

# Справочник по триботехнике

---

В трех томах

# Теоретические ОСНОВЫ

---

1

ТОМ

Под общей редакцией  
д-ра техн. наук, проф. М.Хебды,  
д-ра техн. наук, проф., засл. деят. науки и техники РСФСР  
А.В. Чичинадзе



Москва  
Машиностроение  
1989

Варшава  
ВКЛ  
1989

К читателю (М. Хебда и А. В. Чичинадзе) . . . . .	9	2.2. Функциональные характеристики трибологической системы (А. Вахал, М. Хебда)	51
Предисловие (А. Ю. Ишлинский)	10	2.3. Модели трибологических систем (А. Вахал, М. Хебда)	52
Основные условные обозначения . . . . .	13	2.4. Процессы в трибологической системе (А. Вахал, М. Хебда, Е. Хебда-Дуткевич)	55
<b>Глава 1. Введение . . . . .</b>	<b>15</b>	2.4.1. Адгезия . . . . .	58
1.1. Возникновение и развитие трибологии и триботехники (А. Вахал, М. Хебда) . . . . .	15	2.4.2. Адсорбция . . . . .	59
1.2. Значение трибологии и триботехники (И. В. Крагельский) . . . . .	21	2.4.3. Диффузия и термодиффузия . . . . .	67
1.3. Перспективы развития трибологии и триботехники (А. В. Чичинадзе) . . . . .	23	2.4.4. Рассеяние механической энергии . . . . .	72
1.4. Основы классического подхода к трибологическим системам (А. Вахал, М. Хебда)	26	2.4.5. Электростатика, электродинамика, электромагнитные и другие поля . . . . .	75
1.4.1. Ковалентные (гомополярные) связи . . . . .	30	2.5. Влияние микросреды на трибологическую систему (А. Вахал, В. Покоровски, М. Хебда) . . . . .	78
1.4.2. Ионная связь . . . . .	31	2.5.1. Процессы физического старения деталей трибологической системы . . . . .	78
1.4.3. Водородная связь . . . . .	32	2.5.2. Коррозия . . . . .	79
1.4.4. Металлические связи	32	2.6. Влияние макросреды на трибологическую систему (А. Вахал, М. Хебда) . . . . .	80
1.4.5. Межмолекулярные силы . . . . .	33	2.6.1. Влияние нагружения на интенсивность изнашивания зоны трибологического контакта . . . . .	80
1.4.6. Виды молекулярных сил . . . . .	34	2.6.2. Влияние относительной скорости в зоне трибологического контакта на интенсивность изнашивания . . . . .	81
1.4.7. Трение как результат преодоления сил адгезии и когезии . . . . .	41	2.6.3. Влияние температуры зон трения металлов на интенсивность процессов изнашивания . . . . .	82
1.5. Понятие о трибологических системах (А. Вахал, М. Хебда) . . . . .	42	2.6.4. Влияние смазывания зоны трибологического контакта на интенсивность изнашивания . . . . .	82
Список литературы . . . . .	45	2.7. Свойства поверхностных слоев деталей машин при трении и изнашивании (А. Вахал,	
<b>Глава 2. Модели трибологических систем . . . . .</b>	<b>46</b>		
2.1. Строение и структура трибологических систем (А. Вахал, М. Хебда) . . . . .	46		
2.1.1. «Вход» в трибологической системе . . . . .	50		
2.1.2. «Выход» в трибологической системе . . . . .	50		
2.1.3. Потери в трибологической системе . . . . .	51		

<i>М. Хебда, Е. Хебда-Дуткевич</i>	83	3.5.5. Трение в резьбовых соединениях . . . . .	131
2.7.1. Остаточное напряжение в ПС . . . . .	83	3.6. Влияние нагрузки, скорости скольжения и температуры на коэффициент трения. Градиент механических свойств ( <i>И. В. Крагельский</i> ) . . . . .	135
2.7.2. Упрочнение материала ПС . . . . .	85	3.7. Фрикционные автоколебания ( <i>И. В. Крагельский</i> ) . . . . .	139
2.7.3. Структурные превращения материала ПС . . . . .	87	3.8. Влияние вынужденных колебаний на силу трения. Реверсивное трение ( <i>И. В. Крагельский</i> ) . . . . .	142
2.7.4. Размеры кристаллитов в ПС . . . . .	89	Список литературы . . . . .	144
2.7.5. Текстурирование подповерхностных зон ПС . . . . .	90		
2.7.6. Дефекты материала ПС . . . . .	91	<i>Глава 4. Системы и способы смазки в трибологических задачах . . . . .</i>	145
Список литературы . . . . .	92		
<i>Глава 3. Процессы физико-химической механики в элементах трибологической системы при фрикционном взаимодействии твердых тел . . . . .</i>	94	4.1. Общие принципы проектирования и конструирования систем смазывания ( <i>А. Вахал, М. Хебда</i> ) . . . . .	145
3.1. Строение поверхностных слоев твердых тел ( <i>Н. М. Михин</i> ) . . . . .	94	4.1.1. Индивидуальное смазывание . . . . .	145
3.2. Физико-механические характеристики поверхностных слоев ( <i>Н. М. Михин</i> ) . . . . .	97	4.1.2. Центральное смазывание . . . . .	151
3.3. Макро- и микрогеометрия поверхностей твердых тел и их характеристики ( <i>Н. М. Михин</i> ) . . . . .	98	4.1.3. Применение систем смазывания . . . . .	154
3.4. Контакт волнистых и шероховатых тел ( <i>Н. М. Михин</i> ) . . . . .	106	4.2. Смазывание деталей трибологической системы ( <i>А. Вахал, М. Хебда</i> ) . . . . .	159
3.4.1. Фактическая площадь касания и сближения между поверхностями контактирующих тел . . . . .	106	4.3. Доминирующий вид смазки в трибологической системе ( <i>А. Вахал, М. Хебда — 4.3.1—4.3.3; Р. М. Матвеевский — 4.3.4</i> ) . . . . .	167
3.4.2. Определение фактической площади касания и сближения между поверхностями контактирующих тел в зависимости от контурного давления . . . . .	108	4.3.1. Основы жидкостного трения и гидродинамическая смазка . . . . .	169
3.4.3. Фактическая площадь касания при относительном скольжении твердых тел . . . . .	114	4.3.2. Гидростатическая смазка . . . . .	178
3.5. Трение несмазанных поверхностей и при граничной смазке ( <i>Н. М. Михин</i> ) . . . . .	116	4.3.3. Эластогидродинамическая смазка . . . . .	183
3.5.1. Основные законы внешнего трения . . . . .	116	4.3.4. Граничная смазка . . . . .	193
3.5.2. Механическая составляющая силы трения . . . . .	118	4.4. Смешанное трение и смазка в нестационарных процессах трения ( <i>А. Вахал, М. Хебда</i> ) . . . . .	196
3.5.3. Молекулярная составляющая силы трения . . . . .	124	4.4.1. Смешанное трение . . . . .	196
3.5.4. Расчет силы трения покоя применительно к муфтам сцепления и стояночным тормозам . . . . .	128	4.4.2. Теоретический и экспериментальный анализ . . . . .	196
		4.4.3. Влияние изменения нормальной нагрузки, вязкости и количества смазочного материала . . . . .	203
		4.5. Газовая смазка ( <i>А. Вахал, М. Хебда</i> ) . . . . .	206

4.5.1. Газодинамическая смазка . . . . .	206	Глава 6. Самоорганизующиеся процессы при фрикционном взаимодействии в трибологической системе (Д. Н. Гаркунов)	288
4.5.2. Газостатическая смазка . . . . .	210	6.1. Эффект безызносности (избирательный перенос при трении) . . . . .	288
4.6. Уплотнения, применяемые в системах смазывания (В. Покоровски) . . . . .	211	6.2. Основные представления о механизме избирательного переноса. . . . .	290
4.7. Специфические трибологические проблемы для узлов трения роботов и манипуляторов (В. Покоровски) . . . . .	218	6.3. Структура сервовитной пленки . . . . .	295
Список литературы . . . . .	219	6.4. Физические основы уменьшения износа и сил трения при избирательном переносе. . . . .	298
<b>Глава 5. Результат взаимодействия элементов трибологических систем . . . . .</b>	<b>220</b>	6.5. Использование избирательного переноса в узлах трения машин . . . . .	301
5.1. Взаимодействие, изменения и разрушение твердых тел в трибологической системе (Н. М. Алексеев) . . . . .	220	6.6. Возможности финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) поверхностей трения для снижения износа и трения в трибологических системах . . . . .	302
5.2. Критические параметры процесса изнашивания (Н. М. Алексеев) . . . . .	232	6.7. Необходимость учета водородного изнашивания. . . . .	304
5.3. Классификация и основные закономерности видов изнашивания (Н. М. Алексеев) . . . . .	235	6.8. Отличие водородного изнашивания от водородного охрупчивания . . . . .	305
5.3.1. Адгезионное, окислительное и коррозионно-механическое изнашивание. . . . .	235	6.9. Методы уменьшения и предупреждения водородного изнашивания и программа исследований . . . . .	319
5.3.2. Эрозионное газо- и гидрообразное изнашивание . . . . .	235	Список литературы . . . . .	322
5.4. Характеристики изнашивания (А. В. Блюмен) . . . . .	236	<b>Глава 7. Моделирование трибологических процессов. . . . .</b>	<b>324</b>
5.5. Классы износостойкости (А. В. Блюмен) . . . . .	239	7.1. Теория моделирования и возможности ее применения в трибологии (Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе) . . . . .	324
5.6. Физико-механические модели износа при усталостной и энергетической теориях (А. В. Блюмен) . . . . .	243	7.1.1. Физическое моделирование . . . . .	324
5.7. Основные расчетные соотношения и номограммы для расчета интенсивности изнашивания (А. В. Блюмен) . . . . .	244	7.1.2. Математическое моделирование . . . . .	332
5.8. Основные узлы трения и детали машин, методы их расчета на износ (М. Н. Добычин)	267	7.1.3. Имитационное моделирование . . . . .	333
5.8.1. Подшипники скольжения . . . . .	268	7.1.4. Аналоговое моделирование . . . . .	333
5.8.2. Осевые опоры скольжения . . . . .	282	7.2. Моделирование стационарных процессов трения и изнашивания (Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов) . . . . .	334
5.8.3. Уплотнения . . . . .	283	7.2.1. Моделирование стационарных процессов трения без смазки. . . . .	334
5.8.4. Поршневые кольца . . . . .	284		
5.8.5. Направляющие . . . . .	286		
Список литературы . . . . .	287		

7.2.2. Моделирование стационарных процессов при граничном трении . . . . .	335	биологических систем (Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе) . . . . .	370
7.3. Моделирование нестационарных процессов трения и изнашивания (Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов) . . . . .	342	7.9. Расчет износа деталей машин на базе модельных испытаний образцов пар трения (А. В. Чичинадзе, Г. А. Ревков) . . . . .	376
7.3.1. Моделирование нестационарных процессов при трении без смазки . . . . .	342	7.9.1. Основы и этапы инженерного расчета износа сопряжений . . . . .	376
7.3.2. Моделирование нестационарных процессов при граничном трении . . . . .	350	7.9.2. Классификация сопряжений по условиям изнашивания . . . . .	378
7.4. Моделирование процессов трения и изнашивания при гидродинамической и эластогидродинамической смазке (Ю. А. Евдокимов) . . . . .	351	7.9.3. Расчет сопряжений на износ с использованием условия касания . . . . .	379
7.5. Моделирование абразивного изнашивания (Э. Д. Браун)	355	7.9.4. Расчет на износ конических поверхностей . . . . .	379
7.6. Моделирование явлений, сопутствующих трению и износу (Э. Д. Браун) . . . . .	360	7.9.5. Расчет износа дисков	380
7.7. Моделирование трибологических процессов в типичных узлах трения скольжения, качения, реверсивного движения (Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов)	363	7.9.6. Расчет износа шаровых поверхностей . . . . .	380
7.8. Рекомендации по применению моделирования для разработки ускоренных методов испытания материалов и три-		7.9.7. Износ сопряжений с переменными условиями контакта . . . . .	381
		Список литературы . . . . .	384
		Глава 8. Краткий трибологический словарь терминов и понятий на русском, польском, английском, французском, немецком и испанском языках (М. А. Броновец, А. Вахал, В. Д. Кожемякина) . . . . .	386
		Список литературы . . . . .	397

СПРАВОЧНИК  
ПО  
ТРИБОТЕХНИКЕ

---

ББК 34.41я2

С74

УДК [620.179.112.001 + 621.81«4017» + 621.896](035)

**От СССР:** д-р техн. наук Н. М. Алексеев, инж. А. В. Блюмен, д-р техн. наук Э. Д. Браун, канд. техн. наук М. А. Броновец, проф. д-р техн. наук Д. Н. Гаркунов, канд. техн. наук М. Н. Добычин, проф. д-р техн. наук Ю. А. Евдокимов, инж. В. Д. Кожемякина, проф. д-р техн. наук И. В. Крагельский, проф. д-р техн. наук Р. М. Матвеевский, проф. д-р техн. наук Н. М. Михин, проф. канд. техн. наук Г. А. Ревков, проф. д-р техн. наук А. В. Чичинадзе.

**От ПНР:** доц. докт.-инж. А. Вахал, докт.-инж. В. Покоровски, проф. д-р техн. наук М. Хебда, докт.-инж. Е. Хебда-Дуткевич

Перевод польской части на русский язык Д. И. Юренкова

**Справочник по триботехнике/Под общ. ред. М. Хебды,**  
С74 А. В. Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. — М.:  
Машиностроение, 1989. — 400 с.: ил.

ISBN 5-217-00616-1

В 1-м томе советско-польского справочника изложены сведения о теоретических и экспериментальных основах трения, изнашивания и смазки. Рассмотрены способы смазывания, индивидуальные и групповые свойства элементов и модели трибологических систем. Приведены методы расчета сил трения и срока службы деталей и материалов. Представлены сведения о самоорганизующихся процессах при фрикционном взаимодействии, о моделировании триботехнических характеристик.

Для инженеров, занимающихся разработкой, изготовлением и эксплуатацией машин и материалов.

С  $\frac{2702000000-116}{038(01)-89} 116-89$

ББК 34.41я2

ISBN 5-217-00616-1(Т.1)  
ISBN 5-217-00688-8

© Издательство «Машиностроение»,  
издательство ВКЛ, 1989



Сегодня, как никогда ранее, требуются надежные машины, оборудование, приборы самого высокого качества.

Развитие науки и техники в последние десятилетия показало, что надежные и долговечные машины, оборудование и приборы могут быть созданы только при удачном решении теоретических и прикладных задач трения, износа и смазки, т. е. задач трибологии и триботехники.

Чтобы облегчить работу по созданию такой техники конструкторам, технологам и исследователям предлагается новый весьма обширный справочник по триботехнике в трех томах.

В первом томе собраны в справочном виде новейшие теоретические и экспериментальные сведения о трении, износе, смазке, свойствах контактирующих поверхностей, расчетах и моделировании процессов на фрикционном контакте. В томе имеется также словарь основных терминов, используемых в трибологии и триботехнике, на русском, польском, английском, немецком, французском и испанском языках.

Второй том — это справочные данные о всевозможных смазочных материалах и технике смазывания. Даны оптимальные условия их использования в различных узлах трения скольжения и качения.

Наконец, третий том обобщает опыт проектирования и триботехнических расчетов с применением ЭВМ антифрикционных, фрикционных устройств. В этом томе также даны рекомендации по рациональным методам испытаний триботехнических материалов и узлов трения. Предметный указатель ко всему справочнику будет дан в конце третьего тома.

Коллектив составителей справочника советско-польский. Это позволило непосредственно использовать новейшие оригинальные достижения в области трибологии и триботехники, полученные в СССР и ПНР, а также обобщить имеющийся мировой опыт.

Надеемся, что это новое издание займет достойное место среди технической литературы, повседневно необходимой в конструкторских бюро, на заводах и в научно-исследовательских институтах.

Мы считаем своим долгом выразить большую благодарность за помощь, оказанную нам при подготовке рукописи и редактировании справочника, д-ру техн. наук Э. Д. Брауну, докт. докт.-инж. А. Вахалу, проф. д-ру техн. наук Р. М. Матвеевскому и проф. д-ру техн. наук Я. Янецкому.

М. ХЕБДА  
А. ЧИЧИНАДЗЕ

В последние годы трибология и триботехника развиваются стремительными темпами во всех развитых странах, что в первую очередь связано с требованиями создания экономичных и долговечных машин, приборов, аппаратов, технологического оборудования и инструментов, а также с экологическими проблемами.

Практическая реализация актуальных задач для транспорта, машиностроения, энергетического оборудования, робототехники и других инженерно-технических задач требует комплексных и взаимосвязанных сведений и рекомендаций по теоретическим основам трения, изнашивания и смазки, по инженерным методам расчета и испытания триботехнических материалов и узлов трения, созданию эффективных конструкционных и смазочных материалов для узлов трения, а также новых принципов их конструирования и изготовления.

В этих условиях очень важное значение для научно-исследовательской и в особенности для инженерной практики имеют справочные пособия и справочники, в которых в концентрированном виде представлены все необходимые современные сведения и рекомендации в области трибологии и триботехники, а также даны научно обоснованные прогнозы на ближайшее будущее.

Как известно, во всем мире сейчас уделяется большое внимание изданию подобных справочников. В нашей стране также были сделаны удачные попытки издания подобных книг. В 1978 и 1979 гг. издательством «Машиностроение» был выпущен в свет справочник «Трение, изнашивание и смазка» (под редакцией д-ра техн. наук, проф. И. В. Крагельского и канд. техн. наук В. В. Алисина) в двух томах. Этим же издательством в 1980 г. выпущен справочник «Полимеры в узлах

трения машин и приборов» (под редакцией д-ра техн. наук, проф. А. В. Чичинадзе). Оба справочника имели большой успех как в нашей стране, так и за рубежом (они переведены на английский язык и изданы в Англии и США). Большая и полезная работа ведется редакционным коллективом под председательством академика К. В. Фролова по изданию в рамках серии «Основы проектирования машин» новых справочников по отдельным вопросам триботехники.

Однако за прошедший период в СССР и за рубежом накоплены и получены новые принципиальные результаты как в области исследования, расчета и оценки трения, износа и смазки, так и в области триботехнического материаловедения, которые не имеют обобщения в виде справочных данных.

Важнейшим итогом работы последних лет в области трибологии является четкая картина процесса трения, охватывающая физические, химические и механические сопутствующие явления. Диалектический подход к анализу предложенной модели и предложенной гипотезы позволил сформулировать и ввести в рассмотрение три последовательных и взаимосвязанных этапа процесса трения, а именно: взаимодействие поверхностей, изменение поверхностных слоев в результате взаимодействия и разрушение поверхности вследствие двух предыдущих этапов. Эта знаменитая триада И. В. Крагельского легла в основу многих последующих динамических, развивающихся моделей при решении отдельных частных задач.

Взаимодействие поверхностей — наиболее важный этап трехстадийного процесса, и в зависимости от его интенсивности протекают последующие этапы. Важным для его оценки являются представления о двойственной природе взаимодействия и о локаль-

ном, дискретном характере контактирования, имеющем место в отдельных пятнах. Двойственная природа взаимодействия требует различать молекулярное взаимодействие двух тел, проявляющееся в образовании между сближенными телами молекулярной связи.

Дискретная природа контактирования приводит к необходимости изучения неоднородности структуры поверхностных слоев твердых тел. Исследования показали, что неоднородность этой структуры является важнейшим показателем характера протекающих процессов. Целесообразно при этом подчеркнуть коренное различие задач по изучению структуры материалов в случаях, когда эта структура связывается с объемными или поверхностными свойствами твердых тел.

Исследование поверхностных свойств твердых тел, изменяющихся под действием сил трения и окружающей среды, — это важнейшая область науки, которая сейчас бурно развивается. Правильно поставленные исследования по изучению свойств поверхности твердых тел позволяют выявить кинетику изменения физико-механических и химических свойств, влияние внешних и конструкционных параметров и, следовательно, дают возможность управлять фрикционным поведением материалов путем соответствующего стимулирования или задержки процессов, протекающих на фрикционном контакте.

Создание новых эффективных триботехнических материалов и подбор пар трения тесно связаны с совершенствованием методов испытаний и измерения выходных характеристик, а также методов оценки работоспособности пар трения. При этом разработка рациональных циклов испытаний является одним из необходимых условий оптимизации и подбора пар трения.

Развитие трибологии и триботехники привело к необходимости разработки моделей оптимизации сложных систем. Успешное решение сложных комплексных задач, которые нельзя свести к одному известному алгоритму, возможно при использовании различного моделирования, в первую очередь на основе системного анализа. Для не-

которых задач все еще имеет большое значение физическое моделирование, позволяющее уточнить природу явлений, их математическое описание и выполнить эксперименты с узлами трения, аналоги которых отсутствуют. Наибольшее соответствие между моделью и оригиналом может быть достигнуто при использовании основных положений адаптивности, причем пря накоплением новых статистических достоверных данных о соответствии модели оригиналу необходимо осуществлять последовательную корректировку параметров модели.

Для задач трения и износа особое значение приобретают методы оценки определяющих процессов и явлений через модельный, а не натуральный эксперимент, описание и результаты которого представляют в критериальной форме. Использование методов моделирования при правильном и объективном подходе к обобщению результатов с оценкой их достоверности и точности позволяет значительно ускорить внедрение новых технических решений и сократить трудовые затраты и расходы дефицитных материалов.

Решение задачи о создании и подборе материалов для узлов трения и осуществление наиболее рациональной конструкции этих узлов возможны лишь на основе глубокого изучения процесса трения и физико-химических процессов, происходящих при трении и изнашивании.

Как хорошо известно, польские трибологи в последнее десятилетие завоевали общее признание в мире. Этому способствовали оригинальные научно-исследовательские работы, а также организационные мероприятия, позволившие объединить усилия различных трибологических центров ПНР для достижения конкретных научно-технических результатов.

Существенные успехи были достигнуты польскими трибологами при организации и проведении Международного конгресса по трибологии «Евротриб-81» в г. Варшаве, полные труды которого опубликованы в восьми томах.

Этот конгресс, а также конгресс «Евротриб-85» в г. Лионе, другие

международные конференции и новые труды показали, что польские трибологи имеют приоритет в ряде задач трибологии и триботехники, таких, как модели трибологических систем, теория смазочных материалов и присадок, разработка систем смазки, эластогидродинамика, фрикционные и сцепные устройства, триботехнические испытания, экологические и народнохозяйственные проблемы и т. д.

Важно, что эти научные задачи решены на современном уровне с конкретными рекомендациями для инженерной практики и для высшей школы, готовящей новые технические кадры.

Все это в достаточной мере учтено при написании нового уникального советско-польского справочника.

Предлагаемый научным работникам и инженерам новый справочник по триботехнике под реакцией д-ра техн. наук, проф. М. Хебды (ПНР) и д-ра

техн. наук, проф. А. В. Чичинадзе (СССР) состоит из трех томов: т. 1 «Теоретические основы»; т. 2 «Смазочные материалы и техника смазки» и т. 3 «Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств, методы триботехнических испытаний».

Авторами этого справочника являются ведущие трибологи СССР и ПНР. Комплексный подход делает справочник интересным для широкого круга читателей: инженеров, конструирующих и эксплуатирующих машины, и научных работников, создающих новые триботехнические материалы и работающих в области изучения природы трения и износа.

*Академик А. Ю. ИШЛИНСКИЙ  
Председатель правления Союза научных и инженерных обществ СССР*

- $L$  — длина;  
 $M$  — масса;  
 $T$  — время;  
 $\theta$  — температура;  
 $C$  — симплекс (отношение одноименных параметров  $p$ );  
 $D$  — определитель;  
 $\alpha, \beta, \gamma$  — показатели степени;  
 $K_r$  — комплекс геометрических размеров;  
 $\pi$  — критерий или обобщенная переменная;  
 $\text{var}$  — переменная;  
 $\text{sup}$  и  $\text{inf}$  — верхняя и нижняя границы;  
 $A_c$  — контурная площадь касания;  
 $A_r$  — площадь фактического контакта;  
 $A_a$  — номинальная площадь контакта;  
 $A_o$  — свободная (не находящаяся в контакте) площадь поверхности элемента пары трения;  
 $a$  — коэффициент температуропроводности;  
 $a_n$  — ударная вязкость материала;  
 $B, b$  — ширина фрикционного контакта;  
 $b_{эф}$  — эффективная глубина проникновения тепла;  
 $c$  — удельная теплоемкость;  
 $d$  — диаметр внутренний;  
 $d_v$  — диаметр вала;  
 $d_p$  — диаметр ролика;  
 $D_o$  — главный определитель системы;  
 $D_n$  — диаметр наружный;  
 $D_a$  — дугостойкость;  
 $\text{grad } \vartheta$  — градиент температуры;  
 $e$  — податливость;  
 $E$  — модуль упругости;  
 $F$  — сила трения;  
 $f$  — коэффициент трения;  
 $f_{кр}$  — критическое значение коэффициента трения;  
 $f_{гр}$  — коэффициент трения при граничной смазке;  
 $f_{ТВ}$  — коэффициент трения несмазанных поверхностей;  
 $G$  — модуль сдвига;  
 $g$  — ускорение силы тяжести;  
 $H$  — высота;  
 $HВ$  — твердость по Бринелю;  
 $HВ$  — твердость по Виккерсу;  
 $HR$  — твердость по Роквеллу;  
 $h$  — высота микронеровностей;  
 $I$  — интенсивность изнашивания;  
 $i_h$  — удельный износ на пятне касания (критерий И. В. Крагельского);  
 $i$  — последний член последовательности;  
 $k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты;  
 $K_{II}$  — пьезокоэффициент;  
 $q$  — поверхностное натяжение;  
 $L$  — путь трения;  
 $l$  — характерный размер;  
 $l_p$  — длина ролика;  
 $m$  — масса; модуль зубчатого колеса;  
 $m_z$  — количество размерных параметров;  
 $M_T$  — момент сил трения;  
 $M_{\text{max}}$  — максимальный момент;  
 $n$  — количество элементов или количество опытов;  
 $P$  — нагрузка;  
 $p_A, p_a$  — удельная нагрузка или давление;  
 $p$  — параметр системы;  
 $R$  — внешний радиус; радиус кривизны;  
 $r$  — радиус неровности;  
 $S$  — характерный размер; шаг;  
 $Q$  — расход жидкости;  
 $t_p$  — время релаксации;  
 $T, t_T, \tau$  — продолжительность трения;

$t_{\text{охл}}$  — продолжительность охлаждения;  
 $t_{\text{маш}}$  — машинное время;  
 $U$  — напряжение;  
 $V$  — объем;  
 $v$  — скорость;  
 $W$  — работа сил трения;  
 $z_{\alpha}$  — коэффициент вероятности;  
 $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  
 $\beta$  — коэффициент объемного расширения;  
 $\gamma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  
 $\delta$  — абсолютная величина зазора;  
 $\Delta_{\text{из}}$  — абсолютная величина износа;  
 $\Delta$  — изменение значения параметра;  
 $\varepsilon$  — относительный износ (безразмерный);  
 $\varepsilon_0$  — погрешность опыта;  
 $\varepsilon_{\text{II}}$  — относительная деформативная характеристика;  
 $T$  — абсолютная температура;  
 $\vartheta$  — температура в зоне контакта;  
 $\vartheta^*$  — средняя температура поверхности трения;  
 $\vartheta_{\text{Д}}$  — температура поверхности трения;  
 $\vartheta_{\text{У}}$  — объемная температура;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  
 $\nu$  — вязкость кинематическая;

$\pi$  — обобщенная переменная;  
 $\gamma, \rho$  — плотность;  
 $\sigma$  — коэффициент теплоотдачи и дисперсия;  
 $\tau_{\text{ср}}$  — сопротивление срезу пленки;  
 $\varphi, \psi$  — коэффициенты;  
 $\omega$  — угловая скорость;  
 $\sigma_{\text{вр}}$  — временное сопротивление разрыву;  
 $\sigma_{\text{Т}}$  — предел текучести;  
 $\eta$  — динамическая вязкость;  
 $\nu_{\text{В}}$  — частота включений;  
 $\varnothing$  — диаметр;  
 $\pi_{\text{НВ}}, \pi_{\text{t}}$  и т. п. — обобщенная переменная твердости, времени и т. п.

### Индексы

$M$  — модель;  
 $N$  — натура (оригинал);  
 $1$  — первый элемент пары трения;  
 $2$  — второй элемент пары трения;  
 $3$  — смазочный материал;  
 $4$  — среда;  
 $v$  — волна;  
 $\text{кор}$  — коррозионный;  
 $\text{оп}$  — опора;  
 $\text{окр}$  — окружающая среда;  
 $\text{п}$  — подшипник;  
 $\text{пр}$  — простой;  
 $\text{поп}$  — поперечный;  
 $\text{прод}$  — продольный;  
 $\text{т}$  — трение;  
 $\text{ОП}$  — обобщенная переменная;  
 $1, 2$  — произведение параметров (или ОП) с индексами 1 и 2.

## 1.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

Трибология — это наука о трении и процессах, сопровождающих трение. Название этой научной дисциплины образовано из греческих слов «трибос» — трение и «логос» — наука. Трибология как научная дисциплина охватывает экспериментально-теоретические исследования физических (механических, электрических, магнитных, тепловых), химических, биологических и других явлений, связанных с трением.

Триботехника — это упорядоченные знания о практическом применении трибологии. Трению сопутствуют процессы трибологического изнашивания, и использование этих знаний на практике является важным разделом триботехники.

Трибология является наукой о внешнем трении твердых тел и внутреннем трении твердых и жидких тел, а триботехника — наукой о практическом применении трибологии при проектировании, изготовлении и эксплуатации трибологических систем. Трибологическая система — это комплекс элементов, включая связи, существующие между этими элементами и их свойствами.

Некоторые трибологические законы человек узнал и научился использовать очень давно. Человек палеолита, добывая огонь, использовал явление преобразования работы трения огнива, т. е. приспособления из кремния, дерева или железа, в теплоту, которая служила ему для разведения огня.

Явления трения использовались также при перемещении тяжелых предметов, их транспортировали на санях, которые тянули люди или животные, преодолевая, таким образом, сопро-

тивление трения скольжения. Оно требовало только 30—40 % силы, необходимой для переноски этих предметов.

На рис. 1.1 изображено транспортирование статуи в Древнем Египте с использованием для этой цели саней. Силы трения скольжения были, однако, слишком велики, и поэтому для уменьшения сопротивления трения скольжения при транспортировании, например, тяжелых деталей каменных фигур под несущие балки подкладывали круглые деревянные катки (рис. 1.2). За счет этого значительно снижалась сила, необходимая для перемещения тяжелых конструктивных элементов древних сооружений, поскольку трение скольжения заменялось трением качения. В некоторых случаях трущиеся элементы смазывались маслом для уменьшения сопротивления трения, потому что внешнее трение твердых тел заменялось внутренним трением жидкости (рис. 1.3).

Накопленный опыт замены трения скольжения трением качения стал фундаментальным для эпохального изобретения, каким стало изобретение колеса. Оно позволило существенно снизить сопротивление трения, потому что трение скольжения было заменено трением качения (рис. 1.4).

Человек продолжал искать способы облегчения условий работы животным и людям, используемым в качестве тяговой силы в колесном транспорте. Начались поиски способов уменьшения трения скольжения оси в простых транспортных средствах: колесницах, тачках и в механических устройствах: мельницах, гончарных кругах и т. д. (рис. 1.5 и 1.6).

Все применявшиеся тогда методы сводились к усовершенствованию конструкции подшипников скольжения и снижению сопротивления трения скольжения. Подшипники скольжения сма-

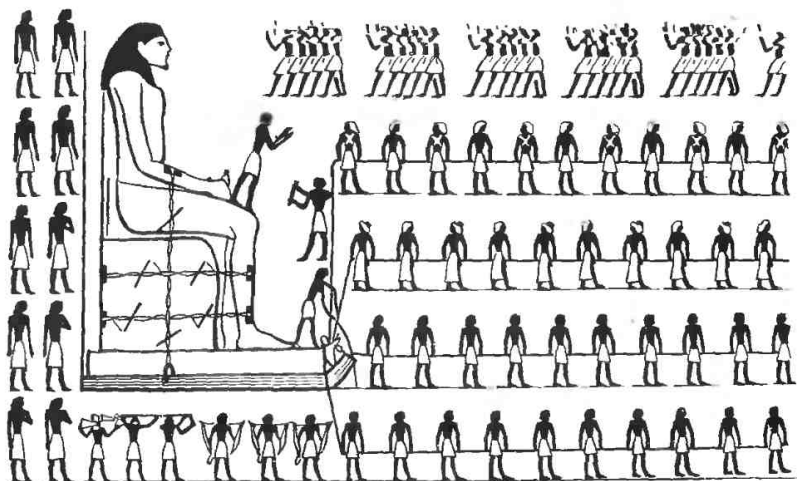


Рис. 1.1. Перемещение статуи в Древнем Египте

зывались. Совершенствовались смаз-  
ывающие свойства масел путем уста-  
новления такой консистенции и адге-  
зии, чтобы смазочный материал дол-  
гое время находился в зоне трения.  
Растительные масла имеют малую вяз-  
кость, и поэтому, стекая, они недолго  
смазывают зоны трения скольжения,  
кроме того, они быстро высыхают.  
В связи с этим их стали сгущать и  
постепенно заменять животными жи-  
рами.

Оси повозок смазывали также раз-  
ного рода мазями из древесной смолы.  
Такие мази получали и из «выкипаен-  
ной» долгим нагреванием нефти. Это  
подтверждается результатами архео-  
логических исследований гробниц дре-  
вних правителей, в которых на осях  
их колесниц найдены остатки смазки  
из животных жиров, сгущенных ми-  
неральными присадками. Температура  
плавления этих веществ около 50 °С.  
В архивах имеется перечень раститель-

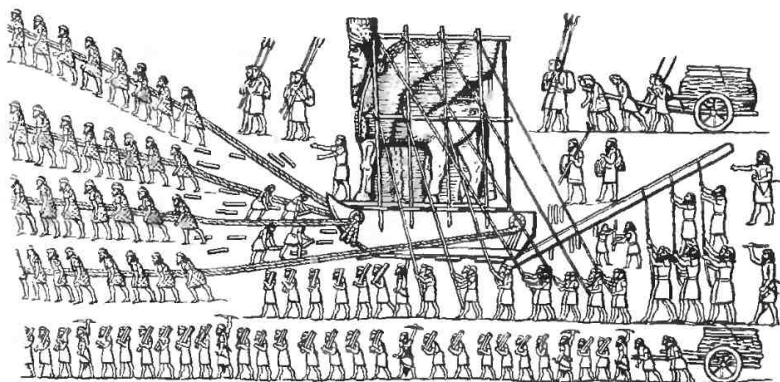


Рис. 1.2. Уменьшение сопротивления трения при перемещении статуи с помощью бревен, подкладываемых под полозья саей



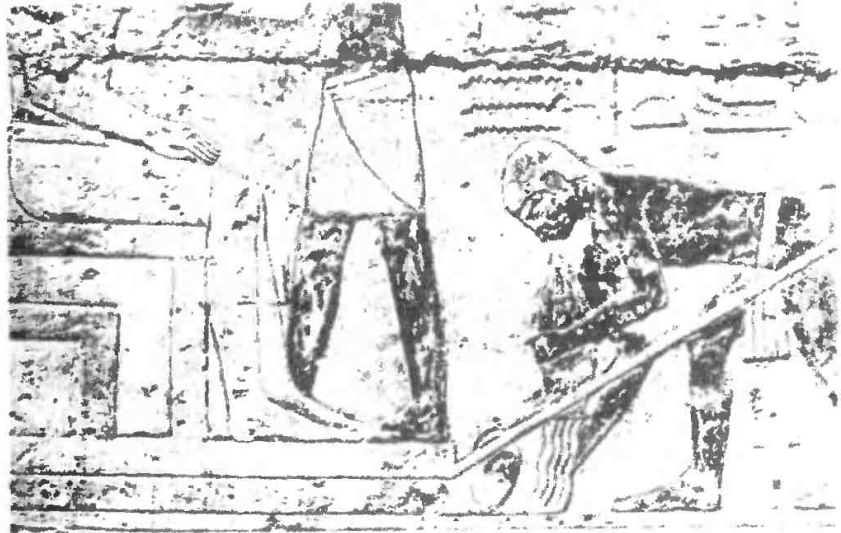


Рис. 1.3. Самый древний рисунок, изображающий использование внутреннего трения масла для уменьшения сопротивления при транспортировании статуи (2400 г. до н. э.)

ных масел и животных жиров, использовавшихся для смазывания, составленный Плинием-старшим (23—73 гг. нашей эры).

Такого рода смазочные вещества использовались повсеместно до изобретения паровой машины в 1801 г. Только в начале нашего столетия довольно широко стали использоваться минеральные масла, а синтетические масла получили распространение лишь в конце 30-х годов.

Сначала смазывание было разовым или периодическим, потом появились масляные ванны для смазывающих колес. Некоторые типы подшипников скольжения представлены на рис. 1.7.

Вместе с практическими решениями, касающимися трения, появились первые научные работы по трибологии. Первые научные рассуждения на тему трения твердых тел обнаружены в записях Леонардо да Винчи, датируемых второй половиной XV в., в них много правильных утверждений, подкрепленных расчетами, например, указано на пропорциональность сопротивления трения нагрузке на трущиеся поверхности тел и на то, что тела с шероховатой поверхностью имеют большее сопротивление трения. Таким образом, закон, согласно которому сила трения прямо пропорциональна нагрузке, т. е.  $F = fN$ , был открыт Леонардо да



Рис. 1.4. Использование колеса, трение скольжения заменено трением качения

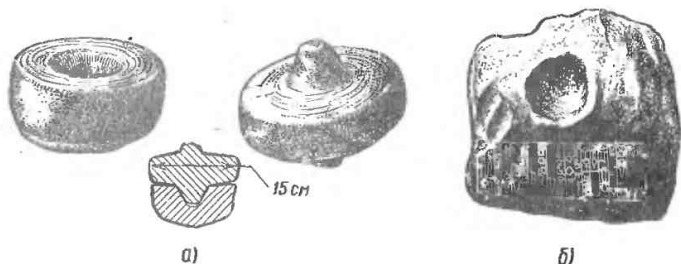


Рис. 1.5. Подшипники, применявшиеся в древности:  
 а — подшипник из Иерихона (2000 г. до н. э.); б — подшипник для установки двери (шумерский период, 2500 г. до н. э.)

Винчи, считавшим, что коэффициент трения  $f$  обычно равен 0,25.

Работы Леонардо да Винчи были забыты, и трением снова стали интересоваться в рамках развития других наук спустя почти два столетия. И. Ньютон сформулировал закон, определяющий зависимость между сопротивлением внутреннего трения жидкости и силой, необходимой для преодоления этого сопротивления. Хотя

И. Ньютон открыл этот закон в 1686 г., он и в наше время остается основным законом ламинарного течения. В XVII—XVIII вв. произошло быстрое развитие техники (улучшенные водяные колеса, паровая машина и т. д.) и науки. Возникшие в разных странах академии наук занимались и наукой о трении. В 1699 г. оригинальные работы по трению в Ежегодниках французской королевской академии наук опубликовал Г. Амонтон. Он снова открыл забытый закон трения Леонардо да Винчи: сила трения пропорциональна нагрузке на трущиеся поверхности, и трение не зависит от размеров трущихся тел, а коэффициент трения  $f$  не изменяется и равен 0,3. Оба закона находят применение до сих пор и в ряде случаев дают хорошие рабочие приближения. В 1734 г. преподаватель физики Оксфордского университета Д. Дезагюлье опубликовал «Курс экспериментальной философии», в котором имеются рассуждения относительно трения и адгезии при трении. Эксперименты, проведенные Д. Дезагюлье, иллюстрируются рис. 1.8.

Рассуждения на тему влияния адгезии на трение появляются и в работах Ш. Кулона, который заметил, что увеличение поверхности контакта приводит к увеличению сопротивления трения.

В 1778 г. он первым предложил двухчленную формулу, согласно которой  $F = A + BN$ , где  $A$  — характеристика сцепленности, не зависящая

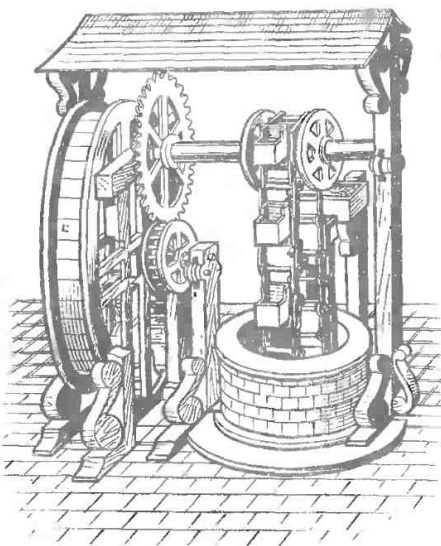
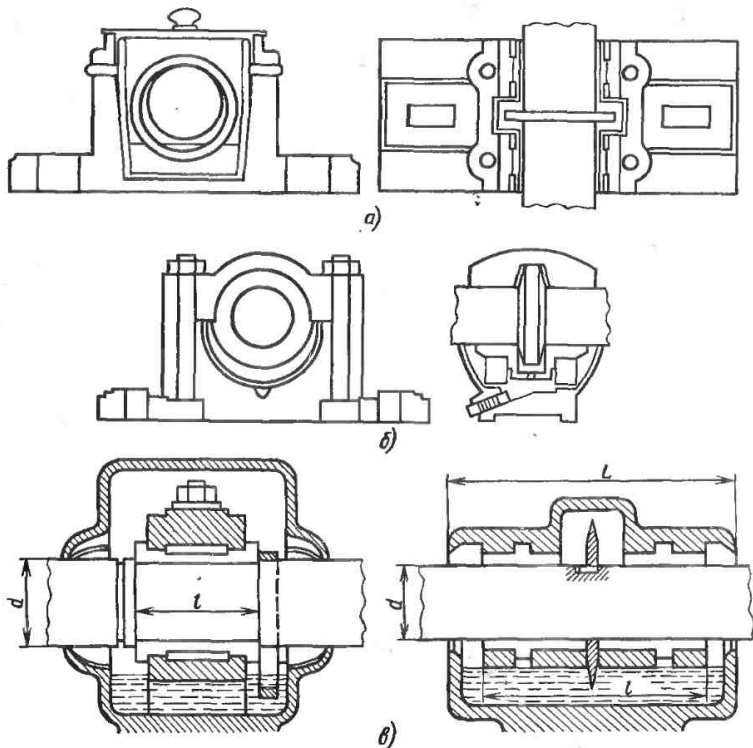


Рис. 1.6. Установка в подшипниках осей колес средневекового подъемного механизма



**Рис. 1.7. Первые подшипники скольжения:**

**а** — с подвижным смазывающим кольцом; **б** — с неподвижным смазывающим кольцом; **в** — с загребающим кольцом

от нагрузки. Это была первая формула, в которой учитывались два вида тангенциального сопротивления — зависящего и не зависящего от внешней нагрузки.

Однако этот закон был забыт, и до начала XX в. в инженерной практике применялся закон Леонардо да Винчи—Амонтона, который иногда неправильно называют законом Кулона.

Ш. Кулон в 1781 г. опубликовал знаменитую «Теорию простых машин». Из этой книги взят рисунок, иллюстрирующий представления автора о сопротивлении, возникающем в результате сцепления поверхностных неровностей (рис. 1.9). Исходя из этих представлений, он сделал вывод о рассеянии энергии при трении.

Во второй половине XIX в. уже немало было написано о трении и смазке. Б. Тауэр случайно открыл явление возникновения динамического давления в результате относительного движения слоев смазки. Рейнольдс на основании опытов Б. Тауэра обнаружил, что действие масла — это гидродинамическое явление, связанное с вязкостью масла. Он разработал теорию гидродинамической смазки («О теории смазки и применении ее к эксперименту г. Б. Тауэра, включая опытное определение вязкости оливкового масла», 1886 г.).

Несколько раньше, независимо от Рейнольдса основы теории гидродинамической смазки разработал Н. П. Петров («Трение в машинах и

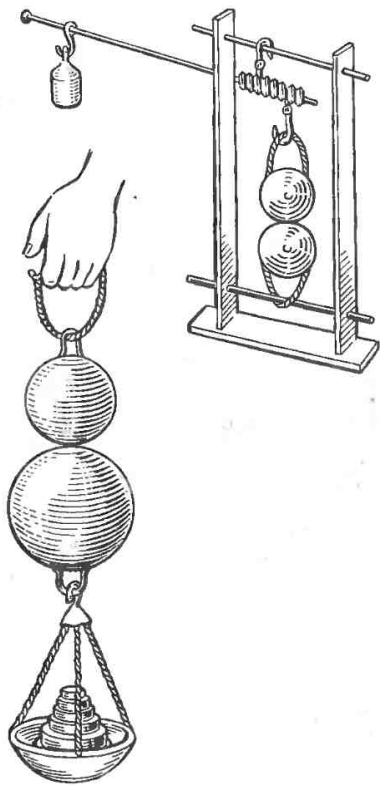


Рис. 1.8. Иллюстрации из работы Деагюлье, касающейся адгезии свинцовых шаров

влияние на него смазывающей жидкости», 1883 г.). На переломе XIX и XX вв. растительные масла и животные жиры постепенно были заменены минеральными маслами, получаемыми из нефти. Различие в сохранении слоя, образованного растительными и минеральными маслами, старался объяснить У. Гарди («Избранные труды», 1936 г.). Он создал экспериментальные основы теории граничной смазки и разработал концепцию структуры граничного слоя. Проблемы граничного трения и трения твердых тел изучал Ф. П. Боуден. Он популяризировал проблемы трения и изнашивания во многих книгах и статьях.

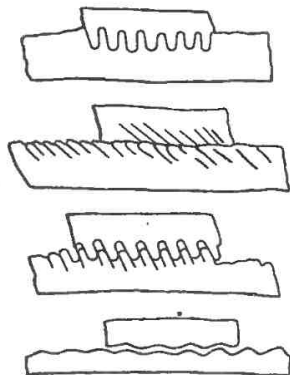


Рис. 1.9. Иллюстрации из книги Кулона «Теория простых машин», изображающие зацепление неровностей

Огромное значение для развития этого направления науки имеют работы И. В. Крагельского, переведенные на многие языки [1.1, 1.2].

В первой половине XX в. появляются профессиональные объединения, например Американское общество инженеров-смазчиков (*American Society of Lubrication Engineers*, 1944 г.). В 1960 г. под председательством акад. А. Ю. Ишлинского был создан Научный совет по трению и смазкам АН СССР, организующий исследования, научные конференции и публикующий материалы по этим вопросам. Во многих странах большие коллективы научных работников начинают работать над проблемами трения и изнашивания.

Термин «трибология» впервые был употреблен группой британских экспертов в рапорте парламенту о состоянии проблем смазки.

В 1964 г. министр образования и науки лорд Ф. Боуден признал необходимым проанализировать состояние техники, образования и исследований в области смазки машин в Великобритании. Была создана рабочая группа специалистов под руководством проф. Н. П. Джоста. Результаты ее работ были оглашены в марте 1966 г. в виде отчета, в котором впервые в истории оценено значение смазки в народном хозяйстве.

По оценкам этого отчета путем улучшения смазочного хозяйства Великобритании могла снизиться потеря и получить прибыль в полмиллиарда фунтов стерлингов в год. Было отмечено, что причиной столь значительных потерь являлся низкий уровень теоретических и практических знаний и отсутствие специалистов в области трибологии. Было предложено организовать изучение трибологии на всех уровнях. Рабочая группа рекомендовала кроме решения вопросов обучения создать специальные институты, занимающиеся трибологическими исследованиями, изменить статус техников и инженеров-смазчиков, повысить оплату, ввести более высокие квалификационные группы и звание триболога. Это объясняется тем, что «смазчик» как звание социально обесценилось и ассоциируется с человеком в промасленной спецовке с масленкой в руках.

В настоящее время трибология признана всеми. Как отдельный предмет она преподается во многих высших и средних учебных заведениях и на курсах повышения квалификации. Созданы специализированные исследовательские центры, во многих институтах трибологические проблемы являются одним из важнейших направлений исследований.

Выпущено большое количество книг по трибологии и триботехнике, выходят специализированные периодические издания. Во многих странах действуют научные трибологические общества (например, в СССР — Координационный совет по триботехнике Союза НИО СССР). Организуются национальные и международные конгрессы, конференции и симпозиумы.

Огромное значение трибологии и триботехники способствует быстрому их развитию, обучению трибологов всех уровней, росту количества публикаций и созданию исследовательских трибологических центров.

## 1.2. ЗНАЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

С трением и его последствиями мы встречаемся очень часто. Трудно вообразить, какие катастрофические

последствия проявились бы при исчезновении трения. Даже в результате частичного его исчезновения, например из-за гололеда, в сотни раз увеличивается количество дорожных происшествий. Без трения невозможна работа многих механических передач, а работа ременных передач, фрикционных вариаторов, тормозов и муфт целиком основана на использовании сил трения. Во всем мире идет борьба за увеличение коэффициента трения колесного транспорта с дорогой, которое повышает тяговую способность и увеличивает эффективность торможения.

Трибологические явления учитываются при проектировании и производстве машин и механизмов. Они проявляются при земляных работах, в сельском хозяйстве, строительстве, добывающей промышленности и многих других случаях.

Для снижения трения в год в мире расходуется более 100 млн. т смазочных материалов. При смазке смазочные материалы подвергаются старению и подлежат замене. Отработавшие смазочные материалы должны подвергаться переработке или утилизации, иначе они будут представлять серьезную опасность для окружающей среды. Обычно последствия трения негативны. Относительные размеры износа, например отношение потери массы машины или изделия к ее первоначальной массе, весьма малы, но износ приводит к выходу из строя всей машины или изделия в целом. Потери средств в машиностроении развитых государств вследствие износа и трения достигают 4—5 % национального дохода. По оценкам специалистов сопротивление трения поглощает во всем мире 30—40 % вырабатываемой в течение года энергии. Энергия при трении не просто теряется, а превращается в теплоту, нагревающую механизмы и узлы машины. Их чрезмерный нагрев во многих случаях приводит к отказам и авариям. Исследования показывают, что примерно 80—90 % отказов машин происходит из-за износа узлов и деталей машин, а также рабочего инструмента. За полный цикл эксплуатации машин (вагонов, тракторов, станочного оборудования и др.) эксплуата-

ционные расходы, трудоемкость ремонта и затраты материалов на ремонт в несколько раз превышают затраты на изготовление новых машин. Ремонт оборудования в развитых странах занят около 30 % общего числа рабочих и примерно такая же часть станочного парка. На ремонт расходуется пятая часть всего выплавляемого металла. Такие значительные расходы обусловлены недооценкой значимости проблем повышения износостойкости и долговечности машин, как ныне эксплуатируемых и проектируемых, так и намеченных к выпуску на ближайшие годы. Основным направлением развития народного хозяйства стран — членов СЭВ на период до 2000 г. является резкое повышение надежности и долговечности машин, технологического оборудования и инструмента, что непосредственно связано с повышением износостойкости. Решение этой актуальной задачи может быть осуществлено только на базе глубоких научно-обоснованных решений.

Управление трением — правильный выбор материалов по трению и износостойкости, рациональное конструирование подвижных сопряжений и оптимизация условий эксплуатации — может существенно продлить срок жизни машин при незначительном увеличении их стоимости.

Поэтому борьба с потерями от трения и износа машин в большинстве развитых стран стала государственной задачей. В результате этого неслучайно на базе ранее несколько разобращенных направлений исследований в области трения, износа и смазки в начале 60-х годов сформировалась новая наука — трибология. Физика, химия, металл- и материаловедение, реология, термодинамика, теория теплопередачи и ряд других наук и технологических дисциплин играют сложные и взаимосвязанные роли в определении общих условий внешнего трения и изнашивания твердых тел. Трибология не может быть сведена только к задачам механики, как это ранее ошибочно предполагали некоторые специалисты. По мнению бывшего редактора международного журнала Wear д-ра Г. Соломона,

«трибология — это образ мышления и искусство: интеллектуальный подход к гибкой кооперации специалистов в различных областях науки и техники. Это искусство применения анализа операций к задачам огромного экономического значения, а именно к надежности, эксплуатации и износу технических устройств от космических кораблей до бытовых приборов». В этой связи исключительное значение приобретают работы в области триботехнического материаловедения (сплавы, полимеры, композиты, порошковые материалы, покрытия, смазочные материалы и т. д.), а также теоретические и экспериментальные исследования в области физико-химической механики процессов трения и изнашивания с использованием новейших испытательных средств и измерительной техники, которые могут позволить раскрыть и изыскать новые способы снижения потерь на трение и повышения износостойкости машин, приборов и оборудования.

К 2000 г. в производстве и эксплуатации машин наряду с количественным ростом будет преобладать тенденция повышения качественных и экономических показателей. Выдвигающееся на первый план повышение долговечности машин, которое лимитируется главным образом долговечностью узлов и элементов трения, равносильно не только пропорциональному повышению производительности, но и высвобождению огромных ресурсов рабочей силы, сырья, материалов, финансовых капиталовложений и капитального строительства.

Задача повышения долговечности узлов трения крайне усложняется, так как тенденция развития науки, техники и технологии производства неумолимо приведет к ужесточению и усложнению режима работы машин, а значит, и узлов трения по нагрузкам, скоростям, температурам, диссипируемым энергиям, вибрации, условиям воздействия различных газовых и жидких сред, воздействию радиоактивных излучений и т. д. Кроме того, конструкторы стремятся к уменьшению габаритов и удельных массовых характеристик узлов трения, что еще больше усложнит задачу.

Имеются и другие не менее важные стороны общей проблемы. Вследствие развития новых направлений техники, а также формирования режимов работы многих машин, приборов и аппаратов возникают новые виды ускоренного износа, не известные ранее, например износ вследствие вредного воздействия водорода при трении.

Проблема трения получает новое значение в связи с серьезными неполадками приборов и механизмов космических аппаратов. Исключительно остро стоит проблема торможения реактивных самолетов, возвращаемых космических аппаратов, скоростного, магистрального, монорельсового и трубокоитейнерного транспорта при использовании линейных и реактивных двигателей с магнитным и газодинамическим подвесом. Чрезвычайно важно повысить срок службы узлов трения и инструментов при глубинном бурении и работе в морских глубинах. Принципиально новым вопросом является повышение износостойкости элементов оборудования ядерной энергетики. Исключительное значение приобретают вопросы трения и изнашивания для узлов трения автоматизированных и программируемых устройств, особенно для роботов и манипуляторов.

Вместе с тем установлен ряд фундаментальных теоретических и экспериментальных закономерностей, позволяющих в ближайшие 10—15 лет успешно решить прикладные задачи в области сухого и граничного трения, абразивного и усталостного изнашивания, гидродинамического, газодинамического и эластогидродинамического трения, которые реализуются в различных узлах машин при скольжении, качении или качении со скольжением.

### 1.3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

Можно выделить следующие основные разделы и направления развития трибологии.

1. Физико-химическая механика контактного взаимодействия с учетом влияния среды твердых тел при ударе, скольжении и качении.

2. Учение о площадях фактического контакта.

3. Исследование сухого и граничного трения скольжения и качения и создание расчетных методов для оценки этих видов трения.

4. Гидродинамика и эластогидродинамика.

5. Исследование изнашивания и разработка методов расчета деталей машин на износ.

6. Теплофизика и тепловая динамика трения и изнашивания.

7. Системный анализ и моделирование трения и изнашивания, а также разработка научных основ трибологии.

8. Научные основы создания износостойких фрикционных и антифрикционных материалов.

Эти научные направления трибологии естественно вытекают из основных положений молекулярно-механической теории трения и усталостной теории изнашивания, по которым при трении происходят три взаимовлияющих процесса (триада И. В. Крагельского) [1.1, 1.2]: взаимодействие поверхностей при трении; изменение свойств поверхностей в результате взаимодействия и влияния окружающей среды; разрушение поверхностей вследствие двух предыдущих процессов, т. е. износ.

Не менее важно, что на значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания твердых тел иногда в равной мере влияют: свойства контактирующих и смазочных материалов; конструкция узла трения; режим работы по нагрузке, скорости и температуре.

Общую главную задачу повышения надежности, долговечности и эффективности узлов машин необходимо разделить на отдельные подзадачи и требования применительно к расчету, конструированию и проектированию узлов трения, методам их ускоренного испытания, разработки и оценки для них новых перспективных конструкционных и смазочных материалов, выбору и обеспечению оптимального режима эксплуатации и т. д.

В связи с этим на передний план выдвигаются следующие научные направления:

1) обеспечение наибольшей долговечности узлов трения или, по крайней мере, равной износостойкости их по сравнению с другими частями машин при работе в различных средах и климатических условиях;

2) повышение работоспособности материалов и узлов трения в широком диапазоне температур;

3) минимизация габаритов конструкций узлов и обеспечение связанного с этим повышения удельных нагрузок на опоры и другие детали, работающие в условиях трения;

4) обеспечение повышения скоростей скольжения и качения без опасности разрушения узлов;

5) обеспечение в одних устройствах минимального сопротивления движению (подшипники), а в других максимального сопротивления (тормоза).

Таким образом, перспективная техника требует обеспечения работоспособности узлов трения на уровне новых рабочих параметров машин, аппаратов и приборов, которые должны будут работать в более широком диапазоне температур, с более высокими скоростями и давлениями, в особых условиях окружающей среды и при постоянном снижении трудоемкости изготовления и материалоемкости изделий.

Для решения этих главных перспективных научных задач необходимо форсировать работы по созданию теоретических основ для разработки и выбора сочетаний триботехнических материалов (материалов трущихся тел и смазочных материалов) по их физико-химическим и механическим свойствам с учетом влияния окружающей среды с целью достижения необходимых параметров узлов трения. Это предполагает комплекс теоретических и экспериментальных исследований:

1) тонких поверхностных слоев (ПС) при трении скольжения и качения, в том числе при использовании эффекта избирательного переноса; 2) явлений задира, схватывания и питтинга при трении скольжения и качения; 3) тепловых явлений и тепловой динамики при всех видах трения и износа; 4) новых присадок к маслам, радикально изменяющих процессы взаимодействия поверхностей при трении;

5) маловязких жидкостей в качестве смазочных материалов; 6) газообразных веществ в качестве смазочных материалов и условий их применения; 7) новых самосмазывающихся, твердых и порошковых смазочных материалов; 8) новых фрикционных и антифрикционных материалов с учетом влияния и изменения окружающей среды (жидкой и газообразной).

В результате должны быть разработаны средства управления процессами трения и изнашивания в разнообразных условиях, сопутствующих созданию и эксплуатации машин будущих поколений.

Практическая реализация всех указанных мероприятий требует комплексного и взаимосвязанного выполнения работ по теоретическим основам трения, изнашивания и смазки, по инженерным методам расчета узлов трения при проектировании и, наконец, по новым принципам конструирования и изготовления узлов трения, элементов пар трения и материалов для них.

Теперь уже во многих отраслях машиностроения надо отходить от принятых ранее расчетов сил и моментов трения, основанных на использовании постоянных значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания, к расчетам, в которых учитывается зависимость этих величин от параметров режима (скорость, нагрузка, работа и мощность трения), условий теплоотдачи, геометрии контактирования, влияния окружающей среды, электрического тока, температуры и др.

Расчеты должны выполняться с учетом геометрии фрикционного контакта при переменной и постоянной во времени мощности трения, с учетом действительного коэффициента распределения теплового потока между трущимися телами и эффективной глубины проникновения теплоты. К этому необходимо также добавить возможность расчета давления на контактных поверхностях и учета изменения сил трения в динамическом режиме. Инженерные расчеты в задачах трения и износа могут быть целесообразными только тогда, когда в них используются физико-механические характеристики материалов, которые соответствуют



реальным режимам работы, особенно реальным температурным условиям. Несмотря на то что трение является своеобразным и в ряде случаев нестабильным граничным условием, обусловленным процессами физико-химической механики на поверхностях трения, в инженерной практике к расчетам на трение и износ предъявляются достаточно высокие требования по точности и надежности, в отдельных случаях значительно более высокие, чем требования к расчетам на прочность в обычных задачах механики, где используются значительно большие значения коэффициентов запаса.

Это, в частности, механико-статистический подход к моделированию кинетики разрушения поверхностей трения; гипотеза формирования равновесной шероховатости; достижения в области классификации видов износа и создание классов износостойкости на базе усталостной и энергетической гипотез износа, позволяющие разработать конкретные инженерные методы расчета срока службы узлов трения машин при сухом и граничном трении; возможность использования в инженерной практике новых достижений в области граничной, эластогидродинамической, гидродинамической и газовой смазок при расчете тяжело нагруженных зубчатых передач, подшипников качения и скольжения, шарниров, цилиндропоршневых пар, скользящих направляющих и т. д. Фундаментальные результаты исследований в области триботехнических процессов при трении полимеров и композитных материалов и их влияние на параметры трения и изнашивания; новые методы ускоренных испытаний материалов и пар трения, основанные на использовании достижений в области математического, физического и аналогового моделирования трения, изнашивания и образования теплоты с расчетом масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре; использование различных триботехнических и технологических способов для существенного повышения надежности и в особенности долговечности узлов трения и деталей машин.

Характерной чертой современного этапа исследований в области трения,

изнашивания и смазки является проявление ведущей роли материаловедческих и технологических направлений. Именно триботехническое материаловедение дает возможность перевести накопленный научный опыт теории трения и изнашивания на уровень практической реализации в народном хозяйстве.

Одной из задач первостепенной важности является повышение качества изделий машиностроения путем применения прогрессивных технологий, улучшения свойств и контроля рабочих характеристик триботехнических материалов и узлов трения.

В этой связи, с одной стороны, целесообразно сосредоточить большое внимание на научно-исследовательских работах по использованию самоорганизующихся процессов и научных основ совместимости трибосистем, разработке новых смазочных и триботехнических материалов, в том числе полимерных и композиционных и технологических методов управления износостойкостью деталей машин и инструментов, которые работают при различных режимах изнашивания, в особенности при абразивном изнашивании. При этом обязательно надо учитывать возможность использования новых материалов и технологических методов в гибких автоматизированных производствах при серийно-массовом изготовлении машин.

С другой стороны, необходимо принять меры по обеспечению научно-исследовательских и промышленных организаций едиными методами и средствами для различных видов трения и изнашивания.

Все сказанное выше позволяет утверждать, что в современных условиях знание основ трибологии и триботехники обязательно для каждого инженера. Инженеру-конструктору оно дает возможность правильно рассчитать и применить конструкцию подвижного сопряжения, подобрать соответствующие материалы трущихся деталей, назначить оптимальный режим работы сопряжения. Инженеру-технологу трибология и триботехника поможет выбрать наиболее эффективные технологические методы изготов-

## 1.1. Виды трения

Критерий деления	Виды трения		
Движение	Покоя, кинетическое	Качения, скольжения, качения со скольжением	Граничные условия при трении
Локализация	Внешнее	Твердых тел	Сухое (или технически сухое), жидкостное, граничное
	Внутреннее	В жидкостях или газах	Жидкостное и граничное
		В твердых телах	При пластических или упругих деформациях

ления, обработки и упрочнения триботехнических материалов (включая смазочные материалы), инженеру-эксплуатационнику — обеспечить надлежащий режим эксплуатации и обслуживания машин.

Таким образом, вопрос подготовки инженерно-технических и научных кадров — специалистов-трибологов в настоящее время является весьма актуальным.

## 1.4. ОСНОВЫ КЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ТРИБОЛОГИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ

С трением мы сталкиваемся, когда перемещаем относительно друг друга какие-нибудь тела (кинетическое трение) либо стараемся привести в движение тела, находящиеся в состоянии покоя (статическое трение).

Трение возникает, когда два тела, перемещающиеся относительно друг друга, соприкасаются своими внешними поверхностями (внешнее трение) или когда элементы структуры тела (атомы, молекулы) перемещаются относительно друг друга (внутреннее

трение). Внутреннее трение может иметь место в жидкостях, газах и твердых телах. Классификация видов трения представлена в табл. 1.1. При трении кроме механических имеют место тепловые, электрические, магнитные и другие явления.

Итак, трением мы называем комплекс явлений в зоне контакта поверхностей двух перемещающихся относительно друг друга тел, в результате чего в этой зоне возникают контактные силы.

Мерой трения является сопротивление трения, уравновешенное равнодействующей силой контакта при перемещении одного тела относительно другого.

Противодействие силам сцепления имеет место при внутреннем трении при взаимном перемещении элементов структуры какого-нибудь тела (газа, жидкости, твердого тела) или при внешнем трении, когда при контакте поверхностных неровностей двух тел эти неровности срезаются, упруго или пластически деформируются. Противодействие силам адгезии двух контактирующих поверхностей тел начинается при попытке их взаимного перемещения (адгезия — это поверх-

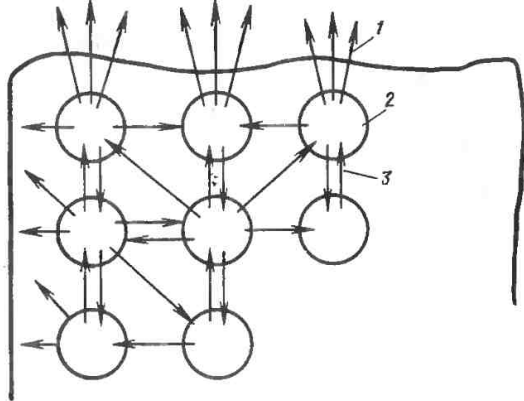


Рис. 1.10. Силы адгезии (1) и когезии (3):  
2 — элементы строения тела (атомы, ионы, молекулы)

ностное ивление, заключающееся в сцеплении поверхностей в результате воздействия, в частности, поля сил).

Поле сил создается зарядом атомов (ионов, молекул), из которых состоит верхний слой контактирующих между собой тел. Это поле экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния от поверхности. Практически поверхностное взаимодействие типа ван-дер-ваальсова исчезает на расстоянии 1—2 нм, поэтому для адгезии необходимо соответствующее сближение поверхностей.

Адгезия и когезия вызываются одними и теми же силами, различие заключается в их локализации. Если силы действуют внутри тела, то вызывают когезию, если действуют на поверхности — адгезию (рис. 1.10). Силы адгезии тем больше, чем больше воздействие электростатических и электродинамических сил в зоне контакта тел. Это тесно связано со структурой тел и, следовательно, их поверхности. Характер сил адгезии — аддитивный, поэтому, чем больше реальная поверхность контакта, тем прочнее адгезионное сцепление.

Всякое воздействие, приводящее к отрыванию элементов тела, встречает сопротивление когезионных сил, а отрывание или взаимное перемещение тел, соприкасающихся между собой, встречает сопротивление адгезионных сил. При взаимном перемещении тел с идеально гладкими поверхностями существовало бы только сопротивление

адгезионных сил. Взаимное перемещение реальных шероховатых поверхностей контакта встречает не только адгезионное сопротивление, но и сопротивление неровностей обеих поверхностей, возникающее в результате упругих и пластических деформаций, срезания неровностей, царапания и т. д. Все эти воздействия уравновешиваются силами сцепления при декогезии материала. Итак, трение является следствием действия сил адгезии и когезии. Кроме деления трения на внешнее и внутреннее практически более важным является деление трения на сухое, граничное и жидкостное. Для снижения внешнего трения трущиеся поверхности разделяются слоем смазывающего вещества, при этом сухое трение тел заменяется жидкостным трением или внутренним трением смазывающего вещества. Если из-за большого давления слой смазки выдавливается из пространства между трущимися поверхностями, то между ними образуется тонкий слой смазочного материала, сохраняющийся там только в результате взаимодействия жидкости с твердыми телами. Этот слой называется **границой пленкой смазки**. Чем сильнее взаимодействие, тем прочнее граничная пленка. Она не допускает возникновения сухого трения. Трение при наличии пленки граничной смазки называется **границым трением**.

Вид трения в макрообласти определяется совокупностью видов трения

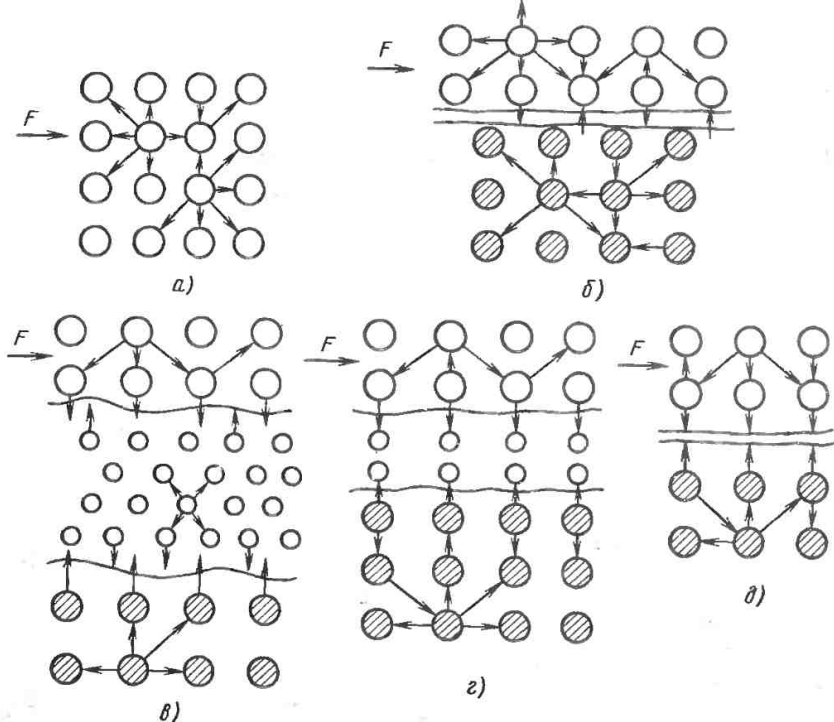


Рис. 1.11. Различные виды трения: а — внутреннее; б — адгезия поверхностей; в — жидкостное; г — граничное; д — сухое

в микрообласти контакта. Вообще трение в макрообласти является смесью разных видов трения, т. е. смешанным трением, характеризующимся нестационарными трибологическими процессами. На рис. 1.11 представлены схемы разных видов трения.

Области контакта можно представить как совокупность элементов структуры (атомов, молекул, ионов) в виде шаров. Между этими элементами действуют силы, которые соединяют их в одно тело. Вид элементов структуры и действующих между ними сил оказывает наибольшее влияние на трибологические процессы, отсюда следует, что понимание трибологических процессов и явлений требует знания структуры принимающих участие в этих процессах тел и действующих сил. Трибологические процессы и явления можно рассматривать на разных уров-

нях: для выяснения некоторых проблем необходим анализ явлений в области ядра и электронов, в иных случаях — атомов, молекул или групп молекул и кристаллов. В триботехнике явления трения и изнашивания обычно анализируются в макрообласти (табл. 1.2).

## 1.2. Области трибологических исследований

Объект исследований	Уровень исследований
Ядра и электроны	Субмолекулярный
Атомы и молекулы	Молекулярный
Группы молекул, кристаллы и т. д.	Микроуровень
Тела, группы тел	Макроуровень

**Силы связности (когезии)**

**Направленные**

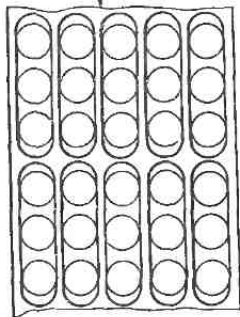
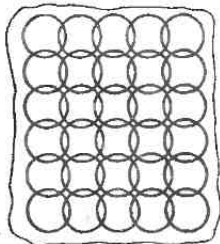
**Электростатические**

**Ковалентная (гомеополярная, атомная связь)**

Твердое тело, соединенное ковалентными связями в одну макромолекулу

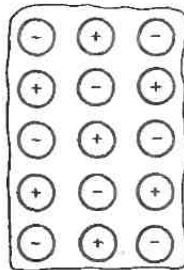
Твердое тело состоит из отдельных молекул, связанных между собой силами межмолекулярного взаимодействия (ван-дер-ваальсовыми):

- а) дисперсионными силами Лондона,
- б) конформационными силами Кеэзона
- в) ориентационными силами Кеэзона
- г) индукционными силами Дебая
- д) водородными связями



**Ионная связь**

Твердое тело представляет собой макромолекулу с ионными связями (электростатическое взаимодействие между ионами)



**Металлическая связь**

Твердое тело является одной большой макромолекулой с металлическими связями (электростатическое взаимодействие между остовами атомов и электронным газом)

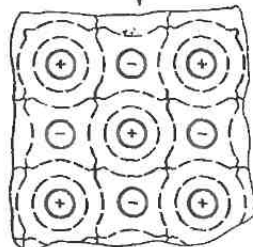


Рис. 1.12. Силы связей тел с различным строением

В природе имеется четыре вида тел, элементы структуры которых соединяют разные силы сцепления (рис. 1.12). Элементами тел могут быть атомы, связанные между собой ковалентными связями, молекулы, связанные межмолекулярными силами (ван-дер-ваальсовыми), ионы, связанные ионными связями, и остовы атомов и электронный газ, связанные металлическими связями. Чем больше энергия сцепления, тем труднее тело раздробить, расплавить или испарить. Энергия связей тела в значительной мере определяет их поведение и износ в трибологических процессах.

### 1.4.1. Ковалентные (гомеополярные) связи

В природе сравнительно немного тел с ковалентными связями. Они имеют большое значение в трибологии из-за очень высокой температуры плавления и твердости (например, алмаз  $C$ , кремний  $Si$  и карбид кремния  $SiC$  — карборунд).

Ковалентная связь, или, иначе говоря, электронная оболочка молекулы может возникнуть тогда, когда образующие ее электронные оболочки атомов энергетически отличаются незначительно. Поэтому в образовании ковалентных связей могут участвовать

электронные оболочки только одного уровня, потому что энергетически они близки.

Возникшая ковалентная связь тем прочнее, чем больше энергии выделится при ее разрушении, т. е. чем ниже будет энергетический уровень новой системы. Минимум энергии системы достигается тогда, когда оболочки обобщенных электронов в максимальной степени совпадают (принцип максимального перекрытия оболочек). Пространственная оболочка является одной из основных черт ковалентной связи. Г и б р и д и з а ц и я — это образование из электронов двух и более состояний одного слоя, но разных оболочек новой оболочки с той же энергией. В качестве примера можно рассмотреть гибридизацию для атома углерода. Он имеет следующую электронную конфигурацию:

Квантовое состояние	1s	2s	2p <sub>x</sub>	2p <sub>y</sub>	2p <sub>z</sub>
Количество электронов	2	2	1	1	0

Поскольку в состоянии 2s два электрона, а в 2p<sub>z</sub> ни одного, чтобы полностью использовать четыре оболочки для образования связей, необходимо перенести один электрон оболочки 2s на свободную оболочку 2p<sub>z</sub>, в результате чего в каждом из четырех состояний второго слоя будет по одному электрону. Гибридизация этих оболочек ( $sp^3$ ) дает четыре оболочки с одинаковой энергией, направленные к углам тетраэдра. Углы между ними равны  $109^\circ$  (рис. 1.13). Этот факт является теоретическим объяснением тетраэдрической формы атома углерода, давно уже обнаруженной эмпирически.

Главной чертой ковалентных связей являются наличие обобщенных электронов и четкая пространственная ориентация. Ковалентными связями могут быть соединены разрывы в молекулах (например, органических соединений) или твердое тело может быть связано ими в одну макромолекулу (алмаз).

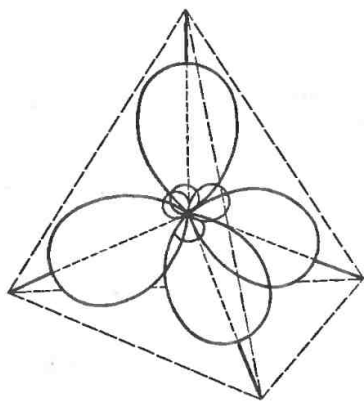


Рис. 1.13. Форма и расположение «облаков зарядов» четырехвалентного атома углерода при тетраэдрической гибридизации  $sp^3$

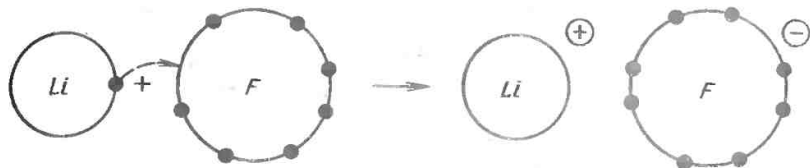


Рис. 1.14. Модель ионной связи

## 1.4.2. Ионная связь

В природе очень много тел, имеющих ионные связи. Однако они играют незначительную роль в трибологических процессах, потому что у них нет свойств, позволяющих использовать их как конструкционный материал. Ионные связи, называемые еще гетерополярными, полярными или электровалентными, являются ненаправленными, в них имеет место электростатическое притяжение между ионами, образовавшимися в результате полного перехода валентных электронов от менее электроотрицательного атома к более электроотрицательному. В результате перехода электрона первый атом становится положительным ионом (катионом), второй отрицательным (анионом); эти ионы в твердом состоянии (кристаллическом) образуют ионную решетку. Возникновение ионных связей обусловлено энергией ионизации химического элемента, отдающего электрон, степенью электронного сродства вещества, принимающего электрон, и энергией образующейся кристаллической решетки.

Энергия ионизации, определяемая как ионизационный потенциал, — это энергия, необходимая для отрыва от отдельного атома слабее всего связанного с ним электрона. Различают энергию ионизации первого, второго и последующих электронов. Энергия ионизации выражается в электрон-вольтах ( $1 \text{ эВ} = 1,6021 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$ ). Значение энергии ионизации зависит, в частности, от радиуса атома. Чем меньше радиус, тем ближе электроны внешнего слоя к ядру и, следовательно, сильнее притягиваются к нему,

поэтому их труднее оторвать. Валентные электроны (электроны верхнего слоя) легче всего оторвать от атомов тех элементов, у которых их немного. Наибольшие значения энергии ионизации имеют элементы, атомы которых обладают восемью валентными электронами ( $s^2 p^6$ ), — инертные газы.

В ионных решетках трудно говорить об отдельных химических молекулах, потому что вся ионная решетка представляет собой как бы макромолекулу, связанную электростатическими силами. Регулярность решетки зависит от геометрических размеров и электрических зарядов образующих ее ионов. Для расчета энергии кристаллической решетки  $U$  необходимо знать расстояние между ионами и тип ионной решетки. Первые расчеты такого рода выполнил Э. Маделунг (рис. 1.14).

Формула Маделунга

$$U = N_L \frac{e_1 e_2}{r} A, \quad (1.1)$$

где  $e_1, e_2$  — заряды электронов;  $r$  — расстояние между ионами;  $N_L$  — число Лашмидта;  $A$  — постоянная Маделунга (сумма потенциалов всех ионов решетки).

Формула Борна

$$U = A \frac{\omega_1 \omega_2 N_L e^2}{R}, \quad (1.2)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  — радиусы ионов;  $r_a$  и  $r_k$  — радиусы аниона и катиона;  $R = r_a + r_k$  — расстояние между анионом и катионом.

Формула Капустинского

$$\left. \begin{aligned} U &= 251,6 \frac{(\sum n) w_1 w_2}{r_k + r_a}; \\ U &= 287,2 \frac{(\sum n) w_1 w_2}{r_k + r_a} \times \\ &\times \left( 1 - \frac{0,345}{r_k + r_a} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

где  $\sum n$  — количество ионов в данном типе соединения.

### 1.4.3. Водородная связь

Водородная связь, называемая протонной связью, или водородным мостиком, является связью специфического вида, которая может быть как внутримолекулярной связью, так и межмолекулярной. Возникновение связи такого вида инициируется ядром водорода или протоном, которое, благодаря своим маленьким размерам, может проникать в глубь электронной оболочки сильно электроотрицательного атома, в результате чего взаимодействие его с попавшим в зону действия электронами довольно силь-

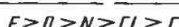
ное и имеет электростатический характер. Деформация протоном электронной оболочки атома, соединенного с ним водородной связью, придает этой связи направленность, т. е. частичную ковалентность. Поэтому водородная связь занимает промежуточное положение между атомной и ионной связью. Водородные связи часто встречаются в органических соединениях и некоторых неорганических. ими определяется ассоциация молекул воды, спиртов, кислот и др. Склонность электроотрицательных элементов к образованию водородных связей представлена на рис. 1.15.

### 1.4.4. Металлические связи

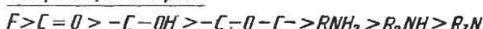
Металлические связи — характерный вид связей для металлов. Все металлическое тело можно считать одной макромолекулой, потому что металлические связи имеют место не только между двумя или несколькими атомами металла.

К характерным свойствам металлов относятся большая тепло- и электропроводность. Это непосредственно связано с их атомной структурой. Атомы металлов имеют мало электронов во

#### Способность к образованию водородных связей



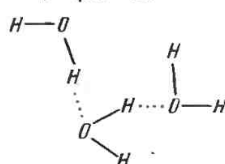
#### Акцепторы водорода



#### Длина и энергия водородных связей

<u>Связь</u>	<u>Длина, нм</u>	<u>Энергия кДж/моль</u>
F...H...F	0,225—0,251	25,95
O...H...O	0,230—0,250	24,69—42,7
N...H...N	0,265	—
C...H...N	—	25,53—32,65
N...H...F	0,253	25,11
C...H...O	—	17,16—25,11
N...H...O	0,288—0,476	25,11—28,46

#### Ассоциация воды



#### Объединение p-бензола с гидрохиноном

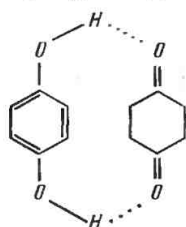


Рис. 1.15. Модель водородной связи



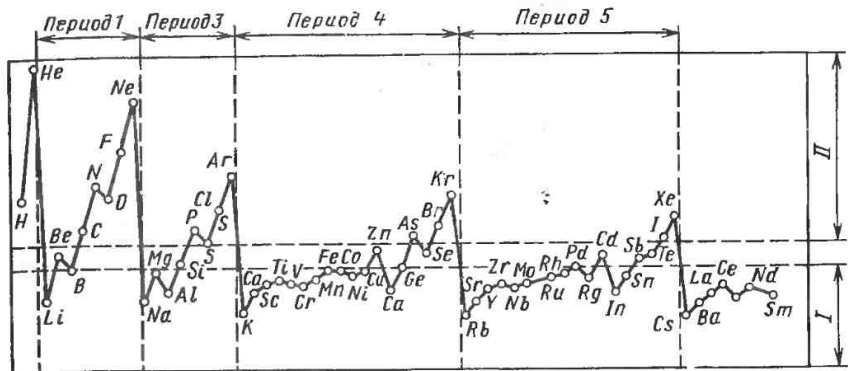


Рис. 1.16. Относительные ионизационные потенциалы  $U$  различных элементов (проводников I и изоляторов II)

внешней оболочке, и электроны эти сравнительно слабо связаны с остальной частью атома (остов атома). Слабая связь внешних электронов приводит к тому, что металлы имеют небольшие ионизационные потенциалы. Эта зависимость представлена на рис. 1.16.

Энергетические свойства отдельного атома металла определяются энергетическими свойствами отдельных уровней. Если металл из газообразного состояния переходит в жидкое, а затем отвердевает, образуя кристаллическую решетку, отдельные атомы металла попадают в зону действия электростатических полей других атомов металла, приближающихся к ним.

Это приводит к тому, что электроны атомов металла, находящиеся во внешней оболочке, постепенно попадают в зону действия электростатического поля других атомов металла, вследствие чего ослабевает воздействие собственного положительного заряда ядра, уже и так ослабленного в результате экранирования ядра электронами более низких уровней, которые отталкивают электроны внешней оболочки.

Понятия зонной теории твердого тела позволяют прийти к выводу, что в металлах электроны имеют большую свободу перемещений; но<sup>0</sup> для них доступны только определенные энергетические состояния, характеризующие физические свойства металлов (на-

пример, электропроводность, теплопроводность и т. д.).

Современная теория металлического состояния имеет физический характер. До сих пор отсутствует соответствующая химическая теория металлических связей. Такая теория должна объяснить изменения свойств металлов в группах периодической системы элементов, далее она должна отражать поведение металлов в сплавах и объяснить существование фаз и межметаллических соединений. Попытки создания такой теории (Паули) успеха не принесли, потому что привели к выводам, противоречащим общепринятым химическим понятиям и результатам физических исследований. Поэтому на настоящем уровне развития науки можно говорить лишь о физических теориях металлического состояния.

#### 1.4.5. Межмолекулярные силы

В повседневной жизни мы имеем дело не с атомами и молекулами, а с телами, состоящими из огромного множества атомов и молекул. Различные типы связей, с помощью которых атомы образуют молекулы, могут также служить для соединения молекул в одну большую макромолекулу.

Кроме уже рассмотренных видов связей между молекулами имеется

### 1.3. Виды молекулярных сил

Молекулярные силы (силы Ван-дер-Ваальса)	Дисперсионные силы Конформационные силы Электростатические силы Индукционные силы Водородные связи (протонные)	Фазовые зависимости движения электронов Вращение и изменение положения атомов Индукционный диполь Постоянный диполь Донор и акцептор водо- рода
---	--	--

специфическое взаимодействие, называемой межмолекулярными силами, или силами Ван-дер-Ваальса. Эти силы действуют между молекулами газообразных и жидких веществ, а также между молекулами в кристаллических решетках. Силы Ван-дер-Ваальса сильнее действуют в кристаллах и жидкостях, слабее — в газах, потому что они тем больше, чем ближе друг к другу находятся молекулы.

В жидкостях из-за сильного притяжения молекул часто имеет место ассоциация, в результате чего стираются границы отдельных молекул. Межмолекулярные связи заключаются во взаимодействии электрических полей расположенных рядом молекул, причем нет переходов электронов от молекулы к молекуле.

#### 1.4.6. Виды межмолекулярных сил

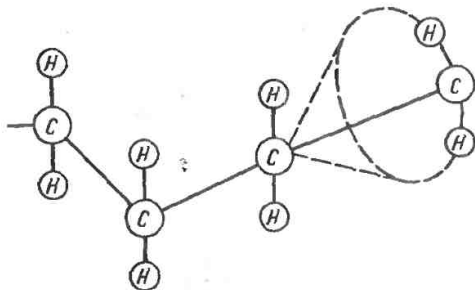
Межмолекулярные силы можно разделить на четыре основные группы: дисперсионные силы (силы Лондона), конформационные силы, ориентационные силы (силы Кеезома) и индукционные силы (силы Дебая) (табл. 1.3).

Пятый вид молекулярных связей — водородная связь, если она возникает между молекулами, а не в границах одной молекулы.

**Дисперсионные силы.** Эти силы являются результатом возникновения элементарных диполей в результате движения электронов вокруг ядра. Они получили свое название по аналогии с явлением оптической дисперсии. Атом электрически нейтрален, если у него уравновешены положитель-

ные и отрицательные заряды и если заряды эти расположены в пространстве симметрично относительно друг друга. Если представим себе два рядом находящихся простейших атома, состоящих из ядра и только одного электрона, взаимодействие между атомами будет разным в зависимости от того, находятся ли электроны на своих орбитах напротив друг друга или на противоположных сторонах орбит. Это различие в распределении электрических зарядов, вытекающее из фаз движения электронов вокруг ядра, приводит к образованию флюктуирующих диполей. Таких элементарных флюктуирующих диполей в атоме столько же, сколько и электронов. Результирующее действие всех элементарных флюктуирующих диполей приводит к возникновению электрического поля, воздействующего на соседние молекулы. Действие этих диполей вызывает возникновение дипольных моментов в соседних молекулах, благодаря чему они взаимно притягиваются. Итак, в результате постоянного движения электронов в атомах электроны эти всегда электрически несимметричны и имеют дипольные моменты, которые со временем в среднем компенсируются до нуля. Дисперсионные силы имеют ограниченную зону действия, потому что возникают только при достаточно большом сближении молекул. Каждая молекула может одновременно действовать на другие молекулы, находящиеся на достаточно малом расстоянии. Притяжение дисперсионными силами обратно пропорционально  $r^6$ , где  $r$  — расстояние между центрами масс ядер атомов соседних молекул. Оно очень сильно

Рис. 1.17. Конформация цепочной молекулы



уменьшается по мере удаления молекул друг от друга.

Дисперсионное взаимодействие называется также трюкинетическим взаимодействием.

**Конформационные силы.** Мгновенный дипольный момент и связанное с ним электростатическое воздействие может быть результатом не только мгновенных изменений во взаимном расположении электронов (дисперсионные силы), но и изменений в положении атомов или их групп, образующих

отдельные звенья молекулы. Их вращение вокруг связи и изменение пространственного положения называется конформацией (рис. 1.17).

Конформация вызывает изменения электростатического поля отдельных звеньев молекулы; межмолекулярное воздействие, возникающее при этом, носит название конформационных сил. Конформация может возникать не только у цепочечных молекул (см. рис. 1.17), но и при кольцевых связях типа л. На рис. 1.18

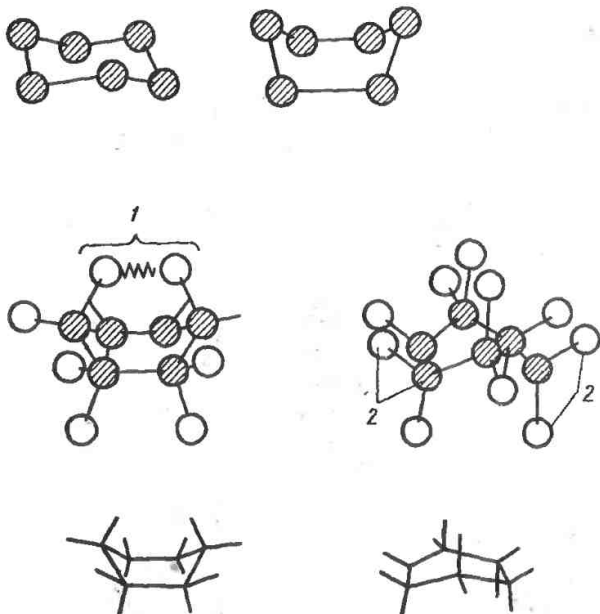


Рис. 1.18. Конформация кольца циклогексана и взаимодействие с атомами водорода: 1 — интерференция атомов водорода; 2 — противоположные атомы водорода

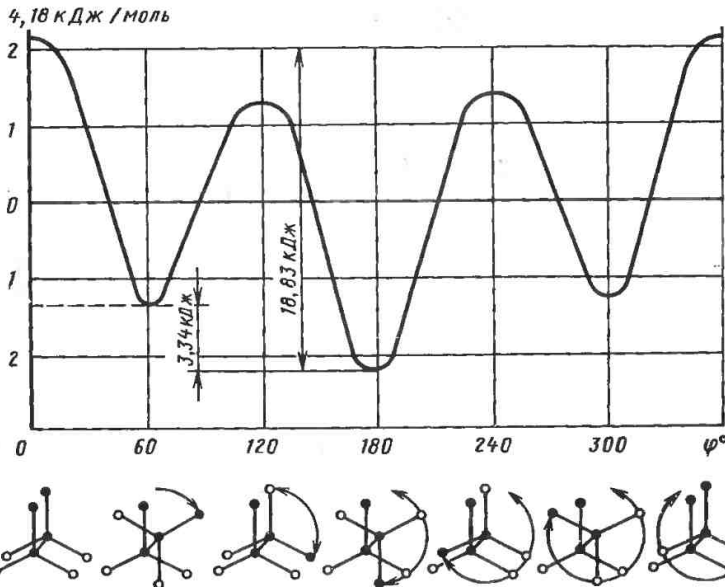


Рис. 1.19. Изменение энергий молекулы *n*-бутана в зависимости от угла поворота

представлена конформация кольца циклогексана. Наличие связей типа  $\pi$  блокирует возможность вращения. С конформацией связаны различия в энергетическом состоянии молекулы (рис. 1.19).

Дисперсионные и конформационные силы — величины аддитивные, поэтому, несмотря на малые значения сил, их сумма в случае больших молекул (например, полимеры) вызывает сильное взаимодействие между ними.

**Ориентационные силы.** Ориентационные силы — это силы электростатического типа, возникающие между молекулами, являющимися постоянными диполями. Постоянным диполем мы называем такую молекулу, в которой положительные и отрицательные электрические заряды расположены несимметрично. Точка, в которой сосредоточен положительный заряд, называется положительным полюсом, точка, в которой сосредоточен отрицательный заряд, — отрицательным полюсом. Прямая, соединяющая оба полюса, называется осью диполя. Про-

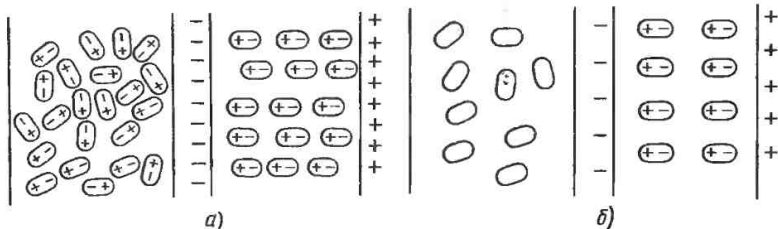
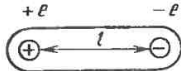
изведение абсолютной величины заряда  $e$  одного из полюсов диполя на расстояние  $l$  между полюсами называется дипольным моментом:

$$\mu_d = el,$$

единица измерения дипольного момента — кулонметр (К·м).

Дипольный момент представляется вектором, направленным вдоль оси диполя от отрицательного полюса к положительному. Дипольный момент молекулы представляет собой векторную сумму дипольных моментов ее составляющих. Результирующий дипольный момент складывается из дипольных моментов атомов, дипольных моментов связей и дипольных моментов групп атомов в зависимости от их расположения в пространстве.

В отличие от рассмотренных выше дисперсионных сил, которые не зависят от температуры, ориентационные силы очень быстро уменьшаются с увеличением температуры, потому что ориентация диполей нарушается в ре-



**Рис. 1.20.** Влияние электрического поля на постоянные диполи и неполярные молекулы: *а* — ориентация постоянных диполей; *б* — индуктивная поляризация неполярных молекул

в результате увеличения подвижности молекул при нагревании.

Действию ориентационных сил, т. е. взаимодействию диполь—диполь может мешать строение полярных молекул. В некоторых случаях полярная молекула имеет такие размеры, что ее неполярная часть мешает приближению какого-либо другого диполя на расстояние эффективного взаимодействия. В этом случае говорят о пространственных помехах дипольному взаимодействию. В электрическом поле постоянные диполи ориентируются вдоль линии силового поля (рис. 1.20).

**Индукционные силы.** Неполярные молекулы не имеют постоянного дипольного момента, попадая под действие электрического поля, они становятся диполями в результате перемещения

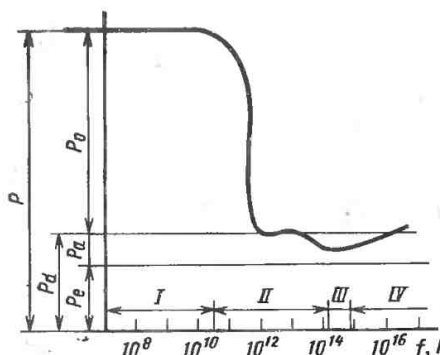
электрических зарядов внутри молекулы. Образовавшиеся вследствие этого диполи называются индукционными. Смещение электрических зарядов молекулы может произойти либо в результате приложения внешнего электрического поля, либо в результате воздействия электрического поля постоянного диполя.

Силы, возникающие при взаимодействии постоянного и индукционного диполей, называются индукционными силами.

Смещение зарядов в неполярной молекуле и образование индукционного диполя называется **поляризацией**. Различают три вида поляризации: электронную, атомную и ориентационную.

**Рис. 1.21.** Зависимость молярной поляризации  $P$  от частоты электромагнитного поля  $f$ :

$P_0$  — ориентационная поляризация;  $P_a$  — атомная поляризация;  $P_e$  — электронная поляризация;  $P_d$  — деформационная поляризация



Силы	Вид взаимодействия	Энергия взаимодействия
Дисперсионные	Элементарный диполь — элементарный диполь	Молекулы одного вида $E_L = - \frac{3I\alpha^2}{4r^6}$ Молекулы разного вида $E_L = - \frac{3}{2} \frac{\alpha_1\alpha_2}{r^6} \frac{I_1I_2}{I_1 + I_2},$ где $I$ — энергия ионизации; $\alpha$ — коэффициент поляризации
Ориентационные	Постоянный диполь — постоянный диполь	$E_k = - \frac{2}{3} \frac{\mu^2}{r^3} \frac{1}{kT},$ где $\mu$ — дипольный момент; $k$ — постоянная Больцмана
Индукционные	Постоянный диполь — индукционный диполь	$E_D = - 2 \frac{\alpha\mu^2}{r^6},$ где $\alpha$ — коэффициент поляризации

Рис. 1.22. Виды и энергия взаимодействия ван-дер-ваальсовых сил

Полная полярная поляризация состоит из электронной, атомной и ориентационной поляризаций. Эти три составляющие тесно связаны с частотой приложенного поля (рис. 1.21).

Электронная поляризация возникает очень быстро, она успевает изменяться, даже если частота изменений поля очень большая (ультрафиолетовая область). Ее можно считать процессом, лишенным инерционности. Значительно более медленным процессом из-за большой массы атомных ядер является атомная поляризация, соответствующая инфракрасной области. Еще более медленным процессом является ориентационная поляризация, соответствующая частоте радиоволн, этот процесс можно отнести к медленным релаксационным процессам.

Виды и формулы для вычисления энергии межмолекулярного взаимодействия приведены на рис. 1.22.

**Силы сцепления.** Все описанные выше виды связей и межмолекулярных взаимодействий могут быть рассмотрены как силы сцепления, или когезионные силы, в результате действия которых из отдельных атомов или молекул образуются тела с разным агрегатным состоянием и разными свойствами. В табл. 1.4 указана энергия разных видов связей. Чем больше энергия связи, тем более когезионным является тело и тем труднее его измельчить, расплавить или привести в газообразное состояние.

Единственным видом неэлектростатической связи является ковалентная (атомная), это направленная связь с очень большой энергией. Остальные виды связей являются ненаправленными.

Наибольшую когезионность имеют твердые тела, в которых силами сцепления являются ковалентные связи.

#### 1.4. Энергия межмолекулярных связей

Вид связи	Энергия, кДж/моль
Ковалентная	418—628
Ионная и металлическая	209—418
Водородная	29,9—33,49
Ван-дер-ваальсовы силы:	4,18—8,37
дисперсионные	0,837—8,37
электростатические (между постоянными диполями)	До 8,37
индукционные	До 2,00

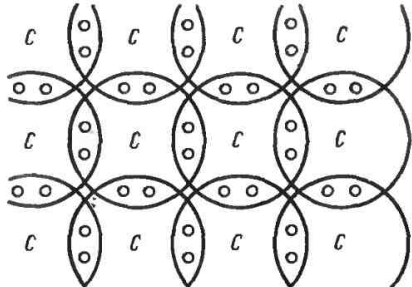


Рис. 1.23. Связь молекул алмаза электронными мостиками

#### 1.5. Зависимость твердости и температуры плавления кристаллов от межатомных расстояний

Кристалл	Расстояние между атомами, нм	Твердость по шкале Мосса	Температура плавления, °С
C—C	0,154	10,0	3500
C—Si	0,189	9,5	2700
Si—Si	0,235	7,0	1420
Ge—Ge	0,243	6,0	958

Например, исключительно ковалентными связями характеризуется алмаз C, кремний Si и карборунд SiC. В структуре алмаза каждый атом углерода пирамидально окружен четырьмя другими атомами, причем эти атомы соединяются между собой общими парами электронов (рис. 1.23).

Атомные связи в кристалле алмаза направлены, от центра к углу правильного тетраэдра. В атомарных кристаллах теряет смысл понятие химической молекулы, потому что нельзя выделить отдельные молекулы и весь кристалл можно считать одной большой молекулой.

Зависимость твердости и температуры плавления атомарных кристал-

лов от межатомных расстояний приведена в табл. 1.5. Как следует из табл. 1.5, с уменьшением межатомных расстояний возрастают твердость и температура плавления кристаллов.

При такой структуре твердость и температура плавления тем выше, чем выше валентность ионов и чем меньше их радиусы (сильнее взаимное притяжение).

Мерой прочности кристаллической решетки является энергия кристаллической решетки, т. е. энергия, необходимая для переноса ионов одного моля кристаллического вещества в бесконечность.

В металлах силами сцепления являются силы металлической связи, энергия которой близка к энергии ионной связи. Каждый кристалл металла можно считать одной большой молекулой. В них наблюдается тенденция к максимально плотной упаковке атомных остовов. Чем плотнее упаковка, тем больше силы сцепления. Эти силы значительно различаются в зависимости от металла, о чем свидетельствуют различия в твердости, температуре плавления (ртуть 39 °С, вольфрам 3370 °С), температуре кипения и температурных коэффициентах расширения и сжатия. Для щелочных металлов зависимость между межатомарным расстоянием и указанными свойствами представлена в табл. 1.6.

Большому расстоянию между атомами или меньшей энергии сцепления соответствуют меньшие значения температурных коэффициентов расшире-

### 1.6. Физические свойства щелочных металлов

Свойство	Li	Na	K	Rb	Cs
Межатомарное расстояние, нм	0,304	0,372	0,462	0,487	0,524
Температура плавления, °C	179	97,7	63,5	30	28,5
Температура кипения, °C	1372	883	776	713	690
Твердость НВ	—	0,07	0,04	0,022	0,015
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$	58	71	84	90	97
Температурный коэффициент сжатия $\beta$ , $10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$	8,6	14,2	23,2	32,8	34,6

ния и сжатия. С силами сцепления связана характерная для металлов способность к пластическим деформациям. Взаимное смещение плоскостей решетки в материале с металлическими связями не разрушает связи и не нарушает свободного движения электронов. Для кристаллов с атомными связями взаимное смещение плоскостей решетки приводит к разрыву направленных связей. В ионных кристаллах такое смещение может привести к столкновению положительных ионов с положительными и отрицательных с отрицательными, в результате чего решетка теряет свою прочность из-за взаимного отталкивания ионов одного знака.

Большое количество твердых тел состоит из молекул, сцепление между которыми осуществляется силами Ван-дер-Ваальса. Большинство органических соединений имеют именно такую структуру. Среди неорганических соединений многочисленны химические элементы и соединения, которые при обычном давлении и комнатной температуре имеют жидкое или газообразное состояние, затвердев, имеют молекулярную решетку (например,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$ , He,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiF}_4$  и т. д.). Вещества с молекулярной структурой в отличие от ионных и атомных кристаллов имеют низкие температуры плавления и кипения, небольшие твердость и плотность, потому что расстояния между молекулами большие.

Межмолекулярные силы увеличиваются по мере увеличения давления

(чем ближе находятся молекулы, тем сильнее они притягиваются). Увеличение температуры дает обратный эффект, потому что вследствие теплового движения возрастает неупорядоченность молекул. При достаточно низкой температуре даже незначительные межмолекулярные силы удерживают молекулы в жидком или твердом состоянии. Увеличение давления приводит к увеличению температуры кипения вещества, потому что молекулы сильнее притягиваются.

В твердых веществах с молекулярными решетками обычно действует несколько видов межмолекулярных сил одновременно, причем их доля в силах сцепления в разных веществах различна. Всегда имеют место дисперсионные силы. В кристаллах затвердевших инертных газов отдельные молекулы между собой соединяют только дисперсионные силы. Дисперсионные и конформационные силы играют главную роль и в кристаллах неполярных углеводородов, и в многомолекулярных соединениях (полиэтилен, каучук). В веществах, в состав которых входят полярные молекулы, значительно большую роль играют ориентационные и индукционные силы.

Значительно меньше силы сцепления в жидкостях. В результате действия сил сцепления соседних молекул образуются привилегированные ориентации, которые, однако, не могут охватить большую область жидкости и не могут существовать долго. Такие при-



визлигированные ориентации молекул (жидкие кристаллы) рассеиваются тепловыми движениями.

### 1.4.7. Трение как результат преодоления сил адгезии и когезии

Сопротивление трения  $F_T$  при взаимном перемещении двух твердых тел складывается из адгезионного  $F_a$  и когезионного  $F_k$  сопротивлений

$$F_T = F_a + F_k. \quad (1.4)$$

Это самый общий трибологический закон. В зависимости от вида и условий трения, а также от структуры тел и связей в них, отдельные компоненты могут возрастать или уменьшаться и даже исчезать совсем. Например, при внутреннем трении жидкости адгезионная составляющая близка к нулю, а при внешнем трении идеально гладких поверхностей когезионный компонент был бы равен нулю. Кроме указанных крайних случаев, когда одно из слагаемых равно нулю, существует множество промежуточных случаев, в которых оба слагаемых имеют большие значения.

Уравнение (1.4) имеет большое смысловое значение, но точный расчет обоих слагаемых затруднен. Существующие формулы позволяют рассчитать основные элементы обоих слагаемых. Последующее изучение трибологических явлений может обеспечить увеличение точности расчетов. Основываясь на этом уравнении можно прогнозировать и объяснять некоторые трибологические явления. Известно, например, что значения коэффициента трения с увеличением гладкости поверхности уменьшается, но при очень высокой степени гладкости начинает резко возрастать. С увеличением гладкости уменьшается значение когезионного компонента, потому что уменьшается количество неровностей, которые деформируются или срезаются, но постепенно начинают возрастать фактическая площадь контакта и коэффициент трения.

Механические теории трения учитывают прежде всего когезионный компонент, т. е. в большей или меньшей

степени принимают во внимание явления, противодействующие когезионным силам (упругие и пластические деформации, срез и т. п.). В молекулярных теориях основное внимание уделяется адгезионным процессам и именно в этом заключается их односторонность. Надо отметить, что название «молекулярная теория» в аспекте адгезионных взаимодействий не является правильным, потому что адгезию двух поверхностей можно рассматривать как макропроцесс, являющийся, однако, совокупностью взаимодействий на молекулярном уровне.

Определенно «молекулярный» непосредственно связано с уровнем изучения. Итак, понятие «молекулярный» может быть отнесено как к когезионному компоненту, так и к адгезионному. При контактировании двух твердых тел, если это контакт металл — металл, сопротивление трения всегда велико. Большие силы сцепления металлической связи приводят к тому, что металлы по сравнению с другими твердыми веществами имеют большую сопротивляемость к упругим и пластическим деформациям, поэтому при наличии поверхностных неровностей когезионный компонент имеет очень большое значение. Уменьшение поверхностных неровностей металла приводит к уменьшению когезионного компонента и увеличению адгезионного.

Поскольку имеются поверхностные заряды (положительно заряженные остовы атомов и отрицательно заряженный электронный газ), адгезионный компонент может достигать очень больших значений. Для технически чистых поверхностей металлов основную роль играет когезия, а адгезия из-за большой шероховатости и сорбционных процессов (образование окислов, адсорбция газов и водяного пара), снижающих энергию поверхности, имеет меньшее значение. Если в трибологическом процессе между собой контактируют твердые тела из пластмасс, то характер явлений будет несколько иным.

Полимеры — это твердые тела, состоящие из молекул, связанных между собой межмолекулярными силами. Большое сцепление и, следовательно, хорошие конструкционные свойства ма-

териала достигаются в результате суммирования (аддитивности) некоторых видов межмолекулярных сил. В случае больших молекул когезия является результатом аддитивности дисперсионных сил Лондона и конформационных сил. Для полимеров, в состав которых входят элементы, придающие молекулам полярность (кислород, хлор, фтор и т. д.), большую роль могут играть индукционные и ориентационные силы.

Полимеры с пространственной решеткой, основные «кирпичики» которых соединены пространственными связями, характеризуются особенно большой вязкостью. Поэтому сопротивление трения при противодействии когезионным силам имеет большое значение, а из-за отсутствия на поверхности электрических зарядов (они могут образовываться в процессе трения) адгезионный компонент имеет небольшое значение. Полимеры имеют низкую теплопроводность, поэтому наблюдается тенденция к накоплению теплоты в зонах трения. Это может вызвать в веществе обратимые изменения, например размягчение, плавление, особенно у термопластических полимеров, и необратимые изменения (механическая деградация полимера, окисление или обугливание). Эти явления могут принципиально изменить условия трения контактирующих поверхностей полимеров. Поверхностное размягчение полимеров приводит к резкому увеличению фактической площади контакта и, следовательно, увеличению адгезионного компонента, а когезия будет уменьшаться из-за уменьшения сопротивления при деформациях. Происходит перенос материала на контактирующие поверхности с более высокой температурой. При трении термопластов наблюдается значительная объемная деформация. Полимеры, будучи диэлектриками, имеют склонность к сильной электризации, что приводит к возрастанию адгезии н, как следствие, общего сопротивления.

В фрикционной паре металл — полимер адгезия имеет небольшое значение из-за поверхностной инертности полимера. Эта инертность снижается с увеличением полярности полимера,

например, с интенсивностью образования электростатических зарядов. Но ощущается большое влияние металла, особенно его электропроводности. Поверхность металла легко разрушается механически (резание, царапание, деформация), что приводит к увеличению когезионного компонента.

Аналогично можно проанализировать процесс трения других видов тел, связанных силами сцепления.

## 1.5. ПОНЯТИЕ О ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Выше рассмотрена структура зон контакта трибологических тел и действие в этих зонах адгезионно-когезионных сил. Для оценки трения необходимо учесть взаимоотношение между контактирующими телами, внешними воздействиями, накопление и рассеяние энергии и последствия трибологических процессов. Процессом называется последовательность изменений свойств системы или ее детали во времени. Изменения могут происходить последовательно по этапам. Они могут приводить к изменению материала деталей системы (химические, ядерные изменения) либо их положения и свойств (физические изменения). Процессы можно разделить на самопроизвольные и вынужденные. Кроме того, различают обратимые и необратимые процессы. Трибологическим процессом называется трение и износ деталей, вызванный трением. Трибологические процессы являются вынужденными. Процессы происходят в системах или в их частях. Система — это деталь или совокупность деталей, физически или мысленно выделенная из их окружения.

Система, состоящая из однофазных деталей, называется однородной. Многофазные системы называются неоднородными. Система, которая не обменивается с однородной средней массой или энергией, называется изолированной. Закрытая система не обменивается с окружающей средой массой, но может обмениваться энергией. Система — это

Главный вход X	Главный выход Y	Основная функция	Пример
Движение + работа	Движение	Перенос движения Передача движения Прекращение движения	Подшипники Муфты Тормоза
	Работа	Механический, гидравлический и пневматический перенос мощности	Зубчатые передачи
	Информация	Создание информации	Циферблаты, кулачковые, следящие механизмы
		Воспроизведение информации	Воспроизведение с лент, дисков
Движение + материалы	Материалы	Транспортирование	Система колесо — рельс, трубопровод
		Формирование	Волочение проводов

внутренне скоординированная и имеющая определенную структуру совокупность взаимно сопряженных деталей, которая при рассмотрении снаружи воспринимается как единое целое. Совокупность деталей является составом системы, а совокупность взаимных соотношений между этими деталями, определяющая их принадлежность к системам, является ее структурой.

При анализе всегда надо определять границы выделенной системы. Для реализации в трибологической системе (ТС) процесса, т. е. последовательности изменений свойств зоны контакта, необходимо воздействие внешних сил. Всякое воздействие на систему снаружи, вызывающее возникновение трибологических процессов, называется внешним воздействием. В ТС спектр внешних воздействий составляют силы или энергия (механическая, электрическая, тепловая). Для некоторых ТС спектр воз-

действия можно описать с большой точностью. Для других ТС это практически невозможно, потому что он изменяется в каждой точке системы и во времени.

Так как трибологические процессы зависят от большого количества параметров, системный анализ позволяет упорядочить и упростить рассуждения. Системный анализ является частью общей теории систем. Первые попытки системного подхода к проблемам трибологии были предприняты в середине 70-х гг. (работы Г. Саломона [1.3, 1.4] и особенно Х. Чихоса [1.5—1.9]).

Работы по систематизации трибологических проблем включены в программу работы международной исследовательской группы *International Research Group (IRG) on Wear of Engineering Materials*. Трибологическая система определена как открытая, динамичная, гранично управляемая. Целью работы ТС может быть преобразование движения, энергии, инфор-

мации или массы. С учетом соотношений между деталями анализ процессов в ТС может быть произведен на нескольких уровнях, между которыми имеется связь.

На фундаментальном уровне описана техническая цель существования ТС. Цель сформулирована трансформацией  $\{X\} \rightarrow \{Y\}$ , где  $\{X\}$ ,  $\{Y\}$  — множества, описывающие соответственно вход и выход ТС. Технические функции ТС дифференцированы (табл. 1.7). Существенное влияние на функциональные свойства ТС оказывают соотношения с другими уровнями анализа процесса функционирования ТС.

Уровень механической работы касается процесса передачи механической энергии через систему. Часть входной энергии накапливается во взаимодействующих деталях (см. рис. 1.23), часть передается на другой уровень (принятый в анализе процесса). Энергетический баланс может быть записан следующим образом:

$$\sum E_x = \sum E_y + \sum E_z + \sum E_s + \sum E_t, \quad (1.5)$$

где  $E_x$  — подводимая энергия;  $E_y$  — получаемая (полезная) энергия;  $E_z$  — потери системы;  $E_s$  — накопленная энергия (деформации);  $E_t$  — теплота, полученная из механической энергии.

Течение потока теплоты через ТС описано на тепловом уровне анализа. При протекании теплоты через систему справедлива следующая зависимость:

$$Q = S_r T_r = S_i T_i, \quad (1.6)$$

где  $S_r$ ,  $S_i$  — энтропия соответственно источника теплоты и детали системы;  $T_r$ ,  $T_i$  — абсолютная температура источника и детали.

Часть теплоты может быть накоплена в деталях системы. Тепловой уровень тесно связан с уровнем механической работы и уровнем материала.

Анализ уровня массы позволяет установить процесс протекания массы через ТС. Прежде всего это связано

с износом деталей. Перенос массы происходит не только между деталями системы и окружающей средой, но и между деталями ТС. Баланс переноса массы между деталями можно описать следующим образом:

$$\sum m_i^a = \sum m_{ij}^a - \sum m_{jk}^a + \sum m_i^{ca} - \sum m_i^{ab}, \quad (1.7)$$

где  $i$  — детали, с которых материал переносится на детали  $j$ ;  $k$  — детали, на которые переносится материал с деталей  $j$ ;  $c$  — все продукты химических реакций, которые становятся частью материала  $a$ ;  $b$  — все химические продукты, в которые переносится материал  $a$ .

Для всей системы баланс массы выглядит следующим образом:

$$\sum m^a = \sum m_x - \sum m_{yz} + \sum m^{ca} - \sum m^{ba}. \quad (1.8)$$

Процессы массообмена также являются источником изменения энтропии в системе. Результаты этого обнаруживаются на тепловом уровне.

Полный анализ трибологических процессов должен учитывать взаимное влияние величин, описывающих каждый уровень. Коэффициент трения не может быть отнесен к какой-нибудь одной детали, он зависит от всех деталей ТС. Аналогично ни к какому элементу ТС нельзя отнести характеристики износостойкости, потому что они зависят от ТС. Значительное число трибологических свойств сильно зависит от системы. Такие свойства называются агрегатными, потому что они появляются только при трибологическом контакте. Частные свойства детали не зависят от системы, в которой деталь находится.

Историческим аспектам становления и развития науки о трении и износе посвящены известные работы И. В. Крагельского и В. С. Щедрова [1.3], Г. Фогельполя и Г. Краузе [1.11], Б. В. Дерягина [1.12], Ф. П. Боудена и Д. Тейбора [1.13].

## Список литературы

- 1.1. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. М.: Гос. науч.-технич. изд-во машиностр. лит., 1962. 220 с.
- 1.2. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
- 1.3. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 234 с.
- 1.4. Salomon G. Application of Systems Thinking to Tribology//ASLE Trans. Vol. 17. N 4. pp. 295—299.
- 1.5. Salomon G. The Structure of Tribological Systems Lubrication Engineering. Vol. 32, 1976. N 9.
- 1.6. Czichos H. Tribology — a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear. Elsevier Publ. Co, Amsterdam, 1978.

1.7. Czichos H. The Principles of System Analysis and their Application to Tribology//ASLE Trans. Vol. 17. 1974. N 4. pp. 300—306.

1.8. Czichos H. A System Analysis Data Sheet for Frictional and Wear Tests and on Outline for Simulative Testing//Wear. Vol. 41. 1977. N 1.

1.9. Czichos H., Molgaard J. Towards a General Theory of Tribological Systems//Wear. Vol. 44. 1977. N 2.

1.10. Czichos H. Current Aspects of Tribology//Wear. Vol. 77. 1982. N 1.

1.11. Vogelpohl G., Krause H. Geschichte der Reibung. Eine vergleichende Betrachtung aus der Sicht der klassischen Mechanik. Düsseldorf: VDI—Verlag, 1981, Nr. 35. 90 S.

1.12. Дерягин Б. В. Что такое трение? Изд-во АН СССР, 1963. 230 с.

1.13. Боуден Ф. П. и Тейбор Д. Трение и смазка. М.: Машгиз, 1930. 151 с.

## 2.1. СТРОЕНИЕ И СТРУКТУРА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для проведения анализа процессов в системе удобно воспользоваться моделью ТС (рис. 2.1).

Модель характеризует: состав системы (детали и свойства деталей системы); внутренние связи системы (связи между деталями системы); внешние связи системы (вход, выход); функциональные характеристики системы (соотношение вход-выход).

Моделирование — это отображение реальной системы. Модель в зависимости от потребностей отображает реальную систему в различном приближении. Главными компонентами модели и ТС являются ее детали. В ТС должны существовать, по крайней мере, две детали. Эти детали могут быть разделены слоем смазочного материала. На контактирующие трибологические детали воздействует окружающая среда. Итак, основными деталями ТС являются детали из твердых тел (зубчатые колеса)  $E_1$ ,  $E_2$ , смазочный материал  $S$  и окружающая среда  $A$  (рис. 2.2). Пары трения могут быть различны: детали машин из металлов, композитов и полимеров или инструменты, обрабатывающие грунт. Смазочным материалом может быть любое вещество, которое снижает коэффициент трения между частями твердых тел. Окружающей средой называется непосредственное окружение трибологических деталей (газы, жидкости и т. п.). Свойства деталей трибологической системы (ТС) оказывают воздействие на ее структуру. Эти свойства зависят от вида тела, принимающего участие в трибологическом процессе. Если это детали машин, сделанные из металла или пластмассы, то деталь характеризуется геометриче-

скими параметрами и физическими свойствами материала. И те, и другие можно рассматривать на макро- и микроуровне с указанием, индивидуальные это свойства или агрегатные.

**Индивидуальные свойства деталей ТС**

*Геометрические параметры:*

а) макропараметры: форма детали, номинальные размеры (длина, ширина, диаметр, радиус кривизны), отклонения формы, отклонения размеров;

б) микропараметры: шероховатость поверхности (распределение неровностей, форма неровностей, радиус закругления вершины неровности, высота неровности), волнистость поверхности (высота волнистости, средний шаг волнистости), направление следов обработки, геометрические дефекты поверхности (царапины, трещины, вмятины и т. п.).

*Свойства материала:*

а) макросвойства: физические и химические (химический состав, плотность, металлофизическая структура, тепловые свойства: удельная теплоемкость, теплота плавления, теплота плавления фаз, теплопроводность, температуропроводность, тепловая расширяемость, свободная энергия поверхности), механические (временное сопротивление на растяжение, предел пластичности, предел упругости, сопротивление срезу, усталостная прочность, ударная вязкость, модуль продольной упругости, модуль поперечной упругости, коэффициент Пуассона, твердость, остаточные напряжения, упрочнение);

б) микросвойства: кристаллическая структура, параметры кристаллической решетки, плотность упаковки, координационное число, энергия связей.

**Агрегатные свойства ТС**

*Геометрические свойства:* номинальная поверхность контакта, фак-

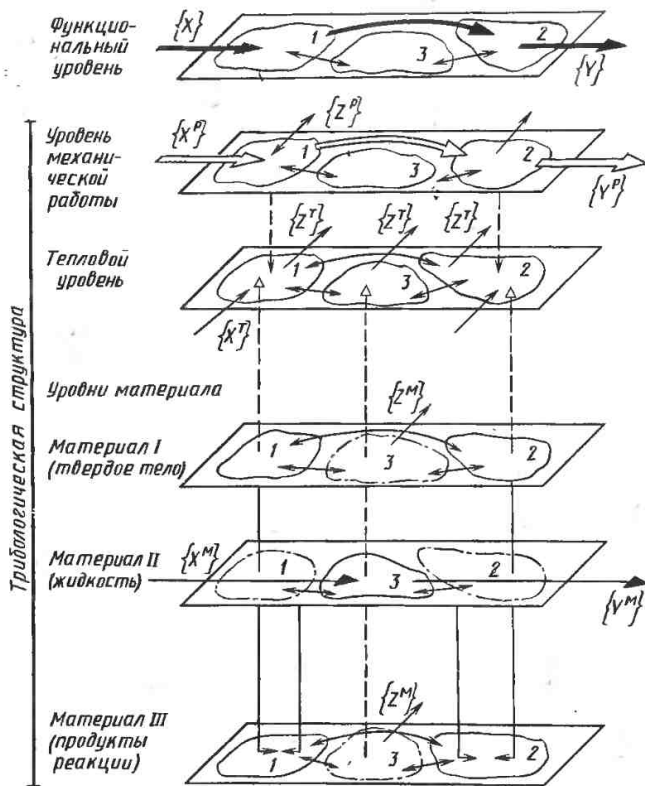


Рис. 2.1. Уровни анализа процессов, происходящих в ТС

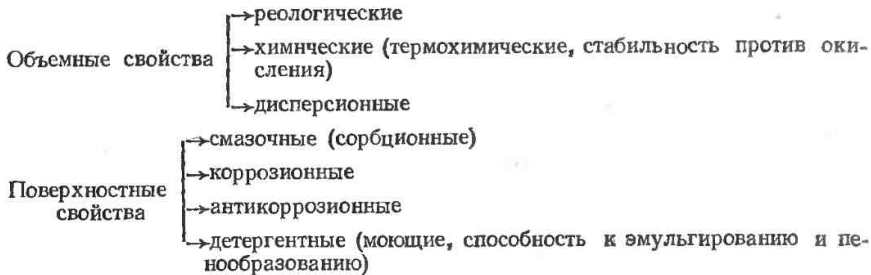
тическая поверхность контакта, эквивалентный радиус кривизны, посадка.

**Свойства материалов:** эквивалентный модуль продольной упругости, прочность адгезионных соединений на сдвиг, прочность адгезионных соединений на разрыв, химическое сродство металлов, взаимная растворимость и свойства твердых растворов, межфазная энергия соединения металлов, диффузность.

**Свойства жидкого смазочного материала (ЖСМ).** Индивидуальные свойства — это такие свойства, которые ЖСМ имеет независимо от системы, в которой она на-

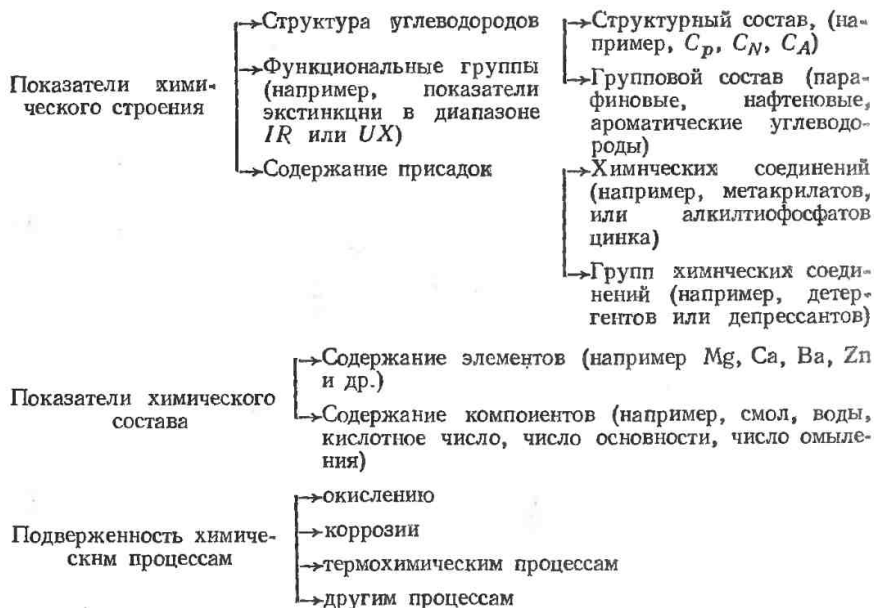
ходится, например вязкость, химический состав и т. п. Агрегатные свойства являются общей характеристикой ЖСМ и деталей, входящих в состав ТС (например, износостойкость зависит от вида ЖСМ и вида материалов пары трения, их адсорбционные свойства или способность к смачиванию зависят и от ЖСМ, и от смазываемой поверхности).

По локализации свойства ЖСМ можно разделить на объемные (характерные для всей массы ЖСМ) и поверхностные, т. е. свойства, проявляющиеся только при контакте с другой фазой. Поверхностные свойства обычно являются агрегатными.



Из совокупности свойств ЖСМ можно выделить химические и физические свойства.

К химическим свойствам относятся: показатели химического строения и состава и подверженность химическим процессам.



Физико-химические свойства можно разделить на индивидуальные и агрегатные. К последним относится подверженность ЖСМ физико-химическим процессам (эмульгирование, пенообразование, адсорбция и т. п.). Индивидуальные свойства можно разделить на группы:

реологические свойства (вязкость, индекс вязкости, пьезокэффициент вязкости, время релаксации);

тепловые свойства (удельная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент теплового расширения, теплота испарения и т. д.);



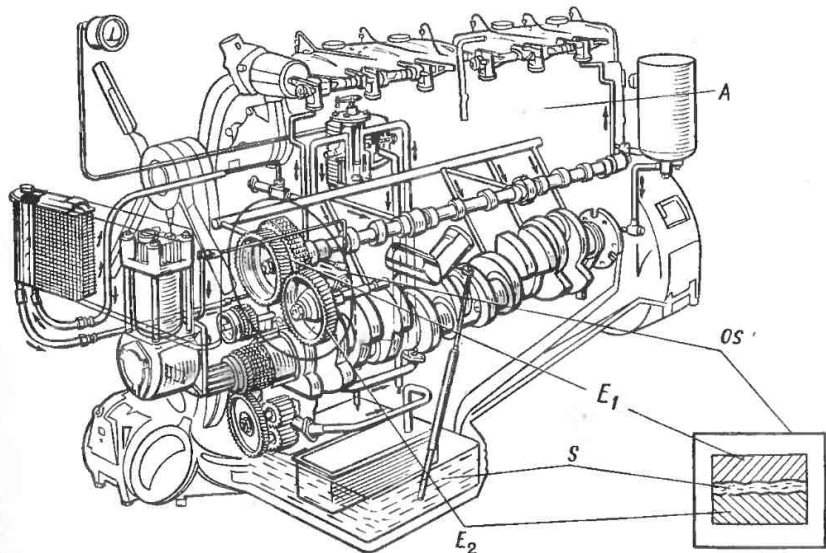


Рис. 2.2. Трибологическая система и трибологическая модель;  
 OS — огнивающая ТС

электрические свойства (удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, коэффициент диэлектрических потерь);

оптические свойства (коэффициенты преломления света, рефракции, абсорбции, дисперсии света и т. д.);

прочие — сюда относятся свойства, для которых трудно найти какое-нибудь общее название (плотность, сжимаемость, температура затвердевания, температура воспламенения, температура кипения, упругость пара и т. д.).

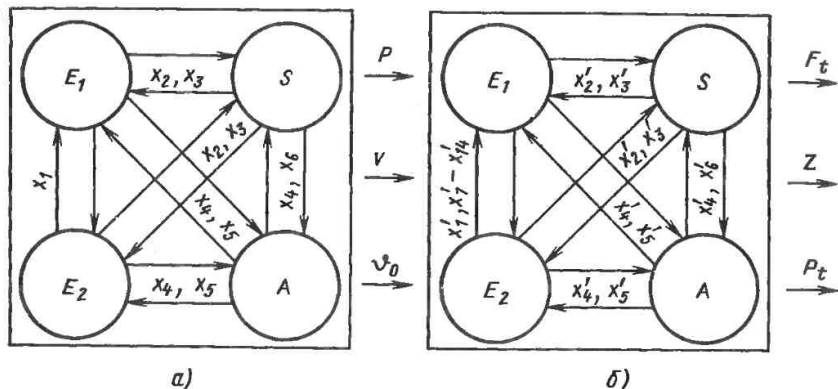
К агрегатным свойствам надо отнести способность к адсорбции и хемосорбции, склонность к пенообразованию, эмульгированию, смачивающую способность, поверхностное натяжение, способность к диффузии и т. д.

**Свойства окружающей среды.** Как уже говорилось, в системном подходе к трибологическим процессам надо отличать окружающую среду от микросреды. Окружающая среда охватывает систему, но не принадлежит к ней, а микросредой является среда, в ко-

торой контактируют детали узла трения, она входит в состав структуры ТС. Так как обычно микросреду образуют различные газы, пары и тонкие пленки смазочного материала, то при анализе свойств микросреды приводят их химический состав, агрессивность, влажность, температуру и давление.

**Взаимодействие деталей ТС.** Компоненты структуры ТС оказывают взаимное влияние. Это взаимодействие будет различным в зависимости от того, находится ли ТС в статическом или динамическом состоянии. В динамическом состоянии внешние воздействия вызывают дополнительные процессы, которые в статическом состоянии отсутствуют, и повышают интенсивность процессов, происходящих в статическом состоянии. Различия во взаимодействии в статическом и динамическом состояниях ТС приведены на рис. 2.3 [2.1, 2.5—2.9].

Статическое состояние:  $x_1$  — адгезия,  $x_2$  — адсорбция,  $x_3$  — хемосорб-



а)

б)

Рис. 2.3. Модель ТС в статическом (а) и динамическом (б) состояниях

ция,  $x_4$  — окисление,  $x_5$  — коррозия,  $x_6$  — диффузия.

Динамическое состояние:  $x_1$  —  $x_6$  — во время трения;  $x_1$  — адгезия,  $x_2$  — адсорбция,  $x_3$  — хемосорбция,  $x_4$  — окисление,  $x_5$  — коррозия,  $x_6$  — диффузия,  $x_7$  — упругие деформации,  $x_8$  — пластические деформации,  $x_9$  — микрорезание,  $x_{10}$  — рифление,  $x_{11}$  — царапание,  $x_{12}$  — отрывание,  $x_{13}$  — разрушение поверхностей трения,  $x_{14}$  — структурные и фазовые превращения.

### 2.1.1. «Вход» в трибологической системе

В ТС вход равнозначен воздействию окружающей среды на систему. Под внешним воздействием ТС обычно понимается [2.1] совокупность полей механических и электрохимических сил, химических реакций и тепловых полей. При этом надо учитывать следующие воздействия: а) кинетическое (скорость скольжения, скорость качения, гидродинамическая скорость); б) динамическое (механическая сила, давление, напряженность электрического поля); в) тепловое (температура, тепловой поток, градиент температур).

Принимая во внимание, что вследствие кинетического и динамического

воздействия в систему вводится механическая энергия, а в результате теплового воздействия — теплота, можно сделать вывод, что внешние воздействия имеют энергетический характер. Кинетические, динамические и тепловые воздействия играют основную роль в трибологических процессах.

Механические воздействия действуют главным образом на детали пары трения и только через них на ЖСМ и микросреду системы. Тепловые воздействия могут вызывать изменения деталей и термохимические изменения ЖСМ. Так как часть работы трения превращается в теплоту, температура в ТС и температура «выхода» выше температуры окружающей среды. Внешние воздействия изменяют не только трибологические процессы, но и структуру ТС.

### 2.1.2. «Выход» в трибологической системе

В ТС выход — это воздействие системы на окружающую среду. Его можно определить также как реакцию системы на внешнее воздействие или как следствие трибологических процессов в системе.

Основные следствия трибологических процессов: сопротивление трения  $F_t$ ,

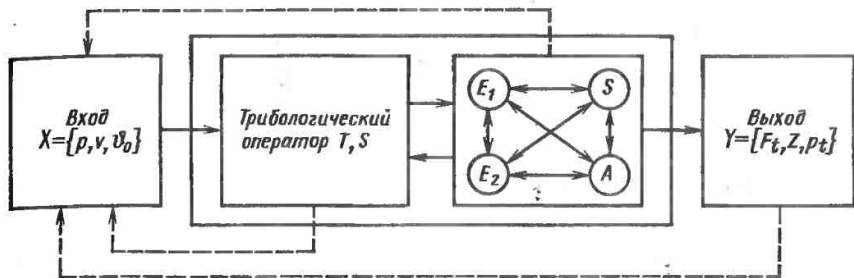


Рис. 2.4. Схема действия ТС

износ и заедание  $Z$  и сопутствующие процессы  $P_t$ , например, генерация максимальной температуры поверхности трения  $\theta_{\max}$  (см. рис. 2.3, б). Крайним случаем заедания является схватывание деталей пары трения.

К выходу в ТС относятся такие сопутствующие процессы, как старение, термохимические, тепловые, электрические, магнитные и др.

### 2.1.3. Потери в трибологической системе

Х. Чихос делит эти потери на три фазы [2.1, 1.5—1.9]. При введении энергии (работы) в зону трибологического контакта образуется фактическая поверхность контакта. Затем происходит диссипация (рассеяние) энергии:

накопление энергии: образование локальных дефектов и дислокаций, накопление энергии в деформированном объеме материала;

эмиссия: фононов (акустические волны, шум), фотонов (триболоминесценция), электронов (экзоэлектроны, эффект Крэмера);

превращение накопленной энергии в теплоту и энтропию.

## 2.2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Функциональные характеристики описывают преобразование входных величин  $X$  в выходные  $Y$  (рис. 2.4):

$$\{X\} \rightarrow \{Y\}. \quad (2.1)$$

Трибологические процессы, возникающие при переходе ТС из статического состояния в динамическое и влияющие на ее структуру, описаны оператором. В результате действия трибологического оператора происходят изменения свойств деталей и смазочного материала и их взаимодействия:  $Y = \{F_t, Z, P_t\}$ . Между выходом и входом ТС существует обратная связь. Например, уменьшение давления в четырехшариковой машине трения при износе шариков; изменение скорости в результате изменения сопротивления трения; увеличение сопротивления трения в результате увеличения вязкости смазочного материала или снижения температуры системы; ухудшение свойств смазочного материала в результате окисления или воздействия высоких температур. Установление связи между внешними воздействиями на ТС и их результатами является основной целью трибологических исследований. Определяется влияние состава и структуры системы на износ и сопротивление трения с учетом свойств сопрягаемых деталей и окружающей среды.

Значительная часть трибологических исследований касается влияния внешних факторов на долговечность и эффективность действия смазочного материала. Результаты трибологических исследований имеют большое значение при конструировании, изготовлении и эксплуатации машин.

Трибологическая система может изменять свои функциональные характеристики во время работы. Отдельные состояния, в которых может нахо-

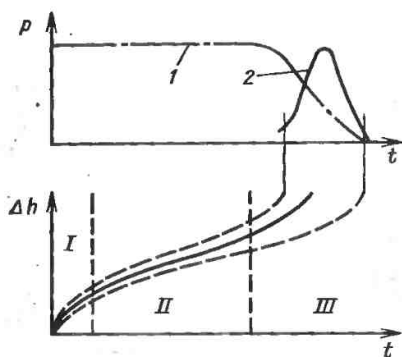


Рис. 2.5. Этапы работы ТС:

$P$  — вероятность;  $I$  — надежность;  $2$  — распределение дефектов;  $\Delta h$  — износ во времени

даться ТС во время эксплуатации, представлены на рис. 2.5.

Состояние  $I$  — период приработки деталей, который с точки зрения интенсивности изнашивания является нестационарным. Система автоматически приспосабливается к оптимальным условиям взаимодействия деталей  $E_1$  и  $E_2$ . Это период саморегулирования. Свойства деталей и взаимодействие между ними изменяются таким образом, что при неизменном внешнем воздействии уменьшается интенсивность изнашивания. В этот период происходят подгонка микрогеометрии поверхностей и благоприятные изменения в металлографической структуре материала деталей. Износ в этот период можно описать степенной функцией. В простейшем случае это квадратный корень от продолжительности процесса  $t$ . Основным состоянием  $II$  является период нормальной эксплуатации, когда процессы изнашивания стационарны во время работы системы. Это состояние длительнее двух других состояний эксплуатации. Чем дольше длится стационарное изнашивание, тем дольше период нормальной эксплуатации. Состояние  $III$  — это период интенсивного изнашивания деталей системы, которое может иметь лавинный характер и привести к аварии. Интенсивное изнашивание является следствием из-

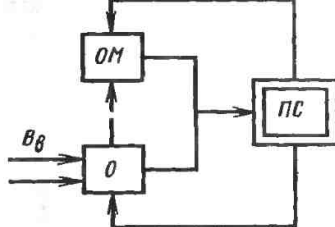


Рис. 2.6. Трибологическая модель детали машины

менений свойств материалов и деталей, находящихся в трибологическом контакте, изменений смазочных материалов (старение), или возникновения вредных побочных процессов.

### 2.3. МОДЕЛИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Трибологические задачи можно решать, пользуясь моделями, в которых выделены компоненты структуры и факторы, имеющие основное значение для рассматриваемой проблемы.

Рассматривая деталь машины как отдельную систему, ее можно представить в виде модели (рис. 2.6). В этой модели принято, что основные процессы происходят на траектории

$$O-O-M-O-M-O, \quad (2.2)$$

где  $OM$  — основной материал;  $ПС$  — поверхностный слой;  $O$  — окружающая среда.

В отдельных случаях можно принять, что допустимо непосредственное воздействие  $O$  на  $OM$ , если воздействие  $O$  на  $ПС$  несущественно. Например, передача нагрузки деталью по всему объему не играет важной роли с точки зрения трибологии, поэтому может не учитываться.

Изнашивание деталей машин происходит, главным образом, в результате действия разных факторов в  $ПС$ . При изнашивании в результате трения сопрягаемые детали можно считать элементарными ТС (рис. 2.7).

Взаимодействие деталей в элементарной системе может осуществляться через микросреду. Взаимодействие сопрягаемых деталей происходит через

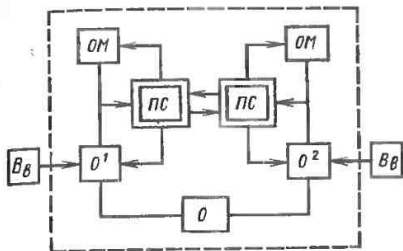


Рис. 2.7. Элементарная трибологическая модель

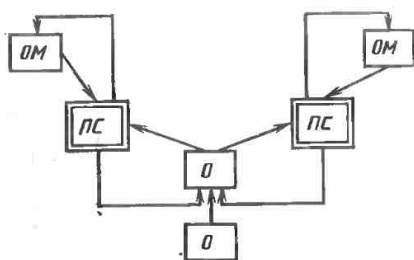


Рис. 2.8. Трибологическая модель без непосредственного взаимодействия PC деталей 1, 2

PC обеих деталей. В частном случае могут существовать системы, в которых  $O^1 = O^2$ , но нет непосредственного взаимодействия PC обеих деталей (рис. 2.8).

Узел трения известен, если известны  $\langle PC^1, OM^1, PC^2, OM^2, O^1, O^2, C \rangle$ , (2.3)

где  $C$  — множество, описывающее связи между деталями узла.

Упорядоченное множество узлов образует ТС. Она определена, если известны ее узлы и множество, описывающее взаимодействие между ними.

Трибологические системы можно разделить на последовательные (рис. 2.9) и параллельные (рис. 2.10). Комбинации таких систем образуют смешанные системы.

Модели ТС можно разделить на простые и сложные. По виду моделей трибологических сопряжений можно выделить трибомеханические, трибоэлектромеханические (например, модель сопряжения щетка-коллектор или механического электровыключателя)

и трибобиологические модели (модели коленных, локтевых, тазобедренных суставов, модели зубов и т. п.).

На рис. 2.11 представлена модель четырехшариковой машины. Она сделана из двух деталей (шариков) в предположении, что статистически одинаковые явления будут происходить в соотношениях  $E_1 \leftrightarrow E_2$ ,  $E_1 \leftrightarrow E_3$ ,  $E_1 \leftrightarrow E_4$ , потому что детали выполнены из одного материала, с одинаково однородной структурой и одинаковым во всех деталях PC. В этой модели приняты следующие обозначения:  $P$  — нагрузка,  $v_{ск}$  — скорость скольжения,  $p$  — среднее значение удельной нагрузки,  $O'$  — окружающая среда, смазочный материал в зоне контакта,  $O'_i$  — окружающая среда, смазочный материал в межфазной области, основной материал,  $\vartheta_V$  — объемная температура,  $\vartheta^*$  — поверхностная температура,  $E$  — деталь модельного сопряжения.

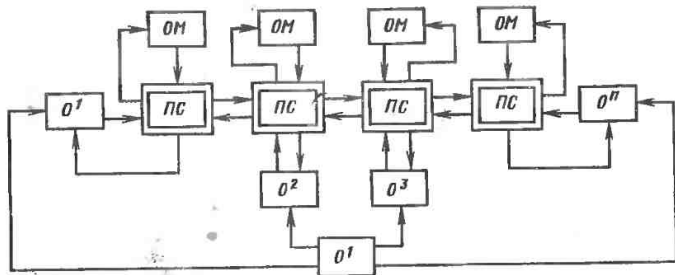


Рис. 2.9. Последовательная ТС

Рис. 2.10. Параллельная ТС

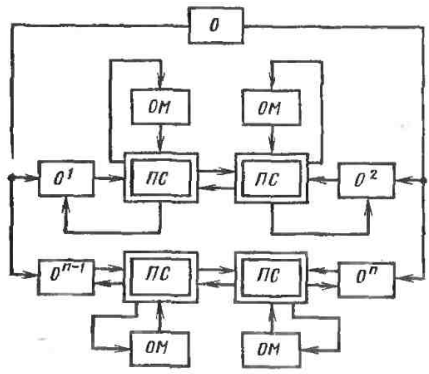
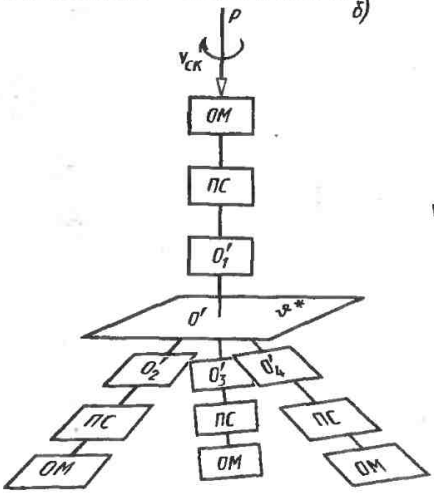
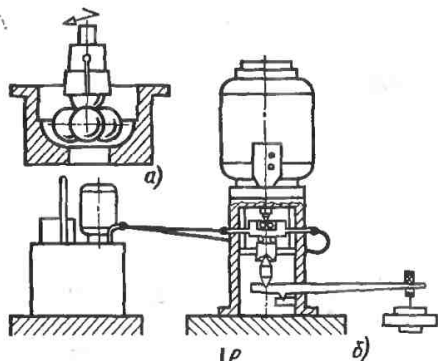
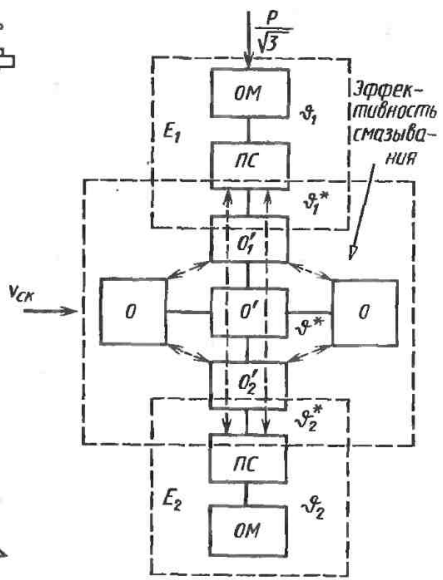


Рис. 2.11. Трибологическая модель четырехшариковой машины:  
 а — схема машины; б — конструкция; в — структурная схема испытаний при малой  $v_{СК}$  и подогреве; г — то же, при большой  $v_{СК}$  и подогреве



в)



г)

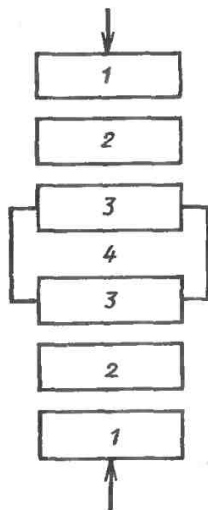


Рис. 2.12. Зубы как биотрибологическая система:

1 — корень; 2 — коронка; 3 — эмаль; 4 — окружающая среда

На рис. 2.12 представлены зубы как биотрибологическая система для измельчения пищи. Основание зуба (шейка и корень) укреплено в зубной впадине и десне, а в полость рта выступает коронка зуба, покрытая эмалью, выполняющей роль ПС зуба.

На рис. 2.13 представлены два сустава, играющие роль подшипника скольжения. Сустав соединяет две

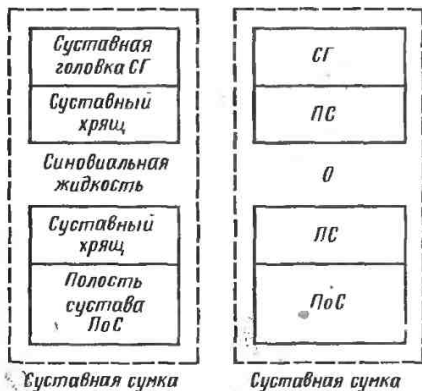


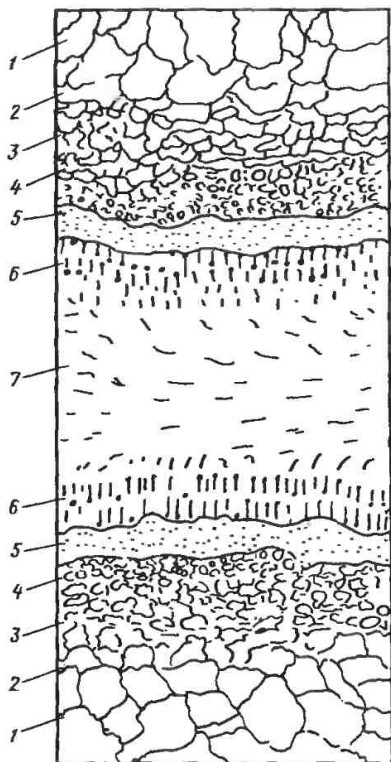
Рис. 2.13. Сустав как биотрибологическая система

кости и более. Одна из костей имеет на конце выпуклую суставную головку в виде шарового сектора, цилиндра или более сложной формы, другая соответствующее углубление (полость сустава). Головка и углубление покрыты стекловидным составным хрящом. Хрящи смачиваются синовиальной жидкостью, в результате чего трение в суставе минимально. Сустав окружен суставной сумкой, состоящей из внешнего волокнистого слоя и внутренней синовиальной оболочки.

## 2.4. ПРОЦЕССЫ В ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Обычно трибологические процессы и явления, происходящие в трибосопряжении, рассматриваются отдельно, что усложняет их объяснение. В ТС, в трибосопряжении одновременно протекает большое количество процессов [2.2]. Часть из них представлена на рис. 2.14. На рисунке показано как бы сечение трибосопряжения со всеми его процессами. Как следует из рис. 2.3, процессы в смазываемом сопряжении зависят от трибологических деталей, в том числе обоих ПС этих деталей и смазочного материала. Явления и процессы, связанные с зоной гидродинамического трения, уже достаточно хорошо известны и описаны [2.3—2.7 и др.].

Высокие давления, действующие в масле, вызывают его загущение, поскольку в микрообластях контакта могут возникать давления, достаточные для перехода масла из жидкого состояния в твердое. Большие давления возникают в зонах контакта неровностей, а неровности перемещаются относительно друг друга. Установлено, что скорость перемещения неровностей выше скорости затвердения, в результате этого масло практически не может переходить в твердое состояние. Это подтверждено экспериментально [2.8, 2.9]. При давлении 12 000 МПа масло затвердевает за 9 мкс, а при давлении 20 000 МПа — за 5,2 мкс. При давлении, большем давления затвердевания, интенсивность затвердевания растет пропорционально росту



- 1 — основной материал  
 2 — зона упругих деформаций  
 3 — зона пластических деформаций  
 4 — текстурированный слой  
 5 — слой окислов и поверхностных соединений  
 6 — граничный слой  
 7 — гидродинамическая зона  
 1—6 — в твердом теле, 7 — в жидкости

Электрические явления:  
 потенциал:  
 контактный  
 термоэлектрический  
 трения  
 токи трения  
 экзоэмиссия  
 электронов

Магнитные явления

Химическая обработка поверхности

Образование полимеров

Поверхностная энергия

Движение масла к местам с повышенной температурой

Смачивание поверхности

Влияние базового масла

Влияние вида и концентрации присадок

Взаимодействие присадок с базовым маслом

Взаимодействие присадок между собой

Смывание граничной пленки детергентами

Разрывание полимерных присадок

Изменение вязкости:

температура  
 давление (отверждение)

Старение масла

Состав граничной пленки:

элементарный  
 химический  
 изменение состава под внешними воздействиями

Проникновение элементов вглубь  
 Геометрия и топография поверхности

Контакт поверхностных неровностей

Текстурирование

Упругие и пластические деформации

Сцепление

Деламинационный износ

Другие процессы разрушения

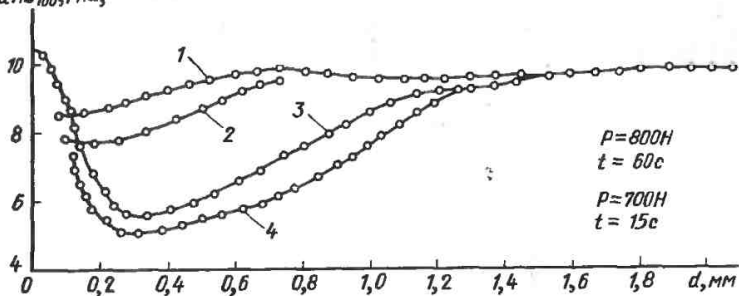
Подповерхностные изменения

Диффузионная миграция легирующих элементов

Влияние вида материала на физико-химические явления фрикционного контакта

Рис. 2.14. Физико-химические явления в трибосопряжении



$\mu\text{НВ}_{100}, \text{ГПа}$ 

$P=800 \text{ Н}$   
 $t=60 \text{ с}$   
 $P=700 \text{ Н}$   
 $t=15 \text{ с}$

Рис. 2.15. Микротвердость  $\mu\text{НВ}$  подповерхностных зон деталей  $d$ ; работающих с различными смазочными материалами:

$P=800 \text{ Н}$ ;  $t=60 \text{ с}$ ; 1 — нипол-15; 2 — селектол специальный SDS1E10w/30; 3 — гидрографинат-5;  $P=700 \text{ Н}$ ;  $t=15 \text{ с}$ ; 4 — сухое трение (техническое)

давления. При давлении 20 000 МПа и скорости качения 15 м/с в зоне контакта шириной 1 мм масло затвердевает в 90 % зоны. В подшипниках качения при нормальных условиях работы в зоне трибологического контакта масло затвердевает. Это особенно характерно для масел с большой вязкостью, которые затвердевают менее чем за 5 мкс при давлении ниже 400 МПа.

Большой интерес представляют работы по реологии очень тонких пленок органических веществ (масла, полимеров) на твердом теле при трении. Измерение сдвигающих сил и других величин, характеризующих реологию тонких пленок, осуществляется методами, указанными в [2.10, 2.11]. Для пленок толщиной в несколько молекул, состоящих из молекул стеариновой кислоты или стеартов металлов, сдвиг вызывает ориентацию цепочек в направлении действия сдвигающих сил. Введение ионов в тонкую пленку приводит к уменьшению сдвигающих сил. Тонкие пленки полимеров по-разному ведут себя под действием сдвигающих сил в зависимости от степени кристалличности полимера.

Интересным реологическим явлением в зоне трения является перенос масла в места с повышенной температурой [2.12, 2.13, 2.14], т. е. к неровностям и микронеровностям, на которых выделяется наибольшее количество теплоты. Источник теплоты и

возникающий под его действием градиент температуры являются сильными термодинамическими факторами, вызывающими перенос молекул масла в направлении действия этого фактора. Его воздействие значительно сильнее гравитационных сил и центробежной силы масла на поверхности трибологических деталей. Даже при небольшом количестве масла его перенос в области повышенной температуры обеспечивает создание несущей пленки, противодействующей заеданию в течение определенного времени работы.

Эластооптические исследования показали [2.15], что в условиях смазки максимальный порядок изохром на 20–30 %, ниже, чем при такой же нагрузке для сухого трения. Изменение распределения изохром в области контакта показывает, что поверхность, передающая нагрузки, в условиях смазки в 2–3 раза больше, чем при сухом контакте, кроме того, масло в месте контакта снижает касательные напряжения.

Масляная пленка между поверхностями сопрягаемых деталей предупреждает локальную передачу усилий через вершины поверхностных неровностей и снижает максимальные контактные напряжения, играя роль «подушки» между твердыми телами.

Масло содержит поверхностно-активные вещества (ПАВ), образующие на твердых телах защитные пленки (эти пленки разрушаются, но тут же

восстанавливаются). Граничная пленка, улучшающая процесс трения, уменьшает глубину теплового воздействия, вызывающего структурные превращения металла, подтвержденные распределением микротвердости в тонких приповерхностных слоях (рис. 2.15).

### 2.4.1. Адгезия

При адгезии поле сил, создаваемое рядом атомов (ионов, молекул), из которых состоит ПС тел, экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния от поверхности. Практически ван-дер-ваальсовы силы исчезают на расстоянии 1—2 нм, поэтому для адгезионного сцепления необходимо соответствующее сближение поверхностей. Для получения большой фактической площади контакта применяется полирование. Кроме воздействия электростатического типа существует электродинамическое воздействие.

Все твердые и жидкие тела имеют поверхностное поле сил, поэтому они должны подвергаться адгезии. Некоторые тела при взаимном контакте не проявляют адгезионных свойств. До сих пор нет рационального объяснения этого явления. Можно предположить, что большое значение в адгезионных явлениях имеет соответствие геометрической формы и расположения атомов (ионов) — поверхностных носителей электростатических зарядов. В случае несоответствия строения сближаемых поверхностей адгезии не происходит. Большая роль приписывается, особенно при адгезии полимеров, существованию полярных групп. Тела с полярным строением более подвержены адгезионному сцеплению [2.16].

Общепризнанной гипотезы адгезии нет, есть несколько теорий. Приведенное объяснение адгезии воздействием межмолекулярных сил является частью адсорбционной теории адгезии. Б. В. Дерягин разработал электрическую теорию адгезии.

Основываясь на результатах, полученных при разрыве сцепленных тел, он установил, что межмолекулярные силы действуют на расстоянии менее 2 нм, тогда как притяжение иа-

блюдается на расстоянии до 1000 нм. Таким образом, кроме межмолекулярных сил важную роль при сцеплении играет двойной электрический слой, образующийся при соприкосновении двух тел. При адгезионном сцеплении полимеров, имеющих полярные группы, двойной электрический слой возникает в результате работы донорно-акцепторного механизма.

При разрыве адгезионного сцепления происходит эмиссия электронов. В. Н. Морозова установила простую зависимость между скоростью электронов и адгезией. При разрыве сцеплений исчезают заряды (рекомбинация) вследствие туннельного эффекта и электронной эмиссии, перемещения зарядов из-за электропроводности поверхности и электрических разрядов в газе, прилегающем к поверхности.

Адсорбционная и электрическая теория не исключают друг друга, электрическая теория лишь указывает на дополнительный источник адгезионных сил [2.16].

И. М. Паркс [2.17] разработал рекристаллизационную теорию адгезии, которая может быть применена к кристаллическим телам и особенно к металлам. Непосредственному контакту и адгезионному сцеплению металлов препятствуют окисные пленки на поверхности металлов и разная ориентация кристаллических зерен из-за поверхностной обработки. При повышенной температуре (различной для разных металлов) происходит миграция атомов одного металла в другой даже через окисные пленки с образованием общих кристаллов, соединяющих оба тела. Эта теория справедлива лишь для кристаллических тел и не объясняет адгезию при температуре окружающей среды, когда рекристаллизация маловероятна.

На движении атомов с повышенным энергетическим состоянием основана энергетическая теория адгезии А. П. Семенова [2.18]. Для адгезионного сцепления необходим переход атомов из одного металлического тела в другое. Выход атома из своей кристаллической решетки связан с преодолением энергетического порога, зависящего от энергии связи данной кристаллической решетки. В резуль-

тате перехода атомов одного тела в ПС другого между атомами обоих тел образуются металлические связи, соединяющие поверхности.

При изучении адгезионного схватывания полимеров и процессов склеивания существующие теории оказались неудовлетворительными, была выдвинута диффузионная теория адгезии. Согласно этой теории молекулы (или их части) контактирующих полимеров диффундируют в околоповерхностные слои, в результате чего размывается резкая граница между полимерами, образуется переходная пленка смешанного состава, спаивающая оба полимера.

Существование такой переходной пленки экспериментально пока не подтверждено, но введение такого предположения хорошо объясняет влияние некоторых технологических факторов процесса склеивания (влияние растворителей клея, пластификаторов и т. д.). Но довольно трудно представить диффузию молекул при адгезионном сцеплении полимера с металлом или стеклом. Однако экспериментально обнаружена диффузия металлов при образовании адгезионных межметаллических сростков как в статических, так и в динамических условиях.

При адгезионных соединениях типа полимер—полимер или полимер—металл предполагается, что чистый слой на границе фаз является слабейшим звеном двух соединенных тел (*weak boundary layer*), потому что в него диффундируют соединения с наименьшей молекулярной массой.

В некоторых типах полимерных адгезионных соединений может происходить образование комплексов с переносом заряда, что увеличивает прочность образовавшейся связи. Адгезионные свойства тел, которые должны образовать соединение, можно изменить путем предварительной химической обработки, например нанесением слоя вещества с большой адгезионной способностью. Адгезионные явления имеют большое значение в трибологических исследованиях, потому что они являются источником значительной части сопротивления трения, особенно при сухом трении.

Надо заметить, что при контакте твердых тел адгезия может существовать только в микрообластях фактического контакта. Значительное увеличение сцепляемости достигается введением между контактирующими поверхностями жидкости (смазочного материала), потому что это приводит к увеличению фактической площади контакта, если, конечно, жидкость смачивает обе поверхности твердых тел. В качестве примера можно привести сцепления двух смоченных стеклянных пластин.

Явление адгезии может быть одной из причин скачкообразного движения в процессе трения (*stic—slip*). Скачкообразное движение возникает, если в трибосопряжении контактируют мгновенно неподвижная поверхность и движущаяся поверхность тела. Обязательным условием возникновения скачкообразного движения являются более высокий коэффициент трения покоя, чем коэффициент трения скольжения, а также небольшая относительная скорость и большие нагрузки.

При скачкообразном движении деталей трибологического контакта в нем возникают колебания. Они часто переносятся на агрегаты и даже на машину в целом.

## 2.4.2. Адсорбция

Адсорбция происходит на границе фаз и характеризуется различной концентрацией составляющих одной из фаз в ПС и в глубине этой фазы (рис. 2.16). Если в ПС молекул одной составляющей больше, чем внутри фазы, то имеет место положительная адсорбция, в противном случае — отрицательная адсорбция, например адсорбция газа или жидкости на поверхности твердого тела, на которой существует поле сил, зависящее от его химического строения. При соприкосновении поверхности твердого тела с молекулами окружающего его газа или жидкости в результате взаимодействия молекулы газовой (или жидкой) фазы приклеиваются к поверхности твердого тела. Присоединение молекул к поверхности межмолекулярными (ван-дер-ваальсовыми) си-

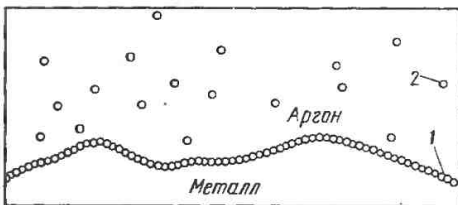


Рис. 2.16. Концентрация адсорбированных молекул аргона на поверхности металла 1 по сравнению с их концентрацией в газовой среде 2

лами называется физической адсорбцией, а химическое соединение молекул с поверхностью — хемосорбцией.

Адсорбция и хемосорбция называются сорбцией. Процесс, обратный адсорбции, т. е. освобождение адсорбированных молекул, называется десорбцией.

Твердое тело, на котором адсорбируются молекулы, называется адсорбентом. Вещество, адсорбированное на адсорбенте, называется адсорбатом. Если адсорбат десорбируется с поверхности твердого тела растворителем, то этот процесс называется элюированием, а растворитель, вымывающий адсорбат, — элюентом.

Адсорбция — динамический обратный процесс, иначе говоря, молекулы адсорбата не навсегда связаны с поверхностью адсорбента, а подвергаются непрерывному обмену с молекулами газовой фазы. При адсорбционном равновесии количество молекул, оседающих на поверхности в единицу времени, равно количеству молекул, переходящих в газовую фазу. В результате количество молекул на поверхности остается постоянным.

Обычно молекула адсорбата на некоторое время задерживается на поверхности адсорбента. Поэтому поверхность всегда (по крайней мере, частично) покрыта слоем адсорбата. Толщина слоя адсорбата растет с увеличением среднего времени пребывания молекул на поверхности, которое зависит от сил взаимодействия между поверхностью и прилегающими к ней молекулами.

Адсорбция молекул приводит к уменьшению поверхностной энергии. В результате этого во время адсорбции в окружающую среду выделяется

некоторое количество энергии, называемой энергией адсорбции, следовательно, адсорбция — изотермический процесс. Теплота физической адсорбции примерно равна теплоте конденсации адсорбата (обычно меньше 41,8 Дж/моль). Теплота хемосорбции может достигать 627 Дж/моль.

Интенсивность процесса адсорбции оценивается количеством (объемом или массой) адсорбированного вещества. Процесс адсорбции можно рассматривать во времени, определяя время, необходимое для адсорбции некоторого количества вещества.

При адсорбции газообразного вещества на твердом адсорбенте объем адсорбированного вещества зависит от давления газа  $p$  и температуры  $T$  (для смеси газов  $p$  — парциальное давление).

Формальная и феноменологическая запись адсорбции. По Фрейндлиху объем адсорбированного вещества

$$V_{\text{адс}} = kp^n, \quad (2.4)$$

где  $k$ ,  $n$  — константы;  $p$  — давление газа (парциальное давление).

Значение  $n$  лежит в пределах 0,1—0,9, оно возрастает с увеличением температуры, стремясь к единице. Значение  $k$  изменяется в зависимости от вида адсорбента и адсорбата.

Первую теорию процесса адсорбции выдвинул в 1916 г. Ж. Ленгмюр. Он предположил, что на поверхности может образоваться только мономолекулярный слой адсорбированного вещества, потому что поле поверхностных сил имеет слишком маленький радиус действия, чтобы удерживать мультимолекулярный слой. Он также предположил, что скорость десорбции молекул равна скорости адсорб-

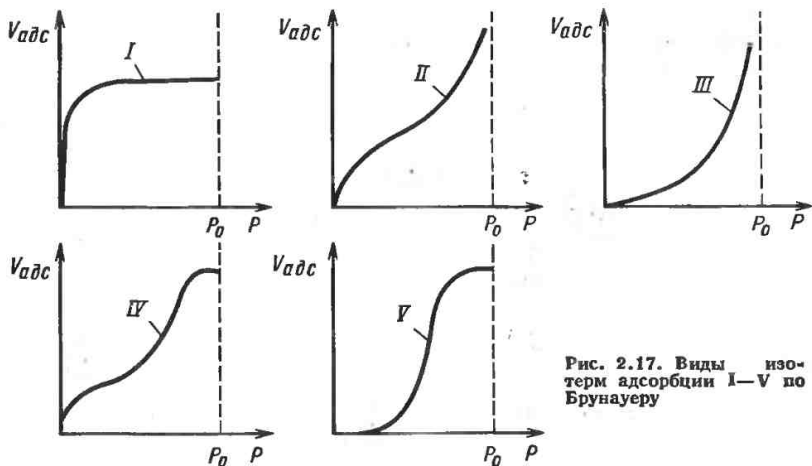


Рис. 2.17. Виды изотерм адсорбции I—V по Брунауэру

ции и прямо пропорциональна доле поверхности, покрытой молекулами, а скорость адсорбции пропорциональна давлению  $p$  и доле поверхности, не занятой адсорбированными молекулами  $(1 - \alpha)$ . Так как принято, что скорости адсорбции и десорбции равны, то, учитывая коэффициенты пропорциональности  $k_1$  и  $k_2$ , можно написать

$$k_1 \alpha = k_2 p (1 - \alpha), \quad (2.5)$$

отсюда

$$\alpha = k_2 p / (k_1 + k_2 p). \quad (2.6)$$

Если принять, что коэффициент адсорбции  $k = k_1/k_2$ , то

$$\alpha = p / (k + p). \quad (2.7)$$

Для перехода от этой зависимости к уравнению изотермы Ленгмюра надо выразить  $\alpha$  через количество молей  $a$ , адсорбированных на поверхности 1 г адсорбента. Значение  $a$  пропорционально степени покрытия поверхности  $X$ . При полном покрытии поверхности адсорбента  $X = 1$ ,  $a = a_H$  (насыщение), поэтому

$$\alpha = \frac{a}{a_H}; \quad a = a_H \frac{p}{k + p}. \quad (2.8)$$

Более универсальную теорию адсорбции представили в 1938 г. Брунауэр, Эммет и Теллер, стремившиеся объяснить форму всех изотерм адсорбции, которые можно получить экспери-

ментально. Брунауэр считает, что возможны пять различных изотерм адсорбции (рис. 2.17).

Кривую I упомянутые авторы считают изотермой Ж. Ленгмюра, соответствующей мономолекулярной адсорбции на поверхности твердого тела, остальные типы кривых соответствуют многослойной мультимолекулярной адсорбции. При многослойной адсорбции каждый слой становится поверхностью адсорбции для следующего слоя. Полное количество адсорбированного вещества равно сумме данного вещества во всех слоях, количество которых может быть неограниченным. Уравнение Брунауэра, Эммета, Теллера, называемое также уравнением изотермы БЭТ, имеет вид:

$$\frac{p}{V(p_0 - p)} = \frac{1}{V_n c} + \frac{(c - 1)p}{V_n c p_0}, \quad (2.9)$$

где  $p_0$  — давление насыщенного пара адсорбата;  $V$  — объем адсорбированного газа при давлении  $p$ ;  $V_n$  — объем газа, покрывающего мономолекулярно ПС;  $c$  — константа, экспоненциально связанная с разностью между теплотой адсорбции в первом слое  $q_0$  и теплотой адсорбции в последующих слоях  $q$ , которая для упрощения принята постоянной и равной теплоте конденсации

$$c = e (\Delta q_0 - \Delta q_k) / kT. \quad (2.10)$$

Если  $\Delta q_0 > \Delta q_k$ , то уравнение БЭТ дает изотерму II, если  $\Delta q_0 < \Delta q_k$ , то получается изотерма III. Возможны и другие виды кривых — изотермы IV и V. Если адсорбция происходит не на плоской поверхности твердого тела, а на поверхности пор и капилляров, то количество адсорбированных слоев ограничивается числом  $n$  и уравнение изотермы БЭТ принимает вид

$$V = \frac{V_n c x}{1-x} \frac{1 - (n+1)x^n + nx^{n+1}}{1 + (c-1)x - cx^{n+1}}, \quad (2.11)$$

где  $x = p/p_0$ .

Жигмонд главной причину адсорбции видит в капиллярной конденсации. Этот вид адсорбции может быть описан уравнением Кельвина:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{2\sigma V_{mol}}{rRT} \cos \theta, \quad (2.12)$$

где  $p$  — давление паров;  $p_0$  — давление паров, при котором заполняются все капилляры;  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $\theta$  — угол смачивания жидкости;  $V_{mol}$  — молекулярный объем.

Особое направление в описаниях физической адсорбции представляют теории, построенные на представлении адсорбированного слоя в виде двухмерной пленки, связанной межмолекулярными силами. Основываясь на уравнении состояния адсорбированного слоя, можно получить уравнения изотерм адсорбции. Принимая эти предположения за исходные, многие авторы вывели уравнения изотерм для адсорбции разных веществ на разных адсорбентах.

Наиболее известным является уравнение изотермы, выведенное Харкисом и Джуром:

$$\ln \frac{p}{p_0} = B - \frac{c}{V^2}, \quad (2.13)$$

где  $V$  — объем адсорбированного вещества;  $B, c$  — константы.

Между константой  $c$  и площадью поверхности адсорбента  $A$  существует связь

$$A = kc^{1/2}. \quad (2.14)$$

Харкис и Джура определили коэффициент пропорциональности на основании измерения теплоты смачивания поверхности адсорбента. В монографиях по адсорбции рассматривают еще несколько теорий этого процесса.

Как следует из приведенного выше обзора теорий адсорбции, в различных теориях исходят из различных предположений. Можно выделить одно- и многослойную адсорбцию. Однослойная адсорбция может не учитывать взаимодействия между адсорбируемыми молекулами (изотерма Ленгмюра, аналогичная изотерм Ленгмюра, изотерма Вольмера) или учитывать (двухмерная конденсация по Харкинсу и Джуру). Многослойная адсорбция объясняется с помощью теорий потенциала, поляризации, БЭТ, усовершенствованной теории, теорий Уилера—Оно, Баррера—Робинсона и др. Представленные теории описывают протекание адсорбции газов на поверхности твердых тел. Применяемость отдельных теорий адсорбции зависит от того, какое вещество адсорбируется и на каком адсорбенте.

**Влияние различных факторов на процессы адсорбции и хемосорбции.** Во всех теориях адсорбции не учитываются два важнейших фактора: вид адсорбата (химическое строение адсорбируемых молекул) и вид адсорбента (структура поверхности твердого тела). Теории предполагают, что вся поверхность однородна с энергетической точки зрения и что существует одинаковая вероятность адсорбирования молекул в любом месте поверхности. Такие предположения неверны. Установлено, например, что при адсорбции на насыщении поверхности одним веществом имеется возможность дополнительной адсорбции другого вещества.

Х. Тейлор выдвинул концепцию активных центров, т. е. таких активных мест на поверхности, в которых происходит адсорбция.

Теорией, учитывающей влияние кристаллографической структуры на хемосорбцию, стала теория мультиплетов А. А. Баландина. В этой теории учтен фактор геометрического соответствия между расположением атомов в кристаллографической решетке

поверхности твердого тела и строения хемосорбированных молекул.

А. А. Баладин добавил к своей теории дополнительный принцип энергетического соответствия (1954 г.). Теория А. А. Баладина справедлива для идеальной кристаллической решетки.

Реальные кристаллы имеют множество разнообразных дефектов, которые принципиально изменяют хемосорбционную способность адсорбентов. Кристаллическая решетка твердого тела имеет макродефекты (включения, трещины) и микродефекты, к которым относятся только отдельные узлы решетки и их окрестности. Дефекты можно разделить на геометрические (вакансия, атом между узлами решетки и т. п.), электрические (ненормальные заряды ионов в решетке) и химические (инородные атомы, примеси и т. п.). Геометрические дефекты наименее стойкие, потому что при сравнительно небольших энергетических затратах можно упорядочить кристаллическую решетку.

Дефекты в структуре реальных кристаллов чаще всего возникают в условиях кристаллизации, особенно тогда, когда кристаллизация протекает с большой интенсивностью, при температуре значительно ниже температуры плавления. Химические дефекты возникают, когда в процессе кристаллизации имеется возможность адсорбции посторонних веществ. При таких условиях кристаллизации получают очень активные поверхности.

Особое место среди хемосорбционных теорий занимает квантово-механическая теория хемосорбции Ф. Ф. Волькенштайна. Эта теория была разработана в 1947 г. и впоследствии развивалась и дополнялась. Она касается хемосорбции на полупроводниках. Эта теория может иметь большое значение для объяснения проблем хемосорбированных слоев при смазывании поверхности металлов смазочными материалами, потому что поверхность металла обычно покрыта пленками окислов, т. е. полупроводниками.

Взаимоотношение адсорбированных атомов, связанных различными видами связей, зависит от толщины кристаллов полупроводника, на котором про-

исходит хемосорбция. Если толщина кристаллов полупроводника менее 0,1 мкм, то концентрация свободных электронов в полупроводнике, как и взаимоотношение различных видов связей, которыми связаны с полупроводником адсорбированные атомы, не зависит от внутренних свойств кристалла, наличия примесей в пространственной решетке полупроводника, но зависит от количества адсорбированных атомов.

Поверхностные свойства кристаллов зависят от их внутренних свойств, если их толщина превышает 0,1 мкм. Такой случай хемосорбции, когда поверхностные свойства зависят от внутренних свойств, подробно рассматривает теория граничного слоя, выдвинутая К. Хауффом, Х. Энгеллем и П. Б. Вейшем. Основные положения этой теории представлены на основе разработок А. Белянского.

П. Б. Вейш пришел к граничной теории, основываясь на зонной модели полупроводника, а К. Хауфф и Х. Энгель — на основании термодинамического анализа. Авторы теории граничного слоя не исследуют способность соединения адсорбированного атома с поверхностью. Они только утверждают, что хемосорбция связана с переходом электрона с адсорбента на адсорбат и наоборот. Количество адсорбированных атомов, каждый из которых отдает или принимает определенное количество электронов, связано с электронными свойствами адсорбируемых молекул и адсорбента. При достаточно низких температурах подвижность механических и химических дефектов решетки мала. В этом случае увеличение или уменьшение количества электронов и дырок, происходящее в процессе хемосорбции, ограничено поверхностным слоем кристалла толщиной 0,1 мкм, называемым граничным слоем.

На рис. 2.18 представлена схема энергетических уровней полупроводника при хемосорбции электроположительных и электроотрицательных атомов. На рисунке  $E_F$  обозначает энергию зоны Ферми, расположенной посередине между краем основной зоны и локальными уровнями, возникающими в решетке из-за акцепторных

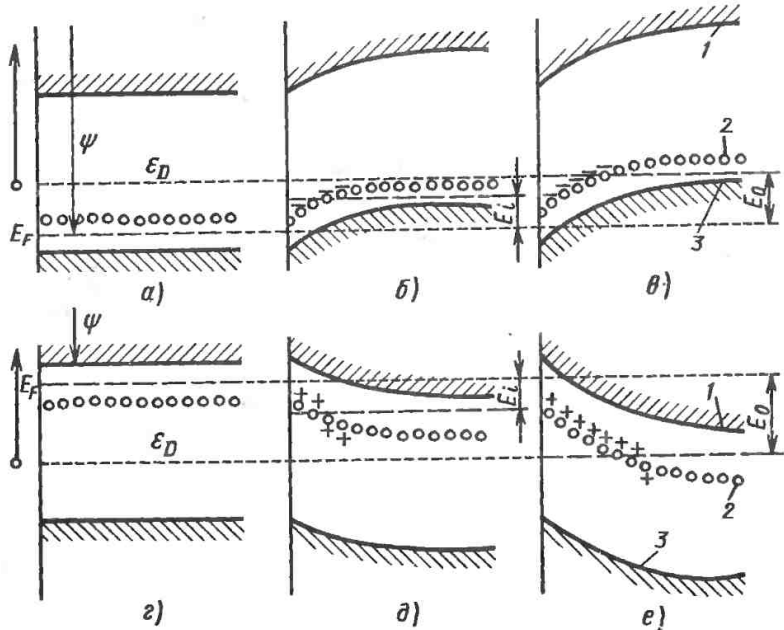


Рис. 2.18. Модели энергетических состояний полупроводника при хемосорбции электроотрицательных ( $z-e$ ) и электроположительных ( $a-e$ ) атомов:

$a, г$  — до хемосорбции;  $б, в$  — в процессе хемосорбции;  $д, е$  — после установления сорбционного равновесия; на оси абсцисс указано расстояние до поверхности полупроводника;  $\psi$  — энергия выхода электрона;  $\epsilon_D$  — плотность акцепторных дефектов в кристаллической решетке; 1 — зона проводимости; 2 — локальный уровень; 3 — основная зона

возмущений с плотностью  $Y_2$ .  $E_0$  — это энергия выхода электрона с уровня Ферми с энергией  $E_F$  (энергия, необходимая для переноса электрона в бесконечность за пределы твердого тела).

Потенциал ионизации обозначен  $I$ , хемосорбция атомов связана с переносом соответствующего количества электронов из атомов адсорбируемого вещества на адсорбент. Электроны обозначаются знаком « $-$ ». Перенос электронов приводит к образованию пространственного заряда в граничном слое, с чем связано изменение потенциальной энергии этого слоя относительно внутренней энергии  $E$ . Это изменение выражается изгибом вниз границ основной зоны и зоны проводимости в поверхностном слое. Изменения такого рода уравниваются смещением вверх уровня Ферми

$E_F$  также на величину  $E_i$  с соответствующим уменьшением энергии выхода  $E_0$ . Равновесие устанавливается тогда, когда работа выхода электрона из полупроводника сравняется с ионизационным потенциалом хемосорбированных атомов, т. е. когда смещение энергетических уровней на поверхности составит  $E_0 = \psi - I$ .

Аналогичные рассуждения можно провести и в случае хемосорбции атомов с акцепторными свойствами, характеризующихся электронным сродством, если адсорбент является полупроводником, содержащим в решетке некоторое количество донорных примесей. Переход электронов будет иметь противоположное направление. В противоположном направлении выгнутся основная зона и зона проводимости в поверхностном слое. Этот случай



показан на рис. 2.18. Условие равновесия примет вид

$$E_0 = a - \psi. \quad (2.15)$$

Авторы теории граничного слоя выводят уравнения для расчета распределения зарядов в этом слое. Представленный обзор основных положений важнейших теорий хемосорбции указывает на большую сложность этого процесса. Надо заметить, что каждая из теорий рассматривает только какой-нибудь из аспектов этого процесса, универсальной теории хемосорбции, которая была бы справедливой во всех случаях, до сих пор еще нет.

**Адсорбция из раствора.** Если в какой-нибудь жидкости 1 (рис. 2.19) растворим вещество 2, то получим раствор вещества 2 в растворителе 1. В таком растворе оба вида молекул могут свободно перемещаться, действуя при этом силами притяжения на соседние молекулы.

Если взаимодействие между молекулами 1 сильнее, чем между молекулами 2, то молекулы 1 будут сильнее втягиваться в глубь жидкости, чем молекулы 2, имеющие в этом случае тенденцию к концентрации на поверхности раствора, поэтому не будет равномерного распространения молекул 1 и 2 во всем растворе. Такого рода увеличение концентрации молекулы 2 на поверхности является примером положительной поверхностной концентрации.

Если молекулы вещества 2 взаимодействуют слабее, чем молекулы растворителя 1, то они будут скапливаться внутри раствора и их концентрация на поверхности будет меньше, чем внутри жидкости. Это случай отрицательной адсорбции.

Вещество, имеющее тенденцию к адсорбции на поверхности раствора и снижению поверхностного натяжения, называется **поверхностно-активным веществом**. Стремлению к концентрации молекул ПАВ на поверхности раствора противодействуют силы диффузии и тепловое движение. Если силы, приводящие к накоплению молекул на поверхности, велики, а противодействующие силы (тепловое движение, диффузия) малы, то молекулы ПАВ могут образовать на

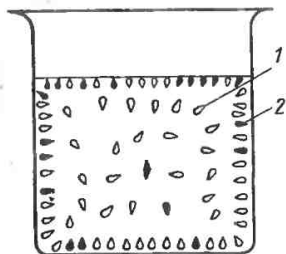


Рис. 2.19. Положительная поверхностная адсорбция из раствора

поверхности плотный мономолекулярный адсорбционный слой.

Зависимость между адсорбцией ПАВ на поверхности раствора и изменением поверхностного натяжения описывает формула Гиббса

$$\Delta\pi = \frac{c}{RT} \frac{d\sigma}{dc}, \quad (2.16)$$

где  $\Delta\pi$  — прирост концентрации ПАВ в ПС;  $c$  — концентрация ПАВ в глубине раствора;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $T$  — температура;  $R$  — газовая постоянная.

Зависимость поверхностного натяжения раствора от концентрации ПАВ выражается формулой Шишковского

$$\sigma_0 - \sigma_r = a \lg(1 - bc), \quad (2.17)$$

где  $\sigma_0 - \sigma_r$  — уменьшение поверхностного натяжения за счет ПАВ;  $\sigma_0$  — поверхностное натяжение чистого растворителя;  $\sigma_r$  — поверхностное натяжение раствора;  $c$  — концентрация ПАВ в растворе;  $a, b$  — постоянные.

На поверхности раствора молекулы ПАВ определенным способом ориентированы по отношению к поверхности в зависимости от их химического строения и пространственного распределения зарядов (дипольный момент). Если молекулы вытянутые, имеют цепочное строение, то, как правило, ось цепочки молекулы перпендикулярна к поверхности жидкости. Если молекула кольцевая или со сложным смешанным строением (цепочно-кольцевым), расположение молекул на поверхности может быть иным.

Когда поверхность твердого тела вступает в контакт с раствором, то

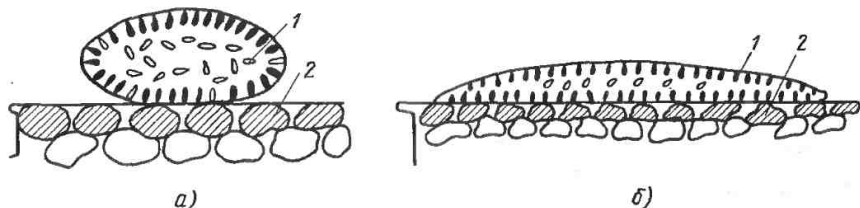


Рис. 2.20. Капля раствора 1 на поверхности твердого тела 2:  
 а — капля с большой связностью; б — капля с малой связностью

полюс своих поверхностных сил оно прежде всего воздействует на молекулы поверхностного слоя раствора, т. е. на молекулы ПАВ. При контакте раствора с твердым телом молекулы ПАВ даже при очень низкой концентрации их в растворе имеют наибольшие шансы адсорбции на поверхности твердого тела вследствие их большой концентрации в ПС, а также потому, что они обычно являются полярными (рис. 2.20).

Для процесса адсорбции на поверхности твердого тела вещества, растворенного в жидкости, не выведено уравнений, базирующихся на теоретических основах этого процесса. Применяется эмпирическое уравнение Фрейндлиха, описывающее связь массы адсорбированного вещества  $x$  из раствора на некоторой массе адсорбента  $m$  при его концентрации в растворе  $c$

$$\frac{x}{m} = kc \frac{1}{n} \quad \text{или} \quad \lg \frac{x}{m} = \lg k + \frac{1}{n} \lg c, \quad (2.18)$$

где  $n$  — число, характеризующее адсорбционную систему;  $k$  — коэффициент адсорбции.

Мономолекулярные слои нерастворимых веществ на поверхности жидкости. Выше рассмотрено образование тонких пленок на поверхности жидкости в результате адсорбции из раствора. Такие пленки можно получить также путем нанесения плохорастворимых веществ на поверхность жидкости. Установлено, что некоторые вещества в таких условиях постепенно растягиваются и образуют очень тонкие пленки, в некоторых случаях даже

мономолекулярные. Классическим примером может быть образование пленок жирных кислот на поверхности воды. Для этого раствор жирных кислот в бензоле наносится на поверхность воды. Бензол (летучий растворитель) легко испаряется, оставляя пленку жирных кислот, которая постепенно растягивается по всей поверхности. Если поверхность воды припорошить тальком, то распространение пленки будет замечнее, потому что частицы талька будут отодвигаться, образуя круг. Измеряя диаметр круга и зная количество нанесенного вещества, можно определить толщину пленки. Частицы талька отодвигаются потому, что растягивающаяся пленка оказывает на них давление. Если на ее пути поставить плавающую преграду (например, парафинированную полоску картона), то на нее будет действовать линейное давление  $p$  (рис. 2.21):

$$p = (\sigma_0 - \sigma) l, \quad (2.19)$$

где  $\sigma_0$  и  $\sigma$  — поверхностное натяжение соответственно чистой жидкости и жидкости с пленкой нерастворимого вещества;  $l$  — длина плавающей преграды.

Это давление можно измерить с помощью весов Ленгмюра, где сила, действующая на преграду, определяется углом поворота, необходимым для возвращения преграды в начальное положение. Перемещая преграду в направлении, противоположном распространению пленки, вызывают сжатие пленки.

Покельс в конце прошлого столетия отметила, что напряжение в пленке жирной кислоты изменяется до тех пор, пока площадь поверхности, при-

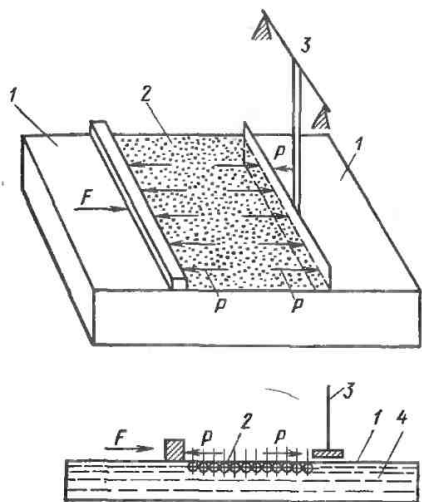


Рис. 2.21. Давление поверхностной пленки:

1 — чистая поверхность воды; 2 — пленка; 3 — весы Ленгмюра; 4 — вода

ходящаяся на одну молекулу, не составит около  $2 \text{ нм}^2$ . Это значение называется точкой Покельс.

В 1899 г. Рэлей обнаружил, что в точке Покельс молекулы жирной кислоты сталкиваются между собой. Ленгмюр, нанося на поверхность воды жирные кислоты с разной длиной цепочки (16—20 атомов углерода), установил, что предельная поверхность (точка Покельс) одинакова для кислот с длинными и короткими цепочками. Это возможно только в том случае, если молекулы располагаются перпендикулярно к поверхности жидкости полярным концом к воде, а неполярным углеводородным концом к воздуху.

При нанесении на поверхность жидкости вещества с небольшой способностью к растяжению на жидкости образуются «линзы» (рис. 2.22). Возможно также образование частично вещества «линзы», а частично мономолекулярного слоя.

Проводятся также исследования по образованию пленок смесью веществ, например жирных кислот и длинноцепочных спиртов и аминов. Такие слои, как установлено, более конден-



Рис. 2.22. Линзообразное утолщение мономолекулярной пленки.

1 — мономолекулярная пленка; 2 — линза; 3 — вода

сированные, это указывает на то, что при смешивании веществ достигается более эффективная поверхностная упаковка. Мономолекулярный слой с поверхности жидкости может быть перенесен на какой-либо предмет после погружения этого предмета в жидкость. Этот метод применяется для нанесения мономолекулярных пленок на детали трибосопряжений для изучения поведения этих пленок в трибологических процессах.

### 2.4.3. Диффузия и термодиффузия

Важную роль во взаимодействии деталей ТС играют диффузионные явления. Ими сопровождаются все явления трения, практически все химические реакции в твердом и жидком состояниях и на границе фаз. В трибологических процессах имеют место: самодиффузия, гетеродиффузия, диффузия в градиенте температур, или термодиффузия; реактивная диффузия, поверхностная диффузия из газозовых, жидких и твердых источников.

Из динамической теории кристаллических структур следует, что атомы (ионы) колеблются около положения равновесия с частотой примерно  $10^{13} \text{ с}^{-1}$ . Амплитуда колебаний иногда достаточно велика, чтобы атом перескочил из одного равновесного положения в другое. Если частота переходов при повышенной температуре около  $10^{10} \text{ с}^{-1}$ , а расстояние одного перехода  $1 \text{ \AA}$ , то переходящий атом в течение  $1 \text{ с}$  преодолевает расстояние  $1 \text{ м}$ . Среднее изменение положения атома за это время примерно  $10^{-5} \text{ м}$ . Перемещение атома несоизмеримо мало по сравнению с путем, пройденным атомом.

Диффузия и самодиффузия практи-

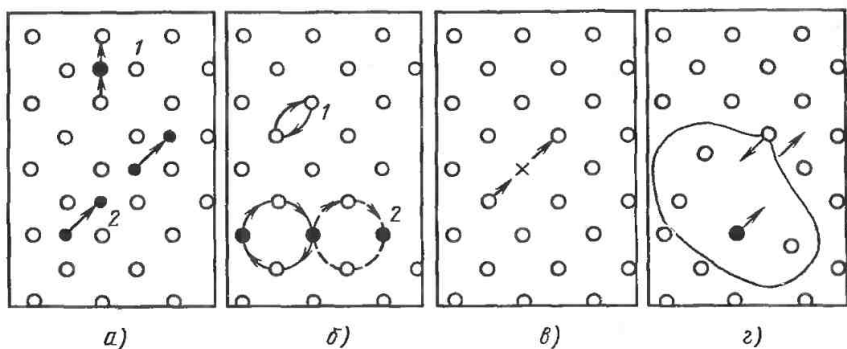


Рис. 2.23. Виды объемной диффузии:

*a* — узловая: 1 — посредством кровдионов; 2 — самодиффузия; *б* — обменом атомов: 1 — простой; 2 — кольцевой; *в* — посредством вакансий; *г* — релаксационная

чески начинаются в металлах при  $T \geq 0,3T_M$ , где  $T_M$  — абсолютная температура плавления металла. При более низкой температуре можно определить значение коэффициента методом измерения внутреннего трения. В системе, состоящей из двух и более фаз с разным составом, протекают процессы взаимной диффузии. Сила, действующая на атомы в результате градиента химического потенциала, вызванного градиентом концентрации, вызывает ориентированное смещение случайных положений хаотично движущихся атомов в направлении действия силы, т. е. в направлении гомогенизации системы. В более общем случае сила, вызывающая изменение положения атомов, может быть связана с градиентом химического потенциала, вызванного градиентом концентраций или неоднородным распределением напряжений, температуры, напряженности электрического поля или сочетанием всех или некоторых из упомянутых факторов.

В трибологических процессах мы имеем дело, как правило, со всем комплексом факторов, доля отдельных сил (полей сил) зависит от условий трения.

**Механизм диффузии.** Важнейший механизм диффузии — атомный. Можно выделить шесть основных видов объемной диффузии в металлах: межузловая, простым или кольцевым обменом атомов, посредством вакансий,

вдоль границ структуры или границ зерен, релаксационная, посредством зон с ослабленной структурой.

Межузловая диффузия возникает в водороде, азоте, углероде, в некоторых случаях в барии и имеет большие коэффициенты диффузии и низкую энергию активации [2.19].

Диффузия или самодиффузия с простым или кольцевым обменным механизмом заключается в одновременном обмене двух соседних атомов или одновременном повороте на соответствующий угол нескольких, например четырех, атомов (рис. 2.23). Некоторый атом, переходя в соседнее кольцо (обозначенное на рисунке пунктиром), может перемещаться дальше в структуре кристалла.

В диффузии посредством вакансий атом, соседствующий с вакансией, занимает ее, образуя, естественно, вакансию на своем старом месте и т. д. Возникает кажущееся движение вакансий. В диффузии этого вида потоку атомов сопутствует поток вакансий.

Диффузия вдоль границ структуры, границ зерен или вдоль систем дислокаций особенно отчетливо обнаруживается при относительно низкой температуре. Дефекты представляют в этом случае легкие пути диффузии, вызывая снижение энергии активации (рис. 2.24). При более высоких температурах описанные дефекты не играют доминирующей роли, и поэтому

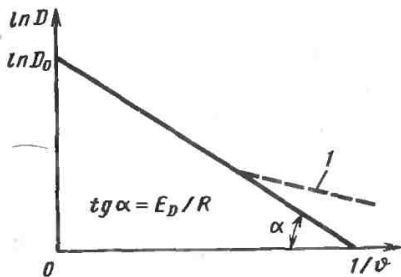


Рис. 2.24. Зависимость коэффициента диффузии  $\ln D$  от температуры  $\varphi$ :

1 — возможное изменение механизма диффузии при более низких температурах

можно считать это явление изотропным.

**Диффузия в градиенте температуры.** Коэффициент диффузии является функцией температуры. В изучении классической диффузии предполагается, что процесс протекает в изотермических условиях. Градиент температуры приводит к переносу массы. Это явление называется термодиффузией Сорета. Простейший пример явления Сорета в кристаллах — это перемещение межузловых примесей в постоянном одномерном градиенте температуры.

**Термодиффузия.** Термодиффузия является примером сопряжения процессов. Градиент температуры приводит к переносу энергии и вещества. Аналогично градиент концентрации приводит к переносу вещества и энергии (эффект Дюфора). Перенос теплоты неразрывно связан с этими факторами.

Энергия, переносимая под воздействием градиента температур, представляет собой энергию отдельных молекул, их энергию трансляции, ротации и т. д. Перенос энергии приводит к переносу молекул как ее носителей. В результате конкурирующих сопряженных процессов необратимый процесс стремится к равновесию, но его тормозят взаимные сопряжения переносов. Система асимптотически стремится к нулю в процессе со сложным внутренним механизмом. Если существует постоянный, определенный и неизменный градиент температуры, то сопряженный с ним перенос энергии приводит к переносу вещества, тер-

модиффузии и увеличенному градиенту концентрации.

**Термодиффузия в твердых телах.** Влияние градиента температуры на диффузию в твердых телах вытекает из второго обобщенного дифференциального уравнения Фика. Первое дифференциальное уравнение диффузии обобщено для случая термодиффузии введением множителя, пропорционального градиенту температуры. Второе дифференциальное уравнение Фика в более общей форме учитывает влияние механических напряжений и градиентов температуры, а также переменную вероятность перехода атомов из одного равновесного положения в другое и переменное количество атомов  $N_i$  на единицу поверхности, описанные зависимостью

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \left( \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial \alpha}{\partial x} \frac{c}{\alpha} \right) \right], \quad (2.20)$$

где  $c$  — молекулярная концентрация;  $D$  — коэффициент диффузии;  $t$  — время.

Для твердых тел

$$\alpha = A \exp \left( -\frac{Q}{KT} \right),$$

следовательно,

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x} = -\frac{1}{KT} \frac{\partial Q}{\partial x}.$$

Если нет градиентов напряжений, а температура изменяется, то

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x} = -\frac{1}{KT} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q}{KT^2} \frac{\partial T}{\partial x},$$

тогда уравнение можно записать в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \left( \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{c}{KT} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Qc}{KT^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]. \quad (2.21)$$

Это обобщение второго дифференциального закона Фика, учитывающего диффузию, вызванную градиентом температуры. Дифференцируя первую часть уравнения и учитывая коэффи-

циент диффузии  $D$  при градиенте  $T$ , можно сказать, что она не будет иметь независимой формы. Отбросив слагаемые с производными второго порядка  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  и  $\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$ , получим уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \\ & - \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Dc}{T} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} + \\ & + \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{cDQ}{T^2} \right) \frac{\partial T}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Первое слагаемое правой части представляет собой классический закон диффузии Фика, два других слагаемых определяются действием градиента температуры. В рассматриваемом случае механические напряжения не учитываются, а значение  $Q$  изменяется в результате изменения температуры.  $Q$  зависит от межатомных расстояний, окружающих мигрирующий атом, и сильно уменьшается с увеличением этих расстояний и температурного коэффициента расширения. Когда известно  $Q_0$  в некоторой точке тела для температуры  $T_0$ , то для произвольной точки можно написать

$$Q = Q_0 + V_0 \kappa (T - T_0) \frac{dQ}{dV},$$

где  $\kappa$  — температурный коэффициент объемного расширения;  $V$  — собственный объем.

Поскольку  $T = T_0 + \frac{\partial T}{\partial x} x$ , можно написать

$$Q = Q_0 + V_0 \kappa x \frac{dQ}{dV} \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Принимая, что температура в твердом теле изменяется линейно, получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} = V_0 \kappa \frac{dQ}{dV} \frac{\partial T}{\partial x}; \\ \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Подставляя в (2.22) последние преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{c}{x} \right) + \\ & + \frac{Q}{V} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Dc}{T^2} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - \\ & - \frac{T}{K} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{cD}{T^2} \right) \frac{\partial Q}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Приведенное математическое описание термодиффузии, справедливое с точки зрения термодинамики, имеет линейную зависимость переноса от действующих факторов. При большом градиенте температуры принимается, что межплоскостное расстояние остается постоянным. Считая, что

$$D(x) = \lambda^2 \alpha \Gamma_i, \quad (2.25)$$

где  $\lambda$  — межплоскостное расстояние;  $\alpha$  — вероятность перехода;  $\Gamma_i$  — частота переходов, получаем поток примеси

$$J = - \frac{\partial}{\partial x} [D(x) C(x)]. \quad (2.26)$$

Это уравнение отличается от первого закона Фика и является общим уравнением потока, учитывающим не только влияние концентрации на  $D(x)$ , но и влияние большого градиента температуры. Сомножитель  $D(x)$  в этом уравнении имеет размерность коэффициента диффузии, а при нулевом градиенте температуры он равен коэффициенту термодиффузии. Это уравнение аналогично уравнению Арениуса

$$D(x) = D_0 e^{-\frac{Q(T(x))}{KT(x)}},$$

где  $D_0$  — коэффициент диффузии при бесконечно большой температуре;  $Q(T(x))$  — зависящая от температуры энергия активации термодиффузии;  $T(x)$  — температура;  $K$  — постоянная Больцмана.

Уравнение можно записать в виде

$$\begin{aligned} J = & - \frac{\partial}{\partial x} [D(x) C(x)] = \\ = & - \frac{\partial D}{\partial x} C - D \frac{\partial C}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

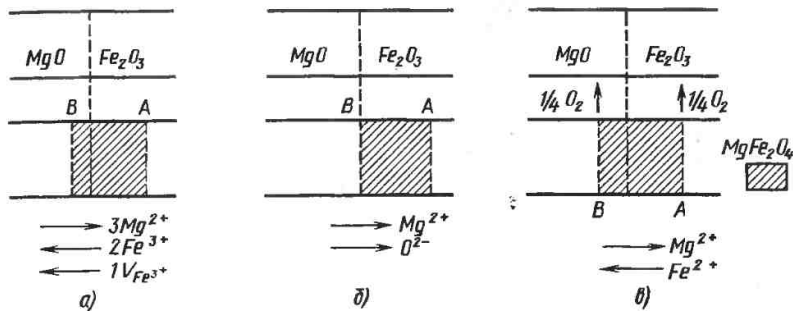


Рис. 2.25. Модели возможных реакций в системе MgO—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Дифференцируя уравнение Арениуса получим

$$\frac{\partial D}{\partial x} = -D \frac{1}{KT} \left[ \frac{\partial Q}{\partial T} - \frac{Q}{T} \right] \frac{dT}{dx}. \quad (2.28)$$

Подставляем (2.28) в (2.27):

$$J = D \frac{C}{KT} \left[ \frac{\partial Q}{\partial T} - \frac{Q}{T} \right] \frac{dT}{dx} - D \frac{dC}{dx}. \quad (2.29)$$

Это уравнение объясняет многие экспериментальные явления, которые прежде были не ясны. Градиент температуры приводит к образованию потока массы, а его направление определяется множителем в квадратных скобках. Существование градиента температуры необходимо, но не достаточное условие для возникновения термодиффузионного потока.  $D(x)$  в первом приближении является функцией положения при данной температуре. Выражение в квадратных скобках определяет существование градиента температуры, вызывающего поток энергии активации как функцию температуры. Если  $\frac{\partial Q}{\partial T} = \frac{Q}{T}$ ,

термодиффузионный поток отсутствует. Если  $\frac{\partial Q}{\partial T} > \frac{Q}{T}$ , то существует термодиффузионный поток, направленный от низкой температуры к высокой. Результирующий поток так долго будет отличаться от нуля, пока

оба члена уравнения не станут равны между собой. Если  $\frac{\partial Q}{\partial T} < \frac{Q}{T}$ , то термодиффузионный поток будет направлен от высокой температуры к более низкой и, как и в предыдущем случае, результирующий поток будет отличаться от нуля, пока оба члена уравнения не станут равны.

Используя второй закон Фика

$$\frac{\partial J}{\partial x} = - \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.30)$$

и подставляя его в (2.26), получим

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 [D(x)C(x, t)]}{\partial x^2}. \quad (2.31)$$

Это уравнение вместе с граничными условиями является основной зависимостью термодиффузии.

**Реактивная диффузия.** В трибологической практике большое значение имеют такие случаи, в которых диффузия приводит к аллотропным фазовым превращениям (изменения структуры без существенных изменений состава) либо сопутствует реакциям типа твердое тело + твердое тело + твердое тело и приводит к образованию новых твердых фаз со структурой, отличной от структуры и состава исходных фаз. Например, происходит реакция окисления металлов, а в некоторых случаях образование новых граничных слоев в процессе граничного трения (рис. 2.25).

По сравнению с другими случаями диффузии в твердом теле важным но-

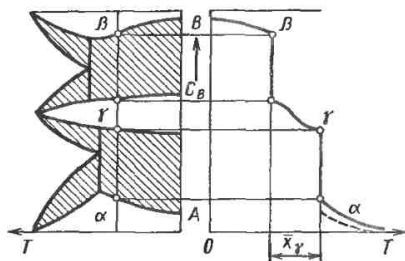


Рис. 2.26. Распределение концентрации при реактивной диффузии

вым фактором в реактивной диффузии является образование новых границ разделения фаз вследствие диффузии и установления состояний равновесия на границе разделения фаз в результате реакции. Их достижению благоприятствует то, что для получения локального равновесия в этих зонах достаточно диффузии на расстояние всего в несколько ангстрем. В системе, возникающей в результате реакции в твердой фазе  $A + B = AB$  и диффузии в системе, исходное вещество  $A$  и исходное вещество  $B$ , образующие продукт  $AB$ , уравниваются на границах разделения фаз  $A/AB$  и  $AB/B$ . При этом одновременно происходит и стабилизация градиентов концентрации отдельных компонентов системы (рис. 2.26). Поэтому, рассматривая течение реакции в твердой фазе, происходящей путем диффузии, кроме подвижности ионов надо учитывать и состояние равновесия на границах фаз. Если процессы диффузии приводят к возникновению в области диффузии новой фазы, имеющей иную структуру и зачастую иные свойства, чем у исходной фазы, то в отличие от рассмотренных выше случаев, в которых следствием диффузии было образование твердых растворов без изменений структуры и основных свойств кристаллов, в данном случае процесс диффузии замедляется из-за:

уменьшения потока диффундирующих атомов, поскольку атомы, проникающие в кристалл, прочно соединяются с его собственными атомами при образовании новой фазы;

увеличения со временем толщины новой фазы, через которую должны пройти диффундирующие атомы, чтобы попасть внутрь кристалла.

#### 2.4.4. Рассеяние механической энергии

Трение, как совокупность явлений в зоне контакта деталей трибологической системы, является диссипативным процессом, которому сопутствуют: выделение теплоты, превращения в ПС деталей ТС, электризация тел и т. п.

**Тепловые процессы.** Внутреннее трение, особенно в твердых телах, является их свойством, основанным на способности необратимого превращения в теплоту механической энергии, переданной телу в процессах деформации. Процессу деформации сопутствует нарушение термодинамического равновесия тела. Внутреннее трение включает в себя два явления: неупругость — отступление от законов теории упругости помимо отсутствия пластических деформаций и способность к вязкому противодействию течению, аналогичная вязкости жидкости или вязкоупругих тел.

В первом случае внутреннее трение связано с неупругими, или релаксационными, свойствами, которые не удается описать с помощью уравнений теории упругости. При деформации с конечной скоростью в трибологических процессах, обычно очень большой, в твердом теле или в его окрестностях происходит отклонение от термодинамического равновесия, вызывающее соответствующий релаксационный процесс (возврат в состояние равновесия). Этот процесс сопровождается рассеянием энергии упругости, т. е. необратимым преобразованием ее в теплоту. Проявлениями неупругих, или релаксационных, свойств являются возвращение упругости в чистых металлах и сплавах, термоупругость и др. Внутреннее трение во втором значении, т. е. явление, аналогичное вязкости жидкости и потому называемое квазивязкостью, возникает при воздействии на тело сил, приводящих к превышению предела упругости и пластическому



тчению материала в результате перемещений вдоль плоскостей скольжения.

Механизм рассеяния энергии в этом случае иной, он связан с трением взаимно перемещающихся плоскостей скольжения. Различия в механизмах рассеяния энергии определяют разность значений вязкости, достигающую 5—7 порядков (вязкость пластического течения, достигающая  $10^{14}$ — $10^{16}$  П, значительно превышает вязкость, рассчитанную на основании упругих колебаний и равную  $10^8$ — $10^9$  П, где  $1\text{ П} = 0,1\text{ Па}\cdot\text{с}$ ).

Фактический контакт сопрягаемых деталей происходит в нескольких точках, которые одновременно находятся под действием деформирующего напряжения от нормальной нагрузки и от нагрузки, вызванной трением.

Высокая концентрация энергии на небольших поверхностях при высоких скоростях скольжения в течение очень короткого периода времени приводит к температурной вспышке, которая может в течение милли- и даже микросекунд достигать сотен или даже тысячи градусов Цельсия.

В зависимости от количества этих импульсных источников теплоты и их конфигурации на поверхности трения будут различные значения температуры поверхности сопрягаемых деталей в макроизмерении. Представленные трибологические явления в макроизмерении являются результатом суперпозиции процессов, происходящих в микроизмерении. Размер областей, охваченных реакцией, можно считать очень большим по сравнению с молекулярными взаимодействиями.

Теплота, выделяющаяся в зоне контакта деталей ТС, температура и возникающий градиент температур приводят к структурным и фазовым превращениям в ПС этих деталей.

*Структурные и фазовые превращения.* Износостойкость металлов зависит от их металлографической структуры. Изучение влияния металлографической структуры на протекание процесса трения и, следовательно, изнашивания привело к «возникновению динамического металловедения».

Важнейшая задача динамического металловедения заключается в том, чтобы исследовать изменения струк-

туры и физико-механических свойств и особенно способности к взаимодействию материала в процессе трения в зависимости от факторов, вызванных трением. Кроме того, важно научиться управлять этими процессами и установить связь между первичными и вторичными структурами, образующимися после каждого этапа трения. Это означает, что на процесс трения влияют не только материал и его исходная структура, но и материалы и структуры, которые возникают в процессе взаимодействия. Понятие структуры включает фазовый состав, тип и характер кристаллической решетки, макро- и микроструктуру, а также количество и характер распределения дефектов кристаллической решетки (субструктуру).

Б. М. Грозин [2.20] показал, что в случае, когда температура трения превышает критические точки структурных превращений металлов, процессы трения характеризуются локальными структурными превращениями. Если температура ниже критической, то в небольших объемах закаленной стали могут происходить процессы отпуска. В реальных условиях трения кроме температуры на фазовые и структурные превращения одновременно влияют высокие напряжения в микроконтактах, а также химические реакции металла с окружающей средой.

Важной особенностью, характеризующей кинетику структурных процессов при трении, является то, что при превращении механической энергии в теплоту нагревание и охлаждение (передача теплоты металлу и окружающей среде) происходят с очень большой скоростью, в известных процессах термообработки скорость охлаждения и нагревания значительно ниже.

Широкий спектр структурных состояний возникает также в результате «точечной» закалки. В локализации процессов нагревания и охлаждения (закаливания) в микроскопических объемах вещества проявляется еще одна особенность процессов трения. При импульсном нагревании скорость нагревания слоя толщиной 100 мкм равна  $4 \cdot 10^5$ — $10^4$  °C/с, а скорость охлаждения  $10^3$ — $10^4$  °C/с.

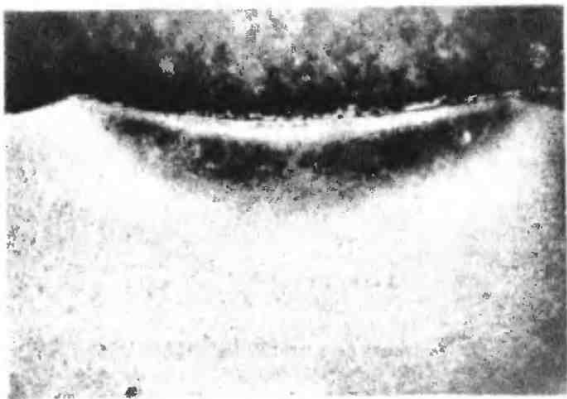


Рис. 2.27. Шлиф следа износа узла трения в условиях технического сухого трения

Среди превращений структуры ПС выделяются развитие дефектов кристаллической решетки и изменение строения металлов, связанное с изменением кристаллической решетки, образованием и растворением карбидов, диффузия элементов одного тела в другое и изменение их распределения, фазовые перемещения, кристаллизация и т. д.

В процессе трения в результате деформаций и значительных температур в ПС образуются вакансии. В нормальных условиях концентрация вакансий не превышает  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, при трении концентрация вакансий возрастает и достигает  $2,5 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Аналогично в процессе трения возрастает количество дислокаций.

В результате взаимодействия деталей ТС в условиях, когда возникает локальное заедание на металлографических шлифах, в зонах, примыкающих к следу износа, существуют зоны теплового воздействия с очень широким диапазоном проникновения. Из металлографических исследований трибологических деталей с сухим трением следует, что размеры отдельных зон и степень их перегрева зависят от количества выделившейся теплоты на фактических пятнах контакта, косвенно определяемого заданной мощностью трения  $(fpu)^{1/2}$ .

В процессе трения возникают аустенит и мартенсит трения. Первый является следствием вторичной закалки, которая может происходить при тре-

нии; мартенсит появляется в результате превращений вторичного аустенита. Количество возникающего аустенита трения зависит от исходной структуры, химического состава стали, концентрации железа в аустените и давления под поверхностью, из отпущенного мартенсита возникает «белый слой», не поддающийся травлению и характеризующийся очень большой твердостью:  $HV \approx 1000$  (рис. 2.27 и 2.28).

В последние годы появилось много работ, посвященных вопросам образования белых слоев на деталях машин и на деталях моделируемых сопряжений [2.21—2.23].

В [2.22] представлены новейшие сведения о природе фазовых превращений, происходящих при изнашивании, и дан критический обзор теорий образования белых слоев Уэлша, Эйра, Роджерса, Кавамото и Окабаяси, Шотки и Хильтенкампа. Авторы этих теорий имеют разные взгляды на адсорбцию азота из окружающей среды или углерода из смазочного материала, обогащающую ПС этими компонентами, но они единогласны в том, что высокая температура является обязательным условием фазовых превращений в ПС.

А. Торанс и А. Камерон [2.23] установили, что высокая температура является необходимым, но не достаточным условием для образования белых слоев в процессе трения. Дополнительным условием образования белых слоев являются высокие напряжения сдвига.

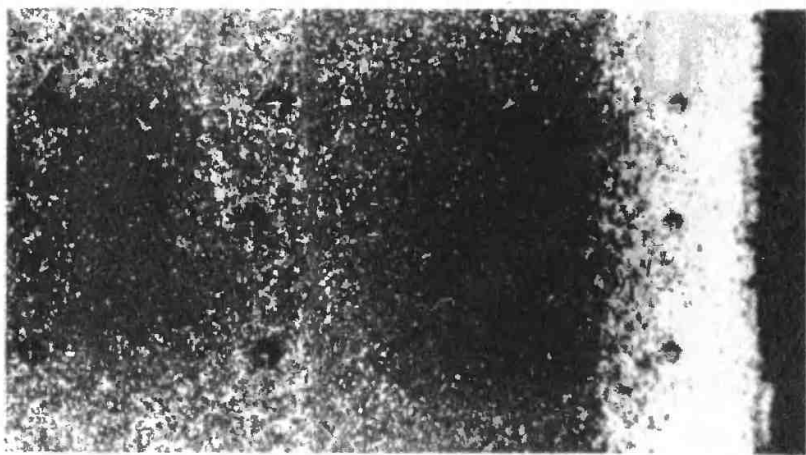


Рис. 2.28. Структурные превращения подповерхностных зон с образованием «белого слоя»

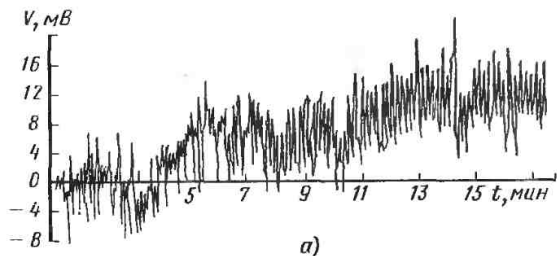
В соответствии с принятыми новейшими теориями мартенсит трения имеет сильно измельченные зерна, которые наблюдаются только при увеличении в 30 000 раз.

#### 2.4.5. Электростатика, электродинамика, электромагнитные и другие поля

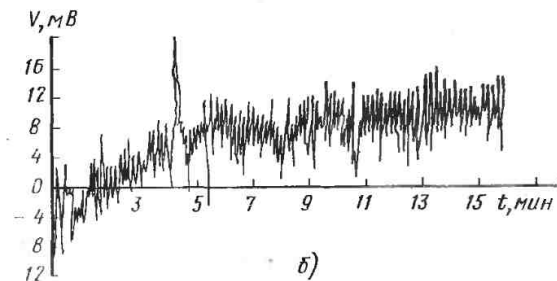
При трении двух диэлектриков, полупроводников или проводников с разным или одинаковым составом, с разной плотностью, при трении металла и диэлектрика, при взаимном трении жидких диэлектриков или трении жидких диэлектриков о твердые тела и т. п. всегда электризуются оба тела, участвующие в процессе трения. Их заряды имеют одинаковое значение и разные знаки. Электризация при трении отличается рядом закономерностей. При трении двух химически одинаковых тел положительный заряд получает тело с большей плотностью. Металлы при трении о диэлектрик получают отрицательный заряд, но если поверхность металла окислившаяся, то заряд может быть положительным. Электризация тел тем больше, чем больше поверхность контакта. При

трении двух твердых тел происходят локальные контакты и последующее разделение этих зон. В момент соприкосновения электроны и ионы переходят от одного тела к другому. Контактная электризация двух металлов, металла и полупроводника вызывается переходом электронов через границу раздела от тела с меньшей энергией выхода электронов к телу с большей энергией выхода (контактные напряжения). В случае контактирования металла с диэлектриком электризация происходит в результате перехода электронов из металла в диэлектрик и положительных ионов из диэлектрика на поверхность металла. При контактировании двух диэлектриков электризация является следствием диффузии носителей заряда от одного материала к другому. В процессе электризации важную роль играет нагревание тел при трении. Когда поверхность одного из тел нагревается больше, носители заряда переходят с локальных неоднородностей поверхности одного тела на другое.

В процессе исследований трибологических явлений при технической сухом трении металлов в возвратно-поступательном движении [2.24] отмечено образование и накопление значительных электрических потенциалов



а)



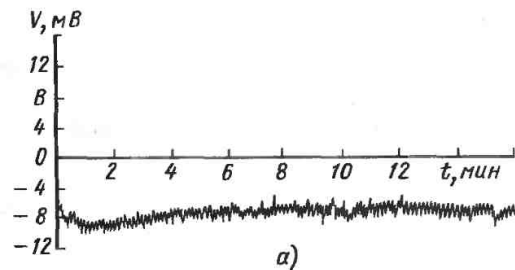
б)

Рис. 2.29. Разность потенциалов, возникающая в процессе технического сухого трения:

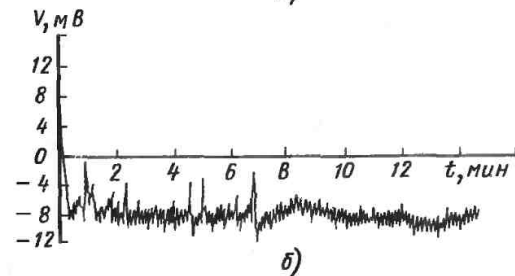
а —  $P = 66$  Н; б —  $P = 96$  Н; в сопряжении сталь 45 — тефлон ( $v = 1,42$  м/с)

(рис. 2.29). Введение диэлектрика (масла) между двумя взаимно перемещающимися проводниками приводит к образованию своего рода конденсатора, в котором могут накапливаться электрические заряды. Возникновение электрических зарядов возможно в ре-

зультате перемещения диэлектрика относительно поверхности металла. Определенное влияние могут иметь и другие электрокинетические явления (рис. 2.30) [2.24]. С учетом того, что при трении в присутствии смазочного материала пленка смазки может раз-



а)



б)

Рис. 2.30. Разность потенциалов, возникающая при трении в присутствии смазочного материала ( $P = 96$  Н;  $v = 1,42$  м/с) в сопряжении сталь 45 — тефлон:

а — фрикция Р1; б — «Брайсток»

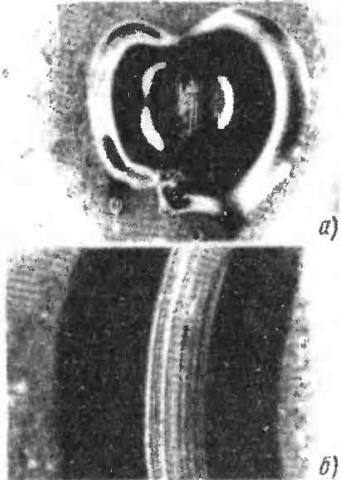


Рис. 2.31. Следы износа с явлениями миграции масла при смазывании тонкой пленкой

рваться на микронеровностях, возможно появление электрических явлений, особенно при больших нагрузках, аналогичных явлениям, имеющим место при сухом трении [2.25]: эмиссия электронов, термоэлектрические явления, контактная разность потенциалов и т. д.

В результате сближения микронеровностей наэлектризованных поверхностей на некотором расстоянии, зависящем от разности потенциалов, могут произойти местные пробои диэлектрика и перенос электрических зарядов с одной поверхности на другую аналогично атмосферным разрядам. Перемещающиеся электрические заряды становятся источником магнитного поля. Магнитное поле в свою очередь является одной из форм электромагнитного поля, действующего на тела с электрическим зарядом или на тела, имеющие магнитный момент, независимо от того, движутся они или находятся в состоянии покоя.

В трибологических процессах часто наблюдаются процессы, являющиеся последствиями суперпозиции поля напряжений, электромагнитного поля, теплового поля, диффузии, фазовых и структурных превращений и т. п.

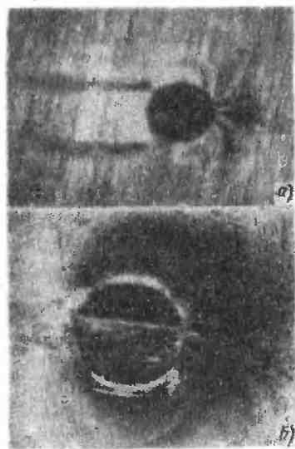


Рис. 2.32. Следы износа и образовавшиеся отложения:

а — в начале взаимодействия; б — после длительного взаимодействия

Объяснение наблюдаемых последствий работы ТС возможно благодаря знанию рассмотренных выше вопросов.

В [2.26] подробно рассмотрены физические явления, сопровождающие трение, для деталей ТС, смазанных тонким слоем масла, и отмечена поверхностная миграция масла в зону контакта (рис. 2.31, а, б).

Оказалось, что на молекулы масла действуют значительно более сильные факторы, чем гравитационные и центробежные силы, действующие на масло на поверхности деталей трибосопрежения. При контактировании обильно смазанных деталей ТС вокруг следов износа сопрягаемых деталей наблюдается характерный рисунок (рис. 2.32, а, б), напоминающий силовые линии магнитного поля.

На этих рисунках хорошо видны темные продукты старения масла и продукты износа деталей ТС, образующиеся в процессе трения. Их интенсивность определяется временем взаимодействия деталей трибосопрежения. При проведении опытов с маслом, содержащим большое количество ПАВ, обнаружено, что рисунки, образовавшиеся вокруг следов износа в процессе работы, после удаления отложений

осталось в виде твердых налетов, это свидетельствует о существовании в этих областях активных центров, благоприятствующих реакциям с ПАВ. Поэтому надо искать дополнительный компонент механизма образования характерных рисунков вокруг следа в виде еще какого-то поля, а не только магнитного, как это утверждали, не отрицая важной роли последнего, Шнурмайн и Педерсен.

Для объяснения этого явления используется дислокационная теория пластической деформации и упрочнения ПС, а также модель образования кольцевых тепловых потоков при трении скольжения, предложенная Шамшуром. Полученные на поверхности рисунки являются макроскопическими картинами суммы микроскопических процессов, происходящих в трибосопрежении вследствие трибологических воздействий. В экспериментах по сухому трению получено, что распределение температуры в зонах, прилегающих к следу износа, оцениваемое на основании цветов, имеет кольцевую симметрию. Аналогичную симметрию имеет поле напряжений, вызванное приложенной нагрузкой, как это следует из распределения изохром на фотографиях, полученных в результате эластооптических исследований, проведенных некоторыми авторами [2.15, 2.27].

В зоне контакта кроме упругих деформаций имеют место пластические деформации. Пластическая деформация верхних слоев трущихся тел характеризуется неоднородностью, объясняемой разными причинами. Прежде всего разной высотой и формой неровностей поверхностей контакта определяется протекание пластической деформации при разнородных условиях (скорости, степени деформации, температуре и т. д.). На неоднородность пластической деформации ПС большое влияние оказывает температура. При пластических деформациях разного рода микро-, макро- и субмикрообъемов в зоне трения возникает большое количество разнообразных структурных дефектов: вакансии, атомы в междоузлиях, дислокации разного типа и т. п., которые начинают перемещаться.

При трении скольжения в процессе пластической деформации металла часть дислокаций выходит на поверхность, образуя на ней активные центры. Надо также учитывать упругие деформации решетки, с которыми связаны изменения электронной плотности. Все это указывает на существенное значение изменений, происходящих в ПС детали трибосопрежения и ее ближайшем окружении, в механизме образования характерных рисунков вокруг следа износа. Добавим к этим причинам гидродинамический поток масла, который, движимый вращающейся деталью сопряжения, подхватывает при входе и выходе частицы, концентрически отложившиеся на неподвижной детали вокруг следа контакта, изменяя характер их распределения (см. рис. 2.32, б).

## 2.5. ВЛИЯНИЕ МИКРОСРЕДЫ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

Динамические характеристики ТС являются детерминированными характеристиками внешнего воздействия, включающего кинематику и динамику механического, теплового, электрического нагружения и коррозионного воздействия.

Каждая из этих характеристик описывает разные физические величины и особенно изменения этих величин, например скорости скольжения или качения, нормальной или касательной силы в зоне трения, температуры, степени загрязнения и т. п.

### 2.5.1. Процессы физического старения деталей трибологической системы

Основными процессами физического старения деталей ТС являются трибологическое изнашивание и коррозия. Оба процесса действуют одновременно с разной интенсивностью.

Оно вызвано разрушением ПС из-за декогезии материала. Размер частиц продуктов износа обычно 0,1—30 мкм. Физическое старение деталей машин

в результате трибологических процессов может быть вызвано изменением формы без потери массы либо зонным перетеканием вещества. Износ может быть вызван потерей массы, пропорциональной пути трения, или накоплением необратимых изменений, вызывающих упругие и пластические деформации, являющиеся зародышами декогезии. Износ поверхностных неровностей зависит от нормальной нагрузки на трибологический стык, скорости смещения и геометрии, характеризуемой отношением  $h/R$ , где  $h$  — глубина внедрения;  $R$  — радиус отдельной неровности. По И. В. Крагельскому значение параметров  $h/R$  определяет вид контакта: упругий, пластический или микрорезание [2.28].

Другой характерный параметр процесса трибологического изнашивания — соотношение  $\tau/R_{pl}$ , где  $\tau$  — касательные напряжения на поверхности трения;  $R_{pl}$  — предел пластичности основного материала (ОМ).

Можно выделить различные виды образования частиц при трибологическом изнашивании. Классифицировать элементарные процессы трибологического изнашивания трудно, в общем случае их можно разделить на кумулированные и мгновенные. Такое разделение имеет практическое и теоретическое значение [2.28—2.30].

Мгновенные процессы трибологического изнашивания вызываются механическим воздействием при превышении порога внешнего трения в зонах контакта выступов. Процесс внедрения неровностей более твердых материалов в менее твердые вызывает пластическое отеснение, микрорезание, царапание или срезание внедряющихся неровностей.

При кумулированном трибологическом изнашивании разрушение — это накопление последствий внешних воздействий и декогезии вещества. Результатом накопления будут упругие и пластические деформации и образование трибологических соединений.

На практике трибологическое изнашивание машин включает абразивное, адгезионное, окислительное изнашивание, питтинг и фреттинг, а для электрических контактов еще и фриттинг. Обязательное условие абразивного из-

нашивания — большая твердость тела, вызывающего изнашивание, чем твердость изнашиваемого тела.

## 2.5.2. Коррозия

Коррозия — это совокупность химических, электрохимических и физико-химических процессов, вызванных действием макро- и микросреды и приводящих к физическому старению деталей машин. Коррозионное и эрозионное разрушения в некоторых случаях трудно различить, например разрушение гребных валов кораблей. Коррозионное разрушение деталей машин начинается с поверхностных зон ПС и с разной интенсивностью распространяется в глубь материала ПС и ОМ.

Явление коррозии металла заключается в том, что в его ПС протекает многофазная химическая или электрохимическая реакция окисления, в результате которой металл переходит в окисное состояние (ионное).

Химическую реакцию окисления можно представить следующим образом:



Эта реакция будет в состоянии химического равновесия, если молекулярное давление (парциальное) кислорода  $p_{\text{O}_2}$  и давление диссоциации кислорода  $p_{\text{MeO}}$  равны.

Если  $p_{\text{O}_2} > p_{\text{MeO}}$ , то реакция происходит в направлении образования окисла. В противном случае направление реакции обратно, окисел будет подвержен диссоциации и разложению на металл и кислород. Такой анализ позволяет определить, в каких условиях процесс коррозии термодинамически вероятен, а в каких нет.

Характерная черта процесса химической коррозии — это образование продуктов коррозии, прилегающих к поверхности металла. Эти продукты образуют пленки, нарастание которых зависит от возможности проникновения через них элементов, вызывающих коррозию. Одним из основных факторов, характеризующих способность пленки продуктов коррозии к

торможению дальнейшего процесса окисления металла, является ее плотность. Защитные свойства образующейся пленки продуктов коррозии можно прогнозировать.

Независимо от модели нарастания пленки механизм процесса коррозии может быть различным в зависимости от направления диффузии. Если существует диффузия ионов металла через пленку окисла, то зона нарастания пленки будет находиться на внешней поверхности, и наоборот, диффузия кислорода приведет к тому, что зона нарастания пленки будет на границе металла и окисла. Может случиться, что интенсивность диффузии металла и кислорода будут сравнимы, тогда зона нарастания будет находиться внутри пленки.

Процесс электрохимической коррозии состоит из анодного (переход металла в раствор в виде свободных ионов с одновременным образованием равновесного количества электронов) и катодного процессов (ассимиляция накапливающихся свободных электронов каким-либо дедоляризатором: молекулами кислорода, ионами водорода и т. п.). Эти процессы сопровождается электрический ток, обусловленный электронами во внешней контуре и ионами в электролите.

Мерой интенсивности коррозии может быть ток коррозии, пропорциональный разности потенциалов на электродах,

$$I = (E_K - E_a)/R, \quad (2.33)$$

где  $E_K$ ,  $E_a$  — потенциалы катода и анода;  $R$  — активное сопротивление системы.

В реальных системах существует множество причин, вызывающих образование, по меньшей мере, двухэлектродных систем. Одна из них — неоднородности во внутренней структуре металла, потому что в технике практически не применяются химически чистые металлы. В зависимости от потенциала основного металла  $A$  и притеси  $B$  будут образовываться соответствующие анодные и катодные точки: металл с более отрицательным потенциалом образует анод и подвергается коррозии, а металл с более положительным потенциалом образует катод

и не подвергается окислению (но может наблюдаться водородная хрупкость из-за диффузии выделяющегося атомарного водорода). Кроме того, развитию коррозионных процессов способствует расклинивающее действие среды (влаги) вследствие адсорбции (эффект Ребиндера). Несомненно, это явление оказывает решающее влияние на процесс коррозии в неэлектролитах, а в электролитах оба явления могут наблюдаться одновременно.

## 2.6. ВЛИЯНИЕ МАКРОСРЕДЫ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

Трибологическое изнашивание является результатом процессов в зонах трения, вызываемых свойствами трибологических деталей и внешним воздействием.

### 2.6.1. Влияние нагружения на интенсивность изнашивания зоны трибологического контакта

Нагружение зоны контакта существенно влияет на интенсивность изнашивания при абразивном изнашивании, которая обычно пропорциональна давлению (линейно и нелинейно) и пути трения. Интенсивность адгезионного изнашивания также пропорциональна давлению (нелинейно). На границе перехода от схватывания  $I$  рода к схватыванию  $II$  рода рост нагружения сокращает время перехода. Нагружение зоны трения, в которой изнашивание материалов является следствием питтинга, оказывает основное влияние на интенсивность изнашивания. Разрушение при питтинге заключается в образовании мелких трещин и в последующем отслаивании материала с типично усталостным характером.

Усталостная прочность характеризуется количеством циклов нагружения, она, в частности, обратно пропорциональна давлению в третьей степени

$$p^3 \sigma = \text{idem}, \quad (2.34)$$

где  $p$  — давление;  $\sigma$  — усталостная прочность.



Незначительное увеличение нагружения зоны трения приводит к значительному снижению усталостной прочности. Увеличение нагружения зоны трения может быть вызвано внешним нагружением или динамическим действием движущихся масс. При фреттинге износ линейно зависит от нагружения, если амплитуда скольжения постоянна. Кривая зависимости интенсивности изнашивания от нагружения имеет форму усталостной кривой Вёлера. На диаграмме можно выделить период ограниченной и неограниченной прочности. При небольшом нагружении процесс изнашивания в результате фреттинга в принципе не существует даже при количестве циклов больше  $10^{10}$ .

Из сказанного выше следует, что нагружение является основным фактором, определяющим интенсивность изнашивания при всех механизмах разрушения материалов в зонах трения.

## 2.6.2. Влияние относительной скорости в зоне трибологического контакта на интенсивность изнашивания

Относительная скорость перемещений в зоне контакта является главной характеристикой спектра воздействий, вызывающих трибологическое изнашивание деталей машин. При абразивном изнашивании относительная скорость в зоне трения имеет незначительное влияние на интенсивность изнашивания в диапазоне малых скоростей. Если при сухом трении относительная скорость превышает некоторое предельное значение, то возникают лавинные процессы резания, царапания, приводящие к аварийному износу (заеданию).

При большой скорости движения охлаждающей или смазывающей жидкости, загрязненной абразивными частицами, может возникнуть эрозийное изнашивание, значительно интенсифицирующее процесс. Если в ТС ведущим процессом физического ста-

рения является адгезионное изнашивание, то относительная скорость перемещения в зоне контакта оказывает большое влияние на качественные и количественные характеристики схватывания. При практическом встречаемом диапазоне относительных скоростей в зоне трибологического контакта машин протекают три основных процесса: схватывание I рода, схватывание II рода, окисление.

Схватывание I рода наблюдается у металлов обычно при скорости 0,0025—0,5 м/с и приводит к образованию на поверхности трения углублений, наростов, царапин при значительном изменении шероховатости. Толщина пластически деформированной подповерхностной зоны 100—150 мкм, ее микротвердость 4500 МПа. Температура зон трибологического контакта при схватывании I рода 60—180 °С, коэффициент трения 0,6—1,1.

При относительной скорости 0,5—1 м/с износ в зонах трибологического контакта вызывается процессами окисления. При скорости 1—5 м/с процессом разрушения зоны трибологического контакта является схватывание II рода, характеризующееся очень интенсивным изнашиванием металла. В результате этих процессов изнашивания поверхность становится очень шероховатой с отчетливыми следами течения и размазывания материала параллельно направлению относительного движения. Процесс схватывания сопровождается температурой около 400 °С и даже до 1000—1100 °С. Такое термическое состояние сталей в зонах трения вызывает рекристаллизацию, отпуск и закалку металла ПС и образование вторичных структур. Микротвердость подповерхностных зон ПС 450—10 500 МПа.

При фреттинге скорость относительного смещения не оказывает существенного влияния на развитие усталостных трещин. А вот скорости качения и скольжения существенно сказываются на толщине эластогидродинамического слоя, влияющего на образование усталостных трещин. При фреттинге значительное влияние на интенсивность процесса изнашивания оказывает количество циклов.

### 2.6.3. Влияние температуры зон трения металлов на интенсивность процессов изнашивания

В трибологических процессах интенсивность изнашивания материалов деталей ТС (твердые тела, жидкости), как правило, возрастает с увеличением температуры. При абразивном изнашивании количество теплоты, выделяющейся в зоне трения, невелико, потому что почти вся энергия расходуется на образование новых поверхностей. При небольших относительных скоростях скольжения температура существенно не повышается, поскольку теплота работы трения интенсивно отводится из зоны трения материалами контактирующих деталей и среды. В случае адгезионного изнашивания влияние температуры на интенсивность процесса существенно, потому что она благоприятствует схватыванию металлов.

Адгезионное изнашивание схватыванием II рода зависит в основном от температуры трибологических деталей. Максимальная температура поверхности трения  $\vartheta_{\max}$  равна сумме объемной температуры  $\vartheta_0$ , среднеповерхностной  $\vartheta^*$  и температурной вспышки  $\vartheta_{\text{всп}}$  вызванных трением,

$$\vartheta_{\max} = \vartheta_0 + \vartheta^* + \vartheta_{\text{всп}}. \quad (2.35)$$

Температура является важнейшим параметром адгезионных процессов и их интенсивности.

При схватывании I рода температура существенно влияет на интервал процесса: чем выше температура, тем уже интервал. При схватывании II рода увеличение температуры зон трения приводит к расширению границ существования этого процесса. С увеличением температуры изменяется химический состав материала ПС и уменьшается концентрация легирующих присадок из-за интенсификации диффузии из подповерхностных зон на поверхность металла, где легирующие присадки окисляются.

Изнашивание при схватывании I рода имеет место при температуре 100—180 °С, изнашивание вследствие окисления — при температуре 180—

560 °С и вследствие схватывания II рода — при температуре 560—1200 °С [2.29, 2.31, 2.32].

Если зоны трения изнашиваются вследствие питтинга при смазке, то влияние температуры на интенсивность процесса незначительно. Температура существенно влияет на вязкость масла и сорбционное действие присадок, и с этой точки зрения рост температуры интенсифицирует усталостное изнашивание. Влияние температуры на интенсивность фреттинг-изнашивания неоднозначно. На воздухе увеличение температуры приводит к снижению интенсивности изнашивания материалов, а в защитных средах к росту интенсивности.

Для хорошо механически обработанных поверхностей существует температура перехода, при которой износостойкость возрастает. Для меди эта температура около 50 °С, для стали 140 °С. При температуре около 500 °С интенсивность фреттинга невелика, потому что окислы, выполняющие функцию твердой смазки в зоне трения, стабильны.

Из сказанного можно сделать вывод, что температура оказывает различное влияние на разные процессы трибологического изнашивания твердых тел.

### 2.6.4. Влияние смазывания зоны трибологического контакта на интенсивность изнашивания

Смазываемые зоны трения изнашиваются значительно менее интенсивно, чем зоны при сухом трении. Смазываемые эластогидродинамические и гидродинамические узлы трения обычно не подвержены абразивному изнашиванию. Поэтому стационарность гидродинамической смазки, зависящая от вязкости смазочного материала и его склонности к адсорбции и хемосорбции, практически исключает абразивное изнашивание зон трения. С увеличением вязкости смазочного материала вообще уменьшается интенсивность изнашивания трибологических деталей. Сорбционные свойства

смазочного материала, особенно с полимерно-активными присадками, влияют на интенсивность изнашивания ПС деталей машин, поскольку они увеличивают способность к образованию граничных пленок. Смазочные материалы уменьшают интенсивность изнашивания деталей машин также вследствие вымывания продуктов износа из зон трения.

При адгезионном изнашивании смазка существенно снижает интенсивность изнашивания деталей машин, поскольку адсорбируемые ПАВ пластифицируют материалы ПС.

Очень сложно влияние смазочного материала на интенсивность питтинга. Вязкость смазочного материала вообще увеличивает усталостную прочность деталей машин. Интенсивность питтинга зависит от толщины эластогидродинамической пленки и высоты неровности в зоне трения.

Эффективность эластогидродинамической смазки зон трения зависит не только от вязкости смазочного материала, но и от индекса вязкости и давления, т. е. от пьезокоэффициента вязкости.

Смазывание зон трения значительно ограничивает их изнашивание по сравнению с изнашиванием при сухом трении, поскольку смазочный материал улучшает передачу нагрузок, снижает сопротивление трения и количество выделяющейся теплоты, отводит продукты износа (например, окислы металлов), отводит теплоту.

## 2.7. СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ

Свойства поверхностных зон ПС описывается совокупностью параметров его состояния.

### 2.7.1. Остаточные напряжения в ПС

В результате действия на металл внешних нагрузок положение атомов в кристаллической решетке выходит за минимальный уровень кинетиче-

ской энергии, нарушая структуру решетки и приводя к определенному напряженному состоянию материала. После устранения нагрузки только часть атомов займет исходное положение, остальные же будут смещены, из-за чего возникнут остаточные напряжения.

В зависимости от размера области, в которой возникают напряжения, различают остаточные напряжения первого, второго и третьего рода.

Остаточные напряжения первого рода, называемые также макронапряжениями, уравниваются в границах областей, размеры которых соизмеримы с размерами тела. В плоскопараллельных слоях напряжения первого рода постоянны, они изменяются в направлении, перпендикулярном к поверхности (почти всегда имеется градиент напряжений первого рода в сечении, перпендикулярном к ПС).

Напряжения второго рода, называемые микронапряжениями, занимают области, соизмеримые с объемом отдельных кристаллитов или групп кристаллитов. Они существуют в плоскостях скольжения и среди блоков мозаичной структуры.

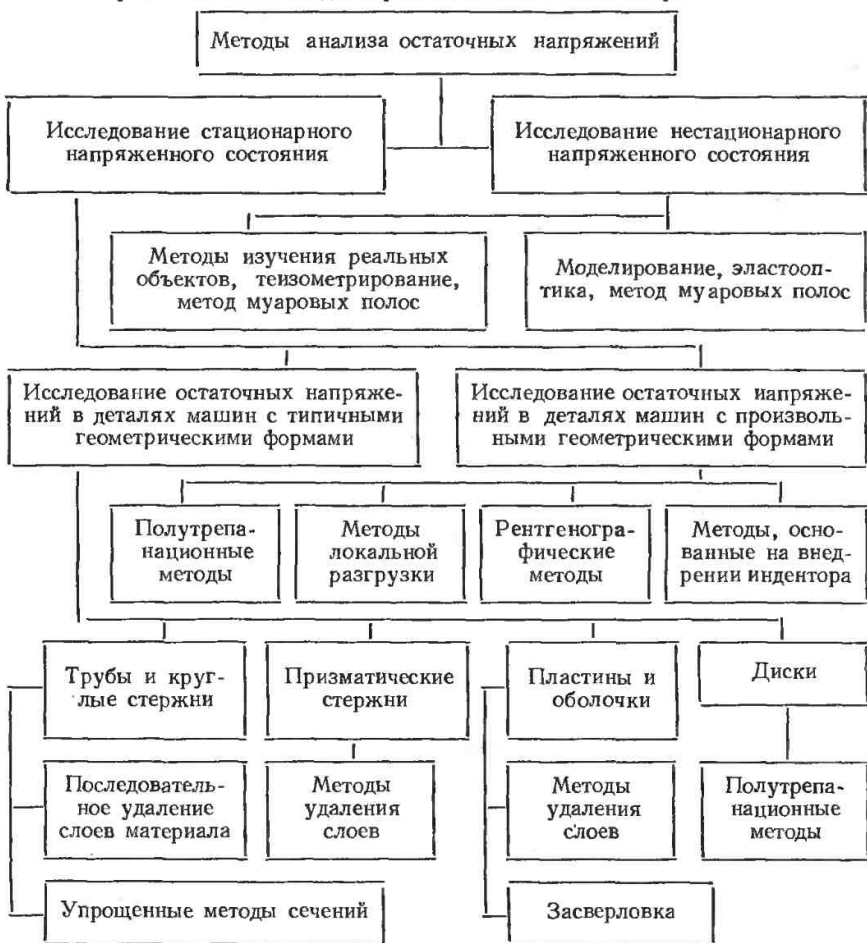
Остаточные напряжения третьего рода изменяются в субмикроскопических областях. Они уравниваются в небольших группах атомов, лежащих на границах блоков мозаичной структуры, в плоскостях скольжения и т. п.

Экспериментальные исследования стационарных и нестационарных остаточных напряжений могут быть выполнены одним из методов, указанных в табл. 2.1.

Методы удаления последовательных слоев напряженного материала просты и удобны для количественных оценок с использованием, например, тензометрирования. Однако это разрушающие методы, и поэтому они не имеют больших перспектив при изучении свойств ПС.

Полутрепанационные методы (засверловка, локальное снятие напряжений) не подходят для изучения состояния ПС, потому что они разрушающие и у них невысока точность. Эти методы и особенно методы срезания

## 2.1. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений



Методы разгрузки, связанные с удалением слоев: Закса, Давиденкова, Ка-лакуцкого, Мартенса, Хейна, Эспэя, Дентана, Александра, Андерсона, Фольмана, Вайсмана, Филлиса.

слоя напряженного материала требуют соответственно большой измерительной базы и могут использоваться исключительно как сравнительные методы, особенно при теоретическом анализе остаточных напряжений.

Определенное значение в анализе распределения остаточных напряжений в ПС могут иметь моделирование

и особенно эластооптические методы. Эти методы могут использоваться для качественных исследований остаточных напряжений в ПС.

Особую группу методов измерения остаточных напряжений составляют методы внедрения индентора. Интересным неразрушающим методом измерения этих напряжений является ме-

тод Оппеля, применяемый для оценки поля напряжений на основании измерения отпечатков при внедрении индентора Кнупа. На основании тщательного анализа механических и физических методов экспериментальных исследований остаточных напряжений отмечено существование большого количества методов, основанных на одном и том же принципе и тех же самых теоретических предположениях и гипотезах, например методов последовательного удаления слоев. Поэтому выбор метода измерения остаточных напряжений зависит, в частности, от того, какой вид напряжений предстоит измерять.

Механические методы (трепанационные, полутрепанационные, локального снятия напряжений, внедрения индентора) позволяют измерять макронапряжения путем измерения деформаций. Механические методы, вообще говоря, являются разрушающими методами. Часто с их помощью измеряются реальные деформации и на их основании определяется реальное напряженное состояние материала. Частично снятые напряжения часто зависят от геометрической формы измеряемой части образца.

Постепенно срезая напряженные слои материала, можно приближенно определить релаксационное напряженное состояние линейной зависимостью. В процессе релаксации напряжений измеряют остаточное напряжение, зависящее от реакции на границе среза, т. е. измеряются напряжения первого рода.

Напряжения первого, второго и третьего родов можно мерить с применением физических методов. К известным физическим методам измерений остаточных напряжений относятся, в частности, методы измерений магнитных свойств, электрического сопротивления, термоэлектродвижений силы и внутреннего трения как функций напряженного состояния материала. Указанные методы позволяют сделать качественную оценку напряженного состояния в материале, это неразрушающие методы, их можно использовать

К физическим методам относятся и рентгеновские, с помощью которых можно определять параметры кристаллографической решетки. По фотометрическим или дифрактографическим кривым, построенным при разных углах падения излучения на исследуемый образец, либо путем сравнения для напряженного и ненапряженного материала можно определить напряжения первого, второго и третьего родов.

Измерение напряжений рентгеновскими методами может быть выполнено только при ограниченной толщине ПС, потому что монохроматическое излучение, используемое для определения константы кристаллической решетки, проникает в толщу материала не более чем на несколько десятков микрометров, но и не менее чем на несколько микрометров.

Теоретический анализ методов исследований остаточных напряжений и эксперименты являются основой предложений, касающихся принятия и внедрения следующих методов изучения поля остаточных напряжений в ПС: Вайсмана—Филлипса, рентнографических, Оппеля, Краузе и др.

Кроме количественного изучения распределения остаточных напряжений в ПС, целесообразен тщательный анализ физических явлений, сопутствующих возникновению самого ПС. Такой анализ необходим при целенаправленном формировании свойств ПС. Существующие методы подбора условий механической обработки плохо учитывают эксплуатационную прочность машин.

## 2.7.2. Упрочнение материала ПС

Один из показателей упрочнения материала — это увеличение твердости металла или плотности дислокаций. При определении упрочнения материала ПС не пользуются методами измерения плотности дислокаций, если изучается материал сложной структуры. В физической интерпретации явления упрочнения материала ПС,

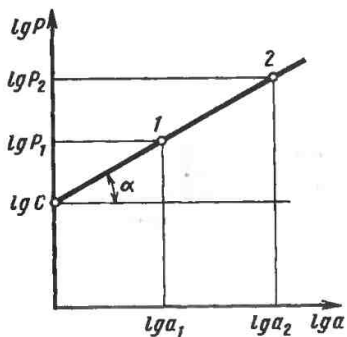


Рис. 2.33. График уравнения  $\lg P = \lg c + n \lg a$

плотности дислокаций позволяет судить о механизме упрочнения. Плотность дислокаций можно изучать путем подсчета ямок травления при использовании метода выборочного травления либо рентгеновских методов.

Количественные исследования упрочнения материала ПС проводятся, как правило, измерением микротвердости. На основании различия микротвердости недеформированного и деформированного материала определяют упрочнение. Из множества известных методов измерения микротвердости для определения значения упрочнения применяется только метод внедрения индентора. Широкое распространение и большая точность измерений микротвердости методов внедрения индентора Виккерса или Кнупа делают их наиболее пригодными для исследования упрочнения ПС. Нагрузка на индентор Виккерса или Кнупа находится в диапазоне 0,49—1,96 Н.

Микротвердость материала ПС, измеряемая методом Виккерса, вычисляется следующим образом:

$$HV = 1854,4 P/a^2,$$

где  $P$  — сила нагружения, Н;  $a = (a_1 + a_2)/2$ .

При определении микротвердости надо учитывать закон Майера, потому что существует различие в характере деформаций исследуемого материала под вершиной пирамид и под ее краями. Особенно большое значение имеет это

при определении градиента упрочнения ПС изучаемого материала на наклонной плоскости, поэтому что индентор в этом случае слабо нагружается (небольшая часть отпечатка). Чем меньше внедрение пирамиды в исследуемый материал ПС, тем больше влияние различия деформаций материала под вершиной и краями пирамиды на точность измерения микротвердости.

Значение коэффициента  $n$  (рис. 2.33) при измерении микротвердости пирамидой Виккерса не является постоянным для данного материала, оно изменяется с изменением нагрузки на внедряемый индентор. Чем больше нагрузка, тем больше значение коэффициента Майера приближается к 2 (при нагружении индентора Виккерса в диапазоне микротвердости  $n = 2$ ).

На практике можно принять, что в диапазоне нагрузок 0,49—1,96 Н значение  $n$  постоянно для данного материала. Значение  $n$ , как правило, больше для мягких материалов и меньше для твердых. Состояние упрочнения материала ПС количественно определяется в относительных единицах, поэтому можно не учитывать влияние указанных факторов на точность измерений при условии, что измерения проводятся при одинаковой нагрузке. Микротвердость определяется по формуле

$$HV = 1854,4 ca^{n-2},$$

причем значения постоянных  $c$  и  $a$  вычисляются из соотношения

$$\ln P = \ln c + n \ln a.$$

Надо построить прямую этого уравнения в координатах  $POa$  в двойной логарифмической системе. Тангенс наклона прямой равен значению коэффициента  $n$ .

Сделав в исследуемом материале два отпечатка пирамидой Виккерса, получают данные для вычисления  $n$ :

$$n = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln a_2 - \ln a_1}.$$

Измерение микротвердости методом Кнупа основано на вдавливании пирамиды, в основании которой ромб. Отношение диагоналей ромба  $l : a = 7,114$ . Мерой твердости материала

по Кнупу является отношение нагрузки на индентор к площади проекции отпечатка

$$HK = 14,228 \frac{P}{l^2},$$

где  $P$  — нагрузка на индентор, Н;  $l$  — длина большей диагонали, мкм.

Метод Кнупа обеспечивает более высокую точность измерений, чем метод Виккерса. Кроме того, при одинаковой нагрузке индентор Кнупа значительно меньше внедряется в исследуемый материал, чем индентор Виккерса, поэтому метод Кнупа лучше, особенно при определении градиента упрочнения ПС на наклонной плоскости. При одинаковой нагрузке на инденторы Виккерса и Кнупа большая диагональ отпечатка в методе Кнупа больше, чем в методе Виккерса, поэтому относительная погрешность измерения методом Кнупа меньше. При измерении микротвердости методом Кнупа большая диагональ не изменяется в результате упругих деформаций материала после снятия нагрузки, поэтому точность измерений выше. С помощью этого метода можно определять изотропность кристаллитов в изучаемом материале ПС.

### 2.7.3. Структурные превращения материала ПС

В ПС могут происходить изменения электронной структуры химических элементов, структуры кристаллитов и фазовой структуры.

Электронную структуру и структуру кристаллитов изучают рентгеновскими методами (методы структурного анализа). Рентгенограммы расшифровывают, сравнивая их с эталонами структур. Фазовые структуры (микроструктуры) изучаются с помощью оптического или электронного микроскопа. Определение фаз или структурных составляющих проводят с учетом количества, распределения, формы и других параметров, связанных с протеканием процессов, формирующих структуру ПС. Микроструктура ПС изучается с помощью металлографии на наклонных и тонких шлифах.

На наклонном шлифе можно наблюдать структуры с помощью оптического (металлографического) или электронного микроскопа после приготовления соответствующих реплик. Фаза отделена от остального металла поверхностью раздела (граница фаз), для нее справедливо правило Гиббса. С помощью микроскопа можно изучать также межметаллические фазы и отдельные структурные составляющие.

Распределение фаз и структурных составляющих может быть равномерным, нерегулярным, спорадичным или сосредоточенным в определенных местах поперечного сечения вследствие, например, сегрегации, ликвидации и разложения на слои. Субмикроструктуры и микроструктуры изучают с помощью электронного микроскопа с использованием техники реплик или рассеяния электронов, проходящих через тонкую фольгу.

Приготовление шлифов в начальных стадиях (получение образцов, шлифование, полирование) одинаково в оптической и электрической металлографии. Особого внимания требуют травление и очистка поверхности образца после травления. Образцы полируют механически, но очень тщательно, чтобы при 500-кратном увеличении оптическим микроскопом не было видно царапин. Мягкие металлы полируются электромеханическим методом, потому что механические методы оставляют царапины. Электромеханическое полирование деформирует области вокруг включений и оставляет неровности. При механическом полировании перед окончательным травлением надо удалить слой Бейльби.

Шлифы можно травить химически и электрохимически. Реже применяется тепловое травление путем испарения в вакууме или ионное бомбардирование поверхности в разреженных газах. Вид реактива, его концентрация и время действия определяются экспериментально в зависимости от вида изучаемого материала, его структуры и цели работы.

Вообще говоря, для электронной металлографии применяются реактивы, селективное воздействие которых на отдельные фазы выражается прежде всего различием в скорости

## 2.2. Зависимость между значениями размера зерен, исследуемых разными способами

Номер зерна по ASTM, $N$	Среднее количество зерен на $1 \text{ дм}^2$ при увеличении в 100 раз, $n = 2^f - 1$	Средняя площадь поперечного сечения зерна		Диаметр сечения круглого зерна $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ , мм	Среднее количество зерен		Общая средняя площадь	
		при увеличении в 100 раз, $A' = \frac{1}{n}$ , $\text{дм}^2$	фактическая, $A = 0,0645A'$ , $\text{мм}^2$		в $1 \text{ дм}^2$ , $m'$	в $1 \text{ мм}^2$ , $m$	$s'$ , $\text{м}^{-2}$	$s$ , $\text{мм}^{-2}$
—1	0,25	4	0,258	0,574	91 200	5,6	125	4,7
0	0,5	2	0,129	0,406	261 000	15,9	170	6,7
1	1	1	0,0645	0,287	739 000	45,1	240	9,5
2	2	0,5	0,0323	0,203	2 090 000	128	340	13,4
3	4	0,25	0,0161	0,144	5 090 000	360	480	18,9
4	8	0,125	0,00806	0,101	16 700 000	1 020	675	26,7
5	16	0,0625	0,00403	0,0718	47 300 000	2 880	961	37,8
6	32	0,0313	0,002022	0,0507	134 000 000	8 160	1360	53,4
7	64	0,0156	0,00101	0,0359	378 000 000	23 000	1920	75,6
8	128	0,0078	0,000504	0,0254	1 070 000 000	65 300	2720	107
9	256	0,0039	0,000252	0,0179	3 030 000 000	184 000	3840	151
10	512	0,0020	0,000126	0,0127	8 560 000 000	522 000	5430	214
11	1024	0,0010	0,000063	0,0090	24 200 000 000	1 470 000	7690	302



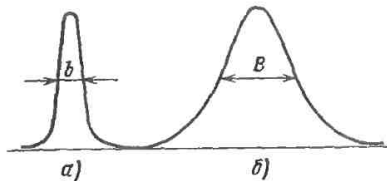


Рис. 2.34. Порошковые рентгенограммы кристаллического кварца с зернами: а — большими; б — малыми

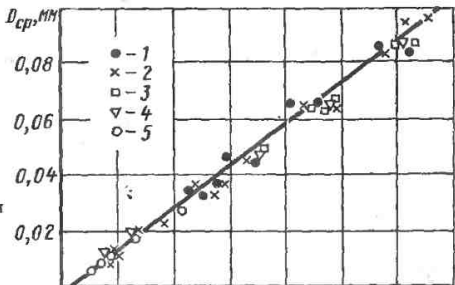


Рис. 2.35. Зависимость между размером дифракционных пятен и средним диаметром зерна  $D_{ср}$ : 1, 3 — малая камера; 2, 4 — большая камера; 5 — сталь

реакции и образованием четкого рельефа поверхности.

На подготовленных для травления поверхностях после промывки не должно оставаться продуктов химической реакции, потому что они искажают картину структуры. Для правильности отображения поверхности и простоты отделения реплики от шлифа рекомендуется слабое травление. В оптической металлографии поверхность шлифа надо травить интенсивнее.

Наиболее приемлемый рельеф получается, если время действия реактива на 20 % меньше времени, которое применяется при металлографических исследованиях с помощью оптического микроскопа. При использовании органических реплик глубина рельефа может быть такой же, как и при исследованиях с помощью оптического микроскопа. Контрастность, ослабленная слабым травлением, усиливается в результате подвечивания реплик. Продолжительность действия и химический состав реактива должны быть (особенно при сравнительных исследованиях) одинаковыми.

## 2.7.4. Размеры кристаллитов в ПС

Если в результате термообработки будут устранены остаточные напряжения в ПС, то главным фактором, характеризующим механические свойства ПС металла, станет размер зерен. Уменьшение размера зерен в ПС деталей машин происходит в результате их дробления в процессе механической обработки или эксплуатации. Вообще уменьшение (дробление) зерен

сопровождается увеличением твердости материала ПС. Чем меньше размер зерен материала ПС, тем меньше его пластичность, выше предел текучести, больше твердость, материал интенсивнее упрочняется и уменьшается шероховатость поверхности излома.

Размер зерна материала ПС можно измерить с помощью оптических и рентгеновских методов.

При оптическом методе полированный и травленный металлографический шлиф наблюдается под микроскопом при соответствующем увеличении. Градиент изменений размеров зерен материала ПС исследуется оптическими и рентгеновскими методами на косом шлифе.

Размеры зерен оцениваются оптическими методами: измеряется диаметр отдельных зерен в поле зрения под микроскопом или количество зерен в  $1 \text{ мкм}^2$ . Можно также привести среднюю площадь зерна в квадратных микронметрах или по классификациям  $IKM$  и  $ASTM$ . В табл. 2.2 приведены размеры зерен, определенные разными методами.

Если зерна меньше  $10^{-4}$  (рис. 2.34, б), происходит расширение (размывание) фотометрических линий. Основываясь на теории дифракции, по размыванию линий можно вычислить статистическое распределение зерен (кристаллитов) по их размерам (рис. 2.35).

## 2.7.5. Текстурирование подповерхностных зон ПС

Для изучения текстуры ПС применяются методы, позволяющие определить анизотропию кристаллитов металла.

Текстурирование ПС можно точно исследовать рентгенографически. Если параллельный пучок рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda$  направить на нетекстурированный ПС, то в любом случае в исследуемом слое будет достаточное количество кристаллографических плоскостей, соответствующих формуле Брэгга

$$n\lambda = 2d \sin \theta_n,$$

где  $d$  — расстояние между плоскостями;  $\theta_n$  — угол скольжения (Брэгга);  $n$  — целое число.

Отраженный пучок рентгеновского излучения образует конус вокруг оси,падающей с падающим пучком. Угол конуса  $2\theta$ . Половина угла раскрытия конуса имеет для каждой плоскости решетки значение  $d$ , поэтому образуется несколько интерференционных конусов. Если на пути отраженных лучей поставить перпендикулярно к ним фотопластину, то на ней останутся кольца Дебая-Шеррера.

При отражении рентгеновского излучения от мелкозернистого образца со статически неупорядоченными кристаллографическими направлениями засветка фотопластины будет равномерной. Если имеются некоторые закономерности в распределении кристаллографических осей (текстурирование), то отраженное рентгеновское излучение приведет к локальной засветке фотопластины с просветлением в остальной области.

Длина темных дуг зависит от ширины накрытой зоны на так называемой сфере пространственной проекции; образец помещается в центр этой сферы, и проводится перпендикуляр к кристаллографическим плоскостям образца. Перпендикуляры пересекают сферу проекции вдоль кольца рефлексии (отклонения рентгеновского излучения). Отклонение этого кольца от начального пучка составляет  $90^\circ - \theta$ . Если отклоняющихся кристаллографических плоскостей много, то

перпендикуляры к этим плоскостям равномерно заполняют кольцо рефлексии, что равнозначно с полной засветкой дебаевского кольца.

При текстурированном металле сфера пространственной проекции неравномерно покрыта точками пересечения перпендикуляров к кристаллографическим плоскостям. Рефлексия будет наблюдаться только там, где кольца рефлексии перекрываются с областями на сфере пространственной проекции. Неравномерное затемнение рентгеновских линий (полос) дает качественную картину текстурирования.

Равномерно затемненные линии не означают произвольных кристаллографических осей. Существуют текстуры, в которых некоторые плоскости накрывают сферу пространственной проекции равномерно, а другие неравномерно. Кроме того, с определенной осторожностью надо подходить к интерпретации линий Дебая, для которых угол отклонения излучения составляет  $90^\circ$ , потому что кольца рефлексии такой плоскости охватывают только небольшую часть сферы пространственной проекции.

Для полного определения текстуры поверхностного слоя надо всю поверхность сферы пространственной проекции покрыть точками пересечения нормалей к кристаллографическим плоскостям.

В некоторых случаях формирования поверхностного слоя, например при прокатке, текстуру можно определить с помощью поворотных съемок, если низкосимметричные кристаллографические плоскости совпадают с направлением прокатки или с перпендикуляром к этому направлению.

Для обоих направлений производят поворотную съемку, определяя по полученным диаграммам ось кристаллитов, параллельную оси вращения образца. Поскольку плоскости кристаллитов одинаково направлены к плоскости образца, можно определить положение изучаемой кристаллографической плоскости.

Во многих случаях таким же образом можно определить текстуру ПС, потому что высокосимметричные кристаллографические оси не всегда параллельны осевому направлению макро-

неровностей (например, прокатка). В таких случаях следует сделать стереографическую проекцию, с помощью которой представляются кристаллографические плоскости и осн. Из стереографической проекции выбирается распределение только одного вида плоскостей для большого числа кристаллитов изучаемого объема и строятся полярные фигуры.

Текстуру ПС можно определить с помощью текстурного гониометра [2.29], благодаря чему можно уменьшить количество рентгеновских снимков. Рентгеновский гониометр имеет камеру, в которой делаются снимки. В камере находится поворачиваемый образец и фотопластина, которые располагаются так, что каждому положению образца соответствует определенная часть фотопластины. Методика расшифровки снимков такая же, как и для других камер. Камеры текстурных гониометров бывают плоскими или цилиндрическими.

В гониометре с плоской камерой плоская фотопластина устанавливается перпендикулярно к направлению исходного пучка излучения, смещенного внутрь относительно радиального направления осн вращения образца. Перед фотопластинной находится экран с круглой щелью. Контактный механизм приводит к изменению направления вращения образца и движению фотопластины после поворота образца на  $90^\circ$ .

Большим достоинством гониометра с плоской камерой является то, что кольцо Дебая, полученное при разных углах поворота образца, и лежащая на фотопластине сетка с десятиградусной шкалой делят затемненную поверхность на зоны, которые формой и отображением соответствуют зонам на полярных фигурах. Это позволяет переносить рентгеновские изображения непосредственно на стереографическую проекцию. В случае текстурирования ПС стальных деталей машин плоскость (110) располагается параллельно поверхности, а кристаллографическая ось (112) параллельна направлению действия силы, деформирующей ПС. На основании полярных фигур определяется кристаллографическая ориентация зерен или текстура ПС.

## 2.7.6. Дефекты материала ПС

Дефекты материала ПС образуются при плавлении, горячей пластической, механической, тепловой и поверхностной обработках. Различают два вида дефектов металлического материала ПС: неметаллические включения и трещины. Неметаллические включения лучше всего определяются с помощью микроскопа. Трещины металла ПС определяют визуальным осмотром, промасливанием, флюоресцентным методом, пропиткой нефтью, магнитным, магнитно-акустическим, рентгеновским, ультразвуковым и металлографическим методами.

*Внешний осмотр.* Эффективность этого метода можно увеличить, покрывая поверхность маслом. Корродирующий в щелях металл приводит к окраске масла.

*Пропитка керосином.* Исследуемую поверхность погружают в керосин на 1 ч. Вынутую из керосина и вытертую деталь посыпают порошковым мелом. Пятна на тонком слое мела свидетельствуют о наличии трещин в ПС.

*Флюоресцентный метод.* Исследуемую деталь машины погружают в флюоресцирующий препарат. Вынув деталь, изучаемую поверхность осматривают в темноте. Флюоресцирующий препарат, заполнивший трещины, позволяет обнаружить их.

*Пропитка маслом.* Деталь машины погружают в разогретое масло, затем вынимают, вытирают и наносят слой извести. Жирные пятна свидетельствуют о наличии трещин.

*Магнитные методы.* В магнитных методах используется влияние внутренних дефектов материала на его магнитную проницаемость. Метод позволяет исследовать дефекты материала внутри поверхностного слоя. Трещины уменьшают локальную магнитную проницаемость, вследствие чего линии магнитного поля изгибаются.

*Магнитно-акустический метод.* Деталь помещают в магнитное поле, а индуктивную катушку (датчик) перемещают вдоль исследуемой поверхности. Изменения нормальной составляющей магнитного поля, вызванные наличием трещин, приведут к возникновению тока в индуктивной катушке.

который после усиления дает звуковой сигнал.

**Рентгеновский метод** (рентгеновская дефектоскопия). Разновидностью рентгеновского метода является метод с применением гамма-излучения, испускаемого радиоактивными изотопами.

**Ультразвуковой метод.** Этот метод позволяет обнаружить не только трещины, но и неметаллические включения, пузырьки и поры. При ультразвуковой дефектоскопии применяется упругая волна частотой  $2 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^6$  Гц. Используется распространение волн в твердых телах, преломление и отражение на границе сред.

**Металлографические исследования.** Эти исследования проводятся с помощью оптического или электронного микроскопа на косых шлифах поперечного сечения ПС или на изучаемой поверхности. Изучение градиента дефектов материала ПС выполняются одним из указанных методов при постепенном травлении материала ПС. Состояние ПС можно определить, когда имеются измеренные значения, градиенты и распределение отдельных его параметров.

#### Список литературы

2.1. Luczak A., Mazur T.: Fizyczne starzenie elementów maszyn. WNT Warszawa, 1981.

2.2. Wachal A.: Wybrane zjawiska fizyko-chemiczne przy tarcii z udziałem smarowania. Materiały XIII Szkoły Trybologicznej — Częstochowa — Poraj, 1984. str. 178—193.

2.3. Myslińska B., Pokorowski W., Romanowski P.: Wpływ składu olejów bazowych na charakterystyki reologiczne i trybologiczne. Trybologia. Vol. 14. 1983. N 5/6. str. 15—17.

2.4. Romanowski P.: Wiskozymetr wysokoscieniowy metodyka badan i charakterystki lepkościowe wybranych olejów w warunkach cisnien do 250 MPa. Praca doktorska Politechnika Gdanska 1978.

2.5. Hötte F.: Analytische Darstellung der Viskosität von Flüssigkeiten abhängig von Temperatur und Druck. Schmier technik Vol. 21, 1974. S. 55—60.

2.6. Chu P. S. Y., Cameron A.: Pressure Viscosity Characteristics of Lubricating Oils. Jour. inst. Petr. Vol. 48. 1962. pp. 148—155.

2.7. Harsey M.S., Hopkins R. F.: Viscosity of Lubricants Under Pressure. Report for ASME Res. Comm. on Lubrication, 1952.

2.8. Jacobson B.: An Experimental Determination of the Solidification Velocity for Mineral Oils. ASLE Trans. Vol. 47, N 4. pp. 290—294.

2.9. Jacobson B.: «On the Lubrication of Heavily Loaded Cylindrical Surfaces Considering Surface Deformations and Solidification of the Lubricant». ASME Paper. N 72. lub 44. 1972.

2.10. Priscoe B. J., Tabor D.: Rheology of Thin Organic Films ASLE Trans. Vol. 17. 1973. N 3. pp. 158—165.

2.11. Boyd J., Robertson B. P.: The Friction Properties of Various Lubricants at High Pressure. Trans. ASME. Vol. 67. 1945. pp. 51—64.

2.12. Pokorowski W.: Praca doktorska WAT Warszawa. 1979.

2.13. Fote A. A., Slade R. A., Feuerstein S.: «Thermally Induced Migration of Hydrocarbon Oil». Transaction of the ASME Journal of Lubrication Technol. 1977. April. pp. 158—162.

2.14. Schurman K., Pedersen O.: «Field of Force Patterns at Frictional Contacts. Wear. Vol. 18, 1971. N 4. pp. 341—355.

2.15. Stuprucki J.: «Napoznienia kontaktowe w elementach maszyn w swietle badan zagadnien elesto hydrodynamicznego smarowania». Mechanika Teoretyczna i Stosowana. 1., 10. 1979.

2.16. Hebda M., Wachal A.: «Trybologia» WNT, Warszawa, 1980.

2.17. Parks J. M.: Recrystallisation Welding. The Welding Journ. Vol. 32. 1953. N 5. 125 p.

2.18. Семенов А. П. Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958. 223 с.

2.19. Langmuir I.: Molecular Properties of Unimolecular Films Jour. Franklin Inst. Vol. 218. 1934. pp. 143—152.

2.20. Грозин Б. М. Износ металлов. Киев: Гостехиздат, 1951: 422 с.

2.21. Vetz H., Sommer K.: Investigating of the Effect of Surface Tempe-

ratures in Sliding Contact Wear. Vol. 43. N 4. 1977. pp. 375—388.

2.22. Scott D., Smith A. J., Taip J., Tremain G. R.: Materials and Metallurgical Aspects of Diston Ring Scuffing. A Literature Survey. Wear. Vol. 33. N 2. 1—75. pp. 293—315.

2.23. Torrance A. A., Cameron A.: Surface Transformations in Scuffing. Wear. Vol. 28. N 3. 1974. pp. 229—311.

2.24. Kaldónski T., Wachal A.: Badania zjawisk elektrycznych towarzyszących tarcii w skojarzeniu teflon—metal. Materiały X Konferencji Trybologicznej, Wpływ smarowania na trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń, Kielce '77. str. 32—34.

2.25. Шамшур А. С. Дислокационная модель возникновения круговых термопотоков при трении скольжения. Машиностроение и приборостроение, 1974, N 6. с. 29—31.

2.26. Boruta J., Hebda M., Pokorowski W., Wachal A.: Zjawiska towarzyszące procesowi tarcia powierzchni kulistych. Technika Smarownicza, Trybologia. N 1. 1979. str. 15—21.

2.27. Blanks R., Richards M. S., Simms M. L.: «An Auger Electron Spectroscopic Examination of the Composition of Surface Films Formed in the Presence of Zinc Dialkyl dithiophosphate (ZDTP) Additives and their Relation to Wear Protection». 3rd International Tribology Congress Eurotrib—81. Tom III. pp. 26—39.

2.28. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 528 с.

2.29. Krause H., Schroelkamp C.: Investigation into the Reaction of Metallic Bodies in Tribological Systems. Wear. Vol. 81. 1982. N 2.

2.30. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. М.: изд-во АН СССР, 1960. 351 с.

2.31. Gierzynska M.: Studium zjawisk trybologicznych w procesach obróbki plastycznej. Politechnika Czestochowska, Czestochowa, 1974.

2.32. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техника, 1970. 396 с.

# Глава 3. ПРОЦЕССЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ В ЭЛЕМЕНТАХ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Силовое взаимодействие контактирующих твердых тел при внешнем трении обусловлено процессами, происходящими в сравнительно тонких поверхностных слоях этих тел [3.1—3.3]. Чтобы понять физическую природу взаимодействия твердых тел при внешнем трении и изнашивания, необходимо иметь четкое представление о физических, химических, механических и геометрических свойствах этих слоев. В значительной мере отмеченные свойства зависят от природы твердых тел, физико-химических процессов, протекающих в ПС и способа обработки поверхностей этих тел (см. гл. 1 и 2).

## 3.1. СТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Реальные твердые тела обладают поликристаллическим и аморфным строением [3.4, 3.5]. При изготовлении детали необходимо придать ей определенную форму, что достигается обработкой поверхности твердого тела. Пластическое деформирование при механической обработке, в особенности в присутствии смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) приводит к тому, что свойства поверхностных слоев детали существенно отличаются от аналогичных свойств материала в объеме детали. Даже у идеального кристалла, поверхность которого не подвергалась обработке, свойства поверхностных и приповерхностных слоев существенно отличаются от объемных свойств материала. Отличие свойств поверхностных и приповерхностных слоев идеально твердого тела от слоев, расположенных в основном объеме, обусловлено двумя причинами. Первая — несимметричность сил, действующих на частицы, расположенные

в ПС, вторая — нескомпенсированность связей этих частиц.

Как известно, при образовании кристалла между частицами действуют либо межатомные, либо межмолекулярные силы. В результате межатомных взаимодействий в кристалле между частицами возникает ковалентная, ионная или металлическая связь [3.6, 3.7].

Межмолекулярные взаимодействия приводят к образованию значительно менее прочных (приблизительно в  $10^8$  раз), ориентационных, индукционных и дисперсионных связей. Некоторые виды связей, например гомеоплярных (ковалентная, обменная), зависят от спинов внешних электронов, образующих эту связь. Связь возникает только в том случае, когда спиновые моменты имеют противоположное направление. В этих случаях принято говорить, что спины антипараллельны. В результате взаимодействий частицы располагаются друг от друга на некотором расстоянии  $r_0$ , соответствующем минимальной энергии взаимодействия (рис. 3.1). Если расстояние между частицами  $r > r_0$ , то они притягиваются друг к другу (ветвь 2). При  $r < r_0$  они отталкиваются друг от друга (ветвь 1). Таким образом, между взаимодействующими частицами проявляются силы притяжения и отталкивания, равнодействующая которых равна нулю при  $r = r_0$ . Под действием сил притяжения и отталкивания частицы совершают колебательные движения относительно положения равновесия.

На произвольную частицу внутри кристалла действуют силы со стороны окружающих ее частиц (рис. 3.2). Равнодействующая этих сил будет равна нулю ( $I$ ). Связи частицы насыщены, т. е. полностью скомпенсированы. Предположим, что кристалл расположен в сверхглубоком вакууме

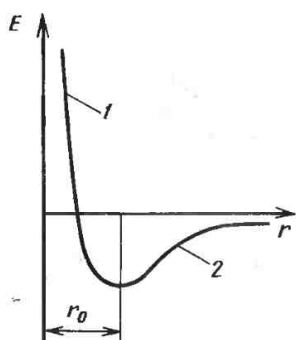


Рис. 3.1. Изменение энергии  $E$  между взаимодействующими частицами в зависимости от расстояния  $r$  между ними

и над его поверхностью практически отсутствуют какие-либо атомы или молекулы другой среды. На частицу внутри кристалла, расположенную в ПС, действуют несимметричные силы, равнодействующая которых направлена внутрь кристалла (2). Такое силовое взаимодействие вызывает искажение строения ПС и приводит к появлению в них избыточной потенциальной энергии, называемой поверхностной. Для частиц, расположенных в ПС, характерна нескомпенсированность связей, поэтому частицы, расположенные на поверхности, обладают сильной адсорбционной способностью [3.8].

Молекулы воздуха находятся в хаотическом тепловом движении и при обычных температурах обладают значительными скоростями. Поэтому к поверхности твердого тела (адсорбента) подходит большое число молекул воздуха (адсорбата). Молекулы адсорбата, приближаясь к поверхности твердого тела на достаточно близкое, сравнимое с радиусом межмолекулярных взаимодействий расстояние, притягиваются к ней. Если угол между траекторией движения молекулы и перпендикуляром к поверхности в точке соприкосновения ее с поверхностью твердого тела (угол падения) достаточно велик, т. е. тангенциальная составляющая скорости движения молекулы невелика, то молекула остается в поле поверхностных сил, иными сло-

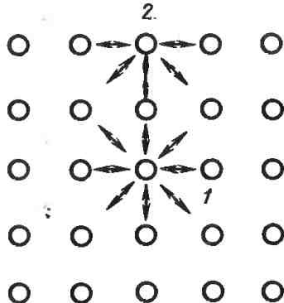


Рис. 3.2. Силы, действующие на частицы, расположенные внутри кристалла (1) и в ПС (2)

вами молекула адсорбируется на поверхности твердого тела. Если угол падения мал, то молекула подходит к поверхности твердого тела, как бы прилипает к ней, а затем отскакивает от нее. Скорость отскока зависит от скорости, с которой подходит молекула, и температуры поверхности твердого тела.

При физической адсорбции проявляются только межмолекулярные взаимодействия и молекулы адсорбата сохраняют свою индивидуальность. Физическая адсорбция является обратимым процессом. Наряду с адсорбцией молекул на поверхности твердого тела происходит их десорбция, при которой молекулы в результате тепловых или иных процессов уходят с поверхности твердого тела. Вследствие протекания двух конкурирующих процессов в течение определенного промежутка времени между адсорбцией и десорбцией наступает динамическое равновесие. Время, в течение которого достигается состояние, практически не отличающееся от динамического равновесия, зависит от давления газов и паров над поверхностью твердого тела. Обычно это время изменяется от  $10^{-10}$  до  $10^{-5}$  с. На поверхности твердого тела, помещенного в воздушную или иную газовую среду, при обычном атмосферном давлении мгновенно возникают пленки адсорбируемых молекул. При очень низком давлении равновесное состояние достигается за несколько часов.

Если твердое тело находится в газовой смеси, то в адсорбированных

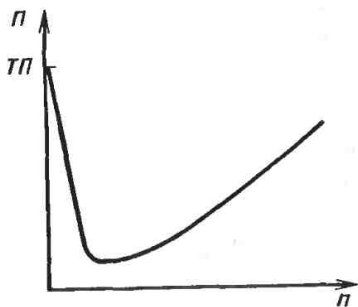


Рис. 3.3. Изменение прочности кристалла  $P$  в зависимости от концентрации дислокаций  $n$ :

$TP$  — теоретическая прочность

слоях наблюдается перераспределение молекул. Наиболее активные сильно адсорбирующиеся молекулы вытесняются с поверхности твердого тела слабо адсорбирующимися.

При хемосорбции адсорбируемые молекулы или атомы вступают в химическое взаимодействие с частицами (молекулами, атомами, ионами) твердого тела, расположенными в ПС. Энергия хемосорбционных процессов намного (на несколько порядков) больше энергии физической адсорбции. Молекулы (атомы) веществ, способных участвовать в хемосорбции, вытесняют с поверхности твердого тела молекулы, участвующие только в физической адсорбции. Поэтому на поверхностях реальных твердых тел, там где это возможно, возникают хемосорбционные пленки. В простейшем и наиболее распространенном случае это пленки окислов. Поверхности всех реальных тел всегда покрыты пленками, возникающими в результате хемосорбции или физической адсорбции.

Под слоем пленок расположены ПС собственно твердого тела.

Объемное поглощение вещества твердым телом называется абсорбцией. Ее влияние на свойства ПС твердого тела исследовано недостаточно. Считается, что поглощаемое при абсорбции вещество со временем равномерно распределяется в объеме тела.

При изготовлении детали происходят существенные изменения в ПС

твердых тел. Аналогичные изменения в этих слоях наблюдаются в процессе эксплуатации узлов трения. Поэтому принято изменения физико-механических, химических и геометрических свойств, возникающие в процессе обработки, называть технологическими, а изменения, появляющиеся в процессе работы, эксплуатационными.

Интенсивные пластические деформации ПС приводят к увеличению концентрации в них микроскопических дефектов. Накопление вакансий способствует разрыхлению ПС и в некоторых случаях образованию микротрещин. Наиболее интенсивно происходит увеличение концентрации дислокаций. Известно [3.9], что в зависимости от концентрации дислокаций прочность кристалла изменяется (рис. 3.3). Уменьшение прочности является результатом облегчения выхода дислокации на поверхность. Увеличение прочности объясняется самоторможением движения дислокаций в результате их взаимодействия.

Появление трещин вызывает фрагментацию отдельных зерен — кристаллических образований. Вследствие поликристаллического образования в ПС возможно появление остаточных деформаций и напряжений. Значение и знак (сжатие или растяжение) этих напряжений зависят от вида и режима обработки, качества инструмента, а также использования СОЖ и ее типа. Точение и шлифование, как правило, вызывают появление в ПС обрабатываемого материала сжимающих напряжений. Фрезерование может привести к появлению сжимающих и растягивающих напряжений. Разрыхление ПС при механической обработке способствует проникновению в ПС твердого тела молекул ПАВ, содержащихся в СОЖ, а также молекул и атомов окружающей среды. Это создает условия для проявления эффекта адсорбционного понижения прочности — эффекта Ребиндера [3.7]. По микротрещинам и порам могут проникать также молекулы коррозионно-активных веществ. Интенсивное пластическое деформирование ПС при механической обработке и в процессе эксплуатации приводит к их разогреву.



Повышение температуры материала ПС приводит к их размягчению и увеличивает в несколько раз скорости диффузии и химических реакций. Ускорение этих процессов в свою очередь приводит к механо- или трибоактивации. Таким образом, скорость химических реакций при внешнем трении увеличивается в несколько десятков раз [3.6, 3.7, 3.10, 3.11].

Можно предложить следующую модель строения ПС реального твердого тела. Поверхностные и приповерхностные слои 2 (см. рис. 2.14) собственно твердого тела 1 сильно деформированные, разрыхленные, с остаточными напряжениями расположены над материалом, обладающим некоторыми объемными свойствами. Толщина этих слоев зависит от большого числа исходных факторов, способов технологической обработки и условий эксплуатации. Обычно она не превышает 100 мкм [3.9, 3.11, 3.13].

Непосредственно к этим слоям примыкает слой 3, образующийся в результате протекания хемосорбционных процессов. Состав и структура этого слоя зависят от условий обработки, а также среды, с которой взаимодействовала деталь при хранении и эксплуатации. Обычно это слой окислов, его толщина изменяется от 20 до 200 мкм [3.4, 3.5, 3.8]. Четкой границы между слоями 1 и 2, а также 2 и 3 не существует.

Над хемосорбционным слоем располагается слой адсорбированных газов, в частности паров воды 4, которые всегда содержатся в воздухе. Толщина этого слоя существенно зависит от давления газов над поверхностью твердого тела и его температуры. С увеличением температуры она уменьшается.

Над слоем адсорбированных газов располагается слой молекул, имеющих органическое происхождение. Строение этих слоев различно [3.12]. Наиболее близко расположенный к поверхности твердого тела слой 5, граничащий со слоем адсорбированных газов, имеет поликристаллообразное строение и обладает механическими свойствами, отличающимися от механических объемных свойств вещества, состоящего из этих молекул. Толщина

этого слоя, по данным [3.12], составляет 25—40 длин молекул, из которых он состоит. Такое строение обусловлено тем, что на сравнительно небольших расстояниях от поверхности твердого тела еще сильно поле поверхностных сил.

Над поликристаллообразным слоем органических молекул 5 расположен слой 6, имеющий ламелярное строение. Молекулы этого слоя ориентированы параллельно поверхности твердого тела. Над этим слоем находится слой молекул, ориентированных хаотически. Следует отметить, что мультимолекулярные слои органических молекул образуются только при достаточной их концентрации. При недостатке молекул на поверхности твердого тела может образовываться монослой органических молекул.

## 3.2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

Из анализа строения слоев, возникающих вследствие физической адсорбции и хемосорбции, следует, что при удалении от поверхности собственно твердого тела прочность этих слоев уменьшается. Если обозначить прочность на сжатие  $\sigma_{сж}$  и отсчитывать расстояние  $h$  от самого верхнего слоя хаотически ориентированных молекул органического происхождения, то для изменения прочности сорбционных слоев имеем  $\frac{d\sigma_{сж}}{dh} > 0$ .

Пластическое деформирование материала ПС приводит к увеличению его прочности. Наиболее интенсивно происходит деформирование слоев, расположенных ближе к поверхности, поэтому они упрочняются больше по сравнению с нижележащими. Однако увеличение концентрации дефектов в ПС может приводить к упрочнению или разупрочнению. Согласно [3.7] эффект адсорбционного понижения прочности наиболее интенсивно появляется при растягивающих напряжениях, создаваемых в материале.

При внешнем трении, за скользящими контактирующими микронеров-

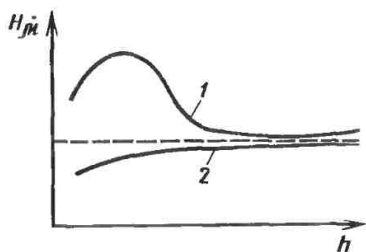


Рис. 3.4. Изменение микротвердости  $H_{\mu}$  в зависимости от расстояния от поверхности  $h$  при технологической обработке (1) и в условиях эксплуатации (2)

ностями возникают растягивающие напряжения.

Особое влияние на физико-механические характеристики, состав и строение ПС оказывает температура. Влияние температуры, возникающей при технологической обработке и в процессе эксплуатации, на прочностные свойства ПС различно. При технологической обработке нагревание ПС приводит к размягчению материала ПС и облегчению пластического деформирования поверхности, следовательно, уменьшает растрескивание материала, ухудшает физическую адсорбцию, интенсифицирует процессы хемосорбции и т. д.

На физико-механические характеристики собственно твердого тела влияет, как было показано, много различных, зачастую конкурирующих процессов. Поэтому теоретически предсказать изменение этих характеристик по глубине в зависимости от вида обработки в настоящее время не представляется возможным. Многочисленные экспериментальные исследования [3.2, 3.11, 3.13] показывают, что по мере увеличения расстояния от поверхности твердого тела микротвердость возрастает, достигает максимального значения на некоторой глубине (рис. 3.4, кривая 1) и затем монотонно снижается до некоторого значения (пунктирная линия), характерного для объемной микротвердости. Положение максимума определить сложно.

В некоторых исследованиях [3.13] максимума микротвердости ПС не отмечается, а констатируется монотон-

ное ее уменьшение. Анализируя в целом изменение микротвердости в ПС, получающееся при механической обработке, следует отметить, что по мере увеличения расстояния от поверхности адсорбированных слоев она возрастает, достигая максимума в слое окислов или ПС самого твердого тела, а затем снижается до объемной микротвердости материала. Следовательно, закономерность, приведенная на рис. 3.4 (кривая 1), является в известной мере универсальной. Такое изменение микротвердости ПС твердых тел характерно и для эксплуатации в тех условиях, когда нагрев ПС детали в процессе работы незначителен.

При нагревании в условиях эксплуатации ПС деталей обычно бывают нагреты более сильно, чем нижележащие слои, и не всегда успевают остывать. Следовательно, они являются размягченными и имеют микротвердость меньшую, чем нижележащие слои. Поэтому в условиях эксплуатации микротвердость ПС будет изменяться при изменении глубины (рис. 3.4, кривая 2).

Для поверхностей реальных твердых тел характерно, во-первых, то, что для некоторого расстояния от поверхности микротвердость возрастает в зависимости от глубины, т. е.

$$\frac{dH_{\mu}}{dh} > 0. \text{ Это свойство названо}$$

И. В. Крагельским правилом положительного градиента механических свойств по глубине. Во-вторых, поверхности реальных твердых тел покрыты сорбционными пленками, поэтому при контактировании и внешнем трении взаимодействие осуществляется не между самими твердыми телами, а между пленками, присутствующими на их поверхностях.

### 3.3. МАКРО- И МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Профиль поверхности детали задается чертежом. Будем называть этот профиль номинальным. Поверхность детали формируется с помощью

обработкой (чаще всего механической). В процессе обработки в результате дефектов в системе станок—приспособление — инструмент—деталь (СПИД), вибраций в этой системе, технологического процесса на поверхности детали возникают отклонения от номинального профиля. Отклонения от номинального профиля, возникающие в процессе обработки, называются технологическими. Эксплуатационные отклонения обусловлены неравномерным износом различных участков поверхностей трения.

Отклонения разделяются на макроскопические и микроскопические. Они оказывают решающее влияние на контактирование, взаимодействие при внешнем трении и изнашивании твердых тел, поэтому рассмотрим эти отклонения более подробно.

Рассмотрим гладкий вал. Номинальный профиль — цилиндр. Рассечем его плоскостью, проходящей через ось вала. Сечение поверхности детали плоскостью, перпендикулярной к ней, называется профилем поверхности вала. Рассмотрим профиль поверхности вала в увеличенном масштабе (рис. 3.5).

Макроотклонения — нерегулярные отклонения поверхности детали от номинального профиля. К ним относят вогнутость, бочкообразность, конусность и неплоскостность. Технологические макроотклонения обусловлены недостаточной точностью станка, неточным закреплением инструмента, неправильным выбором режима обработки или нарушением этого режима, температурными напряжениями и деформациями в системе СПИД. Эксплуатационные макроотклонения обычно обусловлены неравномерностью износа, возникающего в результате неправильной установки деталей подвижного сопряжения, вибрациями и перегрузками в процессе работы. Макроотклонения частично можно устранить, исключив отмеченные причины их появления.

Микроотклонения подразделяются на волнистость 2, шероховатость 3 и субмикрощероховатость поверхности. Волнистость поверхности — периодические от-

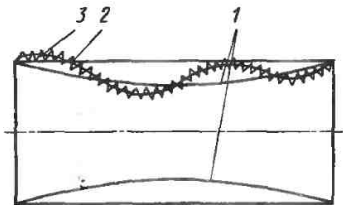


Рис. 3.5. Профиль поверхности вала

клонения номинального профиля детали, представляющие собой примерно равные по размерам возвышенности и впадины.

Технологическая волнистость поверхности возникает в результате недостаточной жесткости в системе СПИД и возникновения в ней низкочастотных колебаний. Эти колебания вызваны неоднородностью механических свойств обрабатываемых материалов, различиями в параметрах обработки, например в параметрах резания.

Эксплуатационная волнистость поверхности вызвана реологическими свойствами материала поверхностей трения и динамическими нагрузками, действующими в подвижном сопряжении при работе. Волны на поверхности детали имеют неправильную геометрическую форму, удовлетворительно описываемую синусоидой. Для характеристики волнистости используют шаг волны  $S_B$  и высоту  $H_B$ . Шаг волны — это расстояние между вершинами двух соседних волн, измеренное на профиле поверхности. Высота волны — расстояние между вершиной волны и ее впадиной, она равна двойной амплитуде волны. Обычно  $\frac{S_B}{H_B} \geq 40$ . В зависимости от видов обработки поверхности  $S_B$  изменяется от 0,25 до  $10^4$  мкм, а  $H_B$  от 0,03 до 500 мкм.

В расчетах параметров контактирования твердых тел часто используют радиусы кривизны выступов вершин волн  $R_B$ :

$$R_B = \frac{S_B^2}{8H_B} \quad (3.1)$$

Обычно  $R_B$  определяют из волнограмм поверхности, снятых с помощью



Рис. 3.6. Характерная профилограмма обработанной поверхности

щуповых приборов, например «Калибр-252» или «Телесерф».

Иногда в расчетах используют сферическую модель волнистости, в которой волны поверхности рассматриваются как шаровые сегменты постоянного радиуса. Для определения  $R_{\text{в}}$  снимают волнограммы вдоль и поперек направления обработки. Используя (3.1), определяют радиусы кривизны волн вдоль направления обработки  $R_{\text{в. прод}}$  и поперек его  $R_{\text{в. поп}}$ . Радиус кривизны волны определяют по формуле

$$R_{\text{в}} = \sqrt{R_{\text{в. прод}} R_{\text{в. поп}}} \quad (3.2)$$

Шероховатость поверхности — нерегулярные микроотклонения от геометрического профиля волнистой поверхности твердого тела. Технологическая шероховатость поверхности обусловлена геометрией обрабатывающего инструмента и его износом, вибрациями в системе СПИД, образованием наростов на резце, усадкой стружки, режимами обработки, свойствами обрабатываемого материала и материала инструмента [3.13].

Технологическая шероховатость поверхности для некоторых видов обработки (например, точения, фрезерования, шлифования в направлении движения инструмента и в направлении, перпендикулярном его движению) неодинакова, ее подразделяют на продольную и поперечную.

Эксплуатационная шероховатость поверхности подразделяется на неравновесную и равновесную. Неравновесная шероховатость является переходной от технологической к равновесной шероховатости и характерна для периода приработки деталей подвижного сопряжения. Механизм ее изменения зависит от напряженного состояния в зоне контакта микронеровностей.

При упругих деформациях в зонах контактов изменение шероховатости

поверхности обусловлено износом поверхностей трения взаимодействующих деталей. При пластических деформациях в зонах контактов микронеровностей в период приработки происходит интенсивное пластическое деформирование ПС менее жесткого из взаимодействующих тел. Происходит подстройка шероховатости поверхности менее жесткого тела под шероховатость более жесткого [3.10]. В результате пластические деформации в зонах контактов микронеровностей трансформируются в упругие. Как только в зонах контактов микронеровностей реализуются упругие деформации, неравновесная шероховатость поверхности переходит в равновесную.

Предполагается [3.1, 3.10], что равновесная шероховатость поверхности при нормальных условиях трения воспроизводится. Механизм воспроизведения шероховатости поверхности до сих пор изучен недостаточно. Известно, что при равновесной шероховатости поверхности в подвижных сопряжениях наблюдаются минимально возможные силы трения и минимальные интенсивности изнашивания. Определение равновесной шероховатости поверхности с учетом условий работы подвижного сопряжения является актуальной научно-технической задачей.

Для оценки шероховатости поверхности используют различные методы [3.1, 3.10, 3.14]. Широко распространен метод оценки, основанный на использовании профиля поверхности. Профиль поверхности обычно получают путем снятия с нее профилограммы (рис. 3.6). Профилограммы снимаются с разным увеличением по горизонтали и вертикали; микронеровности на них могут иметь чрезвычайно острые вершины. На самом деле вершины их скруглены и радиусы кривизны в зависимости от вида обработки  $R_{\text{прод}} = 10^2 - 3,5 \cdot 10^4$  мкм,  $R_{\text{поп}} = 2,5 - 10^3$  мкм.

### 3.1. Углы профиля микронеровностей в зависимости от вида обработки

Вид обработки	$R_a$ , мкм	$\beta_{\text{прод}}$ , градус	$\beta_{\text{поп}}$ , градус
Шлифование: внутреннее	0,8— 0,1	17	11
круглое		25	10
плоское		15	30
Фрезерование: торцовое		5	15
цилиндрическое		9	4
Точение		10	7
Растачивание		8	
Протягивание		10	12
Строгание		6	1
Хонингование	0,4— 0,5	13	4
Доводка поверх- ностей: цилиндрических	0,1— 0,125	6	3
плоских		5	10

Микронеровности поверхности весьма пологи. Значения угла наклона касательной, проведенной к поверхности микронеровностей, в зависимости от вида обработки приведены в табл. 3.1.

Шероховатость поверхности оценивается — высотой микронеровностей профиля поверхности  $R_z$ , средним арифметическим значением отклонения профиля  $R_a$ , средним шагом микронеровностей  $S_a$ , максимальной высотой микронеровности  $R_{\text{max}}$  и радиусом скругления вершин микронеровностей  $R$ . В зависимости от вида обработки  $R_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^2$  мкм,

Если сравнить  $R_{\text{max}}$  и  $H_B$ , можно отметить, что в некотором диапазоне эти величины одинаковы для различных видов обработки поверхности. При одном и том же виде обработки поверхности шероховатость всегда меньше волнистости. Чтобы не спутать параметры волнистости и шероховатости, при оценке параметров последней используют профили поверхности определенной длины, называемой базовой. Длина такого профиля поверхности обозначается буквой  $L$ . Значения базовых длин профиля в зависимости от качества обработки поверхности приведены в табл. 3.2.

Для определения параметров шероховатости поверхности на профиле поверхности проводится средняя линия  $II$  (рис. 3.7). Среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии в пределах базовой длины одинаково. Часть профиля поверхности детали, расположенная между соседними точками пересечения его со средней линией, выше ее, называется выступом. Часть профиля поверхности тела между профилем и прямой, соединяющей две соседние впадины, называется микронеровностью.

Высота микронеровностей, определяемая по десяти микронеровностям в пределах базовой длины, вычисляется по формуле

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^{i=5} |H_{\text{max } i}| + \sum_{i=1}^{i=5} |H_{\text{min } i}| \right), \quad (3.3)$$

где  $H_{\text{max } i}$ ,  $H_{\text{min } i}$  — максимальное отклонение от средней линии профиля

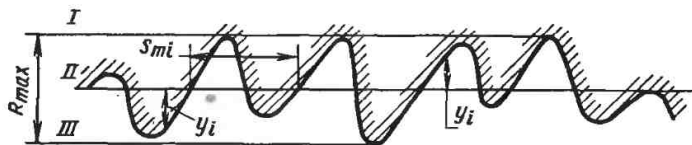


Рис. 3.7. Профиль поверхности

3.2. Характеристика микрогеометрии поверхностей в зависимости от качества обработки

Продолжение табл. 3.2

Класс шероховатости	Разряд	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$L$ , мм
14	а		0,05—0,04	
	б		0,032—0,04	
	в		0,032—0,025	

Класс шероховатости	Разряд	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$L$ , мм
1	—		320—160	8,0
2	—		160—80	
3	—		80—40	
4	—		40—20	2,5
5	—		20—10	
6	а	2,5—2,0		0,8
	б	2,0—1,6	—	
	в	1,6—1,25		
7	а	1,25—1,0		0,8
	б	1,0—0,8	—	
	в	0,8—0,63		
8	а	0,63—0,50		0,25
	б	0,50—0,40	—	
	в	0,40—0,32		
9	а	0,32—0,25		
	б	0,25—0,20		
	в	0,20—0,16		
10	а	0,160—0,125		
	б	0,125—0,100	—	
	в	0,100—0,080		
11	а	0,080—0,063		0,25
	б	0,063—0,050	—	
	в	0,050—0,040		
12	а	0,040—0,032		
	б	0,032—0,025	—	
	в	0,025—0,020		
13	а		0,100—0,80	
	б		0,80—0,063	
	в		0,063—0,050	

поверхности соответственно микровыступов и микровпадин.

При оценке технологической шероховатости поверхности применительно к некоторым видам обработки  $R_z$  определяют по формуле [3.13]

$$R_z = H_p + \Delta H, \quad (3.4)$$

где  $H_p$  — расчетная высота микронеровностей, определяемая с учетом геометрии инструмента и режима обработки;  $\Delta H$  — отклонение от расчетной высоты микронеровности.

Расчетная высота микронеровностей определяется в зависимости от вида обработки и ее режима. Например, при точении

$$H_p = \frac{S^2}{8r_{p3}}, \quad (3.4a)$$

где  $S$  — подача;  $r_{p3}$  — радиус скругления реза при вершине.

Отклонение  $\Delta H$  зависит от многих факторов. Например, при точении

$$\Delta H_s = \Delta H_y + \Delta H_{пл} + \Delta H_c + \Delta H_{тр} + \Delta H_{из} + \Delta H_{в}, \quad (3.5)$$

где отклонения обусловлены:  $\Delta H_y$  — восстановлением материала после среза;  $\Delta H_{пл}$  — пластической деформацией в зоне образования стружки;  $\Delta H_c$  — срезанием вершин микронеровностей сходящей стружкой;  $\Delta H_{тр}$  — трением задней поверхности реза об обработанную поверхность;  $\Delta H_{из}$  — изменением первоначального контура режущей кромки вследствие ее из-

нашивания;  $\Delta H_B$  — вибрациями резца и обрабатываемой детали.

Аналитический метод определения  $R_z$  менее трудоемок, но при его использовании необходимы данные о многих факторах, относящихся к режимам обработки, геометрии инструмента и обрабатываемым материалам.

Среднее арифметическое значение отклонения профиля поверхности

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx, \quad (3.6)$$

где  $y(x)$  — функция отклонений профиля от средней линии.

Для приближенных вычислений

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (3.7)$$

где  $y_i$  — отклонение профиля поверхности от средней линии в произвольном сечении;  $n$  — число разбиений профиля поверхности.

Шагом микронеровностей  $S_m$  называется расстояние между двумя точками пересечения одноименных поверхностей соседних микронеровностей со средней линией профиля поверхности. Среднее арифметическое значение шага микронеровностей

$$S_m = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} S_{mi}, \quad (3.8)$$

где  $n_1$  — число выступов, используемых при определении (обычно не менее 5);  $S_{mi}$  — шаг произвольной микронеровности.

Максимальная высота микронеровности  $R_{max}$  — расстояние между линией впадин и линией выступов профиля поверхности. Линии впадин и выступов — это прямые, проведенные на профиле поверхности (см. рис. 3.7, прямые I и III) в пределах базовой длины соответственно через самую глубокую впадину и вершину самого высокого выступа параллельно средней линии профиля поверхности.

Микронеровности поверхности примерно совпадают по форме с сегментами эллипсоидов, большие оси которых ориентированы по направлению обработки. Радиусы кривизны вершины микронеровности вдоль  $R_{прод}$  и поперек  $R_{поп}$  направления обработки зависят от вида обработки. Обычно  $R_{прод}$  и  $R_{поп}$  определяют с помощью профилограмм. На расстоянии  $h$  от вершины произвольной микронеровности проводят сечение, параллельное средней линии профиля поверхности. Если обозначить длину сечения  $d$ , то по (3.1) можно вычислить  $R$ , подставляя  $d$  вместо  $S_B$ ,  $h$  вместо  $H_B$ . Обычно в расчетах используют сферическую модель неровностей поверхности. В этой модели все микронеровности поверхности представляют в виде шаровых сегментов постоянного радиуса кривизны  $R$ , являющимся средним геометрическим  $R_{прод}$  и  $R_{поп}$  (табл. 3.3).

Субмикрощероховатость поверхности — более мелкие отклонения, имеющиеся на поверхностях микронеровностей. Она обусловлена внутренними дефектами материала (вакансиями и дислокациями), неравномерностью деформирования отдельных кристаллов, микротрещинами, возникающими при их деформировании, неравномерным ростом хемосорбционных пленок и т. д. Размеры субмикрощероховатости поверхности меньше размеров микронеровностей на два-три порядка. Как правило, субмикрощероховатость поверхности не оказывает существенного влияния на геометрические характеристики поверхностей реальных тел.

Распределение материала в шероховатом слое твердого тела задается опорной кривой профиля поверхности  $t_p$ , которая позволяет судить о распределении вершин микронеровностей по высоте.

Кривая  $t_p$  строится следующим образом. Выбирается профиль поверхности (профилограмма) с некоторой базовой длиной  $L$ . Профилограмму рекомендуется [3.1, 3.14] снимать под углом  $45^\circ$  к направлению движения инструмента при обработке. Для получения достоверных данных реко-

3.3. Расчетные значения шероховатости поверхностей для различных видов механической обработки заготовок из стали

Вид обработки	$R_{\max}$ , мкм	$r$ , мкм	$b$	$v$	$\Delta$
Круглое шлифование	9,37	8	0,6	2,0	$1,6 \cdot 10^{-1}$
	4,72	12	0,9	1,95	$4,1 \cdot 10^{-2}$
	2,40	20	1,3	1,90	$9,6 \cdot 10^{-2}$
Внутреннее шлифование	1,20	30	2,0	1,50	$2,8 \cdot 10^{-2}$
	18,75	5	0,6	2,0	$49,5 \cdot 10^{-1}$
	9,37	8	0,9	1,9	$13 \cdot 10^{-1}$
Плоское шлифование	4,72	13	1,1	1,85	$3,6 \cdot 10^{-1}$
	2,4	18,5	1,4	1,75	$1,1 \cdot 10^{-1}$
	37,5	35	0,6	2,2	1,24
Полирование	18,75	100	0,9	1,95	$2 \cdot 10^{-1}$
	9,37	180	1,0	1,85	$6 \cdot 10^{-2}$
	4,72	370	1,6	1,8	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Точение	2,4	550	2,3	1,65	$2,64 \cdot 10^{-3}$
	4,72	230	2,0	1,7	$1,4 \cdot 10^{-2}$
	2,4	450	2,5	1,6	$3 \cdot 10^{-3}$
Торцовое фрезерование	1,2	670	3,5	1,5	$7,8 \cdot 10^{-4}$
	37,5	15	1,0	2,1	2,5
	18,75	20	1,4	1,9	$7,9 \cdot 10^{-1}$
Доводка цилиндрических поверхностей	9,37	35	1,8	1,8	$1,9 \cdot 10^{-1}$
	4,72	55	2,0	1,6	$6,3 \cdot 10^{-2}$
	37,5	425	0,4	2,2	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Доводка плоскостей	18,75	900	0,5	1,6	$3 \cdot 10^{-2}$
	9,37	1350	0,6	1,5	$2,2 \cdot 10^{-2}$
	1,2	30	2,5	1,4	$7,7 \cdot 10^{-3}$
Хонингование	0,6	40	2,6	1,3	$2,6 \cdot 10^{-3}$
	0,3	55	2,6	1,2	$7,4 \cdot 10^{-4}$
	1,2	300	2,4	1,6	$2,34 \cdot 10^{-3}$
	0,6	500	3,0	1,4	$3,5 \cdot 10^{-4}$
	0,3	1000	3,3	1,2	$1,2 \cdot 10^{-4}$
	0,15	3000	4,5	1,1	$1,35 \cdot 10^{-5}$
	4,72	15	0,7	1,8	$0,37 \cdot 10^{-2}$
	2,40	20	1,0	1,7	$1,2 \cdot 10^{-1}$
	1,2	35	1,9	1,6	$2,26 \cdot 10^{-2}$
	0,60	70	2,5	1,6	$4,65 \cdot 10^{-3}$

мендуется снимать с различных участков поверхности детали не менее пяти профилеграмм. На профиле поверхности проводится средняя линия, линии впадин и выступов. Параллельно средней линии проводится произвольное число сечений. Затем строится график, в котором по оси координат откладывается отношение расстояния рассматриваемого сечения от вершины самого высокого выступа  $h$  к максимальной высоте микронеровности  $R_{\max}$ ,

по оси абсцисс — отношение суммарной длины сечений микронеровностей

$$l_1, l_2, l_i, \text{ т. е. } \sum_{i=1}^n l_i \text{ к } L.$$

Опорная кривая профиля поверхности, построенная таким образом, приведена на рис. 3.8.

На кривой  $l_p$  можно отметить три участка. Первый соответствует  $0 <$

$$< \varepsilon = \frac{h}{R_{\max}} \leq \varepsilon_H, \text{ второй } \varepsilon_H \leq \varepsilon \leq$$



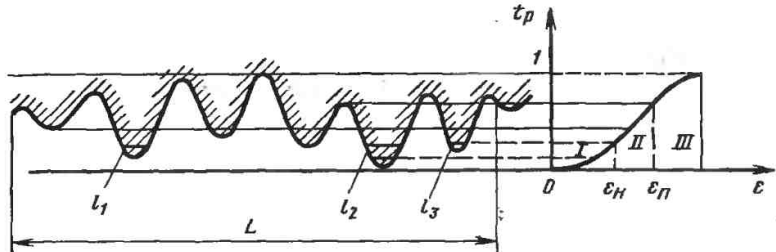


Рис. 3.8. Опорная кривая профиля поверхности

$\leq \epsilon_{\text{П}}$  и третий  $\epsilon_{\text{П}} \leq \epsilon \leq 1$ . На первом участке при увеличении  $h$  суммарная длина сечений микронеровностей  $\sum l_i$  возрастает не только за счет увеличения отдельных значений  $l_i$ , но и за счет попадания в сечение новых микронеровностей. На этом участке  $t_p$  поверхности согласно [3.1, 3.10, 3.14] описывается уравнением

$$t_p = b\epsilon^v, \quad (3.8a)$$

где  $b$  и  $v$  — параметры, зависящие от вида обработки.

Таким образом, на первом участке, называемом часто начальным участком опорной кривой профиля поверхности,  $t_p$  возрастает в зависимости от  $\epsilon^v$ , где  $v = 1,7 \div 3$ ;  $b = 1 \div 10$ . Обычно в машиностроении  $v = 2$ ,  $b = 2$ .

Значения  $b$  и  $v$  можно рассчитать, используя формулы [3.4, 3.7]:

$$\left. \begin{aligned} v &= 0,2 \left( \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{СК}}} \right)^{3/2}; \\ b &= \frac{1}{2(1 - k_p)^v}, \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

где  $k_p$  — коэффициент заполнения профиля поверхности. В последнее время разработана достаточно удобная методика расчетно-экспериментального определения  $b$  и  $v$  [3.10, 3.15].

Такая закономерность изменения  $t_p$  в зависимости от  $\epsilon$  сохраняется до тех пор, пока сечение не пройдет через вершину самого низкого выступа.

При этом достигается сближение  $\epsilon_{\text{П}}$ , определяемое по формуле

$$\epsilon_{\text{П}} = (bv)^{-\frac{1}{v-1}}. \quad (3.10)$$

При дальнейшем увеличении  $h$  величина  $\sum_{i=1}^n l_i$  может возрасти только за счет увеличения  $l_i$ , так как все микронеровности находятся в сечении. На этом участке опорная кривая профиля поверхности описывается уравнением [3.10, 3.15]

$$t_p = b\epsilon_{\text{П}}^v \left( \frac{v\epsilon}{\epsilon_{\text{П}}} + 1 - v \right). \quad (3.11)$$

Следует отметить, что при  $\epsilon \leq \epsilon_{\text{П}}$  (3.11) переходит в (3.10). Уравнение (3.11) выполняется до тех пор, пока сечение не пройдет через самую высокую впадину. Значение  $\epsilon$ , соответствующее самой высокой впадине, обозначим  $\epsilon_{\text{П}}$ . При дальнейшем увеличении  $\epsilon t_p$  возрастает пропорционально  $\epsilon^m$ , где  $m < 1$ .

В ряде исследований показано, что в опорной кривой профиля поверхности

отношение  $\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i$  можно заменить

отношением  $\sum_{i=1}^n A_{S_i}/L^2$ , где  $A_{S_i}$  — площадь сечения произвольной микронеровности.

## 3.4. КОНТАКТ ВОЛНИСТЫХ И ШЕРОХОВАТЫХ ТЕЛ

### 3.4.1. Фактическая площадь касания и сближения между поверхностями контактирующих тел

Из-за волнистости и шероховатости поверхности контактирование реальных твердых тел будет осуществляться в отдельных зонах, т. е. контакт будет дискретным. Для характеристики процесса контактирования твердых тел вводятся понятия номинальной  $A_n$ , контурной  $A_c$  и фактической  $A_f$  площадей касания. Номинальная площадь касания совпадает со всей площадью контактирующей поверхности детали. Например, контактируют два твердых тела с номинально плоскими поверхностями (рис. 3.9). У одного из контактирующих тел поверхность волнистая и шероховатая, у другого идеально ровная. Для первого тела номинальная площадь касания равна площади контактирующей волнистой поверхности  $A_n$ , для второго — площади прямоугольника.

Вначале контактирование осуществляется из самых высоких микронеровностей, расположенных на вершинах волн. Силовые взаимодействия передаются элементам волнистости поверхности и вызывают их деформацию. Обычно деформация элементов волнистости поверхности упругая. Деформация элементов волнистости приводит к образованию на них площадок касания, суммарная площадь которых называется контурной площадью касания  $A_c$  2. При контактировании деталей, обладающих криволинейными поверхностями, контурная площадь касания совпадает с площадью, вычисляемой на основании теории упругости с использованием предположения об абсолютно гладких поверхностях.

Под контурным давлением понимают отношение силы, действующей на контактирующие тела, к контурной площади касания  $p_c = N/A_c$ . В пределах контурной площади касания

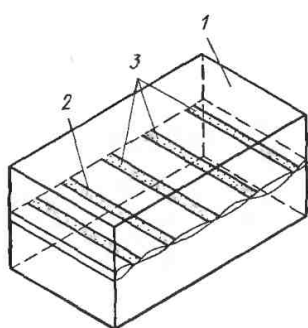


Рис. 3.9. Схема контактирования двух твердых тел с номинально плоскими поверхностями

контактирование осуществляется отдельными микронеровностями, каждая из которых образует элементарную фактическую площадку касания  $A_{fi}$  3. Размеры этой площадки обычно невелики и зависят от конфигурации микронеровностей, механических свойств взаимодействующих тел, контурных давлений и вида деформаций в микроконтактных зонах. Элементарной фактической площадью касания называется площадь, на которой уравновешиваются межатомные и межмолекулярные силы притяжения и силы отталкивания. Суммарная площадь контактных зон микронеровностей образует фактическую площадь касания контактирующих твердых тел.

При увеличении фактической площади касания происходит увеличение сближения между поверхностями контактирующих тел. При определении жесткости стыков, протечек через микрозор и других параметров требуется зависимость фактической площади касания от сближения между поверхностями контактирующих тел. Получим ее применительно к контакту двух твердых тел с номинально плоскими поверхностями, лишенными волнистости. Будем считать, что одно из контактирующих тел имеет шероховатую поверхность, другое — гладкую.

В зависимости от механических характеристик взаимодействующих тел в зонах фактического касания будет

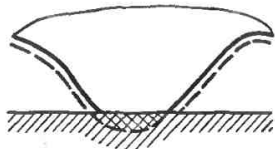


Рис. 3.10. Схема взаимодействия микронеровности с жестким контртелом

происходить смятие микронеровностей или их внедрение в поверхность более мягкого тела. При смятии микронеровностей деформируемый материал равномерно распределяется по всей поверхности микронеровностей (рис. 3.10). Сближения между поверхностями взаимодействующих тел невелики, следовательно, деформируемые объемы (заштрихованы на рис. 3.10) малы. Поэтому с достаточно хорошим приближением можно считать, что фактическая площадь касания произвольной контактирующей микронеровности практически совпадает с площадью ее сечения. Процесс суммирования отдельных площадок фактического касания в большинстве случаев не влияет на соотношение между фактической площадью касания единичной микронеровности и ее сближением. Отсюда следует, что при смятии микронеровностей зависимость фактической площади касания от сближения между поверхностями описывается (3.8) для насыщенного контакта и (3.11) для насыщенного. Если  $\epsilon > \epsilon_n$  — это такая разновидность контактирования твердых тел, когда число контактирующих микронеровностей  $n_r$  меньше числа микронеровностей  $n_c$ , расположенных на контурной площади касания.

Сделанные выше выводы справедливы тогда, когда контактирующие тела неподвижны. При скольжении, как будет показано ниже, в (3.8) и (3.11) необходимо ввести некоторый коэффициент  $\alpha_r$ . Тогда фактическая площадь касания при насыщенном контакте в зависимости от сближения ( $\epsilon \leq \epsilon_n$ ) выражается следующим образом:

$$A_r = \alpha_r A_c b \epsilon^v; \quad (3.12)$$



Рис. 3.11. Шаровой индентор и пластина, изготовленные из свинца, после сжатия

при насыщенном ( $\epsilon > \epsilon_n$ )

$$A_r = \alpha_r b \epsilon_n^v \left( \frac{v \epsilon}{\epsilon_n} - v + 1 \right), \quad (3.13)$$

где  $\alpha_r$  — коэффициент, учитывающий напряженное состояние в зоне контакта и кинематические особенности взаимодействия твердых тел.

Наиболее распространенным типом деформации микронеровностей является внедрение более жестких микронеровностей в менее жесткую поверхность одного из контактирующих тел. Внедрение происходит, когда жесткое тело имеет более шероховатую поверхность, в результате неоднородных механических свойств отдельных участков ПС твердого тела и различия в геометрических размерах микронеровностей. Например, шаровой индентор, изготовленный из свинца, внедряется в свинцовую пластину (рис. 3.11). Даже в случае смятия микронеровностей в зонах фактического касания происходит внедрение более жестких, меньших по размерам микронеровностей в поверхность менее жестких микронеровностей (рис. 3.12).

При внедрении фактическая площадь касания микронеровности образуется на боковой поверхности, ее значение зависит от того, какие деформации (упругие, упругопластические или пластические) возникают в зоне контакта, а также от того, находятся ли контактирующие тела в покое относительно друг друга или движутся. Все это приводит к тому, что фактическая площадь касания  $I$  (рис. 3.13) микронеровности при ее внедрении на величину  $h_i$  отличается от площади сечения микронеровности  $II$ , расположенной на расстоянии  $h_i$  от ее вершины. Однако это различие не

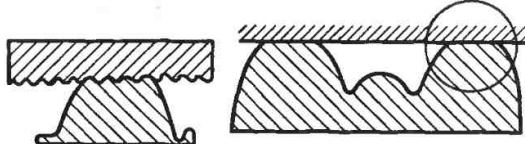


Рис. 3.12. Схема контактирования микронеровностей разных размеров

велико. Например, для сферического очертания микронеровностей площадь фактического касания

$$A_{r1} = \alpha_r 2\pi R h_i. \quad (3.14)$$

При пластических деформациях в зоне контакта  $\alpha_r = 0,5$  при скольжении одного из твердых тел по поверхности другого и  $\alpha_r = 1$ , когда тела относительно неподвижны. При упругих деформациях в зонах фактического касания в обоих отмеченных случаях  $\alpha_r = 0,5$ .

Площадь сечения этой микронеровности

$$A_{si} = \pi r^2 = \pi (2R h_i - h_i^2). \quad (3.15)$$

Следовательно, отношение

$$\frac{A_{si}}{A_{r1}} = \alpha_r \left(1 - \frac{h_i}{2R}\right). \quad (3.16)$$

При  $\alpha_r = 1$ , даже при  $R_{\max}/R \leq 0,1$ , а реальное сближение составляет обычно  $h_i \leq 0,2R_{\max}$ , получим, что фактическая площадь касания приблизительно на 1—2 % отличается от площади сечения. Поэтому для определения фактической площади касания твердых тел в зависимости от сближения могут быть использованы (3.12) и (3.13) с учетом, что параметр шероховатости поверхности  $R_{z1}$  для поверхности одного из тел приблизительно в 2 раза больше  $R_{z2}$  поверх-

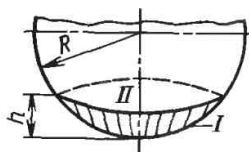


Рис. 3.13. Схема контактирования микронеровностей при внедрении

ности другого. Если это условие не выполняется, то контактирование двух тел с шероховатыми поверхностями можно свести к случаю, когда одно из контактирующих тел будет обладать эквивалентной шероховатостью, а другое — иметь абсолютно ровную поверхность [3,1, 3.2, 3.10].

### 3.4.2. Определение фактической площади касания и сближения между поверхностями контактирующих тел в зависимости от контурного давления

Наиболее широко используемой моделью шероховатой поверхности твердого тела является сферическая модель; преимущественным видом деформации в зонах контактов микронеровностей является внедрение более жестких микронеровностей в поверхность менее жесткого тела. Ниже приведены данные, полученные при использовании этих предположений, а также допущения, что контактируют два твердых тела, одно из которых абсолютно жесткое, имеющее шероховатую поверхность, а другое более мягкое, имеющее абсолютно ровную поверхность. Полученные зависимости можно распространить на случай контактирования твердых тел, имеющих поверхность с одинаковой шероховатостью.

Так как теория взаимодействия твердых тел при упругопластических деформациях в зонах касания в настоящее время практически не разработана, то ниже приведены важные для практики данные по расчету фактической площади касания при упругих и пластических деформациях в этих зонах.

**Упругий ненасыщенный контакт.** Нормальная нагрузка, вызывающая

сближения  $\epsilon$  между поверхностями взаимодействующих тел

$$N = \int_0^{\epsilon} N_i dn_r, \quad (3.17)$$

где  $N_i$  — сила, приходящаяся на произвольную  $i$ -ю микронеровность;  $dn_r$  — число микронеровностей, имеющих одинаковое сближение.

В зависимости от внедрения в соответствии с теорией Герца

$$N_i = \frac{1,33R_{\max}^{1/2} k_i^{3/2} E}{1 - \mu^2}, \quad (3.18)$$

где  $E$  — модуль упругости материала;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Число микронеровностей  $dn_r$  определяется по формуле

$$dn_r = \frac{A_c b v (v-1) x^{v-2} dx}{2\pi R R_{\max}}. \quad (3.19)$$

Из (3.17)–(3.19) с учетом, что  $\epsilon = h/R_{\max}$ , интегрируя по методике [3.2], получим выражение для определения  $p_c$  в зависимости от относительного сближения

$$p_c = \frac{0,21v(v-1) k_1 b E R_{\max}^{1/2} \epsilon^{v+1/2}}{(1 - \mu^2) R^{1/2}}, \quad (3.20)$$

где  $k_1$  — постоянная интегрирования, зависящая от  $v$  (рис. 3.14).

В формулах для вычисления триботехнических параметров часто встречается соотношение  $\Delta = R_{\max}/(Rb^{1/v})$ , которое было введено в рассмотрение Е. П. Непомнящим. Оно является комплексным параметром, характеризующим шероховатость поверхности.

Для наиболее распространенных в машиностроении видов обработки поверхностей  $v = 2$ , а  $b = 2$ , следовательно,

$$p_c = \frac{0,4E\Delta^{1/2} \epsilon^{5/4}}{1 - \mu^2}. \quad (3.21)$$

Значения  $\Delta$  для различных видов обработки приведены в табл. 3.3.

Из (3.8) и (3.20) фактическая площадь касания при упругом ненасыщен-

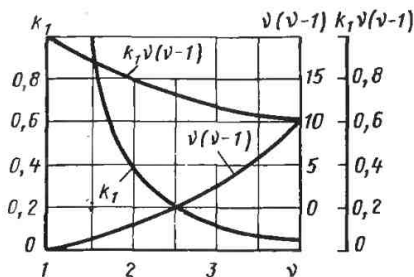


Рис. 3.14. Зависимость  $k_1$ ,  $v(v-1)$  и  $v(v-1)k_1$  от  $v$

ном контакте в зависимости от контактного давления будет

$$A_r = 0,5A_c \times$$

$$\times \left[ \frac{p_c (1 - \mu^2)}{0,21v(v-1) k_1 E \Delta^{1/2}} \right]^{2v+1} \approx \approx \frac{2,1A_c}{\Delta^{2/5}} \left[ \frac{p_c (1 - \mu^2)}{E} \right]^{4/5}. \quad (3.22)$$

Сближение между поверхностями контактирующих тел в данном случае

$$h = R \left[ \frac{5p_c (1 - \mu^2) \Delta^v}{v(v-1) k_1 E} \right]^{2v+1}. \quad (3.23)$$

Таким образом, при упругом ненасыщенном контакте  $A_r \sim p_c^{0,8}$ ,  $h \sim p_c^{0,4}$ . При увеличении модуля упругости менее жесткого тела фактическая площадь касания уменьшается более интенсивно, чем сближение между поверхностями контактирующих тел. Упругий ненасыщенный контакт наблюдается при  $\epsilon < \epsilon_H$ . Как следует из (3.10) и (3.20), этот вид взаимодействия реализуется при

$$\frac{p_{сн} (1 - \mu^2)}{E} = = 8 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta^{1/2}}{(b^{1/v} v)^{2v-1}} \approx 6 \cdot 10^{-3} \Delta^{1/2}. \quad (3.24)$$

Эти предельные контурные давления можно использовать в расчетах только тогда, когда одно (менее жесткое) из

взаимодействующих твердых тел обладает невысоким (характерным для резины и пластмасс) модулем упругости. Если менее жесткое контактирующее тело изготовлено из металла, то контактные давления, при которых будет наблюдаться упругий ненасыщенный контакт, находятся из условия перехода упругих деформаций в зонах фактического касания в упругопластические. Можно предположить, что пластические деформации в зоне контакта шарового индентора, моделирующего контакт, микронеровности, при вдавлении его в полупространство будут в тех участках контакта, где нормальные напряжения станут равными давлению текучести. Пластические деформации возникнут в зоне максимальных напряжений  $p_{r \max} \approx \approx HB$ , где  $HB$  — твердость материала по Бринелю при внедрениях индентора:

$$\frac{h}{R} \geq 2,4 (1 - \mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2. \quad (3.25)$$

Из (3.23) и (3.25) определяется контактное давление, до которого будет реализовываться упругий ненасыщенный контакт при взаимодействии металлических твердых тел:

$$\begin{aligned} p_c &\leq \\ &\leq \frac{2,4 \frac{2\nu+1}{2\nu} \nu(\nu-1) k_1 HB^{2\nu+1} (1-\mu^2)^{2\nu}}{5\Delta^\nu E^{2\nu}} \approx \\ &\approx \frac{5,4 (1-\mu^2)^4 HB^5}{\Delta^2 E^4}. \quad (3.26) \end{aligned}$$

Упругий насыщенный контакт имеет место при  $p_c \geq p_{сн}$  и характеризуется тем, что все микронеровности, расположенные на контурной площади касания, образуют зоны контакта. Он реализуется только при использовании материалов типа резины или пластмасс, обладающих невысоким модулем упругости. При этом виде взаимодействия

$$N = \sum_{i=1}^{n_c} N_i \Delta n_r \approx N_i c_p n_c, \quad (3.27)$$

где  $N_i c_p$  — реакция, возникающая в зоне контакта некоторой микро-

неровности, имеющей среднее внедрение

$$h_{ср} = \frac{A_r}{n_c \pi R}. \quad (3.28)$$

Учитывая, что  $\varepsilon = h/R_{\max}$ , а также принимая во внимание, что

$$n_c = \frac{A_c b \nu \varepsilon^{\nu-1}}{2\pi R R_{\max}}, \quad (3.29)$$

из (3.11), (3.28) найдем

$$\varepsilon_{ср} = \frac{\nu \varepsilon - (\nu - 1) \varepsilon_H}{\nu}. \quad (3.30)$$

Используя (3.27) и (3.20), выразим контурное давление в зависимости от сближения между поверхностями контактирующих тел при упругом насыщенном контакте:

$$\begin{aligned} p_c &= \frac{0,2\Delta^{1/2} b^{1/3\nu} E}{1 - \mu^2} \times \\ &\times \left[ \frac{\nu \varepsilon - (\nu - 1) \varepsilon_H}{\nu} \right]^{3/2}. \quad (3.31) \end{aligned}$$

Тогда, как следует из (3.11) и (3.31), в условиях упругого насыщенного контакта

$$A_r = 1,62 A_{Ic} \left[ \frac{p_c (1 - \mu^2)}{E \Delta^{1/2}} \right]^{2/3}. \quad (3.32)$$

Сравнивая полученное выражение с (3.22), отметим, что при насыщенном контакте  $A_r$  менее интенсивно изменяется при изменении  $p_c$ .

Сближение между поверхностями контактирующих тел в данном случае контактирования

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{3p_c^{2/3} (1 - \mu^2)^{2/3}}{E^{2/3} b^{1/3\nu} \Delta^{1/3}} + \\ &+ \frac{\nu - 1}{(b\nu)^{\nu-1}} \approx \frac{2,7}{\Delta^{1/3}} \times \\ &\times \left[ \frac{p_c (1 - \mu^2)}{E} \right]^{2/3} + 0,125. \quad (3.33) \end{aligned}$$

Среднее относительное сближение при насыщенном упругом контакте находим из (3.31)

$$\varepsilon_{ср} = \left[ \frac{4,2 p_c (1 - \mu^2)}{\Delta^{1/2} E} \right]^{2/3}. \quad (3.34)$$

Пластический неосыщенный кон-  
такт. Выше отмечалось, что при кон-  
турных давлениях, больших, чем вы-  
числяемые по (3.26), в зонах касания  
микронеровностей появляются пла-  
стические деформации. Взаимодей-  
ствие твердых тел при этом будет осу-  
ществляться в условиях упругопла-  
стических деформаций, когда в одних  
зонах контакта микронеровности будут  
иметь место упругие, а в других —  
пластические деформации. Граница ме-  
жду этими деформациями может быть  
определена из решения задачи о вдав-  
ливании шарового индентора в упруго-  
пластическое полупространство. Точ-  
ные методы решения таких задач от-  
сутствуют. Приближенно можно счита-  
ть, что пластические деформации  
возникают в тех точках, где нормаль-  
ные напряжения на контакте равны  
давлению текучести.

Из теории упругости следует, что  
средние нормальные напряжения при  
вдавливании шарового индентора

$$p_r \text{ ср} = \frac{0,4Eh^{1/2}}{(1-\mu^2)R^{1/2}} \quad (3.35)$$

Так как при пластических деформа-  
циях в зонах фактического касания  
микронеровностей средние нормальные  
напряжения  $p_r = HB$ , то, используя  
(3.35), в первом приближении нетрудно  
показать, что эти деформации будут  
возникать при сближениях между по-  
верхностями контактирующих тел

$$\frac{h}{R} = 5,4(1-\mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E}\right)^2 \quad (3.36)$$

Нормальную нагрузку при пласти-  
ческих деформациях в зонах контак-  
тов микронеровностей можно выразить,  
подставляя в (3.17) величину  $N_t$ , рав-  
ную

$$N_t = \alpha_\tau 2\pi RR_{\text{max}} (\varepsilon - x) HB, \quad (3.37)$$

и интегрируя, в следующем виде

$$N = \alpha_\tau A_c b HB \varepsilon^v. \quad (3.38)$$

Тогда  $p_c$  в зависимости от  $\varepsilon$

$$p_c = \alpha_\tau b \varepsilon^v HB. \quad (3.39)$$

Используя (3.39), получим довольно  
простое, проверенное в многочислен-  
ных экспериментах [3.1, 3.10, 3.14,

3.15] выражение для определения фак-  
тической площади касания между твер-  
дыми телами при ненасыщенном пла-  
стическом контакте

$$A_r = N/HB. \quad (3.40)$$

Сближение между поверхностями  
контактирующих тел в этом случае

$$\varepsilon = \left(\frac{p_c}{\alpha_\tau b HB}\right)^{1/v} \approx \left(\frac{p_c}{HB}\right)^{1/2} \quad (3.41)$$

Таким образом, при увеличении  
твердости менее жесткого из контак-  
тирующих тел фактическая площадь  
касания и сближение между поверх-  
ностями уменьшаются.

Подставляя в (3.36) значение  $\varepsilon$  из  
(3.41), определим нижнюю границу  $p_c$ ,  
при которой реализуются пластиче-  
ские деформации в зонах касания:

$$p_c = \frac{5,4^v (1-\mu^2)^{2v} HB^{2v+1}}{2\Delta^v E^{2v}} \approx \frac{14,5(1-\mu^2)^4 HB^5}{\Delta^2 E^4} \quad (3.42)$$

Из (3.10) и (3.41) находим верхнюю  
границу  $p_c$  для данного вида взаимо-  
действия

$$p_{cH} = \frac{\alpha_\tau HB}{(b^{1/v}) \frac{1}{v-1}} \approx 0,125 \alpha_\tau HB. \quad (3.43)$$

При

$$\frac{5,4(1-\mu^2)^4 HB^5}{\Delta^2 E^4} \leq p_c \leq \frac{14,5(1-\mu^2)^4 HB^5}{\Delta^2 E^4},$$

взаимодействие двух твердых тел будет  
осуществляться в условиях упруго-  
пластических деформаций в зонах фак-  
тического касания. Пластический на-  
сыщенный контакт имеет место при  
 $p_c \geq 0,125 \alpha HB$ . В данном случае

контактирования  $N$  в зависимости от  $\varepsilon$  можно выразить так:

$$N = \text{HB} \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{\tau} 2\pi R R_{\text{max}} \varepsilon_i, \quad (3.44)$$

где  $\sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{\tau} 2\pi R R_{\text{max}} \varepsilon_i = A_{\tau}$ .

Следовательно, при пластическом насыщенном контакте, как и при ненасыщенном,  $A_{\tau} = N/\text{HB}$ .

Из (3.11) и (3.44) можно найти  $p_c$  в зависимости от  $\varepsilon$ :

$$p_c = \alpha_{\tau} b \varepsilon_n^{\nu} \left( \frac{\nu \varepsilon}{\varepsilon_n} - \nu + 1 \right) \text{HB}. \quad (3.45)$$

При  $\varepsilon < \varepsilon_n$  (3.45) переходит в формулу (3.39), характерную для пластического ненасыщенного контакта.

Сближение между поверхностями взаимодействующих тел, как это следует из (3.45),

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1}{(bv)^{\frac{1}{\nu-1}}} \times \\ &\times \left[ \frac{p_c (bv)^{\frac{1}{\nu-1}}}{\alpha_{\tau} \text{HB}} + 1 - \nu \right] \approx \\ &\approx 0,125 \left( \frac{8p_c}{\text{HB}} + 1 \right). \quad (3.46) \end{aligned}$$

Таким образом, при пластическом насыщенном контакте  $\varepsilon \sim p_c$ , тогда как при ненасыщенном  $\varepsilon \sim p_c^{1/\nu}$ , т. е. при ненасыщенном контакте  $\varepsilon$  возрастает при увеличении  $p_c$  более интенсивно, чем при насыщенном. Поэтому в тех сопряжениях, где требуется большая жесткость, следует использовать контурные давления  $p_c \leq p_{cн}$ .

Нижней границей  $p_c$ , вызывающих появление пластического насыщенного контакта, являются значения, вычисляемые по (3.43). Верхняя граница  $p_c$ , соответствующая этому виду контактирования, определяется, исходя из того, что на процессы деформирования материала в зоне контакта одной микронеровности будут оказывать влияние процессы деформации в зонах контакта соседних микронеровностей.

Назовем такой процесс контактирования взаимодействием в условиях взаимного влияния микронеровностей на их несущую способность. В [3.10] показано, что взаимодействие в условиях взаимного влияния контактирующих микронеровностей наблюдается при контурных давлениях

$$p_{св} = 0,11\pi \text{HB} \approx 0,33\text{HB}. \quad (3.47)$$

В результате распределения вершин микронеровностей по высоте в общем случае при контактировании твердых тел имеется часть контактирующих микронеровностей  $n_y$ , в зоне контакта которых реализуются упругие деформации, часть микронеровностей  $n_{y.п}$ , в зоне контакта которых реализуются упругопластические деформации, и часть микронеровностей  $n_{п}$ , пластически деформирующих материал менее жесткого тела. Поэтому в общем случае взаимодействия контактирующих тел нормальная нагрузка

$$N = N_y + N_{y.п} + N_{п}, \quad (3.48)$$

где  $N_y$ ,  $N_{y.п}$ ,  $N_{п}$  — нормальные нагрузки, приходящиеся соответственно на  $n_y$ ,  $n_{y.п}$ ,  $n_{п}$ .

В этом случае нормальная нагрузка в зависимости от сближения между поверхностями контактирующих тел может быть выражена так:

$$\begin{aligned} N &= \\ &= \frac{1,33\Delta^{1/2} A_c b^{\frac{\nu+1}{\nu}} v (v-1) k_1 E \varepsilon_y^2}{2\pi R^2 (1-\mu^2)} + \\ &+ \frac{1}{2} A_c b \text{HB} \{ (\varepsilon - \varepsilon_y)^{\nu-1} \times \\ &\times [(v-1) \varepsilon_y + \varepsilon] - (\varepsilon - \varepsilon_{y.п})^{\nu-1} \times \\ &\times [(v-1) \varepsilon_{y.п} + \varepsilon] \} - \\ &- \frac{2(1-\mu^2)^3 A_c b^{\frac{2\nu+3}{\nu}} v (v-1) \text{HB}^4}{E^3 \Delta^{3/2}} \times \\ &\times (\varepsilon_{y.п}^{1/2} - \varepsilon_y^{1/2}) + \\ &+ \frac{0,8 A_c b v^{\frac{\nu-1}{\nu}} (1-\mu^2)^2 \text{HB}^3}{E^2 \Delta} \times \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & \times [(\epsilon - \epsilon_y)^{v-1} - (\epsilon - \epsilon_{y.п})^{v-1}] + \\ & + \alpha_\tau A_c b HВ (\epsilon - \epsilon_{y.п})^v \times \\ & \times \left( \frac{v \epsilon_{y.п}}{\epsilon - \epsilon_{y.п}} + 1 \right), \quad (3.49) \end{aligned}$$

где  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_{y.п}$ ,  $\epsilon_{п}$  — сближения, соответствующие  $n_y$ ,  $n_{y.п}$ ,  $n_{п}$ .

Значения  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_{y.п}$ ,  $\epsilon_{п}$  можно найти из (3.25) и (3.36). Как показали вычисления, значения контурных давлений, найденные в зависимости от сближений по (3.39) и (3.49), несущественно отличаются друг от друга (рис. 3.15). Поэтому с достаточной степенью точности контактные параметры можно вычислить при пластических деформациях в зонах касания микронеровностей по (3.37)—(3.46).

Пластический контакт к условиям взаимного влияния микроконтактов на несущую способность. При таком виде взаимодействия  $p_r$  ср. возрастают при увеличении  $p_c$  [3.11]:

$$p_r = HВ \left( 4,5 \frac{r_i}{s_i} - 0,5 \right), \quad (3.50)$$

где  $r_i$  — радиус контактной зоны микронеровности;  $s_i$  — расстояние между зонами контактов соседних микронеровностей. Известно, что при пластических деформациях в зонах фактического касания

$$r_i = (2R h_i)^{1/2}, \quad (3.51)$$

где  $h_i$  — внедрение микронеровности.

Выражение (3.50) будет выполняться при  $p_c$ , большем, чем определяемое по (3.47). В первом приближении можно считать, что

$$s_i \approx \sqrt{1,7RR_{\max}}, \quad (3.52)$$

следовательно,

$$p_r = HВ \left[ 4,9 \left( \frac{h}{R_{\max}} \right)^{1/2} - 0,5 \right]. \quad (3.53)$$

В случае контактирования при наличии взаимного влияния микроконтактов на их несущую способность сопротивление деформированию ПС больше и сравнимо с сопротивлениями объемной пластической деформации

$p_c/HВ$

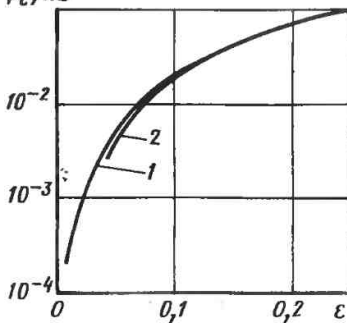


Рис. 3.15. Зависимость  $p_c$  от  $\epsilon$

1 — в общем случае; 2 — при пластических деформациях в зонах фактического касания

твердого тела. Например, при контактировании двух твердых тел размерами, удовлетворяющими сделанным в начале раздела предположениям, пластическое объемное течение материала будет происходить при нормальных напряжениях на контакте [3.11]:

$$p_c = p_\tau = \sigma_\tau \approx 0,33HВ. \quad (3.54)$$

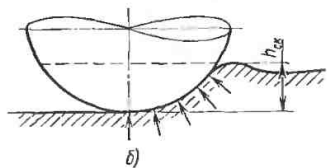
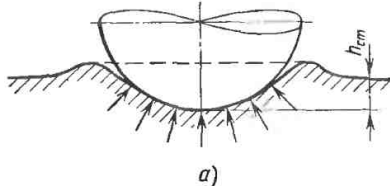
Эти напряжения практически совпадают с контурными давлениями, приводящими к взаимодействию, когда проявляется влияние микроконтактов друг на друга. Следовательно, предельная фактическая площадь касания двух номинально плоских твердых тел в соответствии с (3.40)

$$A_r = 0,33A_c. \quad (3.55)$$

Предельное сближение при этом, как следует из (3.46),

$$\epsilon_{пр} = 0,445. \quad (3.56)$$

Таким образом, в условиях пластического контакта при наличии взаимного влияния микроконтактов на несущую способность возникает ситуация, при которой увеличение  $p_c$  практически не вызывает увеличения  $\epsilon$  и, следовательно, уменьшения микронезора между ними. Поэтому не всегда увеличение  $p_c$  будет способствовать уплотняющим свойствам соединения. Значение  $p_c$ , при котором  $\epsilon$  достигает предельного значения, зависит от кон-



а)

б)

Рис. 3.16. Формирование площади фактического касания;  
а — в статике; б — при скольжении

струкции подвижного сопряжения. Разобранные выше случаи позволяют определить  $A_r$  и  $\epsilon$  в зависимости от комплекса параметров, характеризующих внешние условия ( $p_c$ ), обработку поверхностей этих тел ( $\Delta$ ,  $b$ ,  $\nu$ ,  $R_{\max}$ ), их физико-механические свойства ( $\mu$ ,  $E$ ,  $HВ$ ) и условия работы по температуре ( $\vartheta$ ). Может показаться, что приведенные формулы не учитывают температуру взаимодействующих тел  $\vartheta$ . Однако это не так, потому что входящие в них величины ( $p_c$ ,  $E$ ,  $\mu$ ,  $HВ$ ) следует рассматривать в зависимости от  $\vartheta$ . Параметры, характеризующие шероховатость поверхностей ( $b$ ,  $\nu$ ,  $\Delta$ ), как показали исследования, мало зависят от температуры.

### 3.4.3. Фактическая площадь касания при относительном скольжении твердых тел

Кинематическое состояние взаимодействующих твердых тел оказывает существенное влияние на  $A_r$  и  $\epsilon$ , т. е.  $A_r$  и  $\epsilon$  при скольжении могут значительно отличаться от  $A_r$  и  $\epsilon$ , характерных для неподвижных контактирующих тел. На это различие большое влияние оказывает вид деформаций (смятие или внедрение) в зонах фактического касания микронеровностей, а также физико-химическое состояние поверхностей трения. При неподвижном контакте твердых тел физико-химическое состояние их поверхностей практически не влияет на  $A_r$  и  $\epsilon$ . Рассмотрим случаи контактирования, когда в зонах контакта происходят смятие и внедрение микронеровностей.

При смятии микронеровностей между фактическими площадями касания твердых тел в статике  $A_{r\text{ст}}$  и при скольжении  $A_{r\text{ск}}$  существует следующая связь:

$$A_{r\text{ск}} = A_{r\text{ст}} \sqrt{1 + \alpha_\tau f^2}, \quad (3.57)$$

где  $\alpha_\tau$  — коэффициент, зависящий от напряженного состояния в зонах микронеровностей и физико-химического состояния поверхностей контактирующих тел;  $f$  — коэффициент внешнего трения.

При упругих деформациях в зонах фактического касания микронеровностей коэффициент  $\alpha_\tau = 0,5$  [3.7]. При пластических деформациях в этих зонах, по данным [3.1, 3.3, 3.10, 3.15], коэффициент  $\alpha_\tau$  может изменяться от 3,3 до 27. При  $\alpha_\tau \leq 10$  и  $f \leq 0,15$  существенного увеличения  $A_{r\text{ск}}$  не происходит. Значительное увеличение  $A_{r\text{ск}}$  можно получить при пластических деформациях смятия в условиях высокого или сверхвысокого вакуума, когда  $f \geq 0,5$ . Увеличение  $A_{r\text{ск}}$  при пластических деформациях смятия в зонах касания микронеровностей обусловлено влиянием касательных напряжений, возникающих при скольжении, на изменение напряженного состояния в этих зонах.

Увеличение  $A_r$  вызывает изменение сближения между поверхностями взаимодействующих тел от значения  $h_{\text{ст}}$  при неподвижном контакте до значения  $h_{\text{ск}}$  при скольжении. Используя (3.8), (3.11) и (3.57), можно получить соотношение между сближениями в статике и скольжении:

$$h_{\text{ск}} = h_{\text{ст}} (1 + \alpha_\tau f^2)^{\frac{1}{2\nu}} \approx \approx h_{\text{ст}} (1 + \alpha_\tau f^2)^{1/4}. \quad (3.58)$$

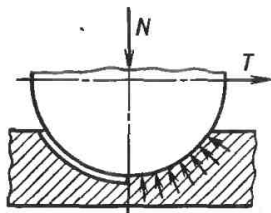


Рис. 3.17. Схема взаимодействия твердых тел при сдвиге

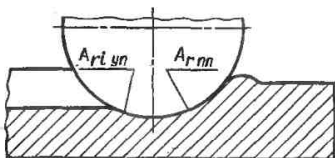


Рис. 3.18. Схема деформирования материала микронеровностью при упругом восстановлении материала

Из (3.58) следует, что при деформациях смятия в зонах микроконтактов  $h_{ск} \approx h_{ст}$ , если  $\alpha_t \leq 10$  и  $f \leq 0,15$ .  
При деформациях внедрения [3.2]

$$A_{r ск} = A_{r ст} \sqrt{1 + f^2}. \quad (3.59)$$

Из (3.59) следует, что при этом виде деформаций  $A_{r ск} \approx A_{r ст}$  при  $f \leq 0,4$ , т. е. в условиях внешнего трения фактические площади касания будут равны. Однако сближения между поверхностями взаимодействующих тел в статике и при скольжении в рассматриваемом случае будут существенно различаться. Это различие обусловлено разными механизмами формирования материала фактических площадей касания в статике и при скольжении.

Например, при идеальных пластических деформациях в зонах контактов микронеровностей касание их с деформированным материалом происходит только по фронтальной по направлению скольжения микронеровности (рис. 3.16, б). В статике микронеровность охватывается материалом со всех сторон (рис. 3.16, а). Следовательно, в статике  $A_{r ст} = A_c b e_{ст}^v$ , при скольжении  $A_{r ск} = 0,5 A_c b e_{ск}^v$ . Тогда, учитывая (3.59), найдем, что при деформациях внедрения и наличия в зонах микроконтактов пластических деформаций

$$h_{ск} = 2^{1/v} h_{ст} (1 + f^2)^{1/(2v)} \approx \approx 1,4 h_{ст} (1 + f^2)^{1/4}. \quad (3.60)$$

Сближения между поверхностями взаимодействующих тел в статике и при скольжении различны, поэтому в период сдвига происходит увеличе-

ние сближения от  $h_{ст}$  до  $h_{ск}$ . Это изменение сближения обусловлено перераспределением фактических площадей касания микронеровностей в период сдвига. При сдвиге каждая микронеровность отрывается по задней относительно направления скольжения поверхности от ранее деформированного материала (рис. 3.17). Напряжения на фронтальной поверхности возрастают и, чтобы скомпенсировать их, увеличивается площадь касания этой части поверхности микроконтакта. Это происходит до тех пор, пока площадь касания фронтальной части микронеровности не достигнет значения, определяемого в соответствии с (3.59).

Приведенный выше механизм формирования фактической площади касания характерен для твердых тел, обладающих незначительным упругим восстановлением. При использовании материалов, обладающих достаточно большим упругим восстановлением (некоторые металлы, пластмасса, пресованная древесина, кожа и др.), при определении фактической площади касания и сближения между поверхностями взаимодействующих тел необходимо учитывать упругое восстановление материала за скользящей микронеровностью. В зоне контакта произвольной микронеровности  $i$  деформирование материала происходит, как показано на рис. 3.18. В этом случае

$$A_{ri} = A_{ri пл} + A_{ri уп}. \quad (3.61)$$

где  $A_{ri пл}$ ,  $A_{ri уп}$  — площади касания микронеровности, соответствующие пластическому деформируемому и упруго-восстановленному материалам трассы, образованной при скольжении микронеровности. Эту трассу часто называют дорожкой трения. Согласно

[3.2] часть фактической площади касания, обусловленная упругим восстановлением дорожки трения,

$$A_{r_i \text{ уц}} = 0,9\pi R^{7/6} h_{i \text{ ск}}^{1/6} \times \left[ \frac{\text{HB} (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/3}, \quad (3.62)$$

тогда

$$A_{r_i} = \pi R h_{i \text{ ск}} + 0,9\pi R^{7/6} h_{i \text{ ск}}^{1/6} \times \left[ \frac{\text{HB} (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/3}. \quad (3.63)$$

Общая фактическая площадь касания при учете упругого восстановления материала менее жесткого из контактирующих тел

$$A_r = \int_0^{n_r} A_{r_i} dn_r = 0,5 A_c b \epsilon_{\text{ск}}^v \times \left( 1 + 0,9\nu (\nu - 1) k_2 \left( \frac{R}{R_{\text{max}}} \right)^{1/6} \times \epsilon^{-1/6} \left[ \frac{\text{HB} (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/3} \right) \approx \approx 0,5 A_c b \epsilon_{\text{ск}}^v \left( 1 + \frac{2,2\epsilon^{-1/6}}{\Delta^{1/6}} \times \left[ \frac{\text{HB} (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/3} \right), \quad (3.64)$$

где  $k_2$  — коэффициент, зависящий от  $\nu$ , обычно  $k_2 \approx 1,3$ .

Полученная формула отличается от формулы для определения  $A_r$  при идеальных пластических деформациях касания членом

$$(2,2\epsilon^{-1/6}/\Delta^{1/6}) [\text{HB} (1 - \mu^2)/E]^{1/3}. \quad (3.65)$$

Между сближениями в этом случае выполняется соотношение

$$h_{\text{ст}} = \frac{h_{\text{ск}}}{(2\sqrt{1 + f^2})^{1/\nu}} \times \left\{ 1 + 0,9\nu (\nu - 1) k_2 \left( \frac{R}{h_{\text{ск}}} \right)^{1/6} \times \left[ \frac{\text{HB} (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/3} \right\}^{1/\nu} \approx$$

$$\approx \frac{0,7h_{\text{ск}}}{(1 + f^2)^{1/4}} \left\{ 1 + 2,5 \left( \frac{R}{h_{\text{ск}}} \right)^{1/6} \times \left[ \frac{\text{HB} (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/3} \right\}^{1/2}. \quad (3.66)$$

Таким образом, площади касания в условиях внешнего трения в неподвижном состоянии контактирующих тел и при скольжении практически одинаковы.

## 3.5. ТРЕНИЕ НЕСМАЗАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ

### 3.5.1. Основные законы внешнего трения

Сходство между внешним и внутренним трением заключается в том, что оба вида трения являются диссипативными процессами. Внутреннее трение характеризует взаимодействие, происходящее в объеме одного объекта (твердого тела, жидкости или газа). Взаимодействие осуществляется по всей геометрической поверхности выделенного слоя. Скорость, с которой слои вещества движутся относительно друг друга, изменяется непрерывно и достаточно плавно.

При внешнем трении взаимодействие осуществляется в общем случае между различными по строению твердыми телами и имеет двойственную атомно-молекулярную и механическую природу. Это взаимодействие реализуется в отдельных изолированных друг от друга зонах фактического контакта. Скорость скольжения в зонах фактического контакта изменяется скачком.

Различают внешнее трение скольжения и трение качения. При трении скольжения относительная скорость всех точек взаимодействующих тел одинакова. При трении качения можно всегда указать точку в зоне контакта, скорость скольжения в которой равна нулю.

При внешнем трении скольжения взаимодействие твердых тел обусловлено процессами, происходящими в

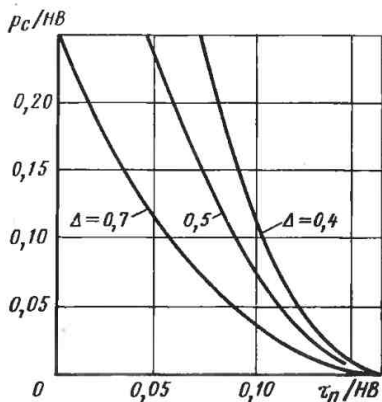


Рис. 3.19. Изменения  $p_c/HB$  в зависимости от  $\tau_n/HB$ , соответствующее условиям внешнего трения

тонких (толщиной обычно менее 10 мкм, реже 20 мкм) ПС этих тел. Оно может осуществляться при отсутствии смазочного материала (сухое трение) и в присутствии его в зоне контакта в количестве, исключающем возникновение гидродинамических эффектов (трение при граничной смазке). Во втором случае на поверхности одного из взаимодействующих тел присутствует пленка смазочного материала такой толщины, при которой свойства этого материала отличаются от его свойств в объеме.

При внешнем трении всегда происходит деформирование тонких поверхностных слоев взаимодействующих тел, при котором сплошность их не нарушается, а деформированием материала нижележащих слоев можно пренебречь.

Эти условия выполняются при сближении между поверхностями трущихся тел [3.1, 3.2, 3.10, 3.15, 3.17]

$$h = 0,5R \left( 1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right), \quad (3.67)$$

где  $\tau_n$  — касательные напряжения в зонах фактического касания твердых тел.

Учитывая (3.41), определим контактные давления, при которых может быть реализовано внешнее трение,

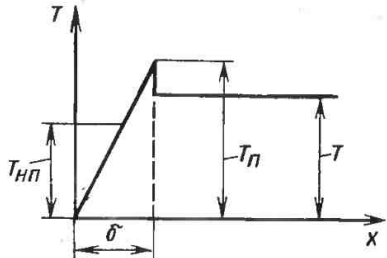


Рис. 3.20. Изменение силы трения  $T$  в зависимости от перемещения  $x$

$$p_c \leq \frac{HB}{2^{v+1}\Delta^v} \left( 1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^v \approx \frac{0,125}{\Delta^2 HB} \left( 1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^2. \quad (3.68)$$

Из (3.68) следует, что условия для реализации внешнего трения существенно зависят от основных параметров, характеризующих работу сопряжения (узла трения) — механических свойств используемых материалов (HB), обработки их поверхности ( $\Delta$ ) и особенно физико-химического состояния этих поверхностей ( $\tau_n$ ). Изменение  $p_c$  в зависимости от  $\tau_n/HB$  при различных  $\Delta$  приведено на рис. 3.19. Выше графика будут нарушаться условия внешнего трения.

Количественной мерой внешнего трения служит сила внешнего трения  $T$  — сила сопротивления относительному скольжению, лежащая в плоскости касания двух твердых тел и являющаяся равнодействующей элементарных сил трения, возникающих в зонах контактов отдельных микронеровностей. Очень часто силу трения путают с внешней силой, приложенной к контактирующим твердым телам и вызывающей их скольжение. Эта сила равна силе трения, но противоположна ей по направлению.

Сила трения — сила неконсервативная. Различают силу трения покоя, неполную силу трения покоя и силу трения скольжения. Рассмотрим взаимодействие твердых тел при сдвиге. Экспериментально установлено, что при сдвиге сила трения возрастает при увеличении смещения одного твердого

тела относительно другого до некоторого значения, затем остается неизменной и не зависящей от перемещения либо уменьшается до некоторого значения, также не зависящего от перемещения (рис. 3.20).

Перемещение  $\delta$  между твердыми телами, при котором происходит изменение силы трения, называется предварительным смещением. Максимальная сила трения, соответствующая наибольшему предварительному смещению, называется силой трения покоя. Сила трения меньше силы трения покоя, зависящая от смещения  $x < \delta$ , называется неполной силой трения покоя. Сила трения, соответствующая непрерывному скольжению между взаимодействующими твердыми телами и не зависящая от перемещения, называется силой трения скольжения.

Отношение силы трения к нормальной относительно поверхности трения внешней силе (или нормальной составляющей этой силы) называется коэффициентом трения.

Впервые понятие о коэффициенте трения ввел Леонардо да Винчи, позже Амонтон, предложив формулу

$$f = T/N. \quad (3.69)$$

Часто эту формулу ошибочно называют законом Кулона. Кулон предложил совершенно другую формулу:

$$f = k + A_0/N, \quad (3.70)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от свойств поверхностей взаимодействующих тел;  $A_0$  — сцепленность этих поверхностей. Под поверхностью трения понимают номинальную поверхность твердого тела, на которой осуществляется взаимодействие твердых тел при внешнем трении.

Определение сил и коэффициентов трения представляет большой практический и теоретический интерес. В процессе трения происходит превращение работы внешних сил в основном в теплоту, а силовые взаимодействия вызывают разрушение поверхностных слоев деталей подвижных сопряжений, т. е. их износ. Большое значение силы трения имеют

в обеспечении работы машин и безопасности движения. Используя основные положения теории взаимодействия твердых тел при внешнем трении, можно при минимальных затратах получить существенный экономический эффект.

### 3.5.2. Механическая составляющая силы трения

Сила трения, возникающая между трущимися телами, равна сумме сил, реализующихся при взаимодействии отдельных микронеровностей. Сопротивление движению произвольной микронеровности зависит от физико-химического состояния поверхностей трения, взаимодействующих тел и напряженного деформированного состояния в зоне контакта. При определении сил и коэффициентов внешнего трения будем рассматривать взаимодействие абсолютно жесткого тела с шероховатой поверхностью с менее жестким твердым телом, обладающим гладкой поверхностью.

Под нагрузкой происходит внедрение произвольной микронеровности  $h_i$ . Поверхности взаимодействующих твердых тел покрыты пленками, возникающими в результате физической адсорбции и хемосорбции. Поверхности сближаются на расстоянии, при которых возможны в общем случае межмолекулярные, а на отдельных участках и межатомные взаимодействия. В результате этих взаимодействий в зонах фактического касания между частицами, составляющими поверхности, возникают связи, кроме того, могут появляться водородная и координационные связи.

При скольжении жесткая микронеровность будет деформировать материал поверхностных слоев менее жесткого тела. В результате будет возникать сопротивление этому деформированию. Межатомные и межмолекулярные взаимодействия, промежуточные взаимодействия, приводящие к образованию водородной и координационной связи, а также макроскопическое электрическое взаимодействие, обусловленное реологическими свойствами, вызывают появление сопротив-

ления относительному скольжению. По традиции назовем силу сопротивления, обусловленную этими взаимодействиями, молекулярной составляющей силы трения  $T_M$ .

Сила сопротивления, обусловленная деформированием материала ПС микронеровностями, называется деформационной составляющей силы трения  $T_D$ . Молекулярная и деформационная составляющие силы внешнего трения взаимосвязаны и оказывают взаимное влияние друг на друга, однако ими в большинстве случаев можно пренебречь. Тогда возникающая при скольжении отдельной микронеровности сила трения

$$T_i = T_{Mi} + T_{Di}. \quad (3.71)$$

Таким образом, внешнее трение имеет двойственную природу: с одной стороны, оно обусловлено деформациями материала поверхностных слоев микронеровностями, с другой — взаимодействиями между частицами, составляющими ПС твердых тел. Такой характер взаимодействия твердых тел описывается молекулярно-механической или адгезионно-деформационной теорией трения [3.1, 3.10, 3.15].

Обе эти теории возникли практически одновременно в СССР и Англии. Однако молекулярно-механическая теория И. В. Крагельского является более общей, так как объясняет внешнее трение твердых тел в более широком диапазоне условий работы подвижных сопряжений. Адгезионно-деформационную теорию Ф. Боудена можно рассматривать как частный случай молекулярно-механической, когда  $\tau_n = \sigma_T/2$ .

Молекулярная составляющая силы внешнего трения

$$T_{Mi} = \tau_n A_{ri}. \quad (3.72)$$

Исходя из строения ПС реальных твердых тел, можно считать, что при контактировании этих тел поверхности их в зоне контакта разделены слоем сорбционных пленок. Совокупность этих пленок представляет собой, по терминологии И. В. Крагельского, «третье тело». При скольжении одного

из трущихся тел происходит течение в третьем теле, вследствие вязкости которого появляются касательные напряжения  $\tau_n$ .

По закону Ньютона удельная сила сопротивления вязкому течению

$$\tau_n = \eta dv/dz, \quad (3.73)$$

где  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости;  $dv/dz$  — градиент скорости.

При постоянной скорости скольжения можно считать градиент скорости неизменным, т. е.

$$\tau_n = c_1 \eta. \quad (3.74)$$

По Френкелю,

$$\eta = A(T_h) \exp \frac{w}{KT_h}, \quad (3.75)$$

где  $A(T_h)$  — некоторая функция температуры;  $w$  — энергия активации вязкого течения жидкости;  $K$  — постоянная Больцмана.

Энергия активации вязкого течения

$$w = B + \gamma p - \alpha(T_h - T_{h1}), \quad (3.76)$$

где  $B$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  — постоянные;  $p$  — давление в жидкости;  $T_h - T_{h1}$  — изменение температуры.

Из (3.75) и (3.76) следует, что с увеличением температуры жидкости  $\eta$  будет уменьшаться, а при увеличении давления  $p$  — возрастать.

При внешнем трении в стационарных условиях сила трения  $T = \text{const}$ , следовательно,

$$\begin{aligned} \eta &= A(T_h) \exp \frac{B + \gamma p}{KT_h} \approx \\ &\approx A(T_h) \exp \frac{B}{KT_h} \left( 1 + \frac{\gamma}{KT_h} p \right). \end{aligned} \quad (3.77)$$

Тогда из (3.74) и (3.77) получаем

$$\begin{aligned} \tau_n &= A(T_h) c_1 \exp \frac{B}{KT_h} + \\ &+ A(T_h) c_1 \left( \exp \frac{B}{KT_h} \right) \frac{\gamma}{KT_h} p. \end{aligned} \quad (3.78)$$

Обозначая

$$\left. \begin{aligned} A(T_h) c_1 \exp \frac{B}{KT_h} &= \tau_0; \\ A(T_h) c_1 \left( \exp \frac{B}{KT_h} \right) \frac{\gamma}{KT_h} &= \beta \end{aligned} \right\} \quad (3.79)$$

и учитывая, что при внешнем трении  $p = p_r$ , получим широко известную формулу [3.1, 3.2, 3.10, 3.15] для определения средних касательных напряжений между частицами, составляющими ПС твердых тел:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta p_r. \quad (3.80)$$

Из (3.72) следует, что  $\tau_n$  и  $A_r$  зависят от напряженного состояния в зоне контакта микронеровностей. Поэтому  $T_M$  и  $T_D$  будут также являться функциями напряженного состояния в микроконтактах.

Упругий ненасыщенный контакт имеет место при контурном давлении, меньшем, чем определяемое по (3.24).

При данном виде взаимодействия

$$T = \int_0^{n_r} T_i dn_r; \quad (3.81)$$

$$T_{Mi} = \tau_n \pi R h_i. \quad (3.82)$$

Величина  $\tau_n$  зависит от внедрения микронеровности, поскольку средние нормальные напряжения будут в условиях упругих деформаций переменными. Для вычисления их следует использовать (3.35).

Возникающая при скольжении произвольной микронеровности сила  $T_{Mi}$  обусловлена тем, что микронеровность деформирует ПС материала менее жесткого тела толщиной, приблизительно равной внедрению микронеровности. Вследствие несовершенной упругости материала при деформировании возникают потери энергии, которые зависят от деформируемого объема и приведенного коэффициента гистерезисных потерь  $\alpha_{\text{эф}}$ . Коэффициент  $\alpha_{\text{эф}}$  зависит от напряженного состояния в зоне контакта микронеровности. Для микронеровности в виде шаровых сегментов

$$\alpha_{\text{эф}} = 2,5\alpha_r, \quad (3.83)$$

где  $\alpha_r$  — коэффициент гистерезисных потерь при одноосном растяжении-сжатии.

При упругом деформировании ПС [3.2]

$$T_{Di} = \frac{0,25\alpha_{\text{эф}} E h_i^2}{1 - \mu^2}. \quad (3.84)$$

Из (3.19), (3.81), (3.82) и (3.84) при упругом ненасыщенном контакте следует:

$$\begin{aligned} T = & \frac{A_c b v (v-1) \varepsilon^v}{2\pi R R_{\text{max}}} \left[ \frac{\pi R R_{\text{max}}}{v(v-1)} \tau_0 + \right. \\ & + \beta \frac{0,4\pi k_1 R^{1/2} R_{\text{max}}^{3/2} E \varepsilon^{1/2}}{1 - \mu^2} + \\ & \left. + \frac{0,5\alpha_{\text{эф}} E R_{\text{max}}^2 \varepsilon}{v(v^2 - 1)(1 - \mu^2)} \right]. \quad (3.85) \end{aligned}$$

Этой формулой пользуются сравнительно редко. Наиболее широко используется метод определения  $T$  по заданному  $p_c$  (или внешней нагрузке) и расчетному значению  $f$ . При упругом ненасыщенном контакте, как следует из (3.20), (3.69) и (3.85),

$$\begin{aligned} f = & \frac{\int_0^{\varepsilon} T_i dn_r}{\int_0^{\varepsilon} N_i dn_r} = \frac{2,4\tau_0(1 - \mu^2) R^{1/2}}{v(v-1) k_1 E h^{1/2}} + \\ & + \beta + \frac{0,4\alpha_{\text{эф}} h^{1/2}}{k_1 v (v^2 - 1) R^{1/2}}. \quad (3.86) \end{aligned}$$

Полученные формулы учитывают основные параметры, характеризующие работу подвижного сопряжения: действующую нагрузку (через  $h$ ), физико-химическое состояние поверхностей трения ( $\tau_0$ ,  $\beta$ ), их обработку ( $R$ ,  $v$ ,  $k_1$ ), физико-механические свойства используемых материалов ( $\alpha_{\text{эф}}$ ,  $E$ ,  $\mu$ ).

При увеличении сближения между поверхностями трущихся тел молекулярная составляющая коэффициента внешнего трения  $f_M$  уменьшается, а деформационная составляющая  $f_D$  возрастает. Следовательно, в определенных условиях  $f$  проходит через минимум. Используя понятие о минимуме функции, найдем минимальное значе-



ние коэффициента внешнего трения  $f_{\min}$  в зоне упругого ненасыщенного контакта. Сближение для этого случая

$$h = \frac{6\tau_0 R (1 - \mu^2) (v + 1)}{E\alpha_{\phi}}, \quad (3.87)$$

далее при  $v = 2$

$$h = \frac{18\tau_0 R (1 - \mu^2)}{E\alpha_{\phi}}. \quad (3.88)$$

Подставляя значение  $h$  из (3.88) в (3.86), получим при упругом ненасыщенном контакте

$$f_{\min} = \frac{1,5\tau_0\alpha_{\phi}(1 - \mu^2)^{1/2}}{E^{1/2}} + \beta. \quad (3.89)$$

Из (3.89) следует, что  $f_{\min}$  зависит только от физико-химического состояния поверхностей трения и физико-механических свойств менее жесткого из взаимодействующих твердых тел.

Для материалов, обладающих высоким модулем упругости, в условиях применения недостаточно хорошего смазочного материала  $f_{\text{д}}$  можно пренебречь по сравнению с  $f_{\text{м}}$ . Составляющая  $f_{\text{м}}$  существенно зависит от изменения физико-химического состояния поверхности трения, тогда как  $f_{\text{д}}$  не зависит от этого. Поэтому там, где требуются стабильные значения  $f$ , необходимо обеспечивать условия, при которых  $f_{\text{д}}$  составляла бы значительную часть  $f$ . Эти условия определены ниже. В некоторых случаях, например в дорожных покрытиях, интуитивно увеличивают  $f_{\text{д}}$ , применяя более шероховатый профиль дорожного покрытия на спусках-подъемах и на поворотах.

Упругий насыщенный контакт реализуется при контурном давлении, большем, чем определяемое по (3.24). При упругом насыщенном контакте

$$T = \sum_{i=1}^{n_c} T_i. \quad (3.90)$$

Используя (3.71), (3.82)—(3.84) и (3.90), выразим  $T(\epsilon)$  в следующем виде:

$$T(\epsilon) = \frac{0,125\alpha_{\phi} A_c b \epsilon_n^{v-1} R_{\max} E}{\pi R v (1 - \mu^2)} \times \\ \times [\nu \epsilon - (\nu - 1) \epsilon_n]^2 + \\ + \left\{ \tau_0 + \frac{0,42\beta E R_{\max}^{1/2} [\nu \epsilon - (\nu - 1) \epsilon_n]^{1/2}}{R^{1/2} \nu^{1/2} (1 - \mu^2)} \right\} \times \\ \times \frac{[\nu \epsilon - (\nu - 1) \epsilon_n] A_c}{2\nu}. \quad (3.91)$$

Из (3.91) и (3.31) нетрудно установить зависимость при упругом насыщенном контакте:

$$f \approx \frac{2,4\tau_0 (1 - \mu^2) R^{1/2}}{E h^{1/2}} + \\ + \beta + 0,2\alpha_{\phi} \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2}. \quad (3.92)$$

В этом случае, как и при насыщенном упругом контакте, коэффициент  $f$  при изменении  $\epsilon$  проходит через минимум. Значение  $f_{\min}$ , найденное на основании (3.92), совпадает с аналогичным значением  $f_{\min}$  при ненасыщенном упругом контакте. Таким образом, степень насыщенности контакта не влияет на значение  $f_{\min}$ .

Среднее сближение между поверхностями трущихся тел, при котором будет иметь место  $f_{\min}$  при насыщенном упругом контакте, будет равно

$$h_{\text{ср}} = \frac{12R\tau_0 (1 - \mu^2)}{\alpha_{\phi} E}. \quad (3.93)$$

Используя (3.30) и (3.93), получим сближение между поверхностями трения, соответствующее  $f_{\min}$ ,

$$h = \frac{24R\tau_0 (1 - \mu^2)}{\alpha_{\phi} E} + 0,25. \quad (3.94)$$

Таким образом, при упругих деформациях в зонах фактического касания микронеровностей коэффициент внешнего трения при увеличении сближения между поверхностями трения взаимодействующих тел в общем случае проходит через минимум.

Пластический ненасыщенный контакт может быть реализован при контурном давлении, изменяющемся в пределах, определяемых по (3.36) и (3.43). При пластических деформациях в зонах контактов микронеровностей

средние нормальные напряжения в направлении скольжения будут постоянны и равны НВ. Тогда на основании (3.82) и (3.90) можно записать, что молекулярная составляющая на единичной микронеровности

$$T_{mi} = (\tau_0 + \beta \text{НВ}) \pi R h_i \text{ск}. \quad (3.95)$$

Деформационная составляющая силы внешнего трения при таких деформациях для единичной микронеровности будет являться силой сопротивления пластическому формоизменению поверхности трения скользящей микронеровности.

Из рассмотрения задачи теории пластичности о скольжении шарового индентора по полупространству можно получить составляющую  $T_{ди}$ , возникающую на единичной микронеровности, в зависимости от ее внедрения:

$$T_{ди} = 1,68 \text{НВ} R^{1/2} h_i^{3/2} \text{ск}. \quad (3.96)$$

Из (3.71), (3.81) и (3.95), (3.96) получим в условиях пластического насыщенного контакта

$$\begin{aligned} T &= \int_0^e T_i dn_r = \\ &= \frac{0,84 A_e b v (v-1) R_{\max}^{1/2} \text{НВ}}{\pi R^{1/2}} \times \\ &\times \left[ k_1 \epsilon_{\text{ск}}^{v+1} + \frac{\pi}{1,68} \left( \frac{R}{R_{\max}} \right)^{1/2} \times \right. \\ &\times \left. \left( \beta + \frac{\tau_0}{\text{НВ}} \right) \frac{\epsilon_{\text{ск}}^v}{(v-1)v} \right]. \quad (3.97) \end{aligned}$$

Тогда на основании (3.41) и (3.97)

$$\begin{aligned} f &= \frac{\tau_0}{\text{НВ}} + \beta + 0,55v(v-1) k_1 \times \\ &\times \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2} \approx f_M + 0,44 \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2}. \quad (3.98) \end{aligned}$$

Пластический насыщенный контакт имеет место при контурном давлении, большем, чем определяемое по (3.43), и меньшем  $p_{\text{св}}$ . Сила внешнего трения, соответствующая этому виду взаимодействия, в зависимости от сближения

между поверхностями контактирующих тел выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^{n_c} T_i \Delta n_r = 0,5 A_e b \epsilon_{\text{н}}^{v-1} \times \\ &\times [v\epsilon - (v-1)\epsilon_{\text{н}}] \times \\ &\times \left\{ f_M + \frac{0,54 \text{НВ} R_{\max}^{1/2}}{\epsilon_{\text{н}}^{3/2} v^{1/2} R^{1/2}} \times \right. \\ &\times \left. [v\epsilon - (v-1)\epsilon_{\text{н}}]^{1/2} \right\}. \quad (3.99), \end{aligned}$$

Как следует из (3.45) и (3.99),

$$\begin{aligned} f &= f_M + \frac{0,54}{v^{1/2}} \times \\ &\times \left[ \frac{vh}{R} + \frac{(1-v)h_{\text{н}}}{R} \right]^{1/2} \approx f_M + \\ &+ \frac{0,38}{R^{1/2}} (2h - h_{\text{н}})^{1/2}. \quad (3.100) \end{aligned}$$

Таким образом, при пластических деформациях в зонах фактического касания при ненасыщенном и насыщенном контактах  $f$  возрастает при увеличении сближения между поверхностями трения взаимодействующих тел.

Пластические деформации возникают в зонах контактов микронеровностей при взаимодействии твердых тел, обладающих высоким модулем упругости (металлов), и некоторых материалов (пластмасс, прессованной древесины и т. д.), обладающих низким модулем упругости. В общем случае для этих материалов коэффициент внешнего трения в зависимости от сближения между поверхностями трения проходит через минимум. Такая закономерность изменения коэффициента внешнего трения обусловлена тем, что обычно у этих материалов весьма невелик коэффициент гистерезисных потерь при трении  $\alpha_{\text{эф}}$ , и малы значения  $h/R$ , соответствующие реализации пластических деформаций в зонах фактического касания. Это приводит к тому, что деформационной составляющей коэффициента трения при упругих деформациях в зонах

фактического касания можно пренебречь. Тогда, как следует из (3.86) и (3.92), коэффициент внешнего трения при упругих деформациях в зонах фактического касания будет уменьшаться при увеличении сближения между поверхностями трения, в то время как при пластических деформациях он будет возрастать. Ориентировочно можно определить сближение при  $f_{min}$ , как среднее арифметическое между значениями  $h$ , вычисляемыми по (3.25) и (3.36), т. е.

$$\frac{h}{R} = 3,9 (1 - \mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2. \quad (3.101)$$

Значение коэффициента внешнего трения, практически совпадающее с минимальным, получим, подставляя  $h/R$  из (3.101) в (3.98):

$$f_{min} = f_M + 0,9 (1 - \mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2. \quad (3.102)$$

В общем случае коэффициент внешнего трения при увеличении сближения между поверхностями трения сначала уменьшается, затем, проходя через минимум, возрастает. Такая закономерность изменения  $f$  для материалов, обладающих невысоким модулем упругости, обусловлена соотношением между молекулярной и деформационной составляющими коэффициента трения, а для материалов с высоким модулем упругости переходом упругих деформаций в зонах фактического касания в пластические.

Обычно в узлах трения машин молекулярная составляющая коэффициента внешнего трения  $f_M \geq 0,02$ . Поэтому для материалов, обладающих высоким модулем упругости ( $HB/E \approx \approx 0,01$ ), минимальный коэффициент внешнего трения практически совпадает с его молекулярной составляющей.

Коэффициент внешнего трения при пластическом насыщенном контакте возрастает до тех пор, пока не начнет сказываться на несущей способности взаимодействие контактов отдельных микронеровностей. Это будет происходить в зоне сближений  $h_B \approx 0,4R_{max}$  [3.10].

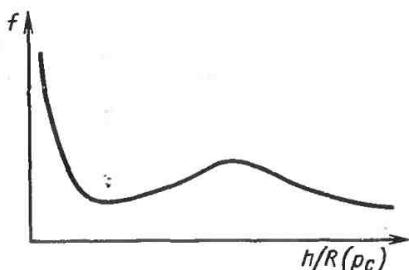


Рис. 3.21. Изменение коэффициента трения в зависимости от  $h/R$  ( $p_c$ ) в общем случае

Используя (3.100), можно определить максимально возможный коэффициент внешнего трения при пластических деформациях в зонах фактического касания:

$$f = f_M + 0,28 \left( \frac{R_{max}}{R} \right)^{1/2} \approx \approx f_M + 0,3\Delta^{1/2}. \quad (3.103)$$

При сближениях между поверхностями трения  $h > h_B$  коэффициент трения будет уменьшаться за счет уменьшения молекулярной составляющей. При увеличении сближения между поверхностями взаимодействующих тел

$$f = \frac{\tau_0}{HB \left[ 4,9 \left( \frac{h}{R_{max}} \right)^{1/2} - 0,5 \right]} + \beta + 0,3\Delta^{1/2}. \quad (3.104)$$

При значительном изменении сближения между поверхностями взаимодействующих тел  $h$  функция  $f = \psi(h)$  имеет два экстремума (рис. 3.21).

Зависимость коэффициента внешнего трения от параметров, определяющих работу трибосопрежения. К параметрам, определяющим работу трибосопрежения, относятся: конструкция узла, приложенные внешние силы, условия смазывания, материалы деталей трибосопрежения, вид обработки их поверхностей, наличие или отсутствие вибраций, температура в зоне трения.

Рассмотрим в трибосистеме только узлы, работающие в стационарных условиях, т. е. при постоянных температурах и при отсутствии существенных динамических нагрузок. Влияние параметров, определяющих работу узла трения, на его триботехнические характеристики в значительной мере зависит от вида деформаций в зонах фактического касания микронеровностей. Поэтому последовательно рассмотрим взаимодействие твердых тел при упругих и пластических деформациях в этих зонах.

### 3.5.3. Молекулярная составляющая силы трения

**Упругий ненасыщенный контакт.** Коэффициент внешнего трения вычисляется по (3.86). Изменение физико-химического состояния поверхностей (параметры  $\tau_0$  и  $\beta$ ) приводит к существенному изменению коэффициента внешнего трения, причем  $f$  линейно зависит от фрикционных параметров.

Чтобы определить влияние других параметров трибосопряжения на коэффициент внешнего трения, подставим в (3.86) сближение из (3.23):

$$f = \frac{2,4\tau_0}{1} \times \frac{1}{\rho_c^{2v+1}}$$

$$\times \left[ \frac{1 - \mu^2}{v(v+1)k_1\Delta^{1/2}5^{1/2v}E} \right]^{2v+1} +$$

$$+ \beta + \frac{0,4\alpha_{\phi}}{v^2 - 1} \left[ \frac{5\rho_c\Delta^v(1 - \mu^2)}{(k_1v)^{2v+2}(v-1)E} \right].$$

(3.105)

Для приближенных расчетов коэффициент внешнего трения в условиях упругого ненасыщенного контакта следует вычислять по формуле

$$f = \frac{2,4\tau_0(1 - \mu^2)^{0,8}}{\rho_c^{0,2}E^{0,8}\Delta^{0,4}} + \beta +$$

$$+ 0,24\alpha_{\phi}\Delta^{0,4} \left[ \frac{\rho_c(1 - \mu^2)}{E} \right]^{0,2}$$

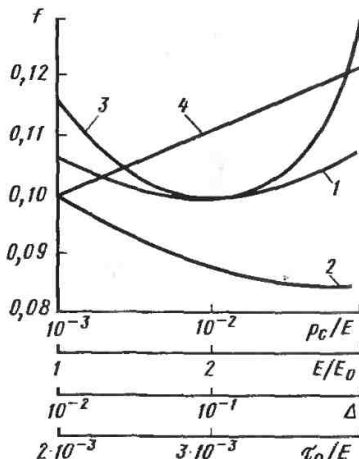


Рис. 3.22. Зависимости коэффициента внешнего трения при упругом ненасыщенном контакте от параметров, характеризующих работу трибосопряжения

Увеличение модуля упругости менее жесткого из элементов трибосопряжения приводит к уменьшению коэффициента внешнего трения (рис. 3.22).

Уменьшение  $f$  при возрастании  $E$  (2) обусловлено падением как молекулярной, так и деформационной составляющих  $f$ . Из (3.104) и (3.105) следует, что большее влияние изменение модуля упругости менее жесткого элемента трибосопряжения оказывает на молекулярную составляющую коэффициента внешнего трения. Поэтому в тех узлах, где  $f_M$  преобладает над  $f_D$ , подбирая материал для менее жесткого элемента, можно существенно изменять коэффициент внешнего трения.

Изменение контурного давления, являющегося функцией приложенных внешних сил и конструкции трибосопряжения, приводит к уменьшению молекулярной и увеличению деформационной составляющих коэффициента внешнего трения (1). Если преобладает молекулярная составляющая, то при возрастании  $\rho_c$   $f$  будет уменьшаться. При преобладании деформационной составляющей (в условиях хорошего смазывания) увеличение  $\rho_c$  приводит к возрастанию коэффициента

внешнего трения. Очевидно, в зависимости от определенных условий, при некотором значении  $p_c$  коэффициент внешнего трения будет иметь минимум.

Контурное давление, соответствующее  $f_{\min}$  из (3.105),

$$p_c = \frac{0,2\nu(\nu-1)k_1}{\Delta^\nu} \times$$

$$\times \left[ \frac{6\tau_0(\nu+1)(1-\mu^2)^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}}{\alpha_{эф}E^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}} \right]^{\frac{2\nu+1}{2}} \approx$$

$$\approx \frac{2,2 \cdot 10^2}{\Delta^2} \left[ \frac{\tau_0(1-\mu^2)^{3/5}}{\alpha_{эф}E^{3/5}} \right]^{5/2} \quad (3.106)$$

Контурное давление, приводящее к минимальным значениям коэффициента внешнего трения, существенно зависит от условия смазывания (параметр  $\tau_0$ ), шероховатости поверхностей трения взаимодействующих элементов ( $\Delta$ ) и физико-механических характеристик материала менее жесткого из этих элементов ( $\mu$ ,  $E$ ,  $\alpha_{эф}$ ). Значение  $\Delta$ , соответствующее минимальному коэффициенту внешнего трения (3), из (3.104) и (3.105) можно получить в виде

$$\Delta = \left( \frac{0,2\nu(\nu-1)k_1}{p_c} \right)^{1/\nu} \times$$

$$\times \left[ \frac{6\tau_0(\nu+1)(1-\mu^2)^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}}{\alpha_{эф}E^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}} \right]^{\frac{2\nu+1}{2\nu}} \approx$$

$$\approx \frac{15\tau_0^{5/4}(1-\mu^2)^{3/4}}{p_c^{1/2}E^{3/4}\alpha_{эф}^{5/4}} \quad (3.107)$$

Увеличение  $f_M(\tau_0\beta)$  приводит к возрастанию  $f$  (4).

Чтобы на стадии проектирования создавать трибосопряжения, обладающие оптимальной несущей способностью при наличии минимальных потерь на трение и высокой износостойкостью деталей, необходимо за-

давать для выбранных материалов и условий смазывания контурное давление, незначительно отличающееся от определяемого по (3.106), и назначать обработку поверхностей трения, позволяющую получить значение  $\Delta$ , близкое к значению, определяемому по (3.107).

**Упругий насыщенный контакт.** Коэффициент трения, определяемый в данном случае по (3.92), прямо пропорционален фрикционным параметрам  $\tau_0$  и  $\beta$ . Из (3.92), (3.30) и (3.31) получим выражение, позволяющее определить коэффициент внешнего трения в зависимости от параметров, характеризующих работу трибосопряжения:

$$f = \frac{1,25\tau_0(1-\mu^2)^{2/3}}{p_c^{1/3}E^{2/3}\Delta^{1/3}} + \beta +$$

$$+ 0,4\alpha_{эф} \left[ \frac{p_c\Delta(1-\mu^2)}{E} \right]^{1/3} \quad (3.108)$$

Если сравнить (3.105) и (3.108), то можно отметить, что при изменении контурного давления коэффициент внешнего трения будет более интенсивно изменяться при насыщенном контакте, чем при ненасыщенном, и менее интенсивно в зависимости от модуля упругости материала менее жесткого из взаимодействующих твердых тел и комплексного параметра шероховатости поверхности трения более жесткого тела. Если при ненасыщенном контакте молекулярная и деформационная составляющие коэффициента трения по-разному зависят от  $p_c$  и  $\Delta$ , то для насыщенного контакта эти зависимости  $p_c$  и  $\Delta$  входят в формулы в одинаковой степени.

Коэффициент трения при увеличении модуля упругости менее жесткого материала будет уменьшаться (рис. 3.23). При этом зависимость изменения  $f$  от  $E$  сходна с аналогичной зависимостью при упругом ненасыщенном контакте.

При насыщенном контакте зависимости коэффициента трения от контурного давления и шероховатости поверхности более жесткого из взаимодействующих тел также носят экстремальный характер. Контурное давле-

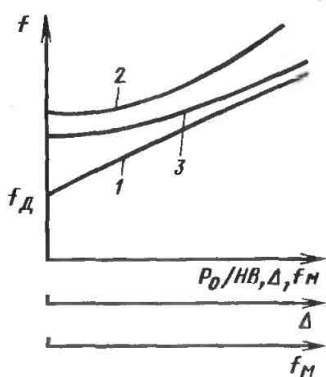


Рис. 3.23. Зависимость коэффициента трения  $f$  при пластическом насыщенном контакте от параметров, характеризующих работу трибосопряжения:

1 —  $f_M$ , 2 —  $\Delta$ , 3 —  $p_c/HB$

ние, соответствующее минимуму коэффициента трения, в данном случае равно

$$p_c = \frac{0,2\tau_0^{3/2}(1-\mu^2)^{1/2}}{\alpha_{эф}^{3/2}E^{1/2}\nu^{3/2}\Delta} \approx \frac{6,4 \cdot 10^{-2}}{\Delta} \times \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{эф}}\right)^{3/2} \left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)^{1/2}. \quad (3.109)$$

Контурное давление, приводящее к минимальному коэффициенту трения, зависит от условий смазывания ( $\tau_0$ ), шероховатости поверхности трения более жесткого из взаимодействующих тел ( $\Delta$ ), физико-механических характеристик материала менее жесткого тела ( $\mu$ ,  $\alpha_{эф}$ ,  $E$ ).

Сравнивая (3.106) и (3.109), нетрудно обнаружить, что при насыщенном упругом контакте контурное давление, приводящее к минимальному коэффициенту трения, будет меньше при одинаковых условиях, чем при ненасыщенном контакте. Поэтому для определенных условий работы трибосопряжения минимальный коэффициент трения будет иметь место либо при ненасыщенном, либо при насыщенном контакте.

Комплексный параметр шероховатости поверхности  $\Delta$ , соответствующий минимальному значению коэффи-

циента трения в условиях насыщенного контакта,

$$\Delta = \frac{5,7}{p_c} \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{эф}}\right)^{3/2} \left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)^{1/2}. \quad (3.110)$$

Значения параметров шероховатости поверхности трения более жесткого из взаимодействующих тел зависят от конструкции узла трения, действующих нагрузок ( $p_c$ ), условий смазывания ( $\tau_0$ ) и физико-механических характеристик материала менее жесткого из взаимодействующих твердых тел.

Пластический ненасыщенный контакт. Из (3.98) и (3.41) в зависимости от параметров, характеризующих работу трибосопряжения, следует:

$$\bar{f} = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,55\nu(\nu-1) \times k_1 \Delta^{1/2} \left(\frac{p_c}{HB}\right)^{1/4}. \quad (3.111)$$

Как и при упругих деформациях, в зонах фактического касания микронеровностей  $f$  пропорционален фрикционным параметрам  $\tau_0$  и  $\beta$ , зависящим от условий смазки в трибосопряжении.

Увеличение твердости материала менее жесткого элемента трибосопряжения при неизменных условиях вызывает существенное уменьшение  $f$ . Причем интенсивность изменения будет тем больше, чем больше будет молекулярная составляющая по сравнению с деформационной. При увеличении контурного давления и шероховатости поверхности более жесткого элемента трибосопряжения  $f$  в данном случае возрастает.

При использовании материалов, способных деформироваться в зонах фактического касания пластически,  $f$  при изменении сближения между поверхностями трения взаимодействующих тел в широких пределах проходит через минимум. Из (3.41) и (3.101) приближенно можно определить контурные давления, приводящие к минимальному коэффициенту трения,

$$\frac{p_c}{HB} \approx \frac{7,5}{\Delta^2} \left[\frac{(1-\mu^2)HB}{E}\right]^4. \quad (3.112)$$

Значение  $p_c$  в основном зависит от физико-механических характеристик материала менее жесткого элемента трибосопряжения ( $HВ$ ,  $\mu$ ,  $E$ ) и параметров шероховатости поверхности более жесткого элемента.

Комплексный параметр шероховатости поверхности, соответствующий  $f_{\min}$ , в данном случае

$$\Delta = 2,7 \frac{(1 - \mu^2)^2 HВ^{5/2}}{p_c^{1/2} E^2}. \quad (3.113)$$

Этот параметр зависит от конструкции узла трения и действующих внешних сил ( $p_d$ ) и наиболее существенно от физико-механических характеристик материала менее жесткого элемента узла ( $HВ$ ,  $\mu$ ,  $E$ ).

Пластический насыщенный контакт реализуется при  $p_c > p_{сн}$  (см. формулу (3.43)). При таком виде взаимодействия на основании (3.45) и (3.100) в зависимости от параметров, характеризующих трибосопряжение,

$$f = \frac{\tau_0}{HВ} + \beta + 0,9\Delta^{1/2} \left( \frac{p_c}{HВ} \right)^{1/2}. \quad (3.114)$$

Видно, что  $f \sim \tau_0$  и  $f \sim \beta$ . Он возрастает при увеличении контурного давления  $p_c$  и шероховатости поверхности более жесткого из элементов трибосопряжения и значительно уменьшается при увеличении твердости материала менее жесткого элемента.

При контурных давлениях  $p_c$ , приближающихся к значению  $p_{сн}$  (см. формулу (3.47)),  $f$  достигает максимального значения, определяемого по (3.103).

Приведенные данные позволяют на стадии проектирования создавать узлы трения с наперед заданными триботехническими свойствами. Этот подход к созданию узлов трения позволяет оптимизировать характеристики и значительно сократить объем испытаний по доводке узлов.

Зависимость коэффициента внешнего трения от температуры, при которой работает трибосопряжение. Рассмотрим влияние температуры, при которой эксплуатируется трибосопряжение, не затрагивая вопросов тепловой

динамики, трения и износа, подробно изложенных в т. III.

В настоящее время принято различать объемную  $\vartheta_{об}$  и поверхностную  $\vartheta_{пов}$  температуры, при которых работает трибосопряжение. Температура  $\vartheta_{об}$  характеризует нагрев всей детали в целом,  $\vartheta_{пов}$  — нагрев тончайших ПС. Объемная температура обусловлена разогревом деталей за счет сил трения в процессе эксплуатации, технологическим разогревом деталей (детали двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, турбин, химических реакторов, оборудования нефтяной и газовой промышленности и т. д.), нагревом в результате воздействия окружающей среды. Поверхностная температура обусловлена энергетическими потерями в ПС взаимодействующих твердых тел при внешнем трении, возникающими в результате деформирования ПС и разрушения связей при внешнем трении, образующихся вследствие межатомных и межмолекулярных взаимодействий. Обычно поверхностная температура бывает больше объемной.

При нагруженных режимах трения, связанных с большими нагрузками и в особенности с большими скоростями скольжения, необходимо уточнять значение  $\vartheta_{пов}$ . В соответствии с работами А. В. Чичинадзе в этом случае надо различать среднюю температуру поверхности трения  $\vartheta^*$  номинального или контурного контакта и температурную вспышку  $\vartheta_{всп}$  на фактических пятнах касания. При этих условиях

$$\vartheta_{пов} = \vartheta_{\max} = \vartheta^* + \vartheta_{всп}.$$

При температуре более 100 °С в зонах фактического контакта микронеровностей возникают, как правило, пластические деформации. При пластических деформациях в зонах контактов микронеровностей для определения  $f$  используют формулы (3.111) при ненасыщенном и (3.114) при насыщенном контактах. Изменение температуры по-разному сказывается на изменении  $f_M$  и  $f_{\text{МД}}$ .

Составляющая  $f_M$  зависит от касательных напряжений  $\tau_n$ , являющихся функцией механо-физико-химических процессов, происходящих на границе раздела взаимодействующих тел в зо-

### 3.5.4. Расчет силы трения покоя применительно к муфтам сцепления и стояночным тормозам

нах фактического касания и нормальных напряжений, возникающих в этих зонах. При рассматриваемых деформациях нормальные напряжения в зонах касания совпадают с твердостью по Бринеллю деформируемого материала.

На изменение касательных напряжений оказывает влияние поверхностная температура

$$\tau_n = \tau_{n0} e^{-\gamma \Delta \vartheta_{\text{пов}}}, \quad (3.115)$$

где  $\tau_{n0}$  — значение касательных напряжений, определенное при комнатной температуре;  $\gamma$  — температурный коэффициент, определяемый обычно экспериментально;  $\Delta \vartheta_{\text{пов}} = \vartheta_{\text{пов}} - \vartheta_0$  —  $\vartheta_0$  — исходная поверхностная температура. Твердость материала изменяется в зависимости от объемной температуры

$$H_B = H_{B0} e^{-\alpha \Delta \vartheta_{\text{об}}}, \quad (3.116)$$

где  $H_{B0}$  — значение твердости, определенное при комнатной температуре;  $\alpha$  — температурный коэффициент;  $\Delta \vartheta_{\text{об}} = \vartheta_{\text{об}} - \vartheta_0$  —  $\vartheta_0$  — исходная объемная температура.

Изменение температуры практически не оказывает влияния на параметр шероховатости поверхности  $\Delta$  и в большинстве случаев на контурное давление  $p_c$ . В этом случае коэффициент внешнего трения в зависимости от температуры на основании (3.111), (3.114)—(3.116) можно выразить следующим образом:

$$f = f_{m0} \exp - [(\xi \gamma - \alpha) \Delta \vartheta_{\text{об}}] + f_{d0} \exp (\alpha \Delta \vartheta_{\text{об}}), \quad (3.117)$$

$$\text{где } \xi = \frac{\Delta \vartheta_{\text{пов}}}{\Delta \vartheta_{\text{об}}} > 1.$$

Из (3.117) следует, что молекулярная составляющая коэффициента внешнего трения при увеличении объемной температуры деталей трибосопряжения уменьшается, в то время как деформационная возрастает. Поэтому в общем случае при возрастании  $\vartheta_{\text{об}}$  коэффициент внешнего трения проходит через минимум.

Рассмотрим метод расчета дисковых стояночных тормозов и дисковых фрикционных муфт сцепления с учетом сил трения покоя.

Существуют различные по конструкции фрикционные муфты сцепления. Рассмотрим дисковые муфты сцепления, принципиальная схема которых приведена на рис. 3.24. Ведущие элементы с валом двигателя или его маховика, ведомые элементы с помощью такого же соединения связаны с ведомым валом. Элементы дисковой муфты сцепления прижимаются друг к другу некоторой силой  $N_{\text{ос}}$ , создаваемой обычно с помощью цилиндрических или тарельчатых пружин.

Фрикционная дисковая муфта будет работоспособна только в том случае, если момент сил трения  $M_{\text{тр}}$ , возникающий в муфте, будет больше передаваемого вращающего момента, т. е.

$$M_{\text{тр}} = K_{\text{сц}} M_{\text{в}}, \quad (3.118)$$

где  $K_{\text{сц}}$  — коэффициент запаса сцепления.

Обычно этот коэффициент задают, исходя из условий работы муфты сцепления. Применительно к тракторам, автомобилям, строительно-дорожным и другим машинам коэффициент запаса сцепления выбирается в зависимости от динамики работы машины, жесткости трансмиссии, двигателя, установленного на машине, и других факторов (подробнее об этом см. в т. III).

Ориентировочно коэффициент запаса сцепления принимается равным для муфт тракторов 2,0—4,5, а для автомобилей 1,5—3,5 [3.10], для муфт других машин и механизмов при спокойном режиме работы 1,25—1,5 [3.15].

Меньшие коэффициенты запаса характерны для машин небольшой мощности, большие — для мощных машин. При расчете муфты сцепления по выбранному из условий работы ма-



шины коэффициентам центра застаса сцепления определяют ее основные конструктивные параметры. Ниже приведем данные по расчету дисковых муфт сцепления, используемых в тракторах и автомобилях. В муфтах сцепления этих машин ведущие диски обычно изготавливаются из металлов (сталей или чугунов) с твердостью  $HВ > 200$ . Материалами для накладок ведомых элементов служат фрикционные полимерные материалы с  $HВ \leq 20 \div 24$ .

Вследствие различия в механических свойствах материалов ведущих и ведомых дисков муфты сцепления в зонах фактического касания происходит внедрение микронеровностей ведущего металлического диска в фрикционные накладки ведомого. Силы трения, возникающие при взаимодействии элементов, зависят от давления  $p_c$ , создаваемого осевой силой  $N_{ос}$ . Обычно в направлении силы  $N_{ос}$  ведомые элементы обладают небольшой жесткостью. Поэтому с достаточно хорошим приближением можно считать, что контурная площадь касания будет совпадать с номинальной, т. е.  $p_c = p_a$ .

Сила трения существенно зависит также от вида деформаций в зонах контактов микронеровностей. На возникновение упругих или пластических деформаций в зонах фактического касания существенное влияние оказывает наряду с механическими свойствами менее жесткого элемента муфты — фрикционной накладки — микрогеометрия поверхности более жесткого металлического элемента. Для поверхностей трения ведущих элементов характерны следующие параметры микрогеометрии:  $\nu = b = 2$  и  $\Delta = 5 \cdot 10^2$ . Тогда, используя (3.26), найдем, что упругие деформации в зонах контактов микронеровностей проявляются при номинальных давлениях

$$p_c \leq (2,1 \div 3) 10^{-6} HВ_{нак}. \quad (3.119)$$

Пластические деформации будут возникать в этих зонах при

$$p_c > (5,6 \div 8,1) 10^{-6} HВ_{нак}. \quad (3.120)$$

В (3.119) и (3.120)  $HВ_{нак}$  — твердость по Бринелю материала фрикци-

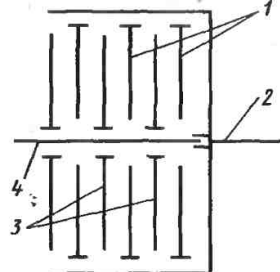


Рис. 3.24. Принципиальная схема дисковой фрикционной муфты сцепления:

1 — ведущие диски; 3 — ведомые диски; 2, 4 — соответственно ведущие и ведомые звенья

онной накладки. Обычно создаваемые в муфтах сцепления номинальные давления приводят к взаимодействию элементов муфты в условиях пластического ненасыщенного контакта. При этом виде взаимодействия определенная часть контактирующих микронеровностей деформирует материал упруго и упругопластически. Однако силы трения, возникающие на этих микронеровностях, составляют только незначительную часть аналогичных сил, возникающих при взаимодействии микронеровностей, деформирующих материал фрикционной накладки пластически.

При расчете фрикционной муфты сцепления будем определять момент сил трения покоя, возникающий при взаимодействии одной поверхности трения ведомого элемента с ведущим. Если в муфте сцепления имеется  $n_0$  ведомых элементов, то суммарный момент сил трения можно получить, умножая момент сил, возникающий на одной накладке, на  $2n_0$ . Момент сил трения, возникающий при взаимодействии одной фрикционной накладки с ведущим элементом,

$$M' = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n T_i r_i, \quad (3.121)$$

где  $T_i$  — сила трения, возникающая на некоторой контактирующей микронеровности;  $r_i$  — расстояние микроконтакта от оси вращения.

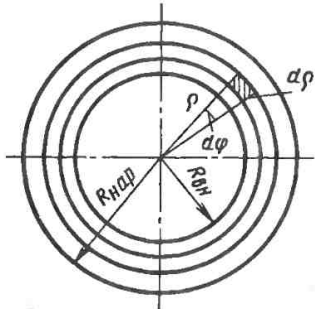


Рис. 3.25. Схема к вычислению момента сил трения

Контактирующие микронеровности расположены случайно в пределах номинальной площади, поэтому использовать (3.121) для вычисления  $M'$  весьма сложно. С целью упрощения  $M'$  вычисляют, используя некоторые усредненные удельные силы трения  $\tau$ , по формуле

$$M' = 4 \int_0^{\pi/2} \int_{R_{вн}}^{R_{нар}} \tau \rho^2 d\rho d\varphi, \quad (3.122)$$

где  $\tau = T/A_a$ ;  $\rho d\rho d\varphi = ds$  (рис. 3.25).

Из (3.41) и (3.97) выразим  $\tau$  в зависимости от нажимного усилия в следующем виде:

$$\tau = \frac{0,84\nu(\nu-1)k_1\Delta^{1/2}N_{осн}^{\frac{2\nu+1}{2\nu}}}{\pi A_a^{\frac{2\nu+1}{2\nu}} HB^{1/(2\nu)}} + f_m \frac{N_{осн}}{A_a}. \quad (3.123)$$

Из (3.122) и (3.123) определим момент сил трения покоя

$$M = \frac{4\pi n_0}{3} (R_{нар}^3 - R_{вн}^3) \times \left[ \frac{0,84\nu(\nu-1)k_1\Delta^{1/2}(2\rho_{ан})^{\frac{2\nu+1}{2\nu}}}{\pi HB^{1/(2\nu)}} + \right.$$

$$\left. + f_m \rho_{ан} \right] \approx 1,33\pi n_0 (R_{нар}^3 - R_{вн}^3) \times \rho_{ан} \left( \frac{1,4\Delta^{1/2}\rho_{ан}^{1/4}}{HB^{1/4}} + f_m \right). \quad (3.124)$$

Таким образом, полученная формула для определения момента сил трения покоя учитывает все основные конструкционные ( $\rho_{ан}$ ,  $n_0$ ,  $R_{нар}$ ,  $R_{вн}$ ), технологические ( $\Delta$ ), материаловедческие (HB) и эксплуатационные ( $f_m$ ) параметры фрикционных муфт сцепления. Составляющую  $f_m$  можно определить в условиях, максимально приближающихся к условиям работы муфты сцепления, используя стандартную методику [3.15].

В (3.124) не учтено влияние на нажимное усилие сил трения в шлицевых соединениях ведомых и ведущих элементов муфты. Поэтому эту формулу можно использовать для вычисления момента сил трения покоя только при относительно небольшом ( $n_0 \leq 5$ ) числе подвижных элементов (об учете сил трения в шлицах см. том III).

Из (3.118) и (3.124) следует, что выразить номинальные нормальные напряжения  $p_a$  в зависимости от передаваемого крутящего момента, коэффициента запаса сцепления и комплекса конструктивно-технологических и эксплуатационных параметров муфты в явном виде не представляется возможным. Поэтому для определения  $p_a$  используют так называемый метод последовательных приближений. Суть метода заключается в следующем. Вначале определяют  $p_a$ , пренебрегая составляющей  $f_m$  [первый член, стоящий в квадратных скобках (3.124)]:

$$\rho_{ан1} = \frac{0,75k_{сц}M_n}{\pi n_0 f_m (R_{нар}^3 - R_{вн}^3)}. \quad (3.125)$$

После этого для уточнения значения  $p_{ан}$  подставляют  $\rho_{ан1}$  в первое слагаемое, стоящее в квадратных скобках, и снова определяют  $p_{ан}$  по формуле

$$P_{ан2} = \frac{0,75k_{сц}M_H}{\pi n_0 (R_{нар}^3 - R_{вн}^3) \left[ \frac{\Delta^{1/2}}{HB^{1/4}} \times \left( \frac{0,75k_{сц}M_H}{\pi n_0 f_M (R_{нар}^3 - R_{вн}^3)} \right)^{1/4} + f_M \right]} \quad (3.126)$$

При необходимости эти вычисления повторяют. Для ориентировочных расчетов можно использовать следующую формулу:

$$P_{ан} = \psi P_{ан1}, \quad (3.127)$$

где  $\psi$  — коэффициент, зависящий от конструктивно-технологических параметров муфты. Обычно  $\psi = 0,8 \div 0,9$  для муфт, работающих при сухом трении без использования смазочного материала, и  $\psi = 0,5 \div 0,6$  для муфт, в которых применяются смазочные материалы.

Осевое усилие, необходимое для получения данного момента сил трения покоя, с одной стороны, можно выразить в зависимости от номинального давления в виде

$$N_H = \pi (R_{нар}^2 - R_{вн}^2) P_{ан1} \psi, \quad (3.128)$$

с другой — в виде

$$N_H = m N_n, \quad (3.129)$$

где  $m$  — число пружин в муфте сцепления;  $N_n$  — усилие нажатия, создаваемое с помощью одной пружины; тогда из (3.125), (3.127)–(3.129) нетрудно найти

$$N_n = \frac{0,75k_{сц}M_H\psi (R_{нар}^2 - R_{вн}^2)}{n_0 f_M (R_{нар}^3 - R_{вн}^3) m}. \quad (3.130)$$

Таким образом, для определения размеров пружин необходимо задать размеры муфты и число пружин. Размеры внешнего диаметра ведомых и ведущих элементов обычно обуславливаются размерами маховика двигателя. Внутренние диаметры элементов или

фрикционных накладок выбираются с учетом конструктивных технологических и экономических соображений.

По найденному значению  $N_n$  определяют размеры нажимных пружин. Эта методика расчета может быть использована для определения триботехнических характеристик дисковых тормозов с легкими режимами работы, когда влиянием нагрева от трения можно пренебречь.

### 3.5.5. Трение в резьбовых соединениях

**Основные характеристики резьбовых соединений.** Резьбовые соединения относятся к наиболее распространенным в машиностроении видам разъемных соединений. На качество этих соединений существенное влияние оказывает внешнее трение в витках резьбы и в торце гайки или головки болта (винта) с сопрягаемой деталью или шайбой. Одна из основных характеристик крепежного резьбового соединения — усилие затяжки болта (гайки) — зависит от значения и стабильности моментов сил трения, возникающих при завинчивании. Так как силы трения в резьбовом соединении зависят от его параметров, то приведем основные характеристики этих соединений.

По форме поверхности, на которой образована резьба, различают цилиндрические и конические резьбы. Ниже рассмотрены цилиндрические резьбовые соединения. Эти соединения выполняются с крепежной, ходовой и специальной резьбами, имеющими различные профили. Профиль резьбы — контур сечения витка плоскостью, проходящей через образующую поверхности, на которой образована резьба, и осью резьбы. Наиболее распространенная в СССР метрическая крепежная резьба имеет треугольный профиль.

Различают однозаходную и многозаходные (наиболее распространенные среди них двухзаходные) резьбы. Однозаходную резьбу можно получить, перемещая профиль резьбы по поверхности, на которой она образована по винтовой линии (рис. 3.26). Основными характеристиками резьбы яв-

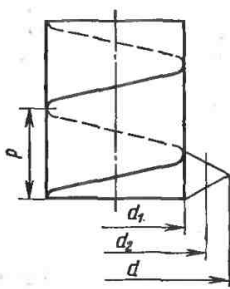


Рис. 3.26. Схема к образованию однозаходной резьбы

ляются угол профиля, угол наклона профиля, угол подъема винтовой линии, шаг резьбы, внутренний, средний и наружный диаметры резьбы.

Угол  $\alpha_p$  между сторонами профиля и перпендикуляром к оси резьбы называют углом наклона профиля. Шагом резьбы  $p$  называют расстояние между параллельными сторонами двух соседних витков, измеренное вдоль оси (см. рис. 3.26). Шаг резьбы зависит от угла подъема винтовой линии и числа заходов резьбы.

Угол подъема винтовой линии на цилиндрической поверхности диаметром, равным среднему диаметру резьбы  $d_2$ , можно определить из выражения

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{pn}{\pi d_2}, \quad (3.131)$$

где  $n$  — число заходов резьбы. Для однозаходной резьбы шаг показан на рис. 3.26.

Средним диаметром  $d_2$  резьбы является диаметр цилиндра, образующая которого пересекает витки резьбы так, что ширина витков и ширина впадин равны (рис. 3.27). Диаметр цилиндра, описанного около вершин внутренней резьбы и впадин наружной, называется внутренним диаметром резьбы  $d_1$ , а цилиндра, описанного около впадин внутренней резьбы и вершин наружной, называется наружным диаметром резьбы  $d$ .

Силы, действующие в резьбовом соединении. Эти силы подразделяются на технологические и силы трения. В крепежных соединениях к технологиче-

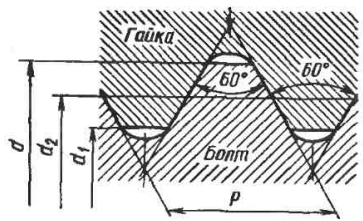


Рис. 3.27. Профиль метрической резьбы

ской относится сила затяжки, которая выбирается из условия обеспечения необходимой плотности стыка в зависимости от приложенных к нему внешних сил. Момент усилия затяжки, прикладываемый к головке винта (болта) или к гайке,

$$M_3 = M_T + M_p, \quad (3.132)$$

где  $M_T$  — момент сил трения, возникающих между торцами винта (гайки) и поверхностями соединяемых деталей;  $M_p$  — эквивалентный момент сил трения, возникающих в резьбе.

Значения  $M_T$  и  $M_p$  зависят от усилия затяжки

$$Q_3 = k_3 P' (1 - \chi), \quad (3.133)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса, обеспечивающий плотность стыка;  $P'$  — внешняя технологическая нагрузка;  $\chi$  — коэффициент основной нагрузки, изменяющийся в пределах  $0,2 < \chi < 0,4$ .

Коэффициент  $k_3$  в зависимости от условий работы и конструктивных особенностей стыка при постоянных нагрузках  $k_3 = 1,25 \div 2$ , при переменных  $k_3 = 2,5 \div 4$ . В герметичных стыках  $k_3 = 1,2 \div 2,5$  при использовании мягких прокладок,  $k_3 = 2,5 \div 3,5$  для фасонных и  $k_3 = 3 \div 4$  для плоских металлических прокладок.

Момент сил трения, возникающих при взаимодействии торца гайки (головки винта) с поверхностью соединяемой детали или шайбы, зависит от вида деформаций в зонах фактического касания микронеровностей. На эти деформации влияют контурные давления, возникающие при затяжке, механические свойства материалов, из которых изготовлены детали соединения,

и шероховатость поверхности этих деталей. Контурные давления, возникающие в зоне контакта торца гайки (головки винта) с сопрягаемой деталью или шайбой, следует вычислять по формуле

$$p_c = \frac{4Q_3}{\pi(D^2 - d^2)} = \frac{4k_3(1 - \chi)P'}{\pi(D^2 - d^2)}. \quad (3.134)$$

Из (3.26) и (3.134) следует, что упругие деформации в зонах фактического касания микронеровностей взаимодействующих деталей будут возникать при

$$Q_3 \leq 4,24\xi_0(D^2 - d^2) \frac{HB^5(1 - \mu^2)^4}{E^4}, \quad (3.135)$$

где  $\xi_0$  — коэффициент, зависящий от механических свойств материалов взаимодействующих деталей. При одинаковой твердости этих материалов  $\xi_0 = 0,67$ , при разной  $\xi_0 = 1$ .

Аналогично из (3.42) и (3.134) следует, что пластические деформации в зонах фактического касания микронеровностей будут возникать при

$$Q_3 \geq \frac{11,4\xi_0(D^2 - d^2)HB^5(1 - \mu^2)^4}{E^4}. \quad (3.136)$$

При больших усилиях затяжки взаимодействие деталей может происходить в условиях пластического насыщенного контакта. В этом случае

$$Q_3 = 8 \cdot 10^{-2} \xi_0 HB(D^2 - d^2). \quad (3.137)$$

Усилия затяжки выбирают исходя из того, чтобы напряжения, возникающие от него в резьбовой части винта  $\sigma_3$ , не превышали определенной части предела текучести материала, из которого изготовлен винт [3.10], т. е.

$$\sigma_3 = \psi_p \sigma_T, \quad (3.138)$$

где  $\psi_p$  — коэффициент, зависящий от ответственности резьбового соединения.

Для обычных крепежных соединений  $\psi_p = 0,5 \div 0,7$  для наиболее ответственных высокопрочных сопряжений  $\psi_p = 0,8 \div 0,9$ . Тогда из формулы (3.134) с учетом (3.138) определяется

$p_c$  в зоне контакта гайка—соединяемая деталь в зависимости от конструкторско-технологических и материаловедческих параметров

$$p_c = \frac{\psi_p \sigma_T d_1^2}{D^2 - d^2}. \quad (3.139)$$

Для обычных крепежных метрических резьб  $D/d_1 \approx 2$ ,  $d/d_1 \approx 1,17$ , следовательно,

$$p_c \approx (0,19 \div 0,265) \sigma_T. \quad (3.140)$$

Приведенные формулы показывают, что взаимодействие торца гайки (головки винта) с соединяемой деталью будет происходить в условиях пластического насыщенного контакта.

Момент сил трения, возникающий при этом взаимодействии,

$$M = \frac{0,11\pi f Q_3 (D^3 - d^3)}{D^2 - d^2}. \quad (3.141)$$

При контурных давлениях, определяемых по (3.134),

$$f = f_M + \left[ \frac{Q_3 \Delta}{HB(D^2 - d^2)} \right]^{1/2}. \quad (3.142)$$

Таким образом, в (3.141) для определения момента сил трения на торце гайки (головки винта) учтены все параметры, характеризующие эксплуатационные условия ( $f_M$ ,  $Q_3$ ), конструкционные особенности ( $D$ ,  $d$ ) и технологию обработки поверхности взаимодействующих деталей ( $\Delta$ ).

Составляющую  $f_M$  можно определить по ГОСТ 23.203—78\* «Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении». Ориентировочно можно принимать  $f_M = 0,15 \div 0,18$  при взаимодействии несмазанных деталей, изготовленных из стали, и  $f = 0,08 \div 0,12$  в присутствии смазочного материала. Деформационная составляющая мало зависит от присутствия в зоне трения смазочного материала. Ее ориентировочно можно вычислить, используя основные данные, характеризующие крепежные резьбы. Для этих случаев торцы гаек (головок винтов) обработаны обычно до  $R_z = 20$  мкм, следовательно, комплексный параметр шероховатости поверхности изменяется в пределах  $0,19 \leq \Delta \leq 0,25$ . Учитывая (3.140) и

принимаемая  $NB = 3\sigma_T$ , можно показать, что при взаимодействии торца гайки (головки винта) с соединяемой деталью для обычных крепежных соединений  $f_{\text{д}} = 0,17 \div 0,21$ , для высокопрочных соединений  $f_{\text{д}} = 0,21 \div 0,22$ .

Применительно к данным деталям (при наличии смазочного материала) для обычных соединений  $f_{\text{min}} = 0,25 \div 0,32$  и для высокопрочных  $f_{\text{min}} = 0,29 \div 0,34$ .

Определение момента сил трения в резьбе осложняется вследствие неравномерности распределения усилия по виткам резьбы. При вычислении момента силы трения в резьбе обычно находят момент в одном витке, а затем суммируют эти моменты с учетом неравномерности распределения нагрузки по виткам резьбы. Момент силы трения в витке зависит от вида деформаций в зонах фактического касания микронеровностей поверхностей витков резьбы гайки и болта или винта (шпильки) и сопрягаемой детали. Эти деформации зависят от контурных давлений в зоне контакта и механических свойств материалов взаимодействующих деталей, а также микрогеографии этих поверхностей. Изменением контурных давлений в пределах одного витка обычно пренебрегают.

Контурное давление, возникающее на поверхности витка под влиянием усилия  $Q(z)$ , действующего вдоль оси болта (винта, шпильки),

$$p_c = \frac{Q(z) \cos(\alpha_p/2)}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \quad (3.143)$$

Усилие  $Q(z)$  неодинаково для всех витков. Так как контурные давления распределены по виткам резьбы, то в общем случае в зонах фактического касания микронеровностей поверхностей резьбы могут возникнуть упругие, упругопластические и пластические деформации. Однако гайки имеют конечную длину. Поэтому на менее нагруженной стороне гайки  $Q(z) \neq 0$ . При оценке вида деформаций в зонах микроконтактов будем рассматривать менее нагруженные витки.

Интенсивность распределения осевых сил по высоте гайки описывается следующей функцией;

$$q(z) = \frac{Qm}{Sh(mH)} \operatorname{ch}(mz), \quad (3.144)$$

где  $Q$  — осевая нагрузка, приложенная к винту;  $H$  — высота гайки;

$$m = \sqrt{\eta/\rho};$$

$$\eta = \sqrt{\frac{1/(E_1 F_1) + 1/(E_2 F_2)}{\lambda_1^*/E_1 + \lambda_2^*/E_2}},$$

здесь  $E_1, E_2$  — модули упругости соответственно винта и гайки;  $\lambda_1^*, \lambda_2^*$  — параметры винта и гайки, зависящие от геометрических характеристик резьб;  $F_1, F_2$  — площади сечений резьбовых частей винта и гайки.

Из (3.144) следует, что, чем больше высота гайки, тем меньше нагружен виток резьбы, наиболее удаленный от соединяемых деталей. Полезную высоту  $H_{\text{п}}$  определяют по формуле

$$H_{\text{п}} = 1,52p/Q. \quad (3.145)$$

Тогда соответствующее число витков в гайке

$$n_{\text{п}} = \frac{H_{\text{п}}}{p} = \frac{1,52}{Q}. \quad (3.146)$$

Нагрузка на первый виток в гайке с полезной высотой превышает нагрузку на 10 % в гайке с бесконечной длиной. Если по оси ординат откладывать значения  $H_{\text{п}}/d$  и  $n_{\text{п}}$ , а по оси абсцисс  $d/p$  (рис. 3.28), то можно видеть, что при увеличении  $d/p$  значение  $H_{\text{п}}/d$  почти не уменьшается, а число витков значительно растет. Поэтому обычно гайки изготавливают с отношением  $H_{\text{п}}/d = 0,5 \div 0,6$ , т. е. с числом витков  $n = 5 \div 6$ . Распределение нагрузки по виткам в такой гайке приведено на рис. 3.29. Усилие, действующее вдоль оси винта,

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \psi_p \sigma_T. \quad (3.147)$$

Следовательно, на последний виток обычной гайки с полезной высотой будет действовать осевая сила

$$Q = (0,04 \div 0,055) \sigma_T d_1^2, 1. \quad (3.148)$$

Тогда контурное давление, возникающее на боковой поверхности по-

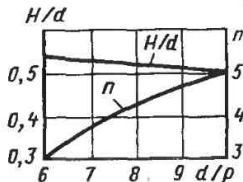


Рис. 3.28. Изменение  $H/d$  и  $n$  от  $d/p$

следнего витка гайки  $A_{cb}$  с обыкновенной метрической резьбой,

$$p_c = (0,11 \div 0,15) \sigma_T. \quad (3.149)$$

Для резьб, изготовленных обычными методами, комплексный параметр шероховатости поверхности  $\Delta = 0,18 \div 0,23$ . При этих условиях контурные давления, при которых в зонах контактов микронеровностей будут наблюдаться пластические деформации, можно определить, используя (3.42),

$$p_c \geq \frac{2,74 \xi \text{HB}^5 (1 - \mu^2)^4}{E^4}. \quad (3.150)$$

Насыщенный пластический контакт будет реализовываться в витках резьбы при контурных давлениях, определяемых по (3.43). Сравнивая контурные давления, вычисляемые по (3.43) и (3.149), можно отметить, что взаимодействие между витками резьб гайки и винта будет осуществляться в условиях пластического ненасыщенного контакта. Тогда момент сил трения в резьбе будет равен

$$M = \int_0^{\pi/2} \int_{d_1/2}^{d_2/2} \int_0^H \left[ f_M + \frac{0,5\Delta^{1/2}}{\text{HB}^{1/4}} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{Q_3 m \text{ch}(mz)}{\text{sh}(mH)} \right) \right]^{1/2} \times \\ \times \frac{Q_3 m \text{ch}(mz) r \, d\varphi \, dr \, dz}{\text{sh}(mH) A_{cb}}. \quad (3.151)$$

Интегрируя (3.151), получим

$$M = \frac{\pi (d_2^3 - d_1^3) Q_3}{12 A_{cb}} \left[ f_M + \right. \\ \left. + \frac{0,35\Delta^{1/2} \text{cth}(mH) Q_3^{1/4} m^{5/4}}{\text{HB}^{1/4} A_{cb}^{1/4}} \right]. \quad (3.152)$$

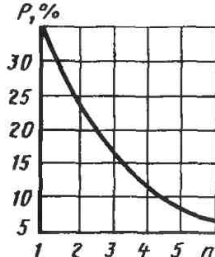


Рис. 3.29. Распределение нагрузки  $P$  по виткам  $n$

Из (3.127), (3.136), (3.145) и (3.152) следует, что момент от усилий сопротивления затяжке будет состоять из двух составляющих, одна из которых  $M_M$  обусловлена атомно-молекулярными взаимодействиями в зонах фактического касания, другая — деформированием тончайших поверхностных слоев контактирующими микронеровностями взаимодействующих деталей.

### 3.6. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ, СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ. ГРАДИЕНТ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

При дискретном контакте источниками теплоты трения являются элементарные объемы тел в области фактической площади касания, от которых теплота распространяется в глубь трущихся тел. Процесс возникновения и установления температуры на пятнах фактического контакта носит характер температурных всплесков  $\vartheta_{всп}$ , максимальное значение которых в зависимости от скорости  $v_{ск}$  достигается за время  $10^{-4} - 10^{-6}$  с. Температурная вспышка при пластическом контакте, как показано в работах А. В. Чичинадзе и Е. В. Зиновьева, пропорциональна произведению

$$\vartheta_{всп} \sim f p_c^{1/4} v_{ск}^{1/2} \text{HB}^{1-4\nu} d_r^{1/2},$$

где  $d_r$  — диаметр пятна касания.

Генерируемая на пятнах контакта теплота распределяется между трущи-

ами телами. Безразмерная величина  $\alpha_{\text{тп}}$ , показывающая, какая часть теплового потока направляется в одно из контактирующих тел, называется коэффициентом распределения тепловых потоков:

$$\alpha_{\text{тп}} = q_{1,2}/q,$$

где  $q_{1,2}$  — тепловой поток, поступающий в одно из контактирующих тел;  $q$  — общий тепловой поток. В общем случае коэффициент распределения тепловых потоков зависит от многих, часто взаимосвязанных факторов, которые не всегда могут быть аналитически полно учтены.

Следующей важной характеристикой температурного режима трения является нормальный поверхностный температурный градиент  $\partial\vartheta^*/\partial z$  ( $z$  — координата в направлении нормали к поверхности трения). Как показал А. В. Чичинадзе, температурный градиент влияет на градиент механических свойств и вследствие этого на коэффициент трения и износ.

При рассмотрении фрикционного контакта как вязкопластического «третьего» тела И. В. Крагельским и Г. И. Троянской получена следующая общая зависимость;

$$f = C\vartheta^{m-n} \frac{\partial\vartheta}{\partial z} + A\vartheta^{m-n}.$$

Как видно, с ростом температурного градиента коэффициент трения может увеличиваться. Объясняется это тем, что с ростом температурного градиента увеличивается нормальный градиент механических свойств, следовательно, сопротивление деформации. В общем случае с ростом температуры возможно снижение, рост или переход коэффициента трения через максимум или минимум в зависимости от коэффициентов  $C$ ,  $A$ ,  $m$ ,  $n$ .

С увеличением поверхностной температуры и уменьшением температурного градиента отмечается тенденция роста износа материалов. При повышенных температурах механизм изнашивания определяется процессами физико-химической механики.

Влияние нагрузки на трение зависит от вида контактного взаимодействия трущихся поверхностей — упругого или пластического.

Как следует из данных разд. 3.5, адгезионная составляющая коэффициента трения обратно пропорциональна фактическому контактиному давлению. При пластическом контакте фактическое давление равно твердости материала менее твердого из контактирующих материалов, и не зависит от нагрузки.

При упругом контакте фактическое давление увеличивается с ростом нагрузки пропорционально  $p_c^{1/(2\nu+1)}$ . Таким образом, при упругом контакте

$$f_a = f_a\Phi(p_c) \sim \left(\frac{1}{p_c}\right)^{1/(2\nu+1)}; \quad (3.153)$$

при пластическом контакте  $f_a$  не зависит от  $p_c$ , поэтому

$$f_a = \text{const}. \quad (3.154)$$

Составляющая  $f_{\text{д}}$  пропорциональна кинетическому внедрению неровностей  $h^{1/2}$ . При упругом контакте  $f_{\text{д}}$  пренебрегают в сравнении с адгезионной составляющей.

При пластическом контакте взаимное внедрение неровностей возрастает с увеличением нагрузки пропорционально  $p_c^{1/(2\nu)}$ .

Следовательно,

$$f_{\text{д}} = f_{\text{д}}\Psi(p_c) \sim (p_c)^{1/(2\nu)}. \quad (3.155)$$

Из сопоставления указаний выше выражений следует, что с ростом нагрузки по мере перехода от упругого контактного взаимодействия к пластическому  $f$  переходит через минимум в зоне упругого контакта и возрастает при пластическом. Положение минимума зависит от соотношения между адгезионной и деформационной составляющими коэффициента трения. С увеличением отношения  $f_a/f_{\text{д}}$  минимум сдвигается в сторону меньших нагрузок и контурных давлений.

Минимум на кривой зависимости коэффициента трения от нагрузки выражен сравнительно слабо. При значениях параметра кривой опорной поверхности  $\nu$  для обычных поверхностей и условий трения, равных 2—3, в области упругого контакта коэффициент трения снижается пропорционально росту нагрузки в сте-



пери  $1/5—1/7$ , а при пластическом контактировании возрастает пропорционально  $p_c$  в степени  $1/4—1/6$ .

Выше рассмотрено влияние нагрузки на трение как фактора, изменяющего геометрию контакта (например, площадь фактического касания  $A_r$ , внедрение  $h$ ).

Влиянием нагрузки на механические свойства контактирующих материалов, по известным данным Бриджмена, можно пренебречь. Однако практика показывает значительное влияние нагрузки на фрикционные характеристики.

С ростом нагрузки интенсивность изнашивания увеличивается: при упругом контакте  $I \sim p_c^{1+t_{упр}/(2\nu+1)}$ ; при пластическом  $I \sim p_c^{1+(t_{пл}+1)/(2\nu)}$ .

В настоящее время общепринято, что влияние нагрузки на трение и износ при средних и высоких скоростях скольжения осуществляется через развиваемую при трении температуру.

Скорость скольжения существенно влияет на трение и износ. Рассматривая диссипацию энергии на фрикционном контакте, И. В. Крагельский и В. С. Щедров получили следующее обобщенное выражение для коэффициента трения скольжения:

$$f = (a + bv_{ск}) \exp(-cv_{ск}) + d, \quad (3.156)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  — параметры, характеризующие трение.

Параметр  $a$  существенно зависит от физических свойств материалов трущихся поверхностей. Он увеличивается с ростом модуля упругости, скорости релаксации напряжений и шероховатости. Параметр  $b$  зависит от вязкопластических свойств материалов, параметр  $c$  является произведением декремента затухания колебаний на коэффициент вязкости контактных слоев. Параметры  $b$  и  $c$  зависят от давления, так как с его увеличением вязкость контакта возрастает.

Выражение (3.156) представляет в общем виде зависимость при наличии максимума на кривой  $f \approx f(v_{ск})$ . Существенными недостатками этой формулы являются невозможность учета влияния давления, размера поверхности, сложность определения пара-

метров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , зависящих от температуры и от всего комплекса процессов, определяющих свойства фрикционного рабочего слоя. Кроме того, эта формула пригодна только для случая, когда скорость скольжения изменяется ступенчато.

Экспериментально установлено, что для материалов, обладающих сравнительно совершенными упругими свойствами и в условиях, когда температура их существенно не изменяется, коэффициент трения не зависит от скорости. В этом случае совершенная упругость исключает гистерезисные потери и обеспечивает независимость от скорости деформационной компоненты коэффициента трения; высокая теплоустойчивость обеспечивает независимость адгезионного взаимодействия.

При несовершенном упругом контактировании с ростом скорости коэффициент трения переходит через максимум и может иметь второй экстремум — минимум. Максимум коэффициента трения расположен в зоне скоростей, обеспечивающих наибольшие гистерезисные потери. При малых скоростях деформации релаксационные процессы сужают гистерезисную петлю, коэффициент трения снижается. При больших скоростях возникающая температура уменьшает адгезионное взаимодействие и гистерезисные потери вследствие сокращения времени релаксации. В результате этого снижается коэффициент трения. Дальнейшее повышение скорости скольжения приводит к новому повышению температуры трущихся материалов, снижению их твердости, росту внедрения и деформационной компоненты силы трения: коэффициент трения вновь может возрастать. При сравнительно высоких давлениях, когда при малых скоростях возможно существенное повышение температуры, зона максимума коэффициента трения может отсутствовать.

При пластическом контакте скорость скольжения может влиять на трение через скорость распространения пластической деформации. При увеличении скорости скольжения пластическая деформация локализуется в меньшем приповерхностном объеме и коэффициент трения снижается.

Вследствие повышения температуры при росте скорости скольжения изменяются прочность и характер адгезионной связи. С увеличением температуры изменяется прочность, толщина и природа защитной контактной пленки. В зоне малых скоростей достаточная защитная пленка не успевает образовываться и передоформирование переходит в микрорезание, что соответствует возрастающей ветви кривой коэффициент трения — скорость. При дальнейшем повышении скорости (следовательно, температуры) снижение адгезионной прочности фрикционных связей приводит к уменьшению высоты деформированного валика и выглаживанию поверхности трения. Вследствие этого по мере роста скорости скольжения шероховатость переходит через максимум, соответственно влияя на коэффициент трения. При малых значениях скорости скольжения ее влияние как фактора, изменяющего прочность материала, незначительно.

Сложный комплекс процессов, протекающих на фрикционном контакте, приводит к сложной и неоднозначной зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от скорости скольжения, которая, по существу, является их зависимостью от температуры.

Большое влияние оказывает градиент механических свойств и конструкция фрикционного сочленения на трение и износ. Роль конструкции фрикционного сочленения при трении настолько велика, что конструктивные параметры узла трения (площадь трения, взаимное перекрытие, форма и размеры контактирующих элементов, жесткость конструкции и др.) выделяются в число основных определяющих факторов наряду с параметрами режима трения и свойствами трущихся материалов.

Влияние конструктивных параметров узла трения на фрикционные характеристики опосредовано и проявляется главным образом через изменение площади фактического контакта, влияние на образование и содержание продуктов износа между трущимися поверхностями, через тепловой режим, действие среды, окружающей

узел трения. Например, изменение номинальной площади трения от 1 до 100 см<sup>2</sup> в отдельных случаях приводит к снижению коэффициента трения в 1,5—2 раза.

Интенсивность изнашивания с увеличением номинальной площади поверхности при неизменных других факторах, влияющих на трение, имеет тенденцию к увеличению.

Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что с уменьшением общей конструктивной жесткости контакта элементов пары трения коэффициент трения возрастает вследствие увеличения площади фактического касания. Реальным средством снижения жесткости является разбиение общей площади трения на отдельные самостоятельно нагружаемые элементы.

Многочисленные исследования убеждают, что в условиях трения, когда возможно существенное повышение температуры, влияние изменения конструкции и размеров фрикционного сочленения на трение и износ проявляется через тепловой режим и градиент механических свойств, возникающий вследствие нагрева элементов пары трения.

Конструктивные макрогеометрические параметры фрикционного сочленения оказывают влияние на все основные характеристики теплового режима трения: распределение тепловых потоков, поверхностную температуру, температурный градиент и объемное распределение температуры в трущихся телах. Через эффективный коэффициент трения конструкция влияет на общую генерацию теплоты, а через жесткость трущихся элементов — на равномерность генерации теплоты в пределах номинальной площади контакта.

Масса трущихся элементов, теплопоглощающий объем, размеры поверхности трения и теплоотдающей поверхности являются факторами, определяющими распределение теплоты в трущихся телах, поверхностную температуру и прочие характеристики температурного поля.

Важной конструктивной характеристикой узла трения является коэффициент взаимного перекрытия  $K_{вз}$ ,

введенный А. В. Чичинадзе. Он представляет собой отношение площадей трения трущихся элементов. Большое влияние этого показателя на трение объясняется тем, что от его значения существенно зависят тепловой режим, напряженное состояние и возможность проникновения окружающей среды на поверхность трения, удержание или удаление продуктов износа. Неполное взаимное перекрытие обеспечивает возможность теплоотдачи с открытых участков поверхности трения; при полном перекрытии вся теплота идет в глубь трущихся тел. Поэтому с уменьшением взаимного перекрытия имеется тенденция к снижению средней поверхностной температуры  $\theta^*$  и росту температурного градиента  $d\theta^*/dz$ , т. е. по существующим понятиям меньшее взаимное перекрытие при постоянном давлении обеспечивает более легкий тепловой режим трения (температуру и градиент температуры).

Практика подтверждает, что для многих тяжело нагруженных фрикционных устройств уменьшение  $K_{вв}$  приводит к повышению  $f$  и большей его стабильности при изменении температуры. Изменение взаимного перекрытия может существенно влиять на напряженное состояние трущихся тел и возникновение окисных пленок.

Окружающая среда при трении рассматривается как фактор, влияющий на развитие физико-химических явлений в зоне трения и, следовательно, на трение и износ.

Установлено, что форма и размеры узла трения, коэффициент взаимного перекрытия являются факторами, влияющими на поступление газовой среды на фрикционный контакт. Для этого предлагается метод моделирования физико-химических явлений, зависящих от действия окружающей среды при трении различных антифрикционных и фрикционных материалов; критерии моделирования и масштабные коэффициенты перехода получены из условий подобия процессов трения, изнашивания и теплообразования на основании работ М. П. Александрова, Э. Д. Брауна, Ю. А. Евдокимова, Ю. Я. Изакона, В. Н. Федосеева, А. В. Чичинадзе и др. (подробно смотри гл. 7).

### 3.7. ФРИКЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ

Обеспечение плавного перемещения с весьма малыми скоростями рабочих органов, например, станков — необходимое условие для точности позиционирования.

Однако при малых скоростях скольжения часто наблюдается резко выраженная иррегулярность движения, которое происходит прерывисто, с периодически чередующимися срывами и остановками. Такого рода скачкообразное движение весьма характерно для станков высокой точности, когда необходимо обеспечить перемещение со скоростями несколько миллиметров в минуту и ниже. Скачкообразное движение часто имеет место даже при более высоких скоростях в узлах трения, имеющих невысокую жесткость.

Длительное время не существовало единого взгляда на природу возникновения механических релаксационных автоколебаний, и исследователями по-разному освещался этот вопрос [3.17, 3.18].

Первый математический анализ релаксационных колебаний выполнен Н. Л. Қайдановским и С. Э. Хайкиным, которые причину возникновения колебаний видели в падающей зависимости силы трения от скорости  $\dot{x}$ . Авторами рассматривались два типа механических систем: системы, в которых возбуждаются колебания, по форме близкие к гармоническим, и системы, в которых колебания имеют вид разрывных или релаксационных. Различие между этими типами систем объяснялось величиной «переменной силы трения». Если сила трения  $F(\dot{x})$  невелика, то она мало нарушает соотношение между силой инерции  $m\ddot{x}$  и силой упругости  $kx$  в уравнении движения системы:

$$m\ddot{x} + kx = F(\dot{x}), \quad (3.157)$$

и колебания системы близки по форме к гармоническим. Если же  $F(\dot{x})$  велика, то характер движения определяется именно ею и силой упругости  $kx$ , а сила инерции  $m\ddot{x}$  существенного влияния на характер движения не оказывает. В этом случае уравнение движения системы имеет вид  $k\dot{x} =$

$= F(\dot{x})$ , а колебания системы носят характер релаксационный. В приведенных выражениях  $m$  — масса ползуна;  $k$  — жесткость привода;  $x$  — малые перемещения.

Однако в соответствии с теорией Н. Л. Кайдановского и С. Э. Хайкина в силу постоянства условий протекания колебательного процесса при увеличении скорости амплитуда колебаний должна быть неизменной. Между тем экспериментально установлена зависимость амплитуды колебаний от скорости, причем первый скачок обычно больше последующих. К сожалению, данная теория, как и последующие (указанные выше), не позволяет объяснить наблюдаемые факты.

В 1939 г. И. В. Крагельским совместно с А. Ю. Ишлинским было доказано, что сила статического трения зависит от времени неподвижного контакта. Считая, что фрикционный контакт имеет упруговязкую природу, они получили следующее выражение:

$$F_0 = F + (F_\infty - F)(1 - e^{-\delta t_2}), \quad (3.158)$$

где  $F_\infty$  — сила статического трения при бесконечно большой продолжительности контакта;  $t_2$  — продолжительность контакта;  $\delta$  — опытный коэффициент, характеризующий нарастание силы статического трения в зависимости от продолжительности неподвижного контакта.

В начале контакта сила статического трения растет быстрее, затем нарастание силы становится менее интенсивным, и она стремится к некоторому предельному значению. Увеличение силы трения при увеличении продолжительности неподвижного контакта обусловлено тем, что фактическая площадь двух соприкасающихся поверхностей даже при самой тщательной обработке их ничтожно мала по сравнению с номинальной площадью касания. Это приводит к возникновению в точках контакта больших удельных давлений, обуславливающих взаимное внедрение соприкасающихся элементов поверхностей, сопровождающихся пластическим течением материала в зоне контакта. Это возрастание имеет место и

для металлов, и для материала органического происхождения.

Такой же характер изменения силы статического трения выявлен Н. Ф. Куниным и Г. Д. Ломакиным, а также Б. Г. Лурье при исследовании различных трущихся пар и смазочных материалов в условиях, наиболее близких к работе станочных направляющих скольжения.

Аналогичные работы по изучению временной зависимости коэффициента статического трения применительно к различным условиям трения проведены и другими исследователями. Теория, выдвинутая А. Ю. Ишлинским и И. В. Крагельским, объясняет: независимость силы трения скольжения от скорости;

изменение силы трения скачком от значения  $F(t)$  до  $F_0$  при переходе от покоя к движению [здесь  $F(t)$  — силы трения при времени  $t$  контакта;  $F_0$  — силы трения при нулевом времени контакта];

изменение амплитуды релаксационных колебаний в зависимости от  $t_2$ , а также большое значение первого скачка (с увеличением скорости время неподвижного контакта сокращается и соответственно уменьшается амплитуда колебаний).

Критическая скорость, выше которой движение происходит без скачков, определяется выражением:

$$v_{кр} > \frac{2\delta(F_\infty - F_0)}{K}, \quad (3.159)$$

где  $F_\infty$  — сила трения при бесконечно длительном контакте;  $\delta$  — константа, зависящая от свойств поверхности трения;  $K$  — жесткость привода.

Этим выражением можно руководствоваться для повышения устойчивости перемещений по направляющим скольжения: уменьшением разности  $F_\infty$  и  $F_0$  с помощью подбора соответствующих материалов, увеличением жесткости приводов подач.

В дальнейшем работами Ю. И. Костерина и И. В. Крагельского было показано, что при оценке релаксационных автоколебаний необходимо также учитывать изменения силы трения скольжения от скорости.

$$v = \frac{\Delta f N}{V \psi K m}, \quad (3.161)$$

Боуден и Лебен предложили теорию, объясняющую возникновение релаксационных колебаний иными причинами. Согласно этой теории наличие падающей характеристики силы трения от скорости скольжения не является необходимым условием для самовозбуждения автоколебаний. По Боудену и Лебену, движение между сухими и слабо смазанными поверхностями носит скачкообразный характер потому, что сама сила трения в определенных условиях испытывает скачкообразные изменения, обусловленные элементарными процессами, протекающими на поверхностях взаимодействия, в частности разрушением мостиков сварки, появляющихся в зонах контакта. Однако ошибочность этой точки зрения в дальнейшем была убедительно доказана С. Э. Хайкиным и др. И. В. Крагельский считает, что теория Боудена и Лебена может быть справедлива лишь в тех случаях, если при трении происходит молекулярное сваривание или схватывание соприкасающихся поверхностей в точках фактического контакта. Колебания же наблюдаются и у таких трущихся пар, как дерево—сталь, чугун—фрикционный полимерный материал, которые по своей природе исключают возможность сварки. Кроме того, скачкообразное движение наблюдается при таких нагрузках, которые недостаточны для образования мостиков сварки.

На основании изложенного Б. В. Дерягин, В. Э. Пуш и Д. М. Толстой предложили уравнение движения ползуна:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx \pm F_0 - n(\dot{x} - v) = 0, \quad (3.160)$$

где  $F_0$  — сила трения скольжения при  $(\dot{x} - v) \rightarrow 0$ ;  $n$  — результирующая крутизна падения характеристики трения, учитывающая одновременно демпфирующее действие смазки. Знак перед  $F_0$  совпадает со знаком относительной скорости  $(\dot{x} - v)$ .

В результате решения этого уравнения получено выражение для критической скорости, которое широко используется при расчете приводов станков:

где  $\Delta f = f_0 - f$  — разность коэффициентов трения покоя и движения;  $N$  — нормальная сила на направляющих;  $\psi = 4\mu\theta$  — относительное рассеяние энергии при колебаниях;  $K$  — жесткость привода;  $\theta$  — коэффициент затухания.

Выражение (3.161) указывает пути повышения плавности перемещения системы и позволяет правильно выбрать количественные соотношения между параметрами системы при проектировании станков.

Проанализировав и обобщив все существующие теории релаксационных автоколебаний, В. А. Кудинов дал принципиально новое объяснение происхождению автоколебательного процесса. Автор, в отличие от всех предыдущих теорий, анализирующих системы с одной степенью свободы, считает, что при рассмотрении процесса трения в большинстве случаев следует учитывать две степени свободы.

Труды В. А. Кудинова представляют большой практический интерес, так как указывают пути достижения абсолютной устойчивости или расширения устойчивости механических систем. Теория В. А. Кудинова экспериментально подтверждена М. Н. Лисицыным.

Б. Г. Лурье при решении задачи равномерности медленных перемещений, пользуясь теорией подобия и анализом размерностей, получил следующие критерии подобия:

$\Pi_1 = \frac{\lambda}{\lambda_{кр}}$  — критерий, характеризующий подобие условий трения в направляющих;

$\Pi_2 = \frac{N}{v \sqrt{K m}}$  — критерий, характеризующий подобие нагружения;

$\Pi_3 = \frac{h}{\sqrt{K m}}$  — критерий, харак-

теризующий подобие условий демпфирования в системе, где  $\lambda$  — характеристика режима работы;  $\lambda_{кр}$  — характеристика режима работы, при котором возникает жидкостное трение;  $N$  — нормальная сила (нагрузка);  $m$  —

масса тела;  $K$  — жесткость привода;  $v$  — скорость движения стола;  $h$  — коэффициент сил сопротивления.

Указанные критерии подобия позволяют анализировать результаты экспериментов, полученные на модели, и перенести их на натуру. Для применения этого метода в конструкторской практике необходимо в достаточной степени располагать экспериментальным материалом, кроме того, следует учесть, что критерии подобия выполнены на основании линеаризованного уравнения, описывающего процесс неравномерного движения.

На основании анализа существующих теорий, объясняющих причины появления механических релаксационных колебаний, приходим к выводу, что на возникновение колебаний влияют как статические, так и кинетические фрикционные характеристики. Следовательно, теории, объясняющие причину появления релаксационных колебаний процессами, происходящими при относительном покое этих элементов, не исключают одна другую, а дополняют, давая более полное представление о механизме, о причинах скачкообразного перемещения трущихся поверхностей.

В этом плане теории Н. Л. Кайдановского и С. Э. Хайкина, А. Ю. Ишлинского и И. В. Крагельского, удачно дополняют друг друга, позволяют получить полную картину причин возникновения автоколебаний. Согласно этим теориям основной причиной возникновения механических автоколебаний является наличие положительной разности между силами трения покоя и скольжения, и эта разность обусловлена как ростом силы трения покоя в зависимости от продолжительности неподвижного контакта при совместном движении соприкасающихся поверхностей, так и падением силы трения скольжения при увеличении относительной скорости. Очевидно, что продолжительность неподвижного контакта определяется не только скоростью принудительно-подвижного элемента, но и зависит от жесткости колебательной системы, свойств фрикционного контакта и свойств материалов соприкасающихся деталей.

### 3.8. ВЛИЯНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СИЛУ ТРЕНИЯ. РЕВЕРСИВНОЕ ТРЕНИЕ

Машины, приборы, строительные конструкции и другие объекты техники находятся под постоянным воздействием вибраций из-за неуравновешенности собственных узлов, машин, находящихся в непосредственной близости, а также сейсмических колебаний и др. Наличие сил трения на несмазанных поверхностях узлов машин, приборов и конструкций могут оказывать и вредное и благотворное влияние на их работу [3.18]. Так, силы трения отрицательно сказываются на работе регистрирующей аппаратуры, гироскопических систем, снижая точность измерений и управления связанных с ними объектов. В то же время наличие сил трения в машинах и строительных конструкциях уменьшает амплитуды колебаний.

Установлено, что сила трения на несмазанных поверхностях не влияет на период вынужденных колебаний. Обычно при рассмотрении вынужденных колебаний наибольший интерес представляет резонансный режим. Возмущающая сила совершает положительную работу на перемещениях системы, пропорциональную амплитуде. Сила трения, рассеивающая энергию на тех же перемещениях системы, совершает отрицательную работу, также пропорциональную амплитуде. Таким образом, если сила трения мала по сравнению с возмущающей силой и имеют место режимы с мгновенными остановками, то энергия, вносимая в систему, больше рассеиваемой энергии и амплитуды колебаний неограниченно растут. В случае вязкого трения рассеиваемая энергия пропорциональна квадрату амплитуды перемещений и даже при малом коэффициенте вязкого трения амплитуды ограничены. В работах Ф. Р. Геккера показано, что при колебаниях системы на закон движения существенно влияет наложение собственных колебаний на вынужденные, что приводит к дополнительным относительным остановкам поверхностей трения.

Работа современных машин обычно сопровождается колебаниями той или иной интенсивности, являющимися следствием условий эксплуатации или несовершенства конструкций. Диапазон частот колебаний, возникающих при работе машин, весьма широк — от долей до десятков тысяч герц. Амплитуды этих колебаний существенно зависят от жесткости узлов машин, характера их крепления на фундаменте, интенсивности возмущающих сил и др. Обычно амплитуды колебаний с увеличением частоты уменьшаются. Наибольшие амплитуды характерны для низкочастотных колебаний. При неравномерном ходе машин амплитуды колебаний достигают 200—400 мкм.

Известно, что при наличии вибраций уменьшается усилие затяжки резьбовых соединений, утрачивается самоторможение червячных передач, смещаются грузы по слабонаклонной поверхности, нарушается устойчивость насыпных дамб при землетрясении, снижается сопротивление скольжению подвижных соединений узлов машин и др.

Относительное скольжение поверхностей трения, обладающих шероховатостью и волнистостью, приводит к колебаниям масс  $m_1$  и  $m_2$  в направлении  $z$ , нормальном к поверхности трения.

Таким образом, трение способно порождать колебания деталей узлов трения и машин, а колебания влияют на силы трения.

Экспериментально установлено, что упругие деформации ПС вне зоны контакта при определенных условиях более длительного трения полностью не исчезают, а сохраняются, накапливаются и благодаря пластическим деформациям в зоне контакта и вблизи нее становятся остаточными. Деформация зависит от направления скольжения. Это позволяет предположить, что реверсивность трения отражается на остаточных внутренних напряжениях поверхностных и глубинных слоев обоих контртел.

В результате проведенных В. Д. Евдокимовым исследований выявлена тенденция к уменьшению растягивающих напряжений в ПС при реверсив-

ном трении по сравнению с односторонним.

С уменьшением частоты реверсирования и особенно при однократном реверсе обнаружено постоянное перераспределение остаточных напряжений в зоне контакта. Рентгенографическое определение остаточных упругих напряжений на поверхности трения показало их зависимость от реверсивности трения.

В условиях реверсивного и одностороннего трения применяемая слабоактивная смазка не влияет на различие в характере эпюр внутренних напряжений. Но при добавлении определенных поверхностно-активных присадок к смазочному материалу это различие нивелируется. Поверхностно-активные присадки, особенно те, которые проявляют активированную хемосорбцию с образованием железных мыл на поверхности трения, создают тонкий пластифицированный слой, приводят к возникновению сжимающих напряжений, значительному повышению износостойкости и открывают перспективу практического управления свойствами ПС при реверсивном трении. В результате знакопеременных сдвиговых деформаций происходит более интенсивное, чем при одностороннем трении, расшатывание микроструктуры, образуются новые поверхности и разнообразные дефекты, что создает более экстремальные условия для проявления адсорбционного пластифицирования.

Различия в остаточных напряжениях при одностороннем и реверсивном трении являются следствием неодинакового протекания сдвиговых процессов пластического деформирования, упрочнения, дефектообразования как в поверхностных, так и в более глубинных слоях материала.

В сравнимых условиях одностороннего и реверсивного трения установлено, что реверсивность существенным образом отражается на свойствах поверхностных и глубинных слоев. При этом происходит своеобразное изменение значения и знака сдвиговых деформаций, внутренних напряжений, увеличение температуры трения, снижение наклепа через промежуточную стадию упрочнения и перестройка дис-

локационных полей, что приводит к возрастанию дефектов структуры, увеличению свободной поверхностной энергии и интенсификации электрофизических и химических процессов на поверхностях реверсивного трения.

Такой комплекс взаимосвязанных процессов формирует отрицательный эффект реверса — повышенный по сравнению с односторонним трением износ рабочих поверхностей.

### Список литературы

3.1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.

3.2. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. 219 с.

3.3. Мур Д. Основы и применение трибоники. М.: Мир, 1978. 487 с.

3.4. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и антифрикционных взаимодействиях. М.: Машиностроение, 1986. 423 с.

3.5. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. — Мн.: Наука и техника, 1976. 432 с.

3.6. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 289 с.

3.7. Лихтман В. Н., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М.: ВНИИСТ, 1982. 303 с.

3.8. Постников В. С. Физика и

химия твердого состояния. — М.: Металлургия, 1978. 543 с.

3.9. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

3.10. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 277 с.

3.11. Михин Н. М. Механизм приработки при исходном пластическом контакте//Трение и износ. 1985. Т. 6. № 5. С. 807—811.

3.12. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.

3.13. Макаров А. Д., Мухин В. С., Шустер Л. Ш. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов. Уфа: Уфимский авиационный институт, 1974. 371 с.

3.14. Демкии Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

3.15. Трение, изнашивание и смазка: Справочник/Под ред. И. В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 399 с.

3.16. Литвинов В. Н., Михин Н. М., Мышкин Н. К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. М.: Наука, 1979. 184 с.

3.17. Ишлинский А. Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.

3.18. Геккер Ф. Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983. 168 с.



# 4.

### 4.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ СИСТЕМ СМАЗЫВАНИЯ

Система смазывания обеспечивает подведение смазочного материала в зону трения. В системах циркуляционного смазывания смазочный материал циркулирует в системе, притекая в зону трения и оттекая из нее.

Система смазывания включает: резервуар (бак) для смазочного материала; устройства, подающие смазочный материал в зону трения; устройства, отводящие смазочный материал из зоны трения, системы охлаждения; системы очистки смазочного материала; устройства, выравнивающие давление и скорость; арматуру (измерители, указатели, органы управления и т. п.). В простых системах некоторые элементы могут отсутствовать или иметь очень простую конструкцию. Конструкция систем смазывания зависит от того, какие устройства смазываются, в каких условиях производится смазывание, какое количество смазочного материала необходимо, какой вид смазочного материала применяется.

Смазывание осуществляется в простейших устройствах и сложнейших системах, включающих сотни элементарных ТС.

Смазочный материал подается к устройствам, работающим при низких и высоких температурах, при больших и малых скоростях и нагрузках. Если для смазывания часов нужна капля масла, то в системах смазывания на металлургических предприятиях используются десятки и даже сотни тонн смазочного материала. В системах смазывания чаще всего применяются минеральные масла, реже синтетические, водно-масляная эмульсия, пластические смазочные материалы.

В отдельных случаях могут использоваться другие материалы. Если смазочный материал подводится к одному устройству, то система называется системой индивидуального смазывания, если смазываются несколько устройств, то система называется системой центрального смазывания. По периодичности подачи смазочного материала можно выделить системы непрерывного и периодического смазывания. Некоторые устройства смазываются один раз на все время их функционирования (холодильники, стиральные машины и т. п.). В качестве критерия классификации можно использовать способ подведения смазочного материала и выделить системы смазывания без давления и под давлением. Если смазочный материал используется один раз, то система называется системой однократного смазывания, при многократном использовании смазочного материала система называется системой циркуляционного смазывания. Дальнейшее деление связано с конкретными конструктивными решениями. Оно представлено на рис. 4.1 и 4.2.

#### 4.1.1. Индивидуальное смазывание

Индивидуальное периодическое проточное смазывание без давления. Простейший способ смазывания — это ручное смазывание, применяющееся до сих пор в значительном количестве машин. В смазочное отверстие с помощью поршневой или мембранной масленки вводится масло. Некоторые виды смазочных отверстий и клапанов представлены на рис. 4.3.

Индивидуальное периодическое проточное смазывание под давлением.

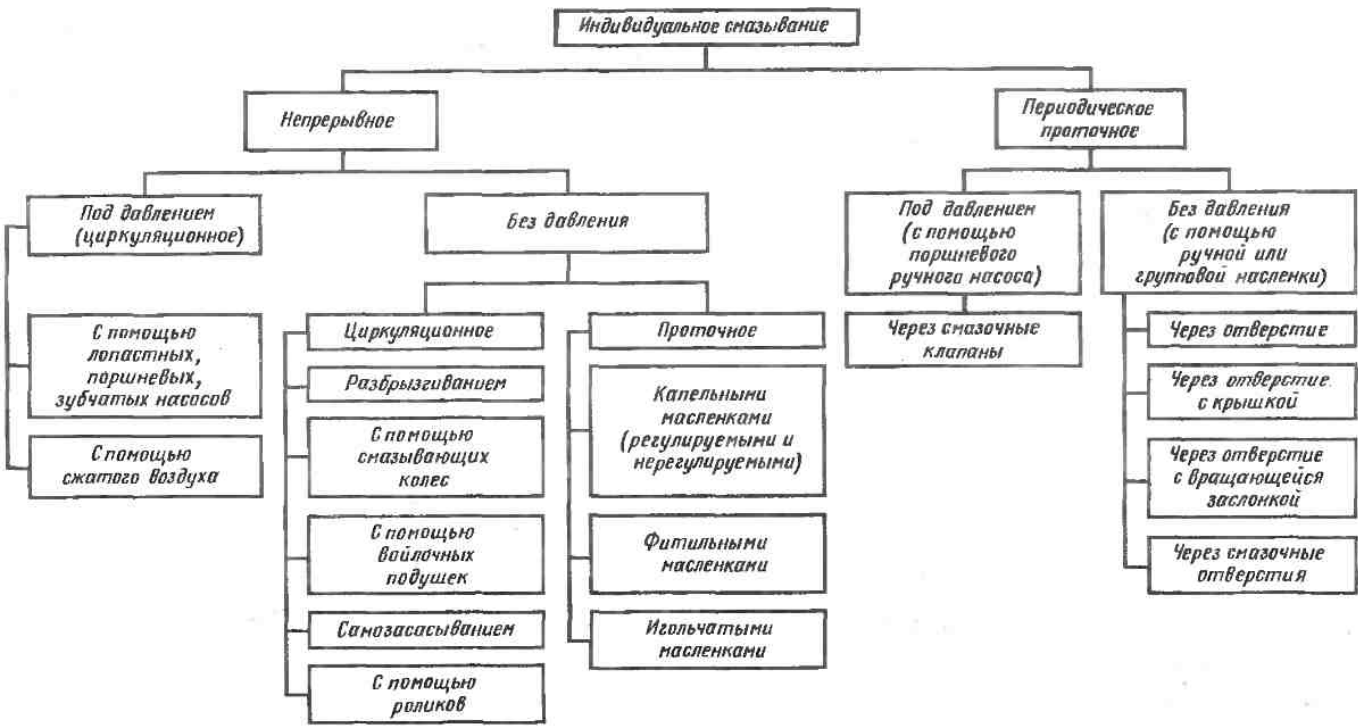


Рис. 4.1. Системы индивидуального смазывания [4.1]

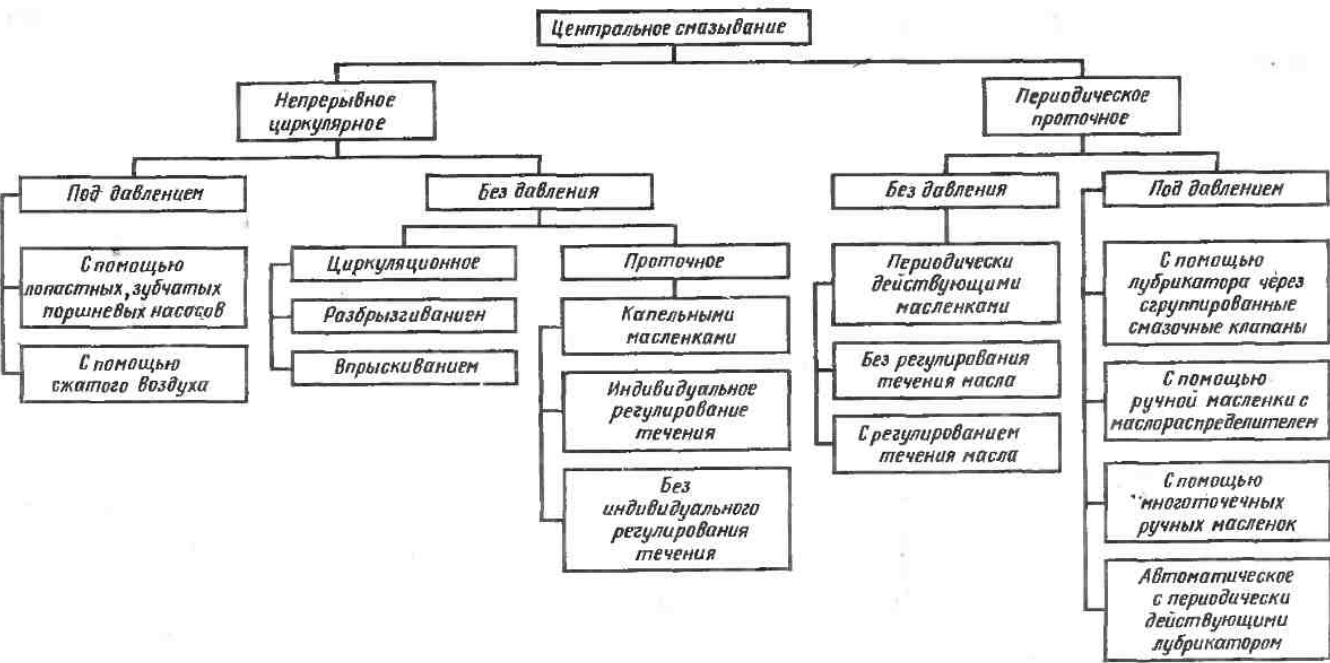


Рис. 4.2. Системы центрального смазывания [4.1]

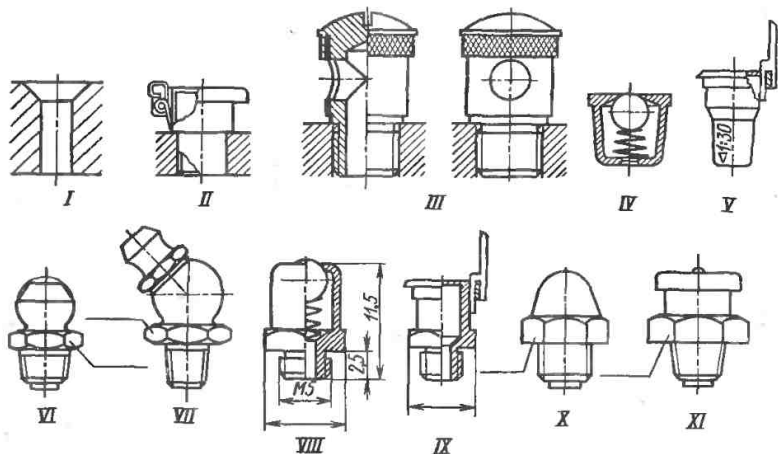


Рис. 4.3. Смазочные отверстия I—III и клапаны IV, V:

II — масленка с откидной крышкой; III — масленка с поворачиваемым колпачком; IV, V — запрессовываемые клапаны; VI—XI — вворачиваемые клапаны и масленки

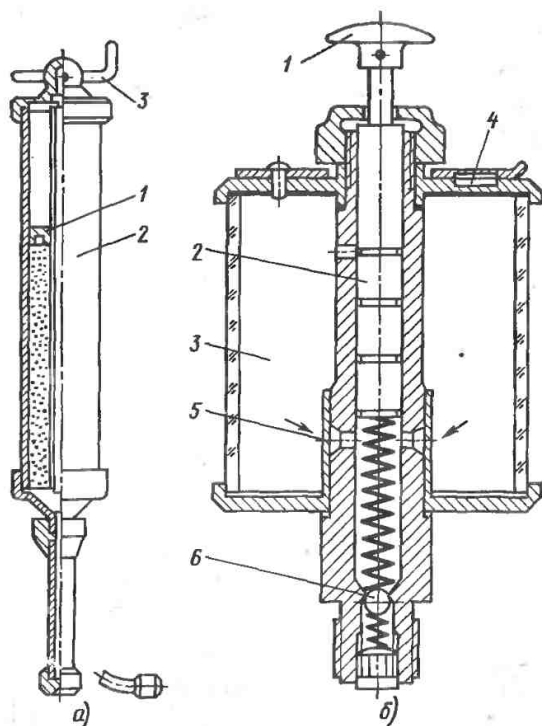


Рис. 4.4. Масленки:

а — пресс-масленка: 1 — поршень; 2 — винт; 3 — воронник; б — масленка, работающая периодически под давлением: 1 — кнопка; 2 — плунжер; 3 — бак; 4 — отверстие для заливки масла; 5 — сеточный фильтр; 6 — шариковый клапан

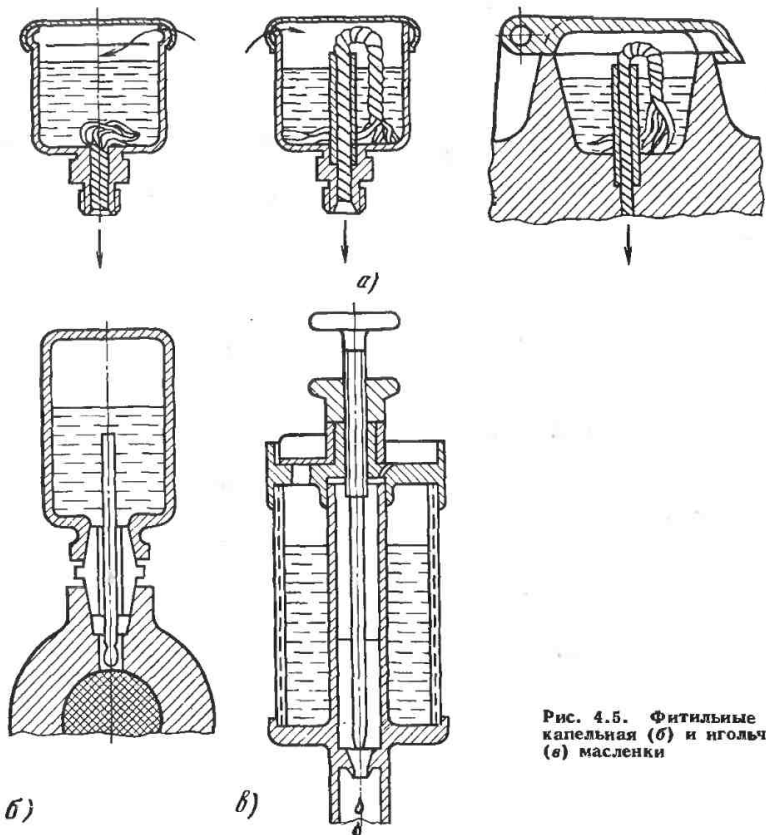


Рис. 4.5. Фитильные (а), капельная (б) и игольчатая (в) масленки

Для этого вида смазывания применяются ручные масленки, из которых масло в смазочное отверстие выдавливается под давлением, создаваемым движением поршня. Подача масла в зону трения под давлением позволяет покрыть им большую поверхность, потому что оно попадает в разного рода трещины и углубления. Конструкция пресс-масленок представлена на рис. 4.4.

Индивидуальное непрерывное проточное смазывание без давления. В этом случае используется разность уровней масла в масленке, смонтированной в устройстве, и в смазываемой детали. Одну группу устройств такого рода образуют фитильные масленки (рис. 4.5, а), в которых используются капилляр-

ные свойства фитиля. В другую группу входят капельные (рис. 4.5, б) и игольчатые (рис. 4.5, в) масленки, в которых через регулируемое отверстие по капле вытекает масло. Масляный бачок делается из прозрачного материала, например стекла, чтобы был виден уровень масла, который может регулироваться поплавком. Применяются также конструкции, в которых игла пропускает масло только во время работы машины. После остановки машины игла закрывает отверстие, через которое поступает масло. Третью группу составляют смазочные подушки (рис. 4.6), сделанные из материалов, обладающих капиллярными свойствами (фетр, войлок, шерстяная пряжа). Подушки могут располагаться в нижней

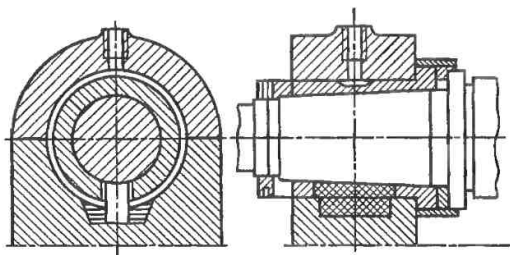


Рис. 4.6. Применение масляной подушки (к цапфе подушка прижимается благодаря собственной упругости)

или боковой части подшипника. Окружная скорость смазываемых поверхностей не должна превышать 4 м/с (трансмиссии, вагонные подшипники, станки и т. п.). Маслом подушки пропитываются с помощью специальных карманов, в которые вливается масло, либо с помощью фитиля.

Индивидуальное непрерывное циркуляционное смазывание без давления. В первую группу такого рода систем смазывания входит смазывание с помощью смазывающих поверхностей, применяемое в основном для горизонтальных подшипников скольжения. Возможны два способа привода кольца: кольцо свободно висит на вале, кольцо закреплено на вале.

В обоих случаях вращающееся кольцо погружается в масло и переносит его на верхнюю часть вала (рис. 4.7). Масло растекается по поверхности и стекает в бак, после чего повторяется. С помощью свободного кольца смазываются валы с окружной скоростью не менее 0,5 м/с и не более 32 м/с. Для длинных подшипников применяются два кольца, а для валов с малой частотой вращения вместо кольца используются мелкозвенные цепи.

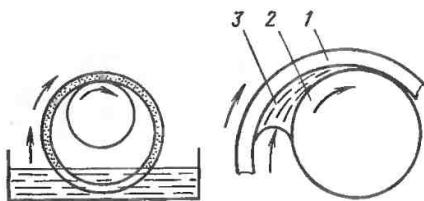


Рис. 4.7. Схема действия смазочного кольца:

1 — кольцо; 2 — вал; 3 — масло

Второй вид такого смазывания — это смазывание погружением (смазывание в масляной ванне), применяемое чаще всего для зубчатых передач и для некоторых двигателей внутреннего сгорания. При смазывании передач одно из колес частично погружено в масляную ванну и, поворачиваясь, переносит масло на другое колесо, смазывая его. Эту роль может выполнять холостая шестерня, наносящая масло на рабочую шестерню. Смазывание погружением применяется для зубчатых колес с окружной скоростью не более 15 м/с и для червячных колес со скоростью не более 10 м/с. Масло разбрызгивается в ванне, и вся ее внутренность заполнена масляным туманом. В двигателях внутреннего сгорания вращающийся коленчатый вал разбрызгивает масло, благодаря чему смазывается двигатель.

Смазывание посредством самозасасывания применяется для смазывания цапф подшипников скольжения с маленьким зазором между цапфой и

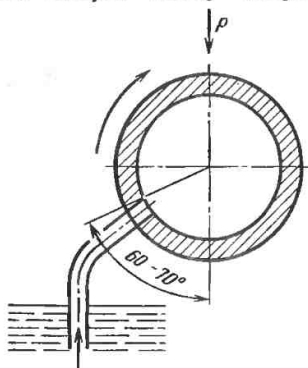


Рис. 4.8. Схема смазывания самозасасыванием [4.1]

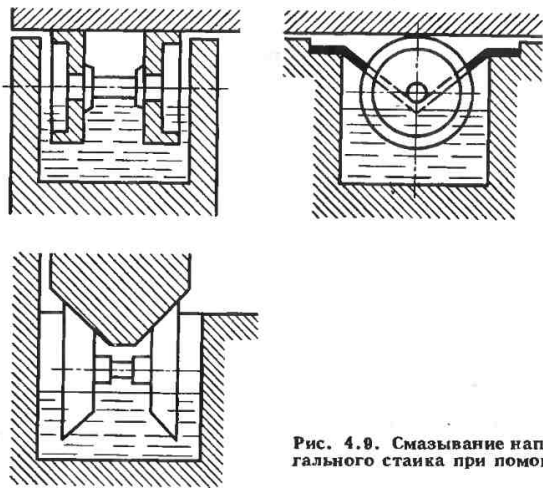


Рис. 4.9. Смазывание направляющих строгального станка при помощи роликов [4.1]

подшипником (не более 10 мкм) и при окружной скорости не менее 3 м/с. При движении цапфы возникает разрежение, в результате чего засасывается масло из бака (рис. 4.8). Для такого способа смазывания нельзя применять масло с большой вязкостью.

Смазывание с помощью роликов применяется в основном для смазывания направляющих и столов фрезерных и строгальных станков (рис. 4.9). Ролики, частично погруженные в масло, забирают его и переносят на движущиеся над ними поверхности.

Смазывание спиральными канавками представлено на рис. 4.10. Вращаю-

щийся с большой частотой (3500—15 000 об/мин) в вертикальном подшипнике вал закачивает масло в канавки и затем разносит его по поверхности подшипника. Такой способ смазывания применяется в вертикальных подшипниках станков.

Индивидуальное непрерывное смазывание под давлением основано на подаче масла под давлением, создаваемым малыми поршневыми, лопастными или зубчатыми насосами. Так как отсутствуют очищающие и охлаждающие устройства и масло подается к небольшому количеству точек смазывания, эта система смазывания относится к индивидуальным.

#### 4.1.2. Центральное смазывание

Система центрального смазывания характеризуется подведением смазочного материала к значительному количеству устройств или точек смазывания. Все устройства смазываются одним и тем же маслом или пластичным материалом. Конструктивно системы центрального смазывания близки к системам индивидуального смазывания, но обслуживают большее количество точек смазывания.

Периодическое центральное смазывание без давления. Подача масла осу-

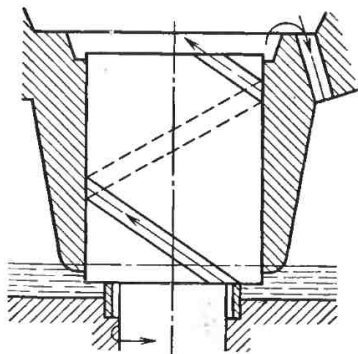


Рис. 4.10. Смазывание вертикального подшипника при помощи канавок

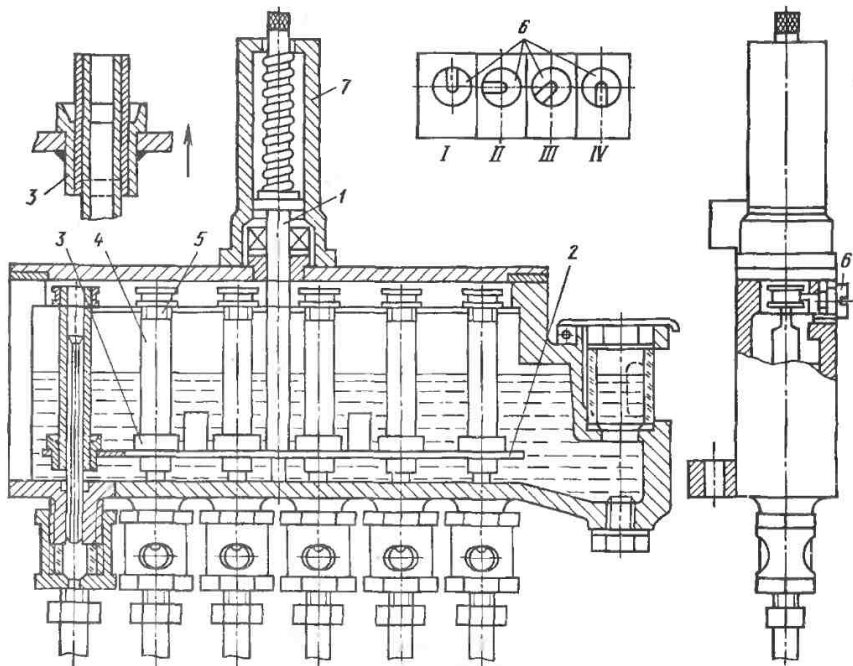


Рис. 4.11. Пневматическая шеститочечная масленка для периодической смазки: I — закрыто, II — одна капля; III — пять капель; IV — 10 капель

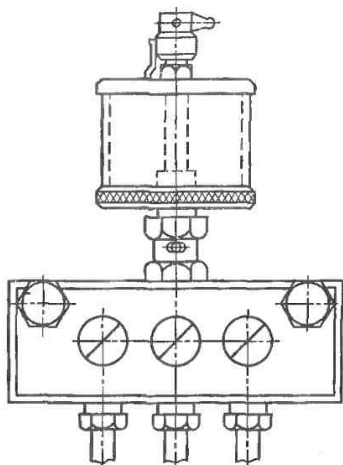


Рис. 4.12. Капельная (или фитильная) масленка с трехточечным распределителем

ществляется под действием силы тяжести, все устройства системы должны находиться выше точек смазывания. Многоточечная масленка снабжена баком, который наполняется вручную и из которого после открытия выходных отверстий масло может стекать к точкам смазывания.

На рис. 4.11 представлена пневматическая шеститочечная масленка для периодического смазывания. Основной ее элемент — поршень (в нижнем положении) со штоком 1. Перемещаясь вверх, поршень поднимает прикрепленную к нему планку 2 вместе с тарелками 3, которые движутся по трубкам 4. Тарелки наполнены маслом и поднимаются до высоты окон 5. Масло через трубки попадает в смазочные отверстия. Винт 6 служит для поднятия или опускания трубок 4 и регулирования тем самым поступления масла к определенным точкам. В цилиндр 7



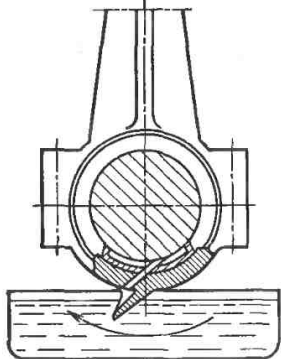


Рис. 4.13. Центральное смазывание с помощью коленчатого вала с лопаткой, разбрызгивающей масло

периодически подается сжатый воздух, что приводит к движению штока и подаче масла. При запуске машины масленка обслуживается вручную.

Периодическое центральное смазывание под давлением. Масло к точкам смазывания подается под давлением. Для этого используются специальные насосы с ручным или механическим

приводом. Привод насосов может осуществляться периодически включаемым электромагнитом или от вала смазываемой машины. Смазочные отверстия открываются периодически в соответствии с программой смазывания, и в точки смазывания подаются определенные порции масла. Конструктивных решений такого рода систем смазывания очень много. Обычно они снабжены распределителем, из которого масло по трубкам подается к отдельным точкам смазывания (рис. 4.12).

Непрерывное центральное смазывание без давления. Обычно это конструкции, объединяющие индивидуальные системы смазывания. Используются многоканальные капельные и фитильные масленки. Часто применяется смазывание разбрызгиванием, когда масло подводится ко всем поверхностям, требующим смазывания. Роль разбрызгивателя могут играть шестерня, коленчатый вал и т. п. (рис. 4.13). Разбрызгивания масла можно добиться, поливая маслом вращающиеся детали. Простое поливание маслом деталей также представляет собой смазывание без давления.

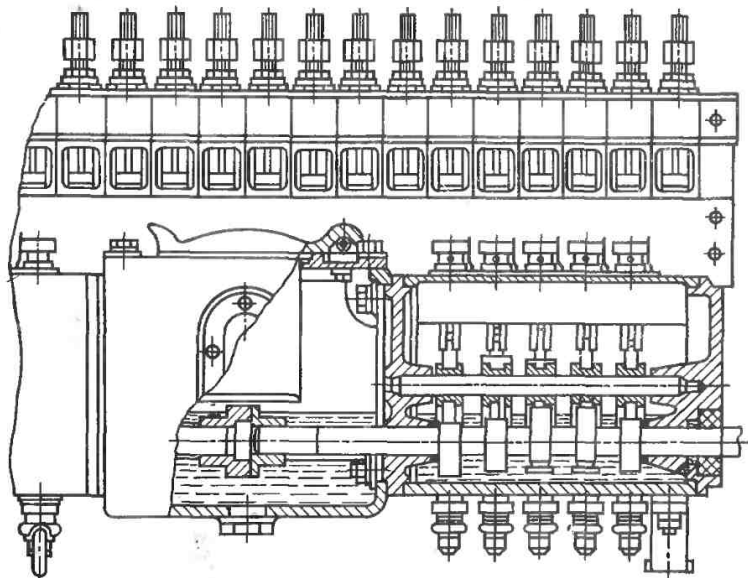


Рис. 4.14. Многоточечный лубрикатор

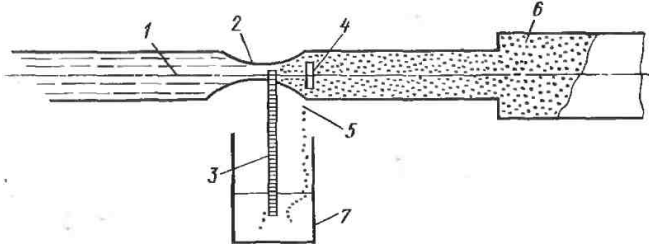


Рис. 4.15. Смазывание масляным туманом:

1 — сжатый воздух; 2 — сопло Вентури; 3 — трубка, засасывающая масло; 4 — отражатель; 5 — капли масла, поступающие в бак от отражателя; 6 — распыленное масло, поступающее к месту смазывания; 7 — бак с маслом

**Непрерывное центральное смазывание под давлением.** Такие системы конструируются для любого количества точек смазывания. Если точек смазывания несколько десятков, применяются смазочные прессы, называемые лубрикаторами. В них входят всасывающе-нагнетающие и распределительно-подающие детали. Ими можно подавать масло на большие расстояния и под большим давлением (до нескольких десятков магистралей). Привод осуществляется от вала смазываемой машины с помощью ременной, цепной или зубчатой передачи. Иногда привод лубрикатора осуществляется от собственного двигателя. Каждый лубрикатор имеет ручной привод, используемый при запуске смазываемой машины. Вместимость бака лубрикатора — несколько литров. На рис. 4.14 показана возможная конструкция лубрикатора.

В больших системах смазывания используются баки, из которых масло насосами через фильтры подается к точкам смазывания. После выполнения задания масло стекает в масляную ванну и оттуда в бак. Большие системы смазывания оборудуются центрифугами, очищающими масло, холодильниками, манометрами, расходомерами и другими устройствами, необходимыми для функционирования такой системы.

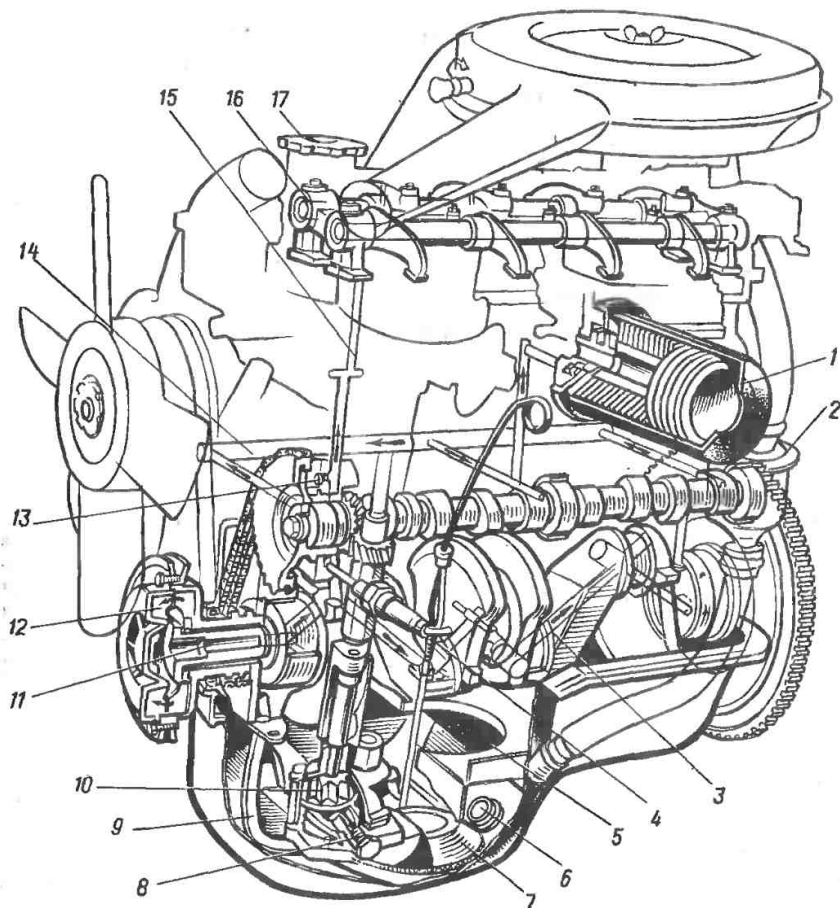
Центральное смазывание может осуществляться с помощью масляного тумана, который создается специальными устройствами. Чаще всего масляный туман создается с помощью сжа-

того воздуха. На рис. 4.15 показан принцип образования масляного тумана. Получение аэрозоля основано на смешивании двух струй: воздуха и масла. Струя воздуха расширяется в сопле и всасывает масло, подводимое из бака под небольшим давлением. Распыленное масло ударяется в отражатель, расположенный за соплом, и только самые мелкие капельки огибают его и по трубопроводу подаются в зону смазки. Размер капель масла должен быть несколько микрометров, скорость потока около 2 м/с. Воздух используется исключительно как транспортное средство, после доставки капель масла в зону смазки они с помощью сгущающего сопла собираются в более крупные капли, а воздух отводится за пределы зоны смазки.

### 4.1.3. Применение систем смазывания

**Системы смазывания двигателей внутреннего сгорания.** Применяются следующие системы: разбрызгивания, циркуляционно-принудительная, с сухим масляным картером, смазывание топливной смесью.

*Система разбрызгивания* основана на том, что головка ползуна погружается в масло, находящееся в картере, смазывает им подшипники и разбрызгивает его на другие детали кривошипно-ползунной группы. Масло по стенкам гильз цилиндров снова стекает в картер.



**Рис. 4.16.** Схема системы смазывания двигателя автомобиля «Польский ФИАТ 125П»: 1 — боковой масляный фильтр; 2 — воздухоотделитель; 3 — отвод масла из фильтра; 4 — датчик давления масла; 5 — указатель уровня масла; 6 — пробка для слива масла; 7 — маслоприемник; 8 — переливной клапан; 9 — трубопровод подачи масла к переднему подшипнику; 10 — зубчатый масляный насос; 11 — коленчатый вал с внутренним масляным каналом; 12 — центробежный масляный фильтр; 13 — разбрызгивающее сопло; 14 — главный масляный коллектор; 15 — канал подачи масла к оси рычага клапанов; 16 — ось рычага клапанов; 17 — заправка маслом

**Циркуляционно-принудительная система.** Масло из кривошипной камеры засасывается и подается ко всем деталям двигателя, требующим смазывания под давлением. Давление масла обычно около 0,4 МПа. От зон смазывания (масляных радиаторов или фильтров) масло стекает в масляный картер и

снова попадает в систему (рис. 4.16). В этой системе масло под давлением подается к коренному и ползунному подшипникам, к поршневому шкворню и деталям системы распределения.

**Система с сухим масляным картером** близка к циркуляционно-принудительной и отличается только тем, что масло

#### 4.1. Методы смазывания, используемые для агрегатов станков

Станок	Смазываемый агрегат при смазывании				
	ручном (масленкой)	циркуляционном (под давлением)	погружением	прочем	лубликатором (пластичный материал)
Универсальный токарный	Шпиндельный подшипник, направляющие станины, ходовой винт и его подшипники, задняя бабка	Шпиндель	Коробка подач	Гитара (ручном, пластичным графитовым смазочным материалом)	
Токарно-револьверный	Винт и гайки поперечного суппорта направляющих револьверной головки	Шпиндель и коробка подач	Передача револьверного суппорта, коробка подач суппорта		Подшипники качения и скольжения
Токарно-карусельный		Коробка скоростей, стол и привод подач		Боковой суппорт (фитильный)	
Токарный автоматический		Шпиндель	Револьверная головка, червячная передача, коробка скоростей		
Вертикально-сверлильный	Вертикальные направляющие		Коробки скоростей и подач		
Радиально-сверлильный		Шпиндель			Подшипники качения шпинделя
Фрезеровально-расточной	Приводная головка подъемного механизма	Шпиндель, поворотный стол			

Отрезной	Направляющие, подающие механизмы		Коробка скоростей	Подшипники колечатого вала (капельном), червячные передачи в дисковых шипах (капельном)	
Поперечно-строгальный	Золотниковые и вертикальные направляющие, ходовой винт эксцентриковый механизм		Коробка скоростей		
Протяжной	Направляющие станины, подшипники скольжения			Гидросистема (центральной)	Подшипники качения
Зубошлифовальный	Направляющие бабки детали	Шпиндель шлифовального станка	Бабка детали	Подшипники качения шлифовального круга (набивка пластичным смазочным материалом)	Станина
Пресс	Шпиндельный механизм, механизм управления, направляющие			Главные подшипники (центральной)	Подшипники скольжения, подшипник качения вала маховика
Пневматический молот	Зубчатая передача			Цилиндр (проточном под давлением), подшипники скольжения (тавотницей)	Подшипник качения кривошипной головки шатуна

накапливается в кривошипной камере, а в отдельном баке за пределами двигателя. Из этого бака масло засасывается насосом, который подает его к подшипникам и другим деталям, как и в циркуляционно-принудительной системе, масло скапливается на дне картера, откуда другой насос перекачивает его в бак.

**Смазывание топливной смесью.** Специальная система смазывания отсутствует. Масло добавляется в бензин в пропорции 1 : 25 или 1 : 50 и вводится вместе с ним через карбюратор двухтактного двигателя в кривошипную камеру, где происходит сжатие. После расширения бензин частично испаряется и происходит смазывание картера. При дальнейшем испарении бензина в камере сгорания капли масла оседают на зеркале цилиндра.

**Смазывание поршневых паровых машин.** Смазываться должны следующие детали машины: зеркало цилиндра, поверхность контакта штока поршня с сальниками, поверхность золотниковых клапанов и направляющие клапанов подачи пара. Применяются системы смазывания под давлением (масленки, лубрикатеры), или распыленное масло подводится с помощью паропроводов.

**Смазывание воздушных компрессоров.** Небольшие вертикальные и горизонтальные компрессоры смазываются с помощью капельных масленок или очень часто посредством разбрызгивания. В больших компрессорах применяется система центрального смазывания с помощью многопоршневых лубрикаторов. В больших компрессорах цилиндры смазываются с помощью распыления масла под всасывающим клапаном. Аналогично действует самотечное смазывание в струе всасываемого газа. Существуют системы смазывания воздушных компрессоров, ограниченные только механизмами движения, а трение в сопряжении поршень — цилиндр уменьшается самосмазывающими кольцами из электрографита. Так как температура сжатого воздуха довольно высока (около 250 °С), система смазывания должна быть сконструирована так, чтобы исключить опасность взрыва смеси горячего воздуха с парами масла.

**Смазывание холодильных компрессоров.** Холодильные компрессоры делятся на поршневые компрессоры, компрессоры с ротационным поршнем (применяются очень редко в небольших холодильных системах) и лопастные компрессоры с большой частотой вращения, применяемые в больших холодильных установках. Способ подачи масла в холодильных компрессорах вообще такой же, как и в других поршневых агрегатах, только для небольших компрессоров применяется разбрызгивание масла из картера или, реже, смазывание кольцом. В холодильных компрессорах с большой частотой вращения применяется система циркуляционного смазывания. При смазывании холодильных компрессоров возникает серьезная проблема: растворение масла в хладагенте и необходимость применения маслоотделителя. Используемое масло должно сохранять текучесть при низких температурах.

**Смазывание турбин.** Турбины бывают паровые, газовые и водяные. Каждый вид турбин имеет свою специфику смазывания из-за конструктивных особенностей, определяемых видом рабочего вещества. Водяные турбины применяются в основном для привода электрических генераторов. В водяных турбинах смазываются подшипники вала, цапфы направляющих лопаток диафрагмы, цапфы направляющих лопаток ротора турбины, шарниры системы управления и зубчатые передачи. Водяные турбины бывают вертикальные и горизонтальные. Способ смазывания горизонтальных турбин довольно прост. Подшипники скольжения вала смазываются с помощью банок Штауфера, фитильно-кольцевой или капельной систем. В системе управления все шарнирные соединения тяг и рычагов, управляющих втулками цапф лопаток диафрагмы, и их поверхности скольжения работают главным образом под водой и смазываются водостойкими пластичными смазочными материалами. Поверхности скольжения кольца диафрагмы смазываются маслом. В современных турбинах для смазывания применяются лубрикатеры. Значительно сложнее смазывать вертикаль-

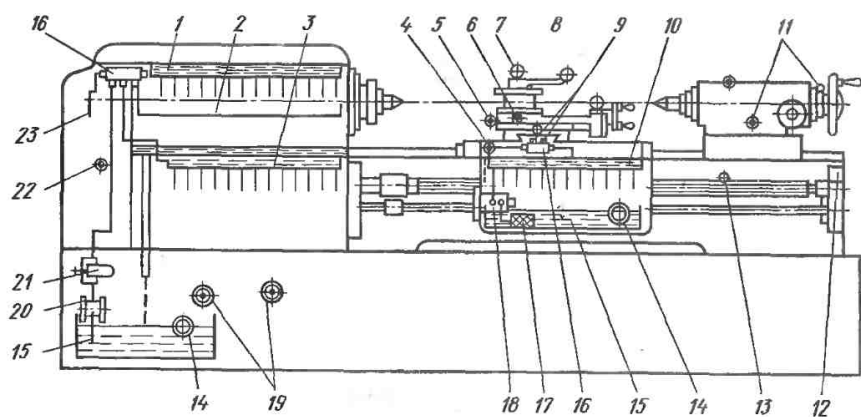


Рис. 4.17. Схема смазывания токарного станка:

1 — распределитель для смазывания механизмов передней бабки; 2 — трубопровод для смазывания подшипников шпинделя; 3 — распределитель для смазывания коробки подачи; 4 — указатель работы насоса; 5 — смазывание направляющих верхнего суппорта; 6 — смазывание поворотной головки; 7 — смазывание вала державки; 8 — смазывание подшипников винта поперечного суппорта; 9 — трубопровод для смазывания станины и салазок суппорта; 10 — распределитель для смазывания суппорта; 11 — смазывание механизмов задней бабки; 12 — смазывание подшипников ходового винта; 13 — смазывание ходового винта; 14 — указатель уровня масла; 15 — масляный бак; 16 — регулируемый распределитель; 17 — сетчатый фильтр; 18 — поршневой насос в суппорте; 19 — указатели течения масла; 20 — насос; 21 — фильтр; 22 — смазывание валика гитары; 23 — трубопровод для смазывания гитары

ные водяные турбины. У вертикальных турбин два подшипника: верхний радиально-упорный и нижний опорный. Смазывание подшипников циркуляционное или погружением. При запуске и остановке турбины смазывание осуществляется гидравлическими масленками, которые обеспечивают давление, необходимое для подъема вала в подшипнике.

В паровых турбинах рабочее тело — водяной пар с температурой 550 °С. Высокая температура усложняет смазывание. Назначение масла — прежде всего смазывание подшипников, а также отведение теплоты и применение в системах регулирования частоты вращения турбины. В паровых турбинах применяется циркуляционно-принудительная система смазывания.

Смазывание станков. В станках обычно применяются смешанные системы смазывания (табл. 4.1). Один или несколько агрегатов смазываются централизованно, остальные — индивидуально. У станков много точек смазывания. На рис. 4.17 показана схема смазывания токарного станка.

Системы смазывания промышленных объектов. Большие промышленные объекты в металлургической, горнодобывающей, электромашиностроительной промышленности имеют очень сложные системы смазывания, включающие тысячи точек смазывания. Несмотря на тенденцию к унификации применяемых смазочных материалов, автоматизацию и централизацию их подачи, большие системы смазывания являются смешанными. В их состав входят рассмотренные выше простые системы смазывания. Применение смешанных систем продиктовано разными условиями работы и разной конструкцией смазочных устройств. Возможен, однако, случай, когда все большое промышленное подразделение смазывается централизованно циркуляционно-принудительно (прокатный цех).

#### 4.2. СМАЗЫВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для снижения сопротивления трения ТС в зоны трения вводятся смазочные материалы. Характерная черта

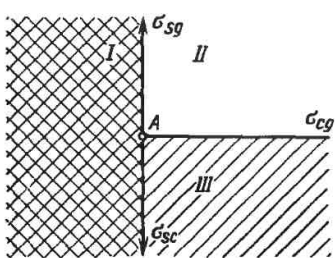


Рис. 4.18. Междофазные напряжения жидкости, находящейся в сосуде:  
I — твердое тело; II — газ; III — жидкость

смазочного материала — это относительно слабые силы сцепления, вследствие чего взаимно перемещающиеся элементы структуры (атомы, ионы, молекулы, слои) встречают незначительное сопротивление.

Смазочным материалом может быть жидкость и твердое тело с таким строением, которое обеспечивает снижение коэффициента трения. Смазочный материал в ТС подвергается воздействию других деталей ТС и сам воздействует на них. Взаимное воздействие должно приводить к положительным трибологическим результатам: снижать сопротивление трения и ограничивать трибологический износ. Небольшое сопротивление трения вызывается внутренним трением. Чтобы смазочный материал мог смазывать, он должен смачивать детали узла трения. Хорошая смачиваемость является обязательным условием правильного сма-

зывания. Понять поведение жидкости на смачиваемой ею поверхности твердого тела может помочь анализ состояния межфазных напряжений около стенок сосуда (рис. 4.18).

В результате действия сил сцепления и поверхностного натяжения жидкости горизонтальная поверхность жидкости вблизи стенок искривляется. Наблюдается выпуклый или вогнутый мениск жидкости.

Если жидкость находится в сосуде, можно выделить три поверхности разделения фаз: твердое тело — газ, жидкость — газ и твердое тело — жидкость. Между этими фазами возникает поверхностное натяжение: между твердым телом и газом  $\sigma_{sg}$ , между жидкостью и газом  $\sigma_{cg}$ , между твердым телом и жидкостью  $\sigma_{sc}$ . Начальное направление сил поверхностного натяжения, действующих на молекулу A, представлено на рис. 4.18.

Обычно  $\sigma_{sg} \neq \sigma_{sc}$ , тогда наблюдается поднимание или опускание жидкости вдоль стенки сосуда в зависимости от того, какая из сил поверхностного натяжения больше. Если  $\sigma_{sg} > \sigma_{sc}$ , то поверхность раздела образует вогнутый мениск (рис. 4.19), а сила поверхностного натяжения  $\sigma_{cg}$  перпендикулярна к изогнутой поверхности жидкости. Вертикальная составляющая этой силы  $\sigma_{gs} \cos \theta$ , а равновесие достигается, когда выполняется условие

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sc} + \sigma_{gc} \cos \theta, \quad (4.1)$$

это уравнение называется уравнением смачивания.

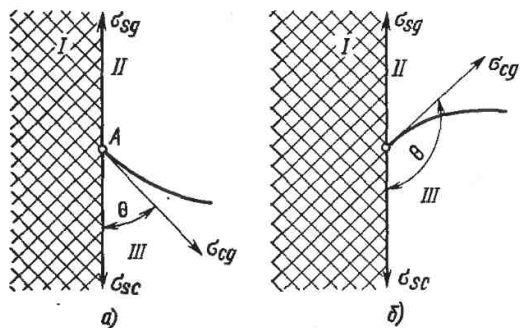
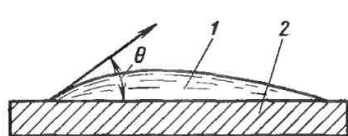
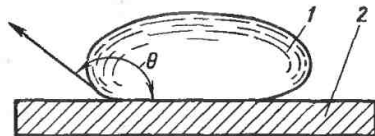


Рис. 4.19. Форма поверхности раздела в зависимости от разности фазовых напряжений тел:  
а — вогнутый мениск (смачивающая жидкость); б — выпуклый мениск (несмачивающая жидкость); I — твердое тело; II — газ (воздух); III — жидкость





а)



б)

Рис. 4.20. Угол смачивания твердого тела смачивающей (а) и не смачивающей (б) жидкостями:

1 — жидкость; 2 — твердое тело

Если  $\sigma_{sg} < \sigma_{sc}$ , то поверхность раздела будет иметь выпуклый мениск. Условие равновесия остается прежним. В обоих случаях

$$\cos \theta = (\sigma_{sg} - \sigma_{sc}) / \sigma_{gc}. \quad (4.2)$$

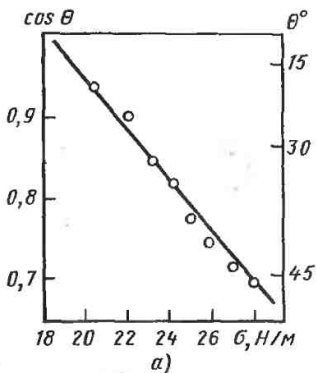
Если  $\cos \theta < 0$ , то мениск вогнутый и жидкость смачивает стенку сосуда. Если  $\cos \theta > 0$ , то мениск жидкости выпуклый и она не смачивает стенку. Угол  $\theta$  называется граничным углом, или углом смачивания. Если угол смачивания  $\theta = 0$ , то смачивание будет полным; если  $\theta = 180^\circ$ , то имеет место абсолютная несмачиваемость.

Угол смачивания (граничный угол) — это угол, образованный между смоченной поверхностью твердого тела и нормалью к поверхности мениска

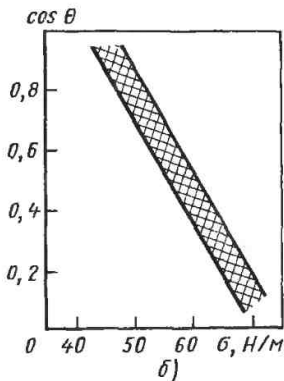
смачивающей жидкости, проведенной из точки соприкосновения жидкости с поверхностью твердого тела (рис. 4.20).

Значение граничного угла для капли жидкости, находящейся на твердом теле, зависит от равновесия следующих сил: когезионных сил притяжения между молекулами жидкости; сил притяжения молекул жидкости частицам (ионами, молекулами, остовами атомов), образующими поверхность твердого тела, в местах контакта жидкость — твердое тело; сил притяжения молекул жидкости, не имеющих контакта с поверхностью твердого тела, но находящихся на расстоянии межмолекулярного воздействия; гравитационных сил (сил тяжести).

Когезионные силы увеличивают угол смачивания, а остальные уменьшают. Если не учитывать силу тяжести, то



а)



б)

Рис. 4.21. Зависимость между углом смачивания  $\theta$  ( $\cos \theta$ ) и поверхностным натяжением  $\sigma_g$ : а — для тефлона и серии *n*-парафинов; б — ориентировочно для разных поверхностей и жидкостей

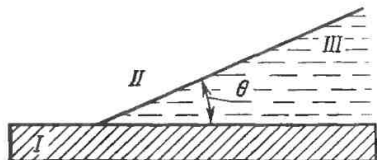


Рис. 4.22. Смачивание твердого тела жидкостью с хорошими смачивающими свойствами:

I — твердое тело; II — воздух (газ); III — жидкость

значение угла смачивания можно вычислить.

Между углом смачивания и поверхностным натяжением имеется линейная зависимость (рис. 4.21, а). Если смачивать поверхность жидкостями, принадлежащими одному гомологическому ряду, зависимость эта будет очень точной, для разных поверхностей и жидкостей значения попадают в полосу определенной ширины.

**Работа смачивания.** Твердое тело и жидкость перед смачиванием имеют поверхностные натяжения  $\sigma_{sg}$  и  $\sigma_{gs}$ . В момент смачивания жидкостью твердого тела образуется общая междуфазная поверхность с поверхностным натяжением  $\sigma_{sc}$ .

Работа смачивания жидкостью единичной поверхности твердого тела  $L_{sc}$  может быть выражена разностью поверхностных натяжений до смачивания и после него:

$$L_{sc} = \sigma_{sg} + \sigma_{gs} - \sigma_{sc}. \quad (4.3)$$

Работа смачивания  $L_{sc}$  равна уменьшению свободной энергии единицы поверхности  $E_s$  в результате распространения слоя жидкости на поверхности твердого тела. В уравнение входит поверхностное натяжение твердого тела относительно газа (воздуха), которое нельзя определить. Поэтому надо заменить  $\sigma_{sc}$  величинами, которые можно измерить. Жидкость смачивает твердое тело (рис. 4.22) под углом  $\theta$ . Поэтому с учетом (4.1) можно вычислить

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sc} + \sigma_{cg} \cos \theta. \quad (4.4)$$

Подставив  $\sigma_{sg}$  в (4.3), получим уравнение

$$L_{sc} = \sigma_{sc} + \sigma_{cg} \cos \theta + \sigma_{gs} - \sigma_{sc}, \quad (4.5)$$

в котором отсутствует  $\sigma_{sg}$ . После упрощения получим уравнение работы смачивания единичной поверхности твердого тела, в котором присутствуют только измеряемые величины:

$$L_{sc} = \sigma_{cg} (1 + \cos \theta). \quad (4.6)$$

После смачивания и распространения смазывающей жидкости по поверхности твердого тела начинается взаимодействие твердого тела и жидкости. Молекулы смазочного материала и поверхность твердого тела взаимодействуют друг на друга своими электростатическими и электродинамическими полями. Наиболее сильное взаимодействие происходит на границе раздела фаз и в пристенной зоне. Молекулы жидкости удерживаются на поверхности, упорядоченные и ориентированные под определенным углом к поверхности. Большая упорядоченность и упаковка молекул жидкости делают ее в этой зоне подобной квазикристаллическому телу, отличающейся свойствами от свойств в объеме жидкости, находящейся в гидродинамической зоне (рис. 4.23). Пристенный слой образует особую фазу, называемую **г р а н и ч н ы м с л о е м**. Если на поверхности твердого тела под действием большого давления остается только граничный слой, то происходит трение при граничной смазке. Компоненты жидкости, находящиеся в этом слое, подвергаются на поверхности твердого тела адсорбции и хемосорбции. Часть наиболее активных составляющих смазочного материала диффундирует (в основном по границам зерен) внутрь ПС твердого тела, изменяя его свойства. В «гидродинамической» области молекулы жидкости удалены от поверхности твердого тела и только в незначительной степени подвержены его воздействию, но действующие межмолекулярные силы (рис. 4.24) затрудняют их перемешивание. При движении жидкости между подвижной и неподвижной пластинами происходит дифференциация скоростей отдельных слоев от нулевой скорости для слоя, связанного с неподвижной пластиной, и до ско-

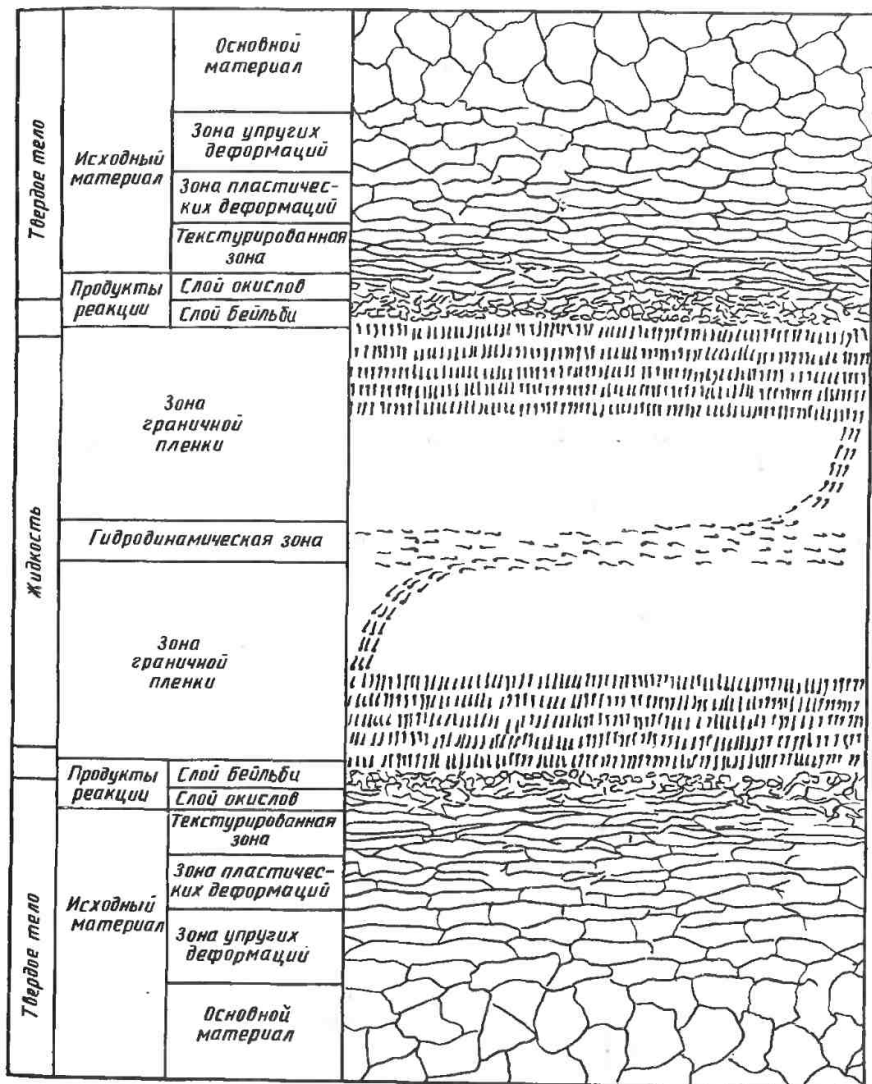


Рис. 4.23. Схема зон фрикционного сопряжения

рости, равной скорости подвижной пластины (рис. 4.25).

Мерой внутреннего сопротивления трения жидкости является вязкость. Большая вязкость смазочного материала затрудняет выдавливание его

из зоны между смазываемыми деталями и обеспечивает присутствие масла между смазываемыми деталями, но вызывает потери мощности устройства на преодоление сопротивления внутреннего трения. Подбор вязкости смазоч-

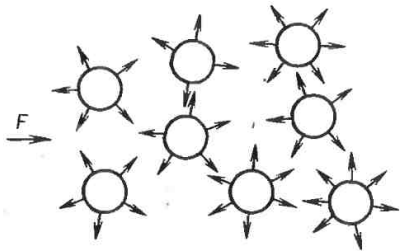


Рис. 4.24. Межмолекулярное взаимодействие в жидкости, приводящее к возникновению сопротивления трения

ного материала обычно является компромиссом. Чаще всего в качестве смазочного материала применяются минеральные масла, получаемые из нефти. Обычно в нефти нет масляных фракций с большой вязкостью, поэтому в них часто вводят жидкие полимеры с относительной молекулярной массой около 15—30 тыс. Большие и длинные молекулы полимеров, находящиеся среди малых молекул масел, затрудняют их перемешивание, т. е. увеличивают вязкость. Чем больше концентрация полимера в жидкости и чем больше его молекулярная масса, тем больше вязкость смазочного материала. Включение жидких полимеров для увеличения вязкости масла с малой и средней вязкостью не является идеальным средством, потому что полимеры в среде работающего масла разрушаются и деградируют, а уменьшение их размеров приводит к уменьшению вязкости. Причины деструкции полимеров представлены на рис. 4.26. Чем длиннее молекула полимера, чем больше его относительная молекулярная масса, чем тяжелее условия работы, тем быстрее разрушаются молекулы полимеров.

Смазочный материал снижает коэффициент трения и отводит теплоту, образующуюся в процессе трения. Из-за небольшой теплоемкости (обычно в 4 раза меньше, чем у воды) и низкой способности к отведению теплоты в зоны трения вводится большое количество органических смазочных материалов.

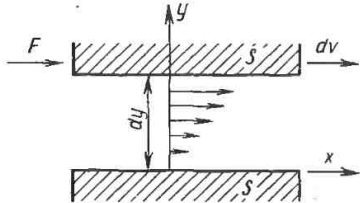


Рис. 4.25. Движение жидкости между двумя пластинами

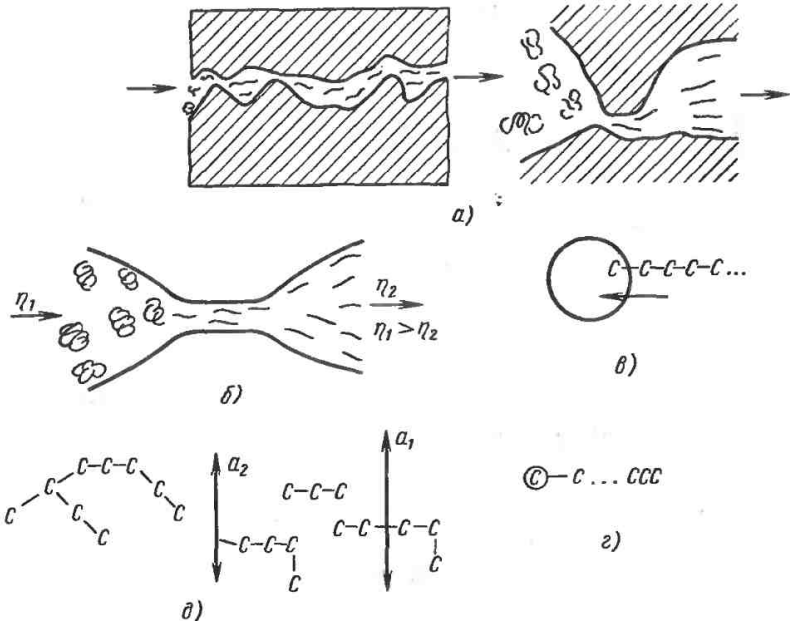
Если в узле трения имеются детали из полимеров, их поведение в процессе трения может быть отличным от поведения металлических деталей. Смазка трущихся полимеров обычно приводит к снижению сопротивления трения. Нельзя сказать, что эффект смазки полимеров однозначно положительный, как это было в случае трения металлических деталей.

Смазывание полимеров может осуществляться подведением смазочного материала к зоне трения снаружи или смазочным материалом (обычно моторным маслом), рассеянным в полимере в виде капель размером 2—10 мкм. При увеличении температуры происходит миграция капель в сторону поверхности трения и ее смазывание.

Первое препятствие в смазывании полимеров — их слабая смачиваемость, вызванная небольшой поверхностной энергией.

Второе препятствие на пути правильного смазывания полимеров — пластификация ПС. Она заключается в проникновении молекул смазочного материала в ПС, которое приводит к раздвиганию частиц структуры и разделению их смазочным материалом. Это ухудшает механические свойства ПС и отрицательно влияет на трибологические характеристики.

Из-за небольшой поверхностной энергии полимеров на них также затруднено образование граничных пленок. Для создания на поверхности граничной пленки жидкости применяется специальная поверхностная обработка, например обработка поверхности полиэтилена серной кислотой, или создание условий для трибоэлектризации и вызванной ею адсорбции соединений,



**Рис. 4.26. Деструкция полимеров (по Вислоцкому):**  
 а — при трении, механическом разрушении; б — при дросселировании; в, г — кавитационная; в — втягивание молекулы полимера (имплозия); г — разрыв связей в молекуле полимера; д — в акустическом поле;  $a_1$  — амплитуда колебаний

приводящих к уменьшению сопротивления трения.

Переходя к рассмотрению влияния внешних воздействий на смазку, надо заметить, что внешние факторы, воздействующие на узел трения, приводят к изменению во взаимодействии деталей узла. Смазочный материал в сопряжении ослабляет действие нагрузки, более равномерно распределяя ее по всей поверхности. Слой смазочного материала представляет своего рода «подушку», которая уменьшает последствия ударных нагрузок, колебаний и т. п. Рост нагрузок, действующих на сопряжение, приводит к увеличению разных форм изнашивания деталей узла трения. Вязкость смазочного материала экспоненциально возрастает с увеличением давления. Большой рост давления может привести к отверждению смазочного материала. Чем больше давление, тем сильнее расклинивающее действие

жидкости (проникновение жидкости в микротрещины и увеличение их размеров), этот эффект усиливается в присутствии детергентов, т. е. веществ, снижающих поверхностное натяжение и облегчающих проникновение жидкости в микротрещины. Рост скорости в зонах трения приводит к изменению интенсивности взаимодействия между деталями узла. В смазываемой области при увеличении скорости сопротивление движению вначале снижается (возрастает гидродинамическое давление), затем сопротивление и коэффициент трения возрастают в результате увеличения сопротивления внутреннего трения жидкости. В определенных диапазонах скоростей появляются характерные доминирующие виды изнашивания. Они различны для малых и больших скоростей. Скорость сдвига смазочного материала может приводить к некоторым реологическим аномалиям и проявle-

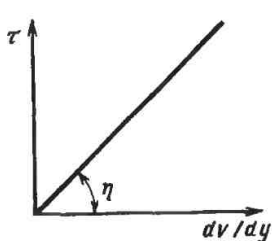


Рис. 4.27. Линия тока ньютоновской жидкости

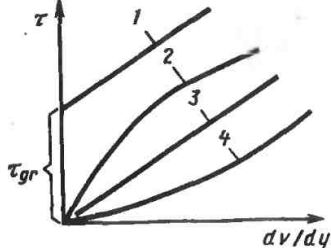


Рис. 4.28. Линия тока различных жидкостей.

1 — бингеймовской; 2 — псевдопластической; 3 — ньютоновской; 4 — дилатационной

нию черт неньютоновской жидкости (рис. 4.27 и 4.28).

Влияние температуры приводит к интенсификации химических реакций в смазываемом сопряжении (реакции в граничной пленке). В контактирующих твердых телах при большом росте температуры и особенно на вершинах неровностей может произойти пластификация материала, пластическая деформация, местное сваривание, фазовые превращения и тому подобные тепловые превращения. Действие высокой температуры на смазочный материал вызывает разные термохимические реакции, приводящие к тепловому разложению и коксованию масла.

**Старение смазочного материала.** В узлах трения масло (как, впрочем, и другие смазочные материалы) подвержено старению. Оно вызвано внешним воздействием, в основном тепловым, и действием кислорода воздуха. Кроме того, смазочный материал при работе загрязняется различными веществами, которые ухудшают его эксплуатационные свойства (пыль, металлические частицы, топливо, вода и т. п.). Окисление, термохимические изменения и посторонние вещества изменяют химический состав масла. Химический состав масла определяет его свойства, поэтому изменения химического состава приводят к изменению свойств масла.

**Термохимические процессы** снижают содержание наиболее летучих фракций в масле, вызывают тепловое разложение, дегидрирование и осмоление части углеводородных компонентов, это при-

водит к увеличению молекулярной массы, вязкости и плотности.

Образующиеся смолы имеют черный цвет, увеличение их концентрации приводит к постепенному потемнению масла. Измеряя степень потемнения масла, можно диагностировать его старение.

**Процессы окисления** приводят к присоединению кислорода к наименее стойким компонентам масла и образованию продуктов окисления, часть из которых имеет кислотный характер, и масло приобретает коррозионные свойства по отношению к металлическим деталям смазываемого устройства. Процесс окисления может иметь дегидрирующий характер. Кислород забирает у углеводородов атомы водорода и образует с ними воду. Возникающие свободные связи способствуют объединению дегидрированных молекул в соединения с большей молекулярной массой. Это типичные реакции смолообразования, основанные на реакции конденсации. В реакциях этого типа могут принимать участие молекулы, включающие кислород, приводя к образованию кислотных продуктов смолообразования.

**Посторонние вещества** попадают в смазочный материал из окружающей среды (например, с пыльным воздухом), в результате коррозии трубопроводов и сосудов, как металлический абразив, возникающий в процессах трибологического изнашивания. Кроме того, в масло попадают несгоревшее топливо и вода.

Продукты процессов старения взаимодействуют между собой образуя сложные продукты реакций, загрязняющие масло. Твердые минеральные частицы и продукты обугливания становятся центрами, на которых адсорбируются смолистые продукты окисления. Образующиеся мицеллы благоприятствуют возникновению коллоидных фаз шлама в масле. Стабилизации коллоидных шламов и эмульгированию загрязнений благоприятствует присутствие в масле воды, продуктов коррозии, полярных соединений и ПАВ. В результате старения изменяется химический и фазовый состав работающего масла. Добавление свежего масла в систему смазывания тормозит процесс старения, так как снижает концентрацию продуктов старения. Без добавления старение можно реализовать только в лабораторных (модельных) условиях, потому что в реальных устройствах и машинах должен быть постоянный уровень масла.

Во время работы имеют место постоянный процесс старения и периодический процесс обновления масла. В реальных системах смазывания имеются очищающие фильтры, которые удаляют из масла часть продуктов старения.

Старение масла в сопряжении (в устройстве) определяется результирующей процессов старения и обновления. Старение зависит от химического состава, наличия ингибиторов, температуры и времени, каталитического действия металлов. Обновление зависит от количества доливаемого масла, условий фильтрования. Между этими двумя противоположно направленными процессами устанавливается равновесие, в результате которого наблюдается определенный уровень старения масла и определенный уровень свойств, обусловленный изменениями химического состава.

### 4.3. ДОМИНИРУЮЩИЙ ВИД СМАЗКИ В ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В триботехнике различают внешнее трение твердых тел и внутреннее трение в жидкостях и твердых телах.

Стационарность и нестационарность процессов трения зависят от детальности их анализа [4.1—4.10].

В триботехнике стационарным процессом трения или изнашивания считается такой процесс, в котором макрохарактеристики постоянны, например коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

Жидкостное трение имеет место в слое жидкости, разделяющей непосредственный контакт твердых тел в зоне трения. Толщина и характер смазывающего слоя определяют вид смазки и тем самым вид трения, относительная толщина этого слоя является важным критерием в классификации видов трения:

$$h_{wzg} = h / (R_{a1} + R_{a2}), \quad (4.7)$$

где  $h$  — толщина смазывающего слоя;  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$  — средние отклонения от центральной линии неровностей контактирующих поверхностей.

Классификация видов смазки по критерию  $h_{wzg}$  приведена на рис. 4.29

*Граничная смазка* ( $h_{wzg} \leq 1$ ). Сопротивление трения и износ поверхностей, взаимодействующих в условиях трения при граничной смазке, зависят от свойств поверхностей и от поверхностной активности смазочного материала. Вязкость жидкости практически не влияет на условия граничного трения (рис. 4.30). Толщина образующейся на поверхности твердого тела изолирующей пленки мала по сравнению с шероховатостью поверхности.

*Жидкостная смазка* ( $5 \leq h_{wzg} \leq 100$ ). Полного отсутствия износа деталей машин в результате трения можно добиться путем применения жидкостной смазки. Создаваемый между взаимодействующими поверхностями слой жидкости или газа полностью разделяет их, исключая взаимодействие неровностей (рис. 4.31). Давление в этом слое возникает в результате относительного движения поверхностей (гидродинамическая и газодинамическая смазки) либо под действием внешнего давления (газостатическая и гидростатическая смазки).

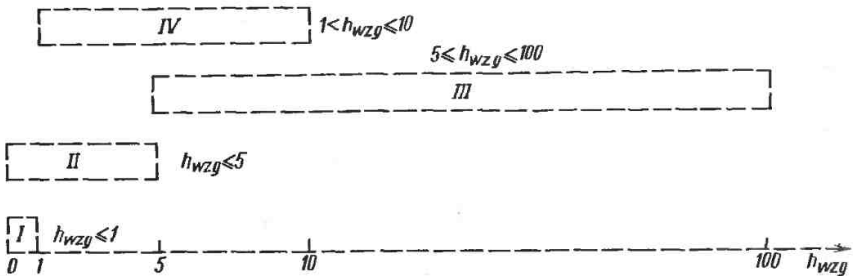


Рис. 4.29. Классификация видов смазки по критерию  $h_{wzg}$ :  
 I — граничная; II — смешанная; III — жидкостная (гидродинамическая, газодинамическая; гидростатическая и газостатическая); IV — эластогидродинамическая (жидкостная)

Толщина слоя во много раз превышает толщину граничной пленки и суммарную шероховатость обеих поверхностей. Жидкость и газ обладают свойствами, позволяющими применять законы классического вязкого течения. Вязкость смазочного материала является важнейшей характеристикой, определяющей жидкостное трение. На жидкостную смазку влияет также плотность смазочного материала. Вязкость особенно важна тогда, когда в качестве смазочного материала применяется газ, т. е. при газостатической и газодинамической смазках.

Принято, что для полного отделения неровностей поверхностей толщина слоя должна в 5 раз превышать сумму шероховатостей цапфы  $R_a$  и втулки

$(R_{a1} + R_{a2})$ . Применяемые повсеместно смазочные материалы не позволяют получить толщину слоя больше  $h = 100 (R_{a1} + R_{a2})$ , поэтому гидродинамическая смазка ограничена диапазоном  $5 \leq h_{wzg} \leq 100$ .

*Эластогидродинамическая смазка* ( $1 \leq h_{wzg} \leq 10$ ). Классическая гидродинамическая теория, которая описывает жидкостное трение, не учитывает упругих деформаций поверхности. Такие деформации надо учитывать в условиях действия больших нагрузок на криволинейные поверхности.

Возникающая между такими поверхностями пленка называется эластогидродинамической. В результате действия больших нагрузок локально (в зоне контакта) возрастает вязкость жидкости, образующей эластогидродинамическую пленку. Учет упругих деформаций и изменение вязкости с увеличением давления позволяют применить гидродинамическую теорию к подшипникам качения, зубчатым передачам и кулачкам.

*Смешанная смазка*  $h_{wzg} \leq 5$ . В большинстве деталей машин одновременно действуют граничная, жидкостная и эластогидродинамическая смазка. Часто образуются микроклинья, связанные с взаимодействием отдельных неровностей, дополнительно повышающие несущую способность пленки. Совокупность одновременно происхо-

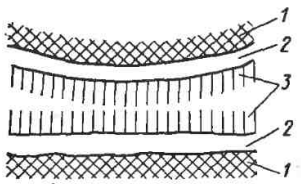


Рис. 4.30. Модель смазочной пленки при граничной смазке:  
 1 — основной материал контактирующих поверхностей; 2 — слой окислов или защитных соединений; 3 — смазочный материал



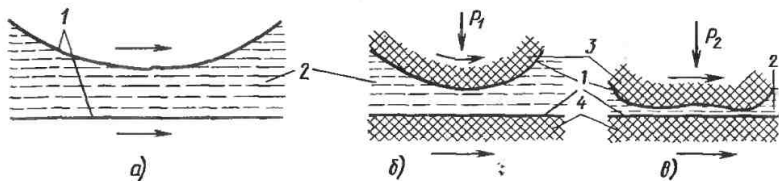


Рис. 4.31. Модели пленок при жидкостной смазке:

*a* — упрощенная; *b* — пленка при жидкостной смазке; *в* — пленка при эластогидродинамической смазке; 1 — защитная или граничная пленка; 2 — смазочный материал; 3 — упругое тело; 4 — твердое тело;  $P_1$  — небольшая нагрузка;  $P_2$  — большая нагрузка

дующих при этом явлений называется смешанным трением (рис. 4.32).

Анализ смешанного трения должен учитывать физические (вязкость, плотность, сжимаемость и т. п.) и физико-химические (способность к адсорбции и хемсорбции, химическое сродство присадок и поверхности) свойства жидкости, а также физические и химические свойства деталей узла трения. Толщина масляной пленки, образующейся в условиях смешанного трения, в 2—5 раз превышает сумму ( $R_{a1} + R_{a2}$ ). Вид трения зависит в основном от качества смазочного материала, скорости и нагружения зоны трения. Свойства смазочного материала характеризуют его реологические свойства.

#### 4.3.1. Основы жидкостного трения и гидродинамическая смазка

Основные явления в смазываемом узле трения характеризует гидродинамическая теория смазки, которая является практическим применением механики жидкостей. Эластогидродинамическая теория смазки, описывающая процесс смазывания стыка, учитывает дополнительно упругие деформации контактирующих деталей. Механика жидкостей является феноменологической теорией поля, в которой материя рассматривается как континуум. Несплошность материи можно не учитывать, если размеры поля течения значительно больше меж-

молекулярных расстояний, а это можно сказать практически о каждом виде контакта и обо всех смазочных материалах [4.1, 4.3—4.5].

Под полем понимается некоторая функция пространства и времени. Каждой точке пространства, заполненной жидкостью, соответствуют некоторые значения переменных, состоящих из одного или нескольких компонентов. Эти переменные в механике жидкостей представляются в виде тензоров.

Описание произвольного физического свойства континуума требует введения соответствующей системы координат. Система координат может быть связана либо с выбранной материальной деталью (точкой), претерпевающей вместе с ней перемещения, либо с определенной точкой пространства. В первом случае (подвижный анализ) имеются координаты Лагранжа, во втором (локальный анализ) координаты Эйлера. Эти координаты, которые не обязательно должны быть прямоугольными, представлены на рис. 4.33.

В координатах Лагранжа произвольное физическое свойство  $\Phi$  выбранной детали задается функцией вида

$$\Phi = \Phi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t). \quad (4.8)$$

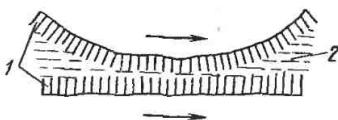


Рис. 4.32. Модель пленки при смешанном трении:

1 — граничная пленка; 2 — смазочный материал

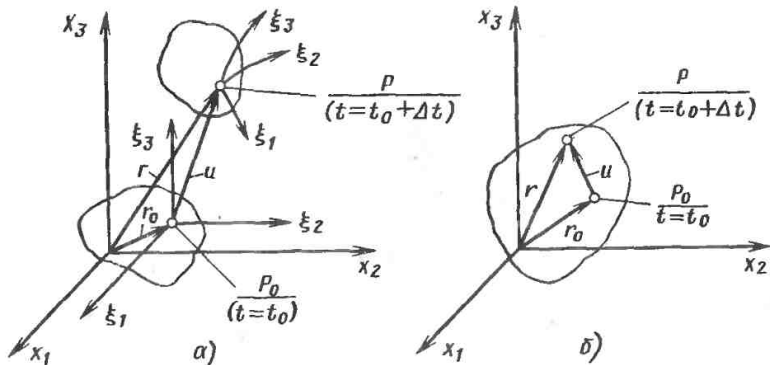


Рис. 4.33. Системы координат в механике сплошных сред: а — Лагранжа; б — Эйлера

Изменение координат  $\xi_i$  соответствует переходу к иной точке жидкости и определяет связанное с этим переходом изменение величины  $\Phi$ , а само изменение времени  $t$  определяет изменение  $\Phi$  в произвольной точке жидкости. Координаты  $\xi_i$ , совпадающие в момент  $t_0$  с глобальными прямоугольными координатами  $x_i$  (рис. 4.33, а), в общем случае спустя время  $\Delta t$  становятся криволинейными координатами.

В координатах Эйлера исследуются поля физических величин, уравнение которых имеет вид

$$\Phi = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n, t). \quad (4.9)$$

Локальный анализ Эйлера описывает изменения, происходящие в определенной точке поля при неизменной системе отсчета, тогда как подвижный анализ Лагранжа применим к индивидуальным элементам жидкости при его движении. В механике жидкостей координаты Лагранжа ( $\xi_i, t$ ) пока применяются в ограниченном диапазоне (например, для описания одномерного течения или при рассмотрении колебаний и волн в жидкостях) и поэтому в дальнейшем используются переменные Эйлера ( $x_i, t$ ).

Пространство, в котором протекают рассматриваемые процессы, в общем случае трехмерное, поэтому для описания этих явлений необходимы три координаты. Принимаем, что система

отсчета прямоугольная (в некоторых случаях целесообразно использовать цилиндрические или сферические координаты).

Компоненты произвольного вектора (например, скорости  $v$ ) по осям прямоугольной системы координат ( $x_1, x_2, x_3$ ) обозначим индексами 1, 2, 3. Матрицу-столбец этих компонентов представляет вектор  $v$

$$v = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix}. \quad (4.10)$$

Линией тока называется линия, касательная в каждой своей точке к вектору скорости. Линии тока удовлетворяют следующей параметрической системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{ds} &= v_1(x_1, x_2, x_3, t); \\ \frac{dx_2}{ds} &= v_2(x_1, x_2, x_3, t); \\ \frac{dx_3}{ds} &= v_3(x_1, x_2, x_3, t), \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

причем время  $t$  определено. Интегрированием этой системы уравнений получают линию тока в момент времени  $t$ .

Траекторно элементу жидкости определяет система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= v_1(x_1, x_2, x_3, t); \\ \frac{dx_2}{dt} &= v_2(x_1, x_2, x_3, t); \\ \frac{dx_3}{dt} &= v_3(x_1, x_2, x_3, t). \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Траектория элементарной частицы жидкости является огибающей линии тока, проходящих через точки траектории, соответствующие мгновенным положениям частицы. Постоянные интегрирования (4.12) можно считать координатами точки, в которой находится рассматриваемая частица жидкости в момент  $t_0$ .

Поток называется стационарным, если соответствующее ему поле скоростей не зависит от времени, т. е.

$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ . Для стационарного потока (4.11) и (4.12) тождественны, линия тока одновременно является траекторией элементарной частицы жидкости.

Для нестационарного случая ( $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ ) линии тока вообще не совпадают с траекториями частиц жидкости. Траектории могут пересекаться, а линии тока как линии векторного поля не могут иметь общих точек.

Общие зависимости течения в слоях жидкости. Используем индексную запись тензорного анализа. Вектор  $A$ , представленный как  $A = A_1 i_1 + A_2 i_2 + A_3 i_3$ , где  $i_i$  при  $i = 1, 2, 3$  является единичным вектором, в индексной записи можно представить так:

$$A = A_i i_i. \quad (4.13)$$

Опускаем знаки суммы Эйнштейна при повторяющихся индексах. Скалярное произведение двух векторов  $A$  и  $B$  в индексной записи имеет вид

$$AB = A_i B_j \delta_{ij} = A_i B_i, \quad (4.14)$$

где символ (дельта) Кронекера  $\delta_{ij}$  определяет зависимость

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{для } i = j; \\ 0 & \text{для } i \neq j. \end{cases}$$

Векторное произведение имеет вид:

$$AB = A_i B_j \epsilon_{ijk} i_k, \quad (4.15)$$

где  $\epsilon_{ijk}$  — символ Риччи,

$$\epsilon_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } i, j, k \text{ образуют четную} \\ & \text{перестановку;} \\ -1, & \text{если } i, j, k \text{ образуют нечетную} \\ & \text{перестановку;} \\ 0, & \text{если } i, j, k \text{ не образуют перестановки.} \end{cases}$$

При четной перестановке количество инверсий четно или индексы расположены в соответствии с движением стрелки часов (1, 2, 3 или 2, 3, 1 или 3, 1, 2). Для нечетной перестановки (нечетное количество инверсий) индексы расположены против движения часовой стрелки (1, 3, 2 или 2, 1, 3 или 3, 2, 1). Перестановок не будет при повторяющихся индексах. Векторный дифференциальный оператор  $\nabla$  (набла, оператор Гамильтона) имеет вид:

$$\begin{aligned} \nabla &= i_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + i_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + i_3 \frac{\partial}{\partial x_3} = \\ &= i_i \frac{\partial}{\partial x_i}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

для скаляра  $E$  имеем

$$\nabla E = \text{grad } E = i_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = E_i i_i. \quad (4.17)$$

Для дивергенции и ротора имеем соответственно

$$\left. \begin{aligned} \text{div } A &= \nabla A = \frac{\partial A_i}{\partial x_i} = A_{i,i}; \\ \text{rot } A &= \nabla A = A_{j,i} \epsilon_{ijk} i_k. \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Запятая в индексе означает частное дифференцирование.

Систему уравнений, представленную в матричном виде

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

кратко можно представить в виде

$$c_{ij}x_j = f_i, \quad (4.20)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Левая часть (4.20) в соответствии с соотношением Эйнштейна понимается как сумма по  $j$  до  $n$ , или

$$\sum_{j=1}^n c_{ij}x_j = f_i. \quad (4.21)$$

Повторяющийся индекс — в (4.21) это  $j$  — называется немым индексом. Индекс  $i$  не повторяется, он называется свободным индексом. Количество уравнений в индексной записи равно произведению верхних пределов всех свободных индексов.

Ускорение элементарной частицы в слое смазочного материала. Оно является производной скорости частицы по времени, причем вектор скорости  $\mathbf{v}(x_i, t)$  определяется вдоль траектории частицы, т. е. координаты  $x_i$  надо рассматривать как функцию времени  $x_i = x_i(t)$ . Дифференцируя  $\mathbf{v}$  как сложную функцию, получим полную производную

$$a = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v_1 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_2} + \dots + v_s \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_s} \quad (4.22)$$

или

$$a = \partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v}. \quad (4.23)$$

Скалярное произведение справа является тензором относительной скорости

$$T = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Подставляя (4.24) в (4.23), получим

$$a = \partial \mathbf{v} / \partial t + T \mathbf{v}. \quad (4.25)$$

Учитывая, что

$$\nabla (\mathbf{v} \mathbf{v}) = 2\mathbf{v} (\nabla \mathbf{v}) + 2(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v}; \quad (4.26)$$

$$\text{rot } \mathbf{v} = \nabla \mathbf{v} = v_{j,i} \varepsilon_{ijk} i_k = 2\omega, \quad (4.27)$$

получим ускорение в форме, не зависящей от системы координат:

$$a = \partial \mathbf{v} / \partial t + \nabla (v^2/2) - \mathbf{v} \text{ rot } \mathbf{v}. \quad (4.28)$$

В индексном виде (4.28) примет вид:

$$a_k = \dot{v}_k + 0,5 (v_j v_j) - \varepsilon_{ijk} \varepsilon_{mnj} v_i v_{n,m}. \quad (4.29)$$

Деформации и напряжения в смазочной пленке. Определение скорости деформации жидкости следует из анализа локального движения, т. е. движения точек частицы жидкости относительно полюса, произвольно выбранного в рассматриваемой частице (рис. 4.34,  $\theta$ ).

При  $\Delta t \rightarrow 0$  можно опустить  $(\Delta t)^2$ , тогда получим

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + (\mathbf{v} - \mathbf{v}_p) \Delta t. \quad (4.30)$$

Вектор  $(\mathbf{v} - \mathbf{v}_p)$  можно записать, используя (4.24), в виде

$$\mathbf{v} - \mathbf{v}_p = T \mathbf{r}. \quad (4.31)$$

Относительная скорость рассматриваемых точек

$$d\mathbf{r}/dt = T \mathbf{r}. \quad (4.32)$$

Тензор относительной скорости в соответствии с принципами тензорного анализа можно разложить на симметричный  $T_d$  и кососимметричный  $T_0$  тензоры:

$$T = T_d + T_0, \quad (4.33)$$

где

$$T_d = \begin{bmatrix} v_{1,1} & \frac{1}{2}(v_{2,1} + v_{1,2}) & \frac{1}{2}(v_{1,3} + v_{3,1}) \\ \frac{1}{2}(v_{2,1} + v_{1,2}) & v_{2,2} & \frac{1}{2}(v_{2,3} + v_{3,2}) \\ \frac{1}{2}(v_{1,3} + v_{3,1}) & \frac{1}{2}(v_{2,3} + v_{3,2}) & v_{3,3} \end{bmatrix}, \quad (4.34)$$

$$T_0 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(v_{1,2} - v_{2,1}) & \frac{1}{2}(v_{1,3} - v_{3,1}) \\ -\frac{1}{2}(v_{1,2} - v_{2,1}) & 0 & \frac{1}{2}(v_{2,3} - v_{3,2}) \\ -\frac{1}{2}(v_{1,3} - v_{3,1}) & \frac{1}{2}(v_{2,3} - v_{3,2}) & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.35)$$

Подставляя (4.33) в (4.32), получим  $dr/dt = T_d r + T_0 r$ .

Компоненты кососимметричного тензора пропорциональны компонентам ротора вектора. Упрощая (4.32), получим

$$T_0 r = 0,5 \operatorname{rot} v r = \omega r. \quad (4.36)$$

Умножая тензоры  $T_0$  на  $r$ , получим зависимость, представляющую скорость, с которой двигалась бы точка  $A$ , если бы вся объемная частица поворачивалась как твердое тело с угловой скоростью

$$\omega = 0,5 \operatorname{rot} v \quad (4.37)$$

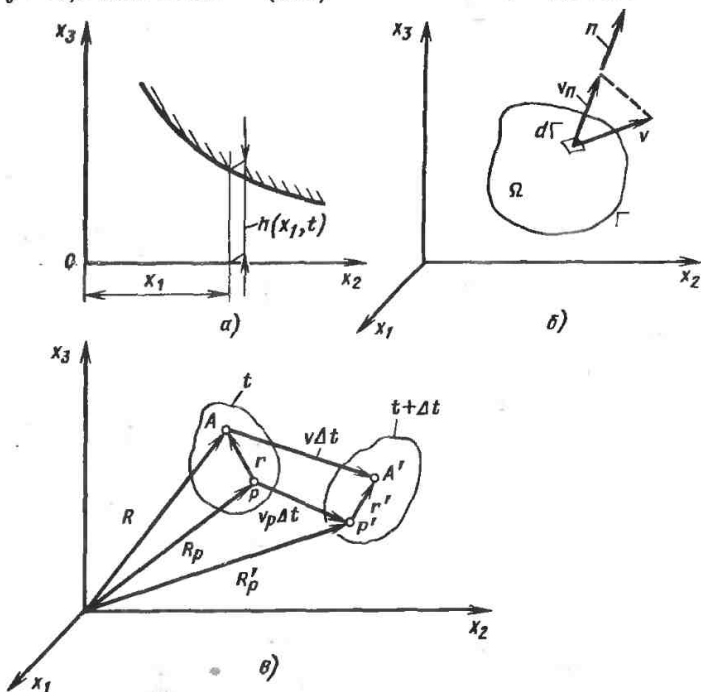


Рис. 4.34. Модель смазочной щели (а), выделенная область жидкости  $\Omega$ , ограниченная контрольной поверхностью (б), и локальное движение относительно полюса  $P$  рассматриваемой частицы жидкости (в)

вокруг мгновенной оси, проходящей через полюс  $P$  (см. рис. 4.34).

Для удобства компоненты тензора  $T_d$  обозначим следующим образом:

$$\begin{aligned} v_{1,1} &= \varepsilon_1; & v_{2,2} &= \varepsilon_2; & v_{3,3} &= \varepsilon_3; \\ v_{2,3} + v_{3,2} &= \theta_1; & v_{1,3} + v_{3,1} &= \theta_2; \\ v_{1,2} + v_{2,1} &= \theta_3. \end{aligned} \quad (4.38)$$

В сокращенной форме тензор  $T_d$  можно записать

$$T_d = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \frac{1}{2} \theta_3 & \frac{1}{2} \theta_2 \\ \frac{1}{2} \theta_3 & \varepsilon_2 & \frac{1}{2} \theta_1 \\ \frac{1}{2} \theta_2 & \frac{1}{2} \theta_1 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}. \quad (4.39)$$

Умножая тензор  $T_d$  на  $\mathbf{r}$ , получим

$$\begin{aligned} T_d \mathbf{r} &= i_1 \left( \varepsilon_1 \zeta_1 + \frac{1}{2} \theta_3 \zeta_2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \theta_2 \zeta_3 \right) + i_2 \left( \frac{1}{2} \theta_3 \zeta_1 + \varepsilon_2 \zeta_2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \theta_1 \zeta_3 \right) + i_3 \left( \frac{1}{2} \theta_2 \zeta_1 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \theta_1 \zeta_2 + \varepsilon_3 \zeta_3 \right), \end{aligned} \quad (4.40)$$

где  $\zeta_i$  — координаты вектора

$$\mathbf{r} = i_1 \zeta_1 + i_2 \zeta_2 + i_3 \zeta_3. \quad (4.41)$$

Компоненты полученного вектора в (4.40), умноженные на прирост времени  $dt$ , определяют перемещение точки  $A$  относительно полюса  $P$ , вытекающее из деформации рассматриваемой объемной частицы. Выражение  $T_d \mathbf{r}$  называется скоростью деформации, а тензор  $T_d$  — тензором деформации. Обозначим скорость деформации  $\mathbf{v}_d$ , тогда  $\mathbf{v}_d = T_d \mathbf{r}$ .

Компоненты тензора деформации, обозначенные  $\varepsilon$  в (4.40) и (4.41), соответствуют объемным деформациям частицы жидкости, а компоненты  $\theta$  — деформациям формы. Предположим, что все компоненты  $\varepsilon \neq 0$ . Увеличение объема частицы будет равно

$$\zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) dt. \quad (4.42)$$

Собственной скоростью прироста объема является отношение прироста объема частицы к начальному объему

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) dt. \quad (4.43)$$

Собственной скоростью объемной деформации называется отношение собственного прироста объема ко времени, в течение которого этот прирост произошел.

Учитывая (4.38) и (4.18), получим скорость объемной деформации, выраженную через дивергенцию вектора скорости,

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \operatorname{div} \mathbf{v}. \quad (4.44)$$

Эта сумма является инвариантом тензора деформации, она не зависит от выбора системы координат. Заметим, что если  $\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$ , то в жидкости нет объемных деформаций. Пользуясь рассмотренными выше свойствами тензора относительной скорости  $T$ , (4.31) можно представить следующим образом:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_p + \omega \mathbf{r} + \mathbf{v}_d. \quad (4.45)$$

Это выражение определяет кинематику частицы жидкости. Движение частицы жидкости можно рассматривать как суперпозицию вращательного и поступательного движения и деформации частицы, определенной симметричным тензором скорости деформации. Выражение (4.45) представляет собой первую теорему Гельмгольца — важнейшую теорему кинематики жидкостей.

Определим тензор напряжений для ньютоновской жидкости, предполагая, что тензор напряжений симметричный:

$$S = S^T, \quad (4.46)$$

где  $S^T$  — транспонированный тензор  $S$ ; в индексной форме это можно записать так:

$$[\sigma_{ij}] = [\sigma_{ji}]^T \quad \text{для } i, j = 1, 2, 3 \quad (4.47)$$

или

$$[\sigma_{ij}] = [\sigma_{ji}] \quad \text{для } i, j = 1, 2, 3. \quad (4.48)$$

Функцию  $f(T_d)$  разложим в степенной ряд в окрестностях скорости

деформации, и отбросим нелинейные члены, получим:

$$S = S_0 + 2\eta T_d - \eta' \operatorname{tr} T_d E, \quad (4.49)$$

где  $E$  — единичный тензор;  $S_0$  — напряжения в жидкости в состоянии покоя, причем из закона Паскаля имеем

$$S_0 = -pE. \quad (4.50)$$

Запись  $\operatorname{tr} T_d$  обозначает след тензора скорости деформаций и определяется следующим образом:

$$\operatorname{tr} T_d = v_{i,j}. \quad (4.51)$$

Преобразуем первый член (4.51)

$$\operatorname{tr} T_d = \operatorname{div} v. \quad (4.52)$$

Коэффициенты  $\eta$  и  $\eta'$  в (4.49) являются скалярными величинами и характеризуют свойства жидкости. Коэффициент  $\eta$  характеризует касательные напряжения на единицу градиента скорости и называется коэффициентом вязкости. Коэффициент вязкости зависит от температуры, давления и вида жидкости.

Коэффициент  $\eta'$  можно представить следующим образом:

$$\eta' = (2/3)\eta - \chi, \quad (4.53)$$

где  $\chi$  — коэффициент объемной вязкости. Подставляя (4.50), (4.52), (4.53) в (4.49) и принимая  $\chi = 0$  (допущение Стокса), получим

$$S = (-p - (2/3)\eta \operatorname{div} v) E + 2\eta T_d, \quad (4.54)$$

в индексном виде

$$\sigma_{ij} = (-p - (2/3)\eta v_{i,j}) \delta_{i,j} + \eta (v_{i,j} + v_{j,i}). \quad (4.55)$$

Главные напряжения  $\sigma_{ii}$  зависят от давления жидкости и от скорости деформации, касательные напряжения  $\sigma_{ij}$  ( $i \neq j$ ) пропорциональны соответствующим компонентам тензора скорости деформации.

Основные уравнения, описывающие течение смазочного материала. Уравнения гидродинамической теории смазки основаны на трех законах механики: сохранения массы, сохранения количества движения и момента количества движения и сохранения энергии.

Примем следующие допущения: компонент тензора напряжений зависит только от компонентов тензора скорости деформации, в рассматриваемом элементарном объеме тело изотропное, это значит, что главные оси напряжений совпадают с главными осями деформаций. На основании закона сохранения массы выведем уравнение неразрывности. Предположим, что движение жидкости относительно некоторой системы отсчета  $x_i$  описано полем скоростей  $v(x_1, x_2, x_3, t)$  и полем плотности жидкости  $\rho(x_1, x_2, x_3, t)$ . В пространстве, заполненном движущейся жидкостью, выделим область  $\Omega$ , ограниченную контрольной поверхностью  $\Gamma$  (см. рис. 4.34, б). Нормальный вектор  $n$  направлен наружу контрольной поверхности.

Изменение массы жидкости в области  $\Omega$  с течением времени может быть вызвано:

изменением плотности жидкости

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial t} dt d\Omega, \quad (4.56)$$

притоком через стенку контрольной поверхности  $\Gamma$

$$\int_{\Gamma} -v_n \rho d\Gamma dt. \quad (4.57)$$

В соответствии с законом сохранения массы оба выражения равны между собой, тогда

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \rho v_n d\Gamma = 0. \quad (4.58)$$

Мы получили уравнение неразрывности в интегральной форме.

Предположим, что скорость дифференцируема. Пользуясь теоремой Остроградского—Грина

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} \rho v_n d\Gamma &= \int_{\Gamma} (\rho v_n) d\Gamma = \\ &= \int_{\Omega} \operatorname{div} (\rho v) d\Omega, \end{aligned} \quad (4.59)$$

получим

$$\int_{\Omega} [\partial \rho / \partial t + \operatorname{div} (\rho v)] d\Omega = 0. \quad (4.60)$$

Поскольку область  $\Omega$  выбрана произвольно, предположим, что уравнение имеет решение при

$$\partial\rho/\partial t + \operatorname{div}(\rho\mathbf{v}) = 0. \quad (4.60a)$$

Это уравнение неразрывности в дифференциальной форме.

На частицу жидкости, ограниченную контрольной поверхностью, действуют поверхностные силы, силы, вызванные поверхностным натяжением, массовые силы. Не будем учитывать сил поверхностного натяжения, предполагая, что жидкость однородна и свободных поверхностей нет. Сумма сил, действующих на частицу жидкости, ограниченную поверхностью  $\Gamma$  в момент  $t$ , равна

$$\int_{\Gamma} p_n d\Gamma + \int_{\Omega} F d\Omega. \quad (4.61)$$

Приравнивая импульс этих сил и количество движения

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_1} \rho\mathbf{v} d\Omega_1 - \int_{\Omega} \rho\mathbf{v} d\Omega_2 = \\ & = \int_{t_1}^{t_2} \left( \int_{\Gamma} p_n d\Gamma + \int_{\Omega} F d\Omega \right) dt. \end{aligned} \quad (4.62)$$

Разделив (4.62) на  $(t_2 - t_1)$  и предположив, что  $t_2 \rightarrow t_1$ , получим

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho\mathbf{v} d\Omega = \int_{\Gamma} p_n d\Gamma + \int_{\Omega} F d\Omega. \quad (4.63)$$

Преобразовав левую часть, получим:

$$\int_{\Omega} \frac{d(\rho\mathbf{v})}{dt} d\Omega = \int_{\Gamma} p_n d\Gamma + \int_{\Omega} F d\Omega. \quad (4.64)$$

Поверхностные силы связаны с тензором напряжений следующей зависимостью

$$P_n = nS. \quad (4.65)$$

Пользуясь теоремой Остроградско-го—Грина, преобразуем поверхностный интеграл

$$\int_{\Gamma} p_n d\Gamma = \int_{\Gamma} nS d\Gamma = \int_{\Omega} \operatorname{div} S d\Omega. \quad (4.66)$$

Подставляя (4.66) в (4.64), получим

$$\int_{\Omega} [d(\rho\mathbf{v})/dt - F - \operatorname{div} S] d\Omega = 0. \quad (4.67)$$

Поскольку объемную частицу выбрали произвольно, знак интеграла можно опустить:

$$d(\rho\mathbf{v})/dt = F + \operatorname{div} S. \quad (4.68)$$

Подставляя (4.54) в (4.68) и предполагая, что массовые силы равны нулю, получим уравнение Навье—Стокса

$$\begin{aligned} d(\rho\mathbf{v})/dt = & -\operatorname{grad} p + \operatorname{div}(\eta \operatorname{grad} \mathbf{v}) + \\ & + \frac{1}{3} \operatorname{grad}(\eta \operatorname{div} \mathbf{v}). \end{aligned} \quad (4.69)$$

Это уравнение описывает движение произвольно выбранной частицы жидкости. Закон сохранения энергии для произвольной частицы жидкости, ограниченной контрольной поверхностью, требует, чтобы прирост энергии в жидкости в этой области был равен сумме работы механической силы, теплоты, возникшей внутри области, и теплоты, подведенной к области за счет теплопроводности.

Уравнение энергии в общем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \rho c_v T + \rho \frac{v^2}{2} \right) = & \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \\ & + \operatorname{div}(Sv) + Fv + q, \end{aligned} \quad (4.70)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $c_v$  — удельная теплоемкость;  $T$  — температура;  $q$  — дополнительные источники теплоты;  $Fv$  — мощность массовых сил;  $\operatorname{div}(Sv)$  — мощность поверхностных сил;  $\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T)$  — теплота, связанная с теплопроводностью.

Пренебрежем действием массовых сил и будем считать, что нет дополнительных источников и стоков теплоты.



Уравнение энергии можно записать в виде

$$\frac{d}{dt} (\rho c_v T + \rho \frac{v^2}{2}) = \text{div} (\lambda \text{grad } T) + \text{div} (Sv). \quad (4.71)$$

Пусть

$$\Phi = \text{tr} (ST_d) = \sigma_{ij} v_j, i. \quad (4.72)$$

Функция  $\Phi$  описывает рассеяние механической энергии. Умножая (4.68) скалярно на  $\mathbf{v}$  и отнимая от (4.71), получим следующую формулу уравнения энергии:

$$\frac{d}{dt} (\rho c_v T) = \text{div} (\lambda \text{grad } T) + \text{div} (T\mathbf{v}) - \mathbf{v} \text{div } T. \quad (4.73)$$

Запишем это уравнение в индексной форме:

$$\frac{d}{dt} (\rho c_v T) = (\lambda T, i), i + (\sigma_{ij} v_j), i - (\sigma_{ij} v_i), j. \quad (4.74)$$

Эти уравнения выведены для сплошной среды. К ним надо добавить уравнения состояния, определяющие зависимость изменения вязкости, плотности, теплоемкости и теплопроводности от давления и температуры. Они характеризуют физические свойства вязкой жидкости:

$$\rho = \rho(p, T); \quad \eta = \eta(p, T); \\ \lambda = \lambda(p, T); \quad c_v = c_v(p, T). \quad (4.75)$$

Функция вязкости для смазочного материала чаще всего выражается экспонентой

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad (4.76)$$

или

$$\eta = \eta_0 \exp[\alpha p + (\beta + \gamma p) \times (1/T - 1/T_0)]. \quad (4.77)$$

Изменение плотности можно описать с помощью формулы Ченга

$$\rho = \rho_0 [1 + C_{AP}/(1 + C_{BP}) + D(T - T_0)]. \quad (4.78)$$

Приведенные типичные зависимости для представления вязкости и плот-

ности получены экспериментальным путем [4.4, 4.8, 4.9]. Теплопроводность  $\lambda$  и удельная теплоемкость  $c_v$  изменяются незначительно, и поэтому можно считать, что  $\lambda = \text{const}$ ,  $c_v = \text{const}$ .

Уравнение Рейнольдса описывает распределение давления смазочного материала и вытекает из уравнения неразрывности и уравнений движения, выведенных ранее для континуума.

Если вектор скорости не зависит от времени ( $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ ), то уравнения движения примут вид:

$$v_{k,i} v_{l,k} = -\frac{1}{\rho} p, i + \frac{\eta}{\rho} v_{i,kk} + \frac{\eta}{3\rho} v_{k,ki}. \quad (4.79)$$

Предположим, что скорости жидкости малы, тогда

$$p, i = \eta v_{i,kk} + \frac{1}{3} v_{k,ki}. \quad (4.80)$$

Если жидкость несжимаемая, то из (4.60) следует, что исчезает дивергенция вектора  $\mathbf{v}$  ( $v_{k,k} = 0$ ). Получим простую форму уравнения движения

$$p, i = \eta v_{i,kk}. \quad (4.81)$$

Рассмотрим область смазки, представленную на рис. 4.34, которую образуют цилиндр и пластина. Пластина движется с постоянной скоростью  $v_0$ , расстояние между пластиной и цилиндром  $h$ . Предположим, что толщина смазочного слоя является функцией переменных  $x_1$  и времени.

Примем

$$v_1 = \frac{1}{2\eta} p, 1 x_3 (x_3 - h) + u_0 \frac{h - x_3}{h}; \quad (4.82)$$

$$v_2 = \frac{1}{2\eta} p, 2 x_3 (x_3 - h) + v_0 \frac{h - x_3}{h}. \quad (4.83)$$

Эти зависимости представляют собой решение системы частных дифференциальных уравнений (4.79)

$$\frac{1}{\eta} p_{,1} = v_{1,33}; \quad (4.84)$$

$$\frac{1}{\eta} p_{,2} = v_{2,33} \quad (4.85)$$

с граничными условиями

$$v_1(h) = v_2(h) = 0; \quad v_1(0) = v_0; \\ v_2(0) = u_0. \quad (4.86)$$

Если функция плотности не зависит от координаты  $x_3$ , то после интегрирования (4.60) по переменной  $x_3$ , получим

$$\int_0^h (\rho v_{1,1}) dx_3 + \int_0^h (\rho v_{2,2}) dx_3 + \rho v_3 + \\ + h \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (4.87)$$

для  $v_3(h) = \partial h / \partial t$  имеем

$$\int_0^h (\rho v_{1,1}) dx_3 + \int_0^h (\rho v_{2,2}) dx_3 + \\ + \partial (\rho h) / \partial t = 0. \quad (4.88)$$

Воспользовавшись формулой

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_a^b f(x, t) dx = f[b(t), t] \times \\ \times \frac{db}{dt} - f[a(t), t] \frac{da}{dt} + \\ + \int_a^b \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} dx, \quad (4.89)$$

получим

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \int_0^h \rho v_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \int_0^h \rho v_2 dx_3 + \\ + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = 0. \quad (4.90)$$

Поскольку мы приняли, что  $p = p(x_3)$ , то

$$\int_0^h v_1 dx_3 = -\frac{1}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x_1} h^3 + \frac{v_0 h}{2}; \quad (4.91)$$

$$\int_0^h v_2 dx_3 = \frac{1}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x_2} h^3 + \frac{u_0 h}{2}. \quad (4.92)$$

Подставим вычисленные интегралы в (4.90), тогда

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( -\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\rho v_0 h}{2} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( -\frac{\rho h}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\rho u_0 h}{2} \right) + \\ + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = 0. \quad (4.93)$$

Принимая, что  $u_0$  и  $v_0$  являются функциями координат  $x_1, x_2$  и времени  $t$ , получим общий вид уравнения Рейнольдса

$$\left( \frac{\rho h^3}{\eta} p_{,1} \right)_{,1} + \left( \frac{\rho h^3}{\eta} p_{,2} \right)_{,2} = \\ = 6 [(\rho v_0 h)_{,1} + (\rho u_0 h)_{,1}] + 12 \frac{\partial (\rho h)}{\partial t}. \quad (4.94)$$

### 4.3.2. Гидростатическая смазка

В зависимости от давления в смазывающей пленке и способа ее образования различают гидростатическую, гидродинамическую и эластогидродинамическую смазку.

Гидростатическая смазка заключается в образовании между сопрягаемыми поверхностями пленки жидкости, в которой статическое давление, возникающее в результате постоянной циркуляции жидкости, поддерживаемой извне, уравновешивает внешнюю нагрузку, полностью отделяя друг от друга поверхности узла трения.

Идея гидростатической смазки впервые была продемонстрирована на Парижской промышленной выставке в 1878 г. Там был выставлен бесполез-

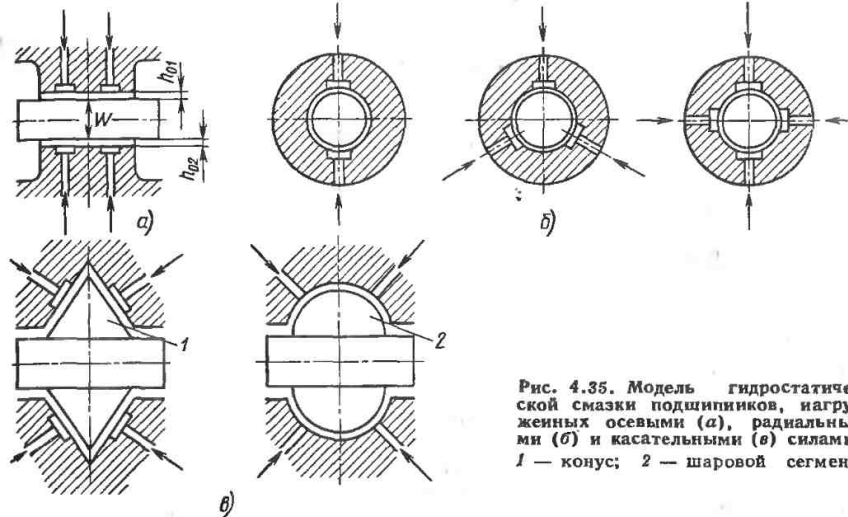


Рис. 4.35. Модель гидростатической смазки подшипников, нагруженных осевыми (а), радиальными (б) и касательными (в) силами: 1 — конус; 2 — шаровой сегмент

ный с виду экспонат под названием *Le Chemin de fer glace* («Железная дорога на льду»). Это был кусок металла на четырех опорах, заканчивающихся плоскими, легкими, вогнутыми башмаками. Башмаки стояли на гладком металлическом полу. Через отверстия в опорах накачивалось масло, которое вытекало из-под башмаков так, что вся глыба легко поднималась и плавала на пленке жидкости. Сопротивление трения между башмаками и полом было небольшим по сравнению с сопротивлением сухого трения. Тяжелая глыба металла очень легко перемещалась.

Явление гидростатической смазки используется до сих пор в различных конструктивных решениях, потому что толщина смазывающей пленки почти не зависит от нагрузки, и грузочная способность подшипника мало зависит от относительной скорости трущихся поверхностей, сопротивление трения практически отсутствует.

Такой способ смазки обеспечивает большую свободу в выборе конструктивного решения. Его уникальное достоинство в том, что сопротивление трения мало при разгоне неподвижных деталей машин. На рис. 4.35 приведены примеры гидростатической

смазки деталей, нагруженных осевыми, радиальными и касательными силами.

Принцип гидростатической смазки нашел повсеместное применение для многих деталей машин. Он применяется, и частности, в следующих случаях:

в упорных подшипниках (рис. 4.36); при подъеме валов тяжелых роторных машин для снижения трения при их разгоне (рис. 4.37);

в радиальных подшипниках скольжения, когда угловая скорость вала мала для образования достаточной пленки жидкости;

в направляющих для снижения трения в деталях, участвующих в прямолинейном движении (рис. 4.38);

в установках для изучения подшипников скольжения в целях снижения сопротивления трения спорных поверхностей (рис. 4.39);

для амортизации различных взаимодействующих плит, отделенных вязкой жидкостью;

для поддержания заданного зазора между поверхностями.

Во всех примерах пленка жидкости, отделяющая взаимодействующие детали машин, существует в результате постоянного подведения жидкости сиа-

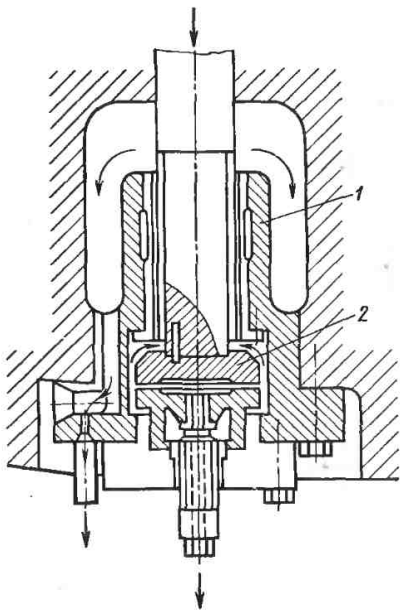


Рис. 4.36. Гидростатическая смазка подпятника.

1 — направляющая втулка; 2 — подпятник

ружи под давлением. На рис. 4.40 представлены схемы типичных радиальных подшипников скольжения с гидростатической смазкой.

Жидкость, подводимая в зону трения через входные отверстия  $R_w$  (рис. 4.41) под давлением  $p_z$ , вытекает через щели  $R_1$  и  $R_2$ . Эти щели имеются между поверхностями цапфы и втулки. Давление жидкости может регулироваться снаружи или компенсироваться внутри подшипника. В случае концентрической установки цапфы и втулки, когда зазоры  $h_1 = h_2$ , давления  $p_1$  и  $p_2$  соответственно в верхней и нижней частях подшипника равны. На цапфу не действует результирующая сила (если не учитывать вес вала). Если в результате действия внешней нагрузки вал выходит из положения равновесия, то увеличится зазор  $h_1$  и уменьшится зазор  $h_2$ . Такое изменение приведет к изменению выпускных щелей  $R_1$  и  $R_2$ . Произойдет уве-

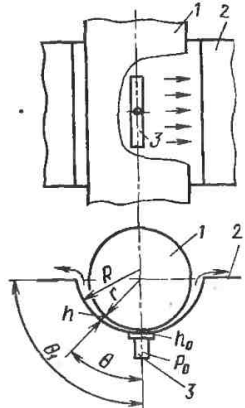


Рис. 4.37. Схема применения гидростатической подушки для подъема вала:

1 — вал; 2 — подушка; 3 — подача газа;  $r$  — радиус вала;  $R$  — радиус подушки;  $h$  — текущий зазор;  $h_0$  — минимальный зазор;  $\theta$  — текущий угол;  $\theta_1$  — конструктивный угол;  $P_0$  — давление газа

личение сопротивления течению в нижней части подшипника и уменьшение в верхней. Поскольку изменение сопротивления течению влияет на давление,  $p_2$  возрастет, а  $p_1$  уменьшится. Результирующая сила, противодействующая отклонению вала, будет пропорциональна заштрихованной площади на диаграмме давлений.

В гидростатическом подшипнике потери на трение малы. Существуют конструкции, характеризующиеся маленькими коэффициентами трения. На-

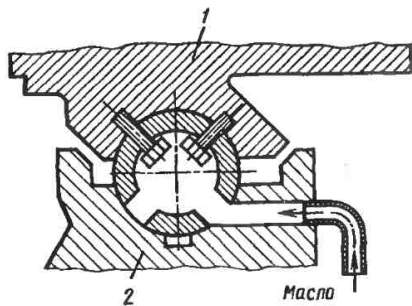


Рис. 4.38. Гидростатическая смазка направляющих фрезерального станка:

1 — стол; 2 — станина

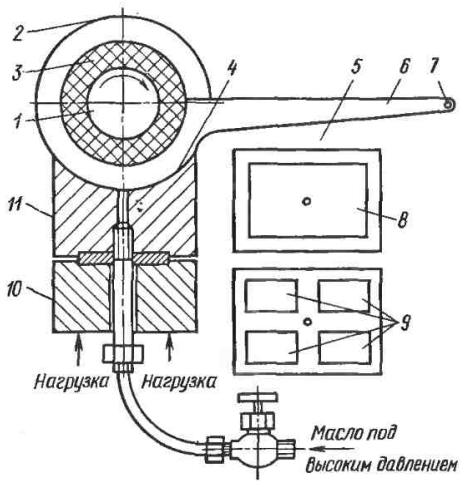


Рис. 4.39. Гидростатическая смазка устройства для изучения подшипников скольжения:

1 — вал; 2 — обойма; 3 — подшипник; 4 — контакт поверхностей; 5 — варианты вкладышей; 6 — рычаг; 7 — веса; 8, 9 — углубления; 10 — прижимная колодка; 11 — кессонная панель

пример, гидростатическая смазка знаменитого телескопа массой 450 т на горе Маунт—Паломор позволила уменьшить коэффициент трения до 0,000004. Однако общая мощность, необходимая для обеспечения функционирования систем гидростатической смазки, довольно велика.

Правильно спроектированная система гидростатической смазки должна базироваться на оптимальных условиях подачи жидкости и нагружения. На рис. 4.42 показаны примеры зависимости потерь мощности от толщины пленки жидкости для подшипника турбогенератора. Как видно на рисунке,

уменьшение потерь трения достигается ценой увеличения потерь нагнетания.

Распределение давления в гидростатическом радиальном подшипнике можно определить из уравнения Рейнольдса. Для неподвижной цапфы, когда  $v = 0$ , уравнение примет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0, \quad (4.95)$$

так как  $h = h(x)$ , то

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (4.96)$$

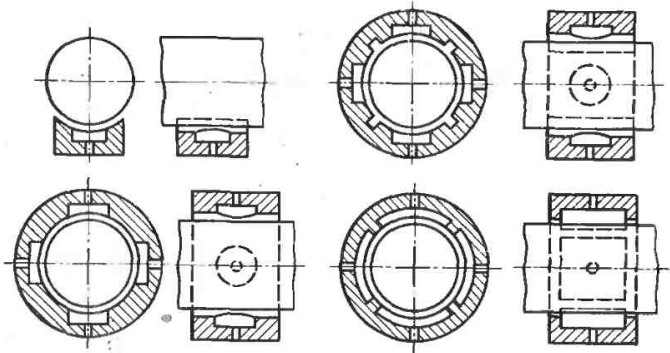


Рис. 4.40. Схемы радиальных подшипников скольжения с гидростатической смазкой

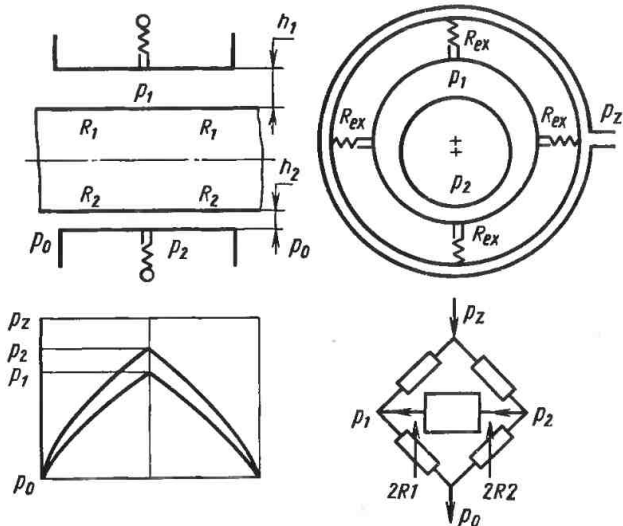


Рис. 4.41. Схема замещения радиального подшипника скольжения с гидростатической смазкой, представляющая собой зависимость нагружения от диаметра цапфы и давления на входе;  $R_{ex}$  — регулируемое сопротивление

Подставляя  $h = c(1 - \cos \theta)$ , получим

$$\frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{3e \sin\left(\frac{x}{R}\right)}{Rc \left[1 - e \cos\left(\frac{x}{R}\right)\right]} \quad (4.97)$$

Граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} p &= p_0 & \text{при } z = \pm 0,5L; \\ p &= p_w(x) & \text{при } z = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.98)$$

где  $p_0$  — давление окружающей среды;  $p_w$  — давление жидкости на входе в подшипник.

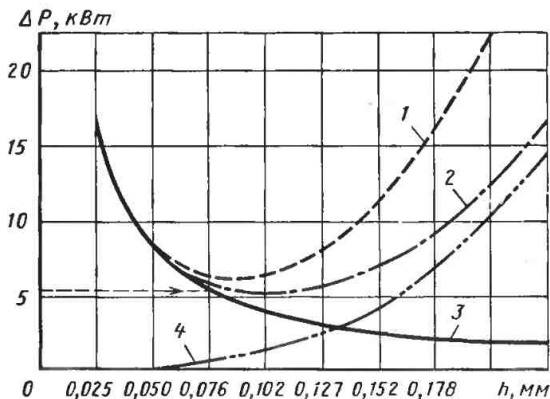


Рис. 4.42. Зависимость потерь мощности  $\Delta P$  от толщины масляной пленки в подшипнике турбогенератора:

1, 2 — полные потери при  $\eta_H = 50\%$  и  $\eta_H = 100\%$ ; 3 — потери от трения; 4 — потери от магнетания

Относительная толщина смазывающей пленки при этих предположениях

$$\frac{h_0}{R} = 0,67 \cdot 10^{-6}. \quad (4.99)$$

Приняв радиус эквивалентного цилиндра, моделирующего контакт зубьев шестерни  $R = 20$  мм, из (4.99) получим толщину пленки жидкости в соответствии с классической теорией гидродинамики:

$$h_0 = 0,013 \text{ мкм}. \quad (4.100)$$

Толщина пленки мала по сравнению даже с минимальными неровностями поверхности. Подтвердить этот вывод практически нельзя. Это значит, что классическая теория гидродинамики не может быть использована для оценки поведения смазочного материала шестерни.

Аналогичные рассуждения можно провести для подшипника качения. Возьмем роликовый подшипник со следующими параметрами: частота вращения вала  $n = 5000$  об/мин, диаметр внутреннего кольца  $R_1 = 32$  мм, диаметр цилиндра  $r = 8$  мм, нагрузка на цилиндр  $p = 300$  кН/м, вязкость смазочного материала  $\eta = 0,01$  Па·с.

Радиус эквивалентного цилиндра  $R$ , см, при этих размерах

$$R = \frac{R_1 r}{R_1 + r} = \frac{3,2 \cdot 0,8}{3,2 + 0,8} = 0,64. \quad (4.101)$$

Скорость  $U$  можно вычислить на основании анализа кинематики подшипника качения по формуле

$$U = \frac{R_1 \omega}{2} \frac{1 + 2r/R_1}{1 + r/R_1}. \quad (4.102)$$

Для нашего случая  $U = 10,4$  м/с.

Относительная толщина смазывающего слоя равна

$$h_0/R = 1,7 \cdot 10^{-6}, \quad (4.103)$$

откуда для данного радиуса

$$h_0 = 0,010 \text{ мкм}. \quad (4.104)$$

Вычисленная толщина пленки смазки, как и в зубчатых колесах, слишком мала по сравнению с высотой неровностей, чтобы ее было достаточно для полного разделения взаимодействующих поверхностей.

### 4.3.3. Эластогидродинамическая смазка

Эластогидродинамическая теория появилась как обобщение классической теории гидродинамики при учете условий контакта, влияющих на свойства смазочной жидкости и деформацию контактирующих деталей, для определения распределения давления в зоне контакта. При этом определяются форма и толщина пленки смазки и ее несущая способность. Эластогидродинамическая теория смазки основана на следующих предположениях:

перемещения вычисляются на основании упругого полупространства твердого тела, которое считается материальным континуумом;

не учитывается влияние боковых утечек, что обосновано размерами зоны динамического давления: ширина зоны влияния этого давления мала по сравнению с длиной цилиндра, т. е. производную  $\frac{\partial c}{\partial z}$  можно не учитывать;

граничные условия:  $p = 0$  на входе, на большом расстоянии от зоны высокого давления  $p = \frac{\partial p}{\partial z} = 0$  на выходе;

смазка несжимаема;

не учитываются изменения вязкости и объема смазочного материала, вызванные изменениями температуры.

С учетом этих предпосылок проблема сводится к решению системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \right) &= 12U \frac{dh}{dx}; \\ \eta &= \eta(p); \quad h = h_0 + \frac{x^2}{2R} + v, \end{aligned} \right\} \quad (4.105)$$

причем гидродинамическая скорость  $U = 0,5 (U_1 + U_2)$ .

Сумма упругих деформаций двух контактирующих твердых тел

$$v = - \frac{2}{\pi E'} \int_{s_2}^{s_1} p(s) \ln(x-s)^2 ds + C, \quad (4.106)$$

причем

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right), \quad (4.107)$$

где  $E_1, E_2$  — модули упругости материалов контактирующих деталей;  $\nu_1, \nu_2$  — коэффициенты Пуассона контактирующих материалов;  $E'$  — эквивалентный модуль упругости;  $s$  — дополнительная координата вдоль оси  $x$ .

Зависимость вязкости  $\eta$  от давления  $p$  представлена уравнением

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p}, \quad (4.108)$$

где  $\eta_0$  — вязкость при  $p = 0$ ;  $\alpha$  — пьезокоэффициент вязкости.

При этом предположении удобнее в уравнении Рейнольдса давление  $p$  заменить редуцированным давлением

$$q = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha p}), \quad (4.109)$$

тогда

$$\frac{dq}{dx} = e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx}. \quad (4.110)$$

Система уравнений (4.108)—(4.110) представляет собой изотермическую задачу эластогидродинамической смазки. До сих пор нет ее общего решения, хотя получено много численных решений. Главная трудность в получении численного решения заключается в том, что итерация «давление—деформация—форма масляной пленки—давление» не всегда сходится.

Процесс трения при эластогидродинамической смазке характеризуется следующими переменными: эквивалентным радиусом кривизны  $R$ , м, эквивалентным модулем продольной упругости  $E'$ , Па; характеристиками вязкости жидкости  $\eta$ , Па·с,  $\alpha$ , Па<sup>-1</sup>; нагрузкой на контакт  $W$ , Н/м; скоростью  $u$ , м/с; толщиной слоя смазки  $h$ , м.

В теории подобия обозначены размерность длины  $[L]$ , размерность массы  $[M]$  и размерность времени  $[T]$ . Учитывая эти обозначения, можно в рассматриваемом процессе смазки выделить семь независимых переменных со следующими размерностями:

$h$  [L];  $R$ , [L];  $E'$ ,  $[M/(LT)^2]$ ;  $\eta_0$ ,  $[M/(LT)]$ ;  $\alpha$ ,  $[LT^2/M]$ ;  $W$ ,  $[MT^2]$ ;  $U$ ,  $[L/T]$ . Они характеризуют геометрию ( $h, R$ ), кинематику ( $U$ ), динамику ( $W$ ), материал смазываемых деталей ( $E'$ ) и смазочный материал ( $\eta_0, \alpha$ ).

Цель эластогидродинамической теории смазки — определение зависимости между указанными выше переменными. Особенно важна зависимость толщины слоя смазки от остальных переменных. Информация, касающаяся влияния нагрузки и скорости на толщину слоя  $h$ , позволяет оценить возможность выполнения роли, предназначенной слою смазки еще в процессе конструирования. Это можно оценить, сравнивая значение  $h$  с высотой неровностей.

Исходя из приведенных предположек, на основании теории подобия можно установить три безразмерных отношения, в зависимости от которых определяется относительная толщина слоя смазки

$$\frac{h}{R} = f \left( \frac{W}{E'R}, \frac{\eta_0 U}{E'R}, \alpha E' \right). \quad (4.111)$$

Сокращение количества переменных до четырех значительно упрощает способ представления зависимости в сравнении с семью переменными. Безразмерные параметры в такой системе определяются в такой последовательности: параметр толщины слоя смазки, параметр нагружения, параметр скорости и параметр материала

$$\bar{H} = \frac{h}{R}; \quad \bar{W} = \frac{W}{E'R}; \quad \bar{U} = \frac{\eta_0 U}{E'R}; \\ \bar{G} = \alpha E'. \quad (4.112)$$

Значение  $\bar{W}$ ,  $U$  и  $\bar{G}$  приведены в табл. 4.2. Наиболее значительное влияние на процесс смазки имеет параметр скорости  $\bar{U}$ , поэтому он представлен в диапазоне  $10^{-8}$ — $10^{13}$ .

Первые работы Эртеля и А. Н. Грубина по смазке контактов привели к формулировке и развитию эластогидродинамической теории смазки (см. работы А. И. Петрусевича, М. В. Корвчинского, Д. С. Коднира, М. А. Галахова, Даусона, Хиджинсона и др.).



4.2. Безразмерные параметры, определяющие эластогидродинамическую смазку

Обозначение	Значение	$\bar{W}$ , кН/м	$R$ , мм	$E'$ , МПа	$\alpha$ , Па <sup>-1</sup>	$U$ , м/с, при $\eta$ , мПа·с		
						3	30	300
$\bar{U}$	10 <sup>-13</sup> 10 <sup>-12</sup> 10 <sup>-11</sup> 10 <sup>-10</sup> 10 <sup>-9</sup> 10 <sup>-8</sup>	—	13	2,3·10 <sup>5</sup> сталь/сталь	—	0,1 1 10 100 — —	— 0,1 1 10 100 —	— — 0,1 1 10 100
$\bar{W}$	3·10 <sup>-5</sup> 3·10 <sup>-4</sup>	90 900	13	2,3·10 <sup>5</sup> сталь/сталь	—	—		
$\bar{G}$	5000 2500	—	—	2,3·10 <sup>5</sup> сталь/сталь 1,15·10 <sup>5</sup> бронза/бронза	2,2·10 <sup>-3</sup>	—		

Теория А. Н. Грубина предполагает, что деформация цилиндра в случае сухого и смазываемого контакта одинакова. Геометрия контакта упругого цилиндра и жесткой плоскости представлена на рис. 4.43. Из теории упругости вытекает следующее выражение для определения перемещений в твердом теле снаружи зоны контакта Герца (для  $|x| > b$ ):

$$\bar{H} - \bar{H}_0 = \frac{h - h_0}{R} = \frac{4\bar{W}}{\pi} \times \left\{ X(X^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \ln \left[ X - (X^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}, \quad (4.113)$$

где

$$\bar{H} = h/R, \quad \bar{H}_0 = h_0/R, \quad X = x/b. \quad (4.114)$$

Проинтегрированное уравнение Рейнольдса имеет следующий вид:

$$\frac{dp}{dx} = 12\eta U \frac{h - h_0}{h^3}. \quad (4.115)$$

Введя приведенное давление

$$\frac{dq}{dx} = 12\eta_0 U \frac{h - h_0}{h^3}, \quad (4.116)$$

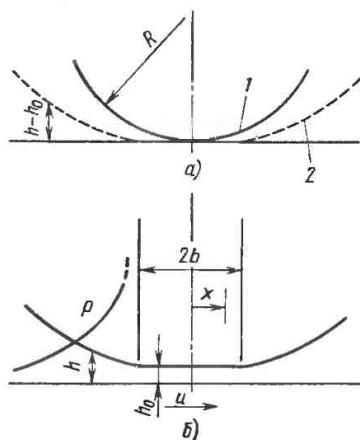


Рис. 4.43. Геометрия контакта: а — несмазанные поверхности; б — смазанные поверхности; 1 — недеформированный цилиндр; 2 — деформированный цилиндр

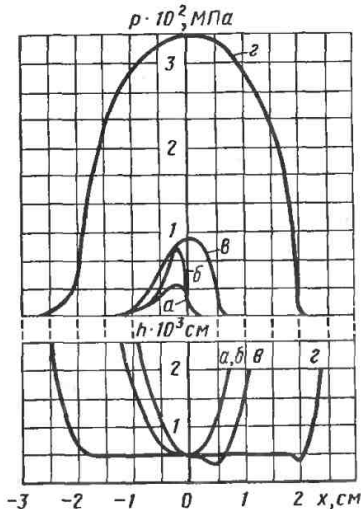


Рис. 4.44. Распределение давления и форма смазывающей пленки в стыке:

*a* — постоянная вязкость, недеформируемые цилиндры; *б* — вязкость зависит от давления, недеформируемые цилиндры; *в* — постоянная вязкость, упругие цилиндры; *г* — вязкость зависит от давления, упругие цилиндры

а затем относительное приведенное давление

$$Q = q/E \quad (4.117)$$

и воспользовавшись зависимостью, определяющей размер контакта,

$$\frac{b}{R} = 4 \left( \frac{\bar{W}}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.118)$$

получим уравнение Рейнольдса в безразмерном виде

$$\frac{dQ}{dX} = 48 \left( \frac{\bar{W}}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} U \frac{\bar{H} - \bar{H}_0}{\bar{H}^3}. \quad (4.119)$$

Приведенное давление, возникающее на краю стыка Герца, составляет

$$Q_{X=-1} = 48 \left( \frac{\bar{W}}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \times \times U \int_{-\infty}^{-1} \left( \frac{\bar{H} - \bar{H}_0}{\bar{H}^3} \right) dX. \quad (4.120)$$

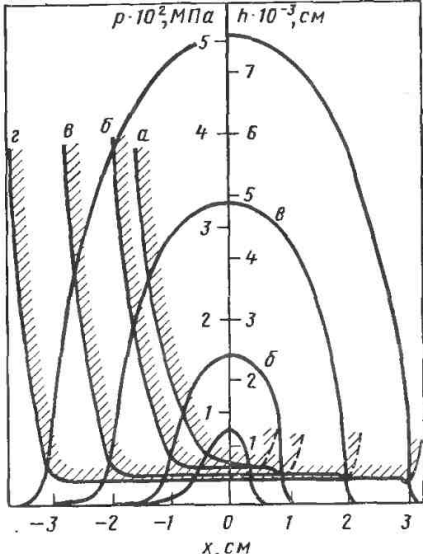


Рис. 4.45. Распределение давления и форма эластогидродинамической пленки при различных внешних нагрузениях; условия контакта см. на рис. 4.44

Численным интегрированием получено

$$Q_{X=-1} = 48 \left( \frac{\bar{W}}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} U \left( \frac{\pi}{2\bar{W}} \right)^2 \times \times 0,0986 \left( \frac{\pi \bar{H}_0}{2\bar{W}} \right)^{-\frac{11}{8}}. \quad (4.121)$$

Давление на краю стыка при  $X = -1$  должно быть сравнимо с максимальным давлением Герца. В диапазоне практических нагрузок это значит, что  $q \approx 1/\alpha$ , потому что  $e^{-\alpha c} = 1$ . Из определения  $Q$  следует, что

$$Q_{X=-1} = q/E \approx 1/(\alpha E') = 1/G.$$

Подставляя  $Q_{X=-1}$  в уравнение (4.121) и преобразуя его, получим значение параметра толщины слоя смазки

$$\bar{H}_0 = 1,95 (\bar{G}U)^{\frac{8}{11}} / \bar{W}^{\frac{1}{11}}. \quad (4.122)$$

Несмотря на простоту рассуждений А. Н. Грубина, толщина слоя смазки,

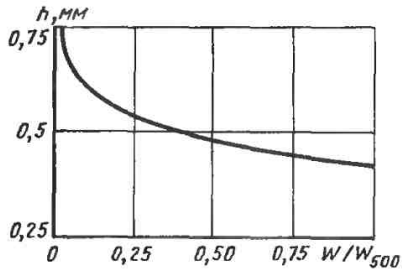


Рис. 4.46. Зависимость толщины эласто-гидродинамической пленки  $h$ , мм от относительного нагружения  $W/W_{500}$

получения из этого уравнения, близка к рассчитанным другими более точными методами и к экспериментальным данным.

На рис. 4.44 приведены зависимости, характеризующие влияние изменений вязкости и упругой деформации на распределение давления и форму слоя смазки. Кривые построены в предположении, что толщина эласто-гидродинамического слоя для  $x = 0$  одинакова во всех случаях.

Из анализа кривых на рис. 4.44 можно сделать интересный вывод об общем влиянии изменения вязкости вследствие увеличения давления и упругости поверхности на динамическое давление. На рис. 4.45 показано изменение кривой давления с ростом нагрузки. Эти результаты учитывают существование одновременного влияния изменения вязкости в результате увеличения давления и деформаций смазываемых поверхностей. Кривая  $\sigma$  на рис. 4.45 имеет такую же форму и величину, как кривая  $g$  на рис. 4.44, поскольку обе они относятся к одинаковым условиям:  $E = 2,15 \cdot 10^5$  МПа;  $v = 0,3$  м/с;  $R = 200$  см;  $U = 1$  м/с;  $\eta_0 = 0,137$  Па·с. На рис. 4.45 показано также изменение толщины слоя смазки с изменением нагрузки. Эту зависимость можно представить в другом виде. На рис. 4.46 показано изменение толщины как функции давления, отнесенного к усилению  $W_{500}$  при  $p = 500$  МПа. Толщина слоя мало зависит от изменений нагрузки. Не-чувствительность эластогидродинамической пленки к изменению нагрузки

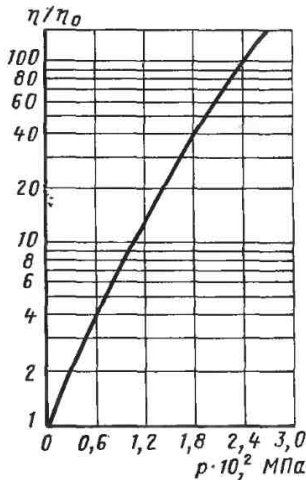


Рис. 4.47. Экспериментальная зависимость вязкости минерального масла  $\eta/\eta_0$  от давления  $p$  ( $\eta_0 = 0,137$  Па·с)

является одним из важнейших выводов эластогидродинамической теории. Кривые на рис. 4.44—4.46 построены в предположении, что вязкость изменяется в соответствии с рис. 4.47. Это типичная опытная кривая для обычного минерального масла.

Для получения модели, учитывающей уравнение градиента давления для масла, вязкость которого зависит от давления с учетом деформаций зон трения применяются численные решения.

Изотермическая модель масляной пленки при эластогидродинамической смазке базируется на уравнении градиента давления и уравнении состояния. Пьезокоэффициент, учитывающий изменение вязкости масла в зависимости от давления, имеет значения  $0,01—0,04$  м<sup>2</sup>/МН. Поэтому при небольшом давлении вычисление фактического давления на основании приведенного давления не доставит больших трудностей. Если же приведенное давление достигает нескольких десятков Мега Ньютонов на квадратный метр, то фактическое давление стремится к бесконечности.

На рис. 4.48 и 4.49 показаны распределение давления в безразмерной

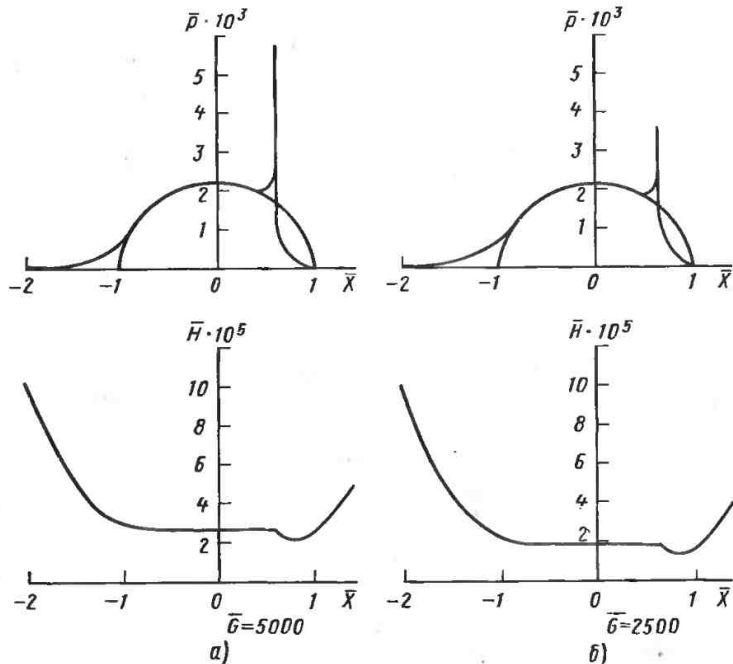


Рис. 4.48. Распределение давления  $\bar{p}$  и перемещений  $\bar{H}$  и форма эластогидродинамической пленки при разных значениях параметров:  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-6}$  — параметр нагружения;  $\bar{U} = 10^{-11}$  — параметр скорости;  $\bar{G}$  — параметр материала;  $\bar{H}$  — параметр перемещений в твердом теле;  $\bar{X}$  — параметр длины зоны контакта

форме как  $\bar{p} = p/E$  и форма эластогидродинамических пленок для разных значений безразмерных параметров  $\bar{W}$ ,  $\bar{U}$ ,  $\bar{G}$ . Во всех четырех случаях давление резко возрастает, пик давления на выходе. Такого пика нет на рис. 4.44, потому что значения параметров  $\bar{G}$  и  $\bar{U}$ , на основании которых построены кривые, слишком малы для создания достаточного прироста давления. Из рис. 4.48 и 4.49 следует, что высота пика давления зависит прежде всего от значения параметра материала  $\bar{G}$  и весьма незначительно от параметра нагружения  $\bar{W}$ . Аналогично толщина эластогидродинамической пленки зависит от параметра материала  $\bar{G}$  и почти не зависит от параметра нагружения  $\bar{W}$ .

Поскольку практически диапазон изменения  $\bar{G}$  невелик по сравнению с диапазоном изменения параметра скорости  $\bar{U}$ , можно принять, что толщина смазочной пленки зависит в основном от параметра скорости  $\bar{U}$ . На рис. 4.50 показано изменение минимальной толщины пленки  $\bar{H}_{\min} = h_{\min}/R$  в зависимости от  $\bar{U}$ . Из диаграммы следует:

$$H_{\min} = \alpha \bar{U}^{0.7}. \quad (4.123)$$

Для сравнения приведена толщина смазывающей пленки, полученной по классической гидродинамической теории.

На рис. 4.51 показано влияние параметра скорости  $\bar{U}$  на распределе-

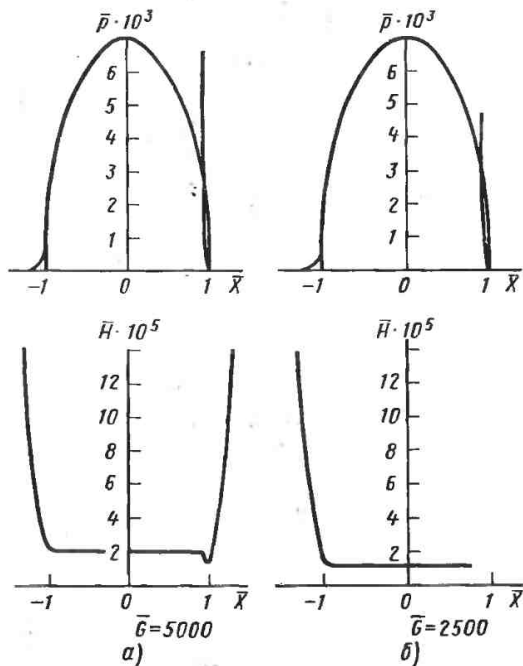


Рис. 4.48. Распределение давления и форма эластогидродинамической пленки при различных значениях параметров материала:  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\bar{U} = 10^{-11}$ , остальные обозначения см. рис. 4.48

ние давления  $\bar{p}$  в эластогидродинамической пленке. По мере увеличения параметра скорости  $\bar{U}$  распределение давления отклоняется от распределения Герца. Пики давления при этом могут в несколько раз превышать давление Герца.

На рис. 4.52 показана форма эластогидродинамической пленки масла, соответствующая функциям давления на рис. 4.51. Огибающая линий, представляющих форму смазывающих пленок, для разных значений параметра  $\bar{U}$  (обозначена 0), ограничивает зону несмазанного контакта, т. е. контакта при  $\bar{U} = 0$ . Характерная черта формы эластогидродинамической пленки — ее сужение со стороны выхода. С увеличением  $\bar{U}$  сужение охватывает все большую часть зону контакта Герца; при максимальных значениях  $\bar{U}$  оно начинается перед зоной контакта Герца. Во всех случаях минимальная толщина пленки составляет 0,7—0,8

толщины в точке максимального давления. Из сказанного следует, что параметр скорости  $\bar{U}$  является доминирующей независимой переменной.

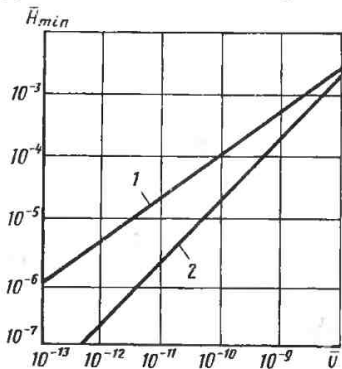


Рис. 4.50. Зависимость толщины пленки  $\bar{H}_{min}$  от параметра  $\bar{U}$  для  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\bar{G} = 5000$ .  
1 — эластогидродинамическая теория;  
2 — гидродинамическая теория

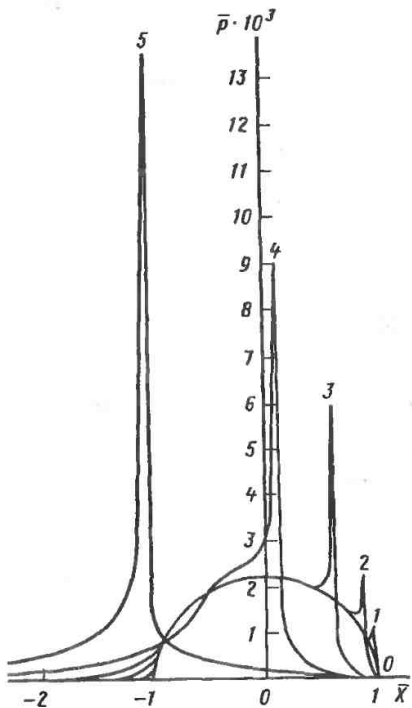


Рис. 4.51. Влияние параметра скорости  $\bar{U}$  на распределение давления в эластогидродинамической пленке смазки при  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $\bar{G} = 5000$ :  
 0 —  $\bar{U} = 0$ ; 1 —  $\bar{U} = 10^{-12}$ ; 2 —  $\bar{U} = 10^{-12}$ ; 3 —  $\bar{U} = 10^{-11}$ ; 4 —  $\bar{U} = 10^{-10}$ ; 5 —  $\bar{U} = 10^{-9}$

Проведенный выше анализ не учитывал сжимаемости смазочного материала, жидкость считалась идеально несжимаемой. Однако из-за большого давления в зоне контакта необходимо учитывать изменение плотности в зависимости от изменения давления. При небольшом давлении это изменение можно считать линейным. Типичная экспериментальная зависимость плотности от давления для минерального масла представлена на рис. 4.53. Изменение плотности из-за роста давления влияет прежде всего на пиковое давление.

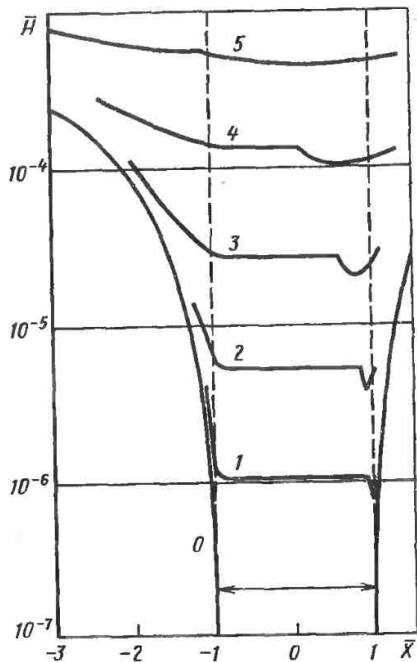


Рис. 4.52. Влияние параметра скорости  $\bar{U}$  на форму и толщину эластогидродинамической пленки смазки при  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-5}$ ;  $\bar{G} = 5000$ :  
 0 —  $\bar{U} = 0$ ; 1 —  $\bar{U} = 10^{-12}$ ; 2 —  $\bar{U} = 10^{-12}$ ; 3 —  $\bar{U} = 10^{-11}$ ; 4 —  $\bar{U} = 10^{-10}$ ; 5 —  $\bar{U} = 10^{-9}$

Сравнение рис. 4.51 и 4.54 показывает, что во всех случаях, учитывающих сжимаемость, пиковое давление снижается и смещается в направлении  $+x$ . Особенно заметно это сниже-

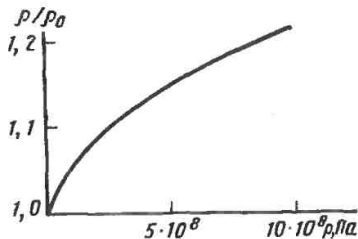


Рис. 4.53. Зависимость относительной плотности  $\rho/\rho_0$  от давления  $p$  для типичного минерального масла

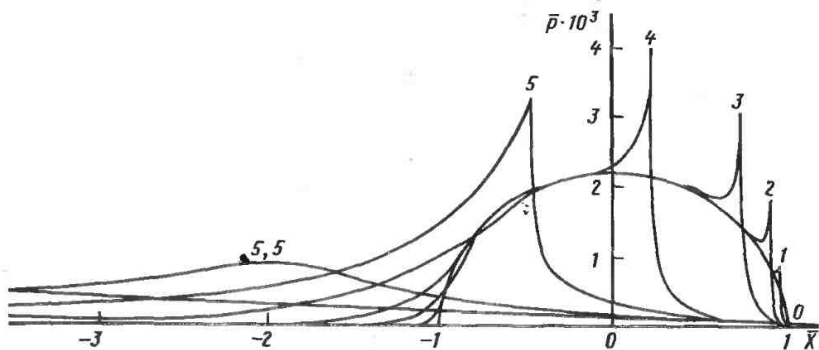


Рис. 4.54. Влияние параметра скорости  $\bar{U}$  на распределение давления в эластогидродинамической пленке сжимаемой жидкости при  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-6}$ ;  $G = 5000$ :  
 0 —  $\bar{U} = 0$ ; 1 —  $\bar{U} = 10^{-13}$ ; 2 —  $\bar{U} = 10^{-12}$ ; 3 —  $\bar{U} = 10^{-11}$ ; 4 —  $\bar{U} = 10^{-10}$ ; 5 —  $\bar{U} = 10^{-9}$

ние при больших значениях параметра скорости.

Учет сжимаемости жидкости принципиально не влияет на форму масляной пленки. На рис. 4.55 показана форма эластогидродинамической пленки для несжимаемой 1 и сжимаемой 2 жидкостей.

Сила трения, возникающая при эластогидродинамической смазке, не зависит от параметра нагружения  $\bar{W}$  и изменяется с параметром скорости  $\bar{U}$  так же, как и толщина пленки. В первом приближении можно принять, что сила трения при чистом качении прямо пропорциональна толщине пленки масла. На рис. 4.56 показано изменение

коэффициента трения, что при независимости силы трения от нагружения соответствует изменениям силы трения вместе с параметром скорости  $\bar{U}$ . Для сравнения на нем показана зависимость, полученная на основании классической гидродинамической теории.

Распределение напряжений в твердом теле, возникающее в условиях смазки зоны контакта Герца, показано на рис. 4.57. Кривые на этом рисунке соответствуют одинаковым значениям отношения максимальных главных напряжений к максимальным напряже-

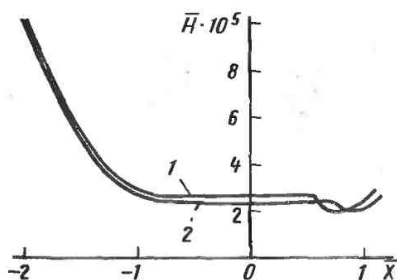


Рис. 4.55. Влияние сжимаемости смазочного материала на форму и толщину эластогидродинамической пленки:  
 1 — несжимаемая пленка; 2 — сжимаемая пленка

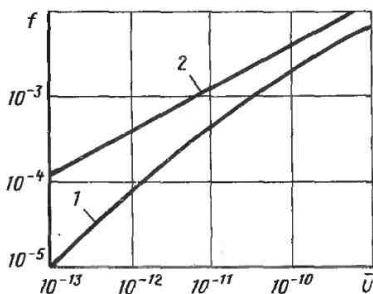


Рис. 4.56. Зависимость коэффициента трения  $f$  от параметра скорости  $\bar{U}$  в контакте при  $\bar{W} = 3 \cdot 10^{-6}$ ;  $G = 5000$ :  
 1 — эластогидродинамическая теория;  
 2 — гидродинамическая теория

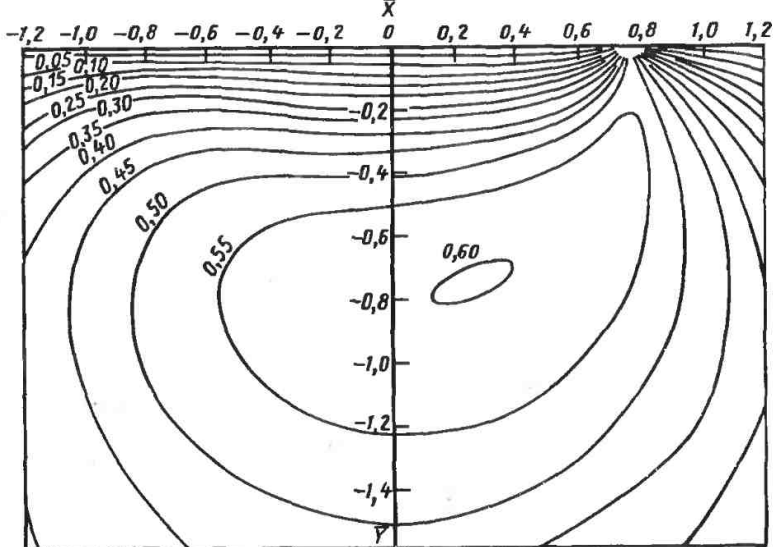


Рис. 4.57. Распределение напряжений в контакте при эластогидродинамической смазке

ниям Герца. Это распределение относится к чистому качению, а несимметричность распределения напряжений относительно оси  $\bar{Y}$  вызвана наличием динамического распределения давления в жидкости.

Представленные результаты позволяют определить общие закономерности трения при эластогидродинамической смазке следующим образом:

для данной нагрузки и скорости качения в диапазоне практических значений минимальная толщина эластогидродинамической пленки смазки значительно больше, чем по классической гидродинамической теории;

в диапазоне упругих деформаций поверхностей толщина эластогидродинамической пленки мало зависит от нагрузки;

влияние параметра материала  $\bar{G}$  на толщину пленки того же порядка, что и влияние параметра скорости  $\bar{U}$ ; поскольку диапазон изменений  $\bar{G}$  на практике невелик,  $\bar{U}$  является доминирующей переменной;

с увеличением параметра нагружения  $\bar{W}$  или изменением параметра

скорости  $\bar{U}$  распределение давления в жидкости смещается от гидродинамического распределения для идеально жестких цилиндров в сторону распределения Герца для сухих цилиндров;

для условий и материалов, применяемых на практике, наблюдается резкое увеличение давления на выходе;

в случае чистого качения сила трения не зависит от параметра нагружения  $\bar{W}$  и изменяется вместе с параметром скорости  $\bar{U}$  так же, как и толщина масляной пленки.

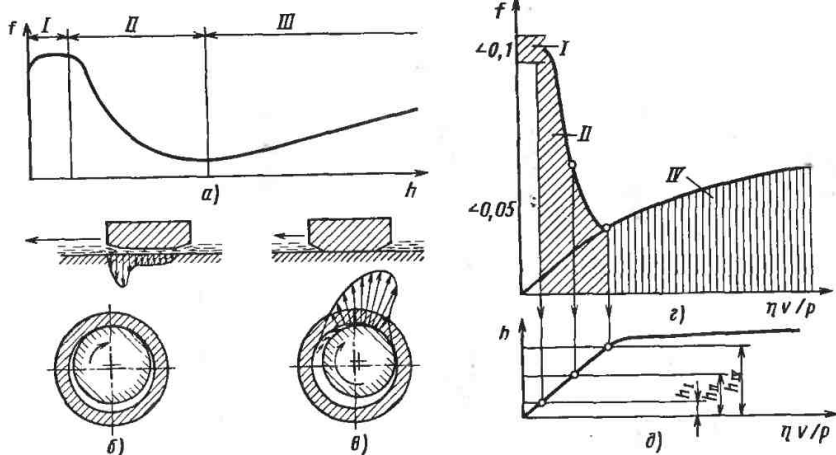
Доусон и Хиджинсон представили другую зависимость для толщины масляной пленки, похожую, однако, в общих чертах, на формулу А. Н. Грубина:

$$\bar{H} = 1,6\bar{G}^{0,8}\bar{U}^{0,7}/\bar{W}^{0,13}. \quad (4.124)$$

Расхождения в результатах, полученных по обеим теориям, не превышает 20%. Интерес представляет запись (4.124) в размерных величинах

$$h = 1,6\alpha_0^{0,6}(\eta_0 U)^{0,7}(E')^{0,03}R^{0,43}/\bar{W}^{0,13}. \quad (4.125)$$





**Рис. 4.58. Смазка радиального подшипника скольжения:**  
*a* — зависимость коэффициента трения  $f$  от толщины масляной пленки  $h$  для смазки: *I* — граничной; *II* — смешанной; *III* — жидкостной; *IV* — гидродинамической; *б, в* — модели подшипников соответственно с граничным и жидкостным трением; *г* — зависимость  $f$  от числа Герси  $\eta v/p$ ; *д* — зависимость  $h$  от  $\eta v/p$

Отсюда следует, что толщина пленки мало зависит от нагружения. Исключительно малое влияние модуля продольной упругости. Степень 0,03 означает, что практически толщина эластогидродинамической пленки не зависит от упругости материала.

Этот теоретический результат подтверждают эксперименты, в которых контактировали стеклянный и стальной диски. Эксперименты показали, что толщина пленки, возникающей в этой системе, почти такая же, как и между двумя стальными дисками при тех же условиях работы. Конечно, ширина зоны контакта и распределение давления в значительной степени зависят от упругих свойств контактирующих материалов [4.1, 4.3, 4.4, 4.6, 4.10].

Применение формул для определения толщины эластогидродинамической пленки ограничено случаями, когда смазываемые тела металлические, а вязкость смазочного материала зависит от давления экспоненциально. Конкретные инженерные приложения теории эластогидродинамической смазки приведены в т. 2, гл. 4.

### 4.3.4 Граничная смазка

В присутствии смазочной среды работоспособность узлов трения определяется видом смазки: гидродинамическим, эластогидродинамическим, граничным или смешанным (частично гидродинамическим, частично граничным). На рис. 4.58 представлена известная диаграмма Герси в виде зависимости коэффициента трения от безразмерного параметра  $\eta v/p$ , позволяющая определить области соответствующего вида смазки. Из перечисленных видов смазки наиболее неблагоприятным и опасным для нагруженных узлов трения является граничная смазка.

В соответствии с международным стандартом ИСО 4378/3 под граничной смазкой понимается такой вид смазки, которому не могут быть приписаны объемные вязкостные свойства смазочного материала и который определяется свойствами граничных слоев, возникающих при взаимодействии материала поверхности трения и смазочного материала в результате физиче-

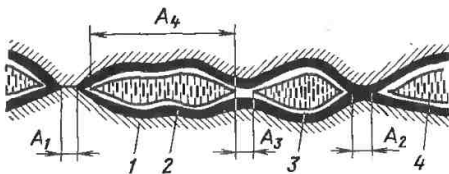


Рис. 4.59. Модель контакта поверхностей трения при граничной смазке: 1 — металл; 2 — слой оксида; 3, 4 — мономолекулярный и полимолекулярный граничные слои

ской адсорбции или химической реакции.

Поверхности трения поршней, поршневых колец, крестовин, обрабатывающего инструмента работают периодически в режиме граничной смазки. В этих условиях работоспособность узлов трения определяется способностью граничных смазочных слоев разделять поверхности трения, предотвращая непосредственный металлический контакт, повышенный износ, возможность задира и заедания поверхностей трения.

В жидкой или газообразной внешней среде граничные слои возникают в результате адсорбции. Этот процесс идет постепенно с увеличением концентрации адсорбированных молекул до насыщения адсорбционного слоя и сопровождается миграцией молекул вследствие их поверхностной подвижности [4.11].

В отличие от хемосорбции, при которой только первый, прилегающий к твердому телу монослой имеет химические связи с металлом поверхности, возможно образование химически модифицированных слоев на твердой поверхности в результате более глубоких химических реакций при наличии в жидкой или газовой среде таких активных в химическом отношении элементов, как сера, хлор, фосфор и др. В этом случае образуются модифицированные слои, например, на стали, состоящие из соединений железа с указанными элементами.

Наиболее прочные адсорбционные слои на металлах образуют ПАВ, такие, как жирные кислоты, их спирты и эфиры, животные и растительные жиры, а также амины и амиды и их производные.

Граничные слои могут быть образованы и в результате адсорбции твердых частиц, например, графит из

коллоидальной суспензии в воде адсорбируется на стали. Образование граничных слоев частицами материалов слоистой структуры получают методом натирания поверхностей металла мелкодисперсными порошками графита, дисульфида молибдена и другими. Формирование слоя в этом случае идет в значительной степени за счет адгезии к металлу частиц указанных слоистых веществ.

В условиях граничной смазки вследствие шероховатости поверхностей трения всегда возможны прорывы граничного слоя и кратковременное возникновение металлического контакта при сухом трении. В общем виде сила трения складывается из следующих компонентов: сопротивления сдвигу или сдвигу на участках площадок металлического контакта  $F_{A1}$  и контакта окисных слоев  $F_{A2}$ , сопротивления сдвигу на участках контакта, разделенных мономолекулярным слоем  $F_{A3}$ , и сопротивления сдвигу в полимолекулярном граничном слое  $F_{A4}$  (рис. 4.59). Чем больше степень химической активности металла и поверхностной активности смазочного материала, тем меньше сила трения (табл. 4.3).

Поверхностно-активные молекулы граничных слоев в результате взаимодействия с твердыми телами и способности к миграции по поверхности могут проникать в микротрещины и оказывать механическое действие, приводящее к углублению микротрещин и разрушению тонкого ПС (эффект Ребиндера), вызывая его адсорбционное пластифицирование [4.12]. Если такой процесс локализуется на неровностях поверхностей и приводит к их сглаживанию и приработке, смазывание поверхностей улучшается. При высоких нагрузках и разрушении поверхностей на большей глубине подобные граничные слои ведут себя не

### 4.3. Коэффициенты трения при температуре 20 °С

Материал поверхности	Без смазочного материала	Парафиновое масло	Парафиновое масло + 0,1 % лауриновой кислоты	Степень химической активности металлов
Cr	0,4	0,3	0,3	Инертны
Ag	1,4	0,8	0,7	
Fe	1,0	0,3	0,2	Малореактивные
Al	1,4	0,7	0,3	
Cu	1,4	0,3	0,08	Реактивные
Cd	0,5	0,45	0,05	

как смазочные, а скорее как режущие. На этом свойстве поверхностно-активных молекул основан механизм действия жидкостей, применяемых при резании металлов.

Ориентированные граничные слои способны оказывать расклинивающее действие (эффект Дерягина) [4.13], выражающееся в сопротивлении слоя утоншению под действием нагрузки. Расклинивающее действие не связано с объемными свойствами жидкости, проявляется в присутствии ПАВ и зависит от их взаимодействия с твердой поверхностью. Тонкие, твердые и плотные окисные пленки менее благоприятны для формирования прочных граничных слоев. При работе в течение длительного времени в некоторых газовых средах смазочные материалы могут насыщаться газом и в связи с этим изменять свои смазывающие свойства. В процессе трения вследствие повышения температуры при генерации теплоты трением, а также развития механохимических эффектов при деформации и частичном разрушении ПС трущихся деталей газовая среда также оказывает влияние, проявляющееся в реакции газа окисления или диффузии молекул газа в металлическую поверхность. В пленках масла с оптимальным режимом окисления необходимая деформация схватывания увеличилась приблизительно на 20 % по сравнению

пленками неокисленного масла. Наличие молекулярного кислорода в нефтяных смазочных маслах обеспечивает высокую работоспособность граничных слоев в вакууме, а при избытке кислорода возможно ухудшение защитных свойств граничного слоя. Наличие в базовом масле присадок, содержащих серу, фосфор и хлор, повышало его нагрузку заедания в опытах на четырехшариковой машине. В то же время увеличение содержания кислорода в масле сказалось положительно только в случае серосодержащей присадки.

Граничные адсорбированные и ориентированные слои на поверхностях обладают большой механической прочностью и способны выдерживать без разрушения давление до 100 МПа [4.11]. Увеличение температуры поверхности и граничного слоя оказывает значительное влияние на прочность слоя при трении. Это подтверждается исследованиями антифрикционных свойств тонких смазочных слоев при объемном нагреве [4.12, 4.14]. Увеличение температуры приводит к резкому возрастанию силы трения и повреждению поверхностей, что свидетельствует о разрушении граничного смазочного слоя. Если в смазочном материале присутствует только ПАВ, такое разрушение связано с дезориентацией и десорбцией молекул в ПАВ. В присутствии химически активных добавок в смазочном материале повышение температуры приводит к возникновению на поверхностях трения химически модифицированных слоев обеспечивающих снижение трения и повышающих работоспособность деталей машин при повышенных температурах. Дальнейшее возрастание температуры может привести к разрушению таких модифицированных слоев, возникновению металлического контакта и катастрофическому износу деталей. Таким образом, основной причиной разрушения граничных слоев является увеличение температуры в контакте трения выше критических значений для соответствующего сочетания материалов поверхностей и смазочного материала.

Разрушение граничного слоя может также быть вызвано большой

пластической деформацией поверхности в сопряженном контакте. В этом случае граничный слой разрушается при пластическом течении во фрикционном контакте. Граничная смазка является наименее разработанным разделом проблемы смазки машин в связи со сложностью охватываемых ею явлений. В последнее время проводится ряд исследований по развитию теории граничной смазки на базе термодинамического и кинетического подходов [4.14, 4.15].

## 4.4. СМЕШАННОЕ ТРЕНИЕ И СМАЗКА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССАХ ТРЕНИЯ

### 4.4.1. Смешанное трение

Смешанным трением называется сумма всех или, по крайней мере, двух видов трения. При этом часть трущихся поверхностей контактирует непосредственно (трение без смазочного материала), а часть разделена граничной пленкой (граничное трение) или пленкой смазочного материала (гидродинамическое и эластогидродинамическое трение).

Смешанное трение имеет место при малой скорости движения и большом удельном давлении, например, при запуске и остановке машины. Тогда смазочный материал не полностью разделяет поверхности трения взаимодействующих деталей машин. Часть нормальной нагрузки передается микробластями непосредственного контакта трущихся тел, остальная часть нагрузки передается микроклинками смазочного материала, заполняющего углубления и неровности.

На рис. 4.58 показана модель изменения коэффициента трения в зависимости от скорости для типичного поперечного сечения подшипника скольжения. Эта зависимость показывает тенденцию изменений при условии, что остальные параметры, характеризующие работу подшипника, — нагрузка, давление, геометрические размеры, вязкость масла и т. п. — постоянны.

Модели взаимодействия неровностей в процессе трения включают геометри-

ческую форму для отображения неровности поверхности, а именно конус, шар, клин и параболоид. Шаровая модель упрощает рассуждения и в то же время является достаточно хорошим приближением формы поверхностей, встречающихся в действительности.

### 4.4.2. Теоретический и экспериментальный анализы

Анализ смешанного трения включает исследование явлений в микробластях контакта выступов неровностей, значение суммарной подъемной силы микроклинков, явления, определяющие касательные силы областей непосредственного контакта неровностей и силы в микроклинках смазочного материала.

Для трения без смазочного материала имеем

$$F_{\text{сух}} = f_0 N, \quad (4.126)$$

а для жидкостного трения

$$F_{\text{жид}} = \eta A \, dv/dh. \quad (4.127)$$

Для смешанного трения имеем

$$F_{\text{смеш}} = F_{\text{сух}} - F_{\text{жид}} = f_{\text{смеш}} N = \\ = f_0 N - \eta A \, dv/dh, \quad (4.128)$$

тогда коэффициент смешанного трения

$$f_{\text{смеш}} = f_{\text{сух}} - K \frac{\eta}{h} \frac{v}{p}, \quad (4.129)$$

где  $N$  — нормальная нагрузка;  $A$  — площадь трения;  $p = N/A$ ;  $f_0$  — коэффициент сухого трения;  $K$  — безразмерный коэффициент, характеризующий геометрию контакта трущихся поверхностей.

Эта зависимость получена в предположении постоянной толщины масляной пленки между трущимися поверхностями, равной сумме максимальных высот неровностей контактирующих поверхностей. Такое предположение справедливо для жидкостного трения. При смешанном трении вместе с изменением деформации неровностей происходит изменение поперечного сечения щели и, следовательно, толщины пленки.

При смешанном трении существуют только отдельные зоны металлическо-

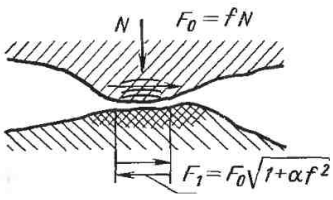
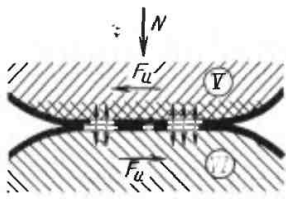
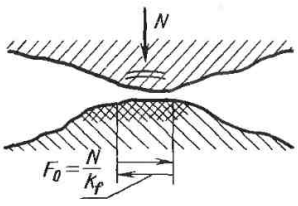
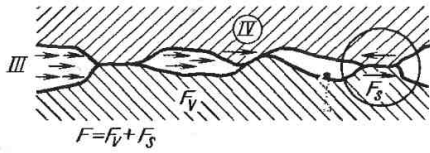
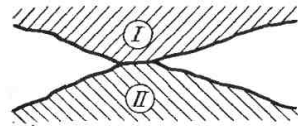


Рис. 4.60. Зоны металлического контакта при смешанном трении;

$F_S$  — срезающая сила;  $F_V$  — сила трения в микроклине;  $F_u$  — сила трения окисной пленки;  $F_0$  — сила трения без смазочного материала; I II — твердый и мягкий материалы; III — плоскость скольжения в масле; IV — сила царапания; V — разрывающие силы; VI — продукты окисления

го контакта (рис. 4.60), поверхность которых мала по сравнению с номинальной площадью трения. В зонах металлических контактов существуют сообщающиеся между собой микрообласти, заполненные смазочным материалом (масло, воздух) и продуктами износа.

Предполагалось, что смазочный материал обладает объемными свойствами при толщине масляной пленки более 0,1 мкм [4.1, 4.3, 4.6].

Суммарную нагрузку  $N$  можно разделить на составляющие: подъемную силу клиньев смазки  $N_p$  и нормальную силу  $N_0$ , передаваемую микрообластями металлического контакта:

$$N = N_0 + N_p. \quad (4.130)$$

Сила смешанного трения

$$F_{\text{смеш}} = f_{\text{сух}} N_0 + f_{\text{жид}} N_p, \quad (4.131)$$

где  $f_{\text{сух}}$  — коэффициент сухого трения;  $f_{\text{жид}}$  — коэффициент жидкостного трения.

Коэффициент смешанного трения определяется формулой

$$f_{\text{смеш}} = f_{\text{жид}} \left(1 - \frac{N_p}{N}\right) + f_{\text{сух}} \left(\frac{N_p}{N}\right) \quad (4.132)$$

Чтобы воспользоваться этой формулой, надо измерить коэффициент сухого трения  $f_{\text{сух}}$  и отношение нагрузки, передаваемой гидравлическими клиньями, к суммарной нагрузке.

В процессе трения скольжения нормальная деформация в зоне контакта твердых тел зависит от приложенной нормальной силы  $N$ :

$$\delta_0 = N/C_h, \quad (4.133)$$

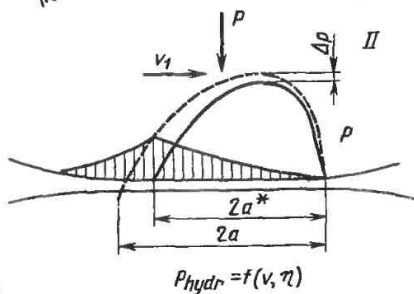
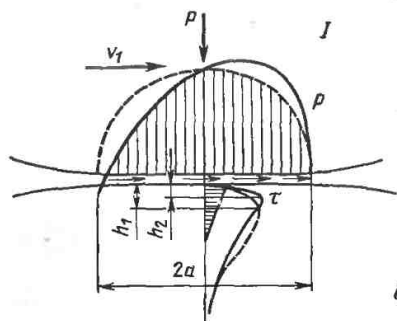
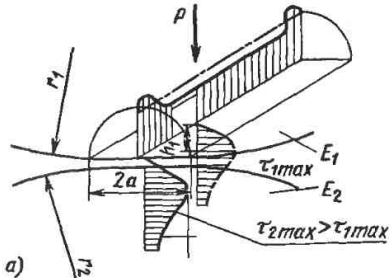
где  $C_h$  — контактная жесткость поверхности.

При скольжении двух смазываемых твердых тел возникает гидродинамическая сила, поднимающая тело, снижающая нормальную нагрузку и, следовательно, деформацию стыка. При уменьшении нормальной нагрузки в микрообластях контакта происходит снижение фактического давления. Нагрузка, передаваемая выступами неровностей, уменьшается на подъемную силу  $N_p$ .

Преобразуем (4.133) к виду

$$y_0 = \frac{N_p}{C_h} = \frac{1}{C_h} \times$$

$$P_0 = \sqrt{\frac{p}{\pi(1-\nu^2)} \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}}$$



б)

Рис. 4.61. Модели представляющие различные виды нагружения в зоне контакта: а — без трения; б — с трением; I — без гидродинамического подъема; II — с гидродинамическим подъемом

$$\times \frac{4\eta v a^2 h}{8(h_0 + y_0)^3 + 12h(h_0 + y_0)^2 + 6h^2(h_0 y_0) + h^3}, \quad (4.134)$$

$$+ \frac{1}{8} x (2n_B + 1)^3 = k_D v. \quad (4.137)$$

из которого далее имеем

$$y_0^4 + \frac{3}{2} y_0^3 (2h_0 + h) + \frac{3}{2} y_0^2 (2h_0 + h)^2 + \frac{1}{8} y_0 (2h_0 + h)^3 - \frac{\eta a^2 h v}{2C_k} = 0. \quad (4.135)$$

Принимая, что

$$x = y_0/h; \quad n_B = h_0/h; \quad k_D = \eta a^2 h / (2C_k), \quad (4.136)$$

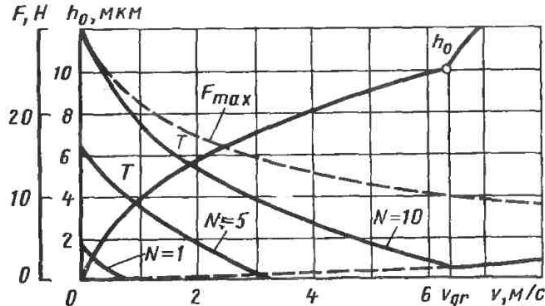
получили

$$x^4 + \frac{3}{2} x^3 (2n_B + 1) + \frac{3}{4} x^2 (2n_B + 1)^2 +$$

Кривые изменения  $x$  с изменением движения при данных  $n_B$  и  $k_D$  представляют зависимость подъема тела от скорости скольжения. Они отличаются от кривых гидродинамики жидкостного трения. При жидкостном трении подъемная сила  $N_p$ , вычисленная по формулам, учитывающим постоянные значения внешней нагрузки, будет постоянной. При смешанном трении давление масла в микроклиньях растет с увеличением подъема внешнего тела (гидродинамический эффект), хотя внешняя нагрузка остается постоянной.

Интенсивность подъема внешнего тела выше при жидкостном трении (рис. 4.61). По мере увеличения подъема тела, т. е. при уменьшении контактных деформаций, часть нормальной нагрузки, приходящаяся на масляные клинья, возрастает, а часть, приходящаяся на зоны металлического контакта, уменьшается.

Рис. 4.62. Зависимость силы трения  $F$  и подъема  $h_0$  от скорости скольжения  $v$ :  
 $N$  — относительная нормальная нагрузка



Зависимость силы трения  $F$  и подъема  $h_0$  от скорости скольжения  $v$ , рассчитанная для данных условий, приведена на рис. 4.62. Зная закон изменения деформации металла в зоне контакта в зависимости от нагрузки и зависимость силы трения от контактных деформаций, можно получить общие выражения для силы смешанного трения.

В первом приближении силу смешанного трения можно представить в виде

$$F_{\text{смеш}} = k_T (\delta_0 - y_0) + F_{\text{жид}}, \quad (4.138)$$

причем коэффициент пропорциональности силы трения и контактной деформации

$$k_T = C_h f_{\text{сух}}. \quad (4.139)$$

Приведенная зависимость (4.138) справедлива только для смешанного трения, до полного подъема тела. Это означает, что первый член уравнения положителен или равен нулю. Из условия (4.139) вычисляется предельная скорость  $v_{\text{пред}}$ , определяющая переход смешанного трения в жидкостное.

Сила жидкостного трения определяется на основании гидродинамической теории смазки при тех же условиях, для которых выводилось уравнение подъемной силы:



Рис. 4.63. Модели поверхностных неровностей в виде упругопластических цилиндров

$$N_p = \frac{2\eta av}{h} \left( 2 \ln k - 3 \frac{k-1}{k+1} \right) \quad (4.140)$$

или

$$N_p = \frac{2\eta av}{h} \left( 2 \ln \frac{m+1}{m} - \frac{3}{2m+1} \right). \quad (4.141)$$

Разложив в ряд выражение  $\ln \frac{m+1}{m}$  и используя первое выражение, получим

$$N_p = \frac{2\eta va}{h} \frac{1}{2m+1}. \quad (4.142)$$

Роль материалов контактирующих деталей машин проявляется прежде всего в двух основных характеристиках: зависимости силы трения  $F$  от деформации в зоне контакта  $\delta_0$  и в зависимости деформации от нормального давления. В модели заложено, что поверхностные неровности имеют форму коротких упругопластических цилиндров со сферическими концами (рис. 4.63).

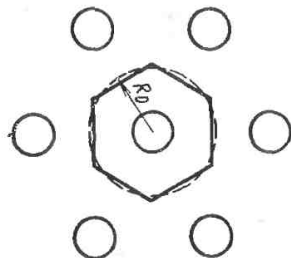


Рис. 4.64. Модель размещения поверхностных неровностей

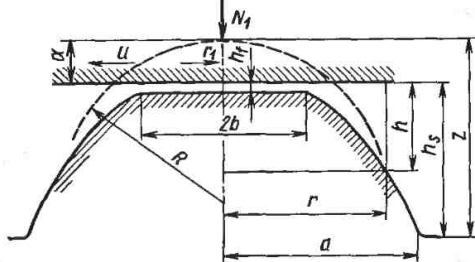


Рис. 4.65. Модель слоя жидкости, отделяющего неровности от плоской, жесткой и идеальной гладкой поверхности

Из параметров, характеризующих поверхностные неровности, важнейшим с точки зрения рассматриваемого процесса является высота неровностей, которая имеет нормальное статистическое распределение. В модели также принято, что расстояния между неровностями постоянны. На рис. 4.64 показано расположение неровностей, которые при таком предположении образуют правильную гексагональную сеть. Вокруг каждой неровности возникает изобара в форме правильного шестиугольника. Для упрощения математических рассуждений шестиугольник можно заменить эквивалентной окружностью.

Условия смешанного трения можно смоделировать, рассматривая движение плоской, жесткой и гладкой поверхности по шероховатой поверхности, представленной как совокупность модельных неровностей (рис. 4.65). Пространство между такими поверхностями можно разделить на две области с различными механизмами смазывания. Вокруг центра неровности масляная пленка настолько тонкая, что там наблюдается граничная смазка, обусловленная физическими и химическими явлениями на междофазных поверхностях жидкость—твердое тело при больших локальных удельных давлениях. Вне этих областей слой смазки достаточно велик.

Обычно используются две основные теории: теория граничной смазки и теория микроэластогидродинамической смазки (микроЭГД), которые имеют общие феноменологические свойства: толщина пленки почти не зависит от нормальной нагрузки; распределение удельного давления в пленке почти

совпадает с распределением давления Герца, возникающим при контактировании сухих поверхностей; напряжение сдвига в пленке почти не зависит от нормальной нагрузки.

На рис. 4.65 показано поведение неровностей, прижимаемой к плоской, жесткой и гладкой поверхности при указанных допущениях. Область контакта становится плоской поверхностью, отделенной от жесткой поверхности пленкой постоянной толщины  $h_f$ . Если высоту недеформированной неровности обозначить  $z$ , а расстояние от гладкой поверхности до шероховатой поверхности  $h_s$ , то из рис. 4.65 следует, что деформация центра области контакта  $\alpha$ , называемая податливостью шероховатости, составляет

$$\alpha = z - (h_s - h_f). \quad (4.143)$$

Податливость шероховатости является очень важным параметром при изучении смешанной смазки. Как функции податливости можно выразить остальные параметры, характеризующие отдельный контакт неровности: радиус зоны контакта  $b$  (см. рис. 4.65), нормальную нагрузку контакта неровности  $N_1$  и силу трения  $F_1$ , возникающую в результате взаимодействия отдельной неровности с плоской поверхностью.

Если деформация упругая, то из теории Герца вытекает следующая зависимость:

$$b = \sqrt{\alpha R}; \quad (4.144)$$

$$N_1 = 1,33 \frac{E}{1 - \nu^2} \sqrt{\alpha^2 R}, \quad (4.145)$$





Рис. 4.66. Фактический и модельный микровклины смазки

где  $N_1$  — нормальная нагрузка контакта отдельной неровности;  $R$  — радиус недеформированной неровности.

По мере увеличения давления в зоне контакта при определенной податливости шероховатости  $\alpha$  начинается пластическое течение, а податливость шероховатости составляет

$$\alpha = R (H/E)^2 (1 - \nu^2). \quad (4.146)$$

При допущении вдавливания недеформированной модельной неровности в плоскую поверхность получим следующие приближенные зависимости для пластической области:

$$b = 2\alpha R (\alpha < \alpha_{pl}), \quad (4.147)$$

$$N_1 = \pi b^2 H = 2\pi H R \alpha. \quad (4.148)$$

Силу трения в зоне контакта отдельной неровности можно определить по формуле

$$F_1 = \pi b^2 \tau_f, \quad (4.149)$$

где  $\tau_f$  — напряжения среза, определенные на основании анализа граничной пленки. Приближенно можно считать

$$\tau_f = fH. \quad (4.150)$$

Сила трения изменяет зависимость между деформацией и нормальной нагрузкой, особенно в области пластического течения. Так как значение срезающей силы составляет около 0,1 нормальной нагрузки, ее влияние на деформацию можно не учитывать.

Вне зоны контакта неровностей течение масла можно анализировать по гидродинамической теории. Пространство, в котором происходит течение, ограничено с одной стороны плоской поверхностью, а с другой обозначено пунктирной линией (рис. 4.66), за исключением заштрихованных областей, в которых наблюдается граничное трение. Расчеты показали, что деформированную вершину можно представить в виде сферической поверх-

ности с такой же минимальной и максимальной толщиной масляной пленки, как у деформированной неровности. На рис. 4.66 такой шаровой сегмент показан сплошной линией.

Уравнение Рейнольдса в полярных координатах  $r, \theta$  имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \times \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 12\eta v \cos \frac{\partial h}{\partial r}. \quad (4.151)$$

В дальнейшем принято, что  $\eta = \text{const}$  и  $v = \text{const}$ , а  $h$  зависит от  $r$ . Граничное условие для  $p$  — это давление на круговой изобаре радиусом  $r_0$ . Принято, что соответствующее ей давление  $p$  равно среднему макроскопическому давлению  $p_m$  во всей смазываемой области при  $r = r_0$ . Толщину пленки  $h$  можно выразить как функцию  $r$  на основании рис. 4.65 и на основании рассуждений для эквивалентных цилиндров:

$$\left. \begin{aligned} h &= h_f \left( 1 + \frac{r^2}{2R h_f} \right) \text{ для } 0 \leq r \leq a; \\ h &= h_s \text{ для } a \leq r \leq r_0, \end{aligned} \right\} \quad (4.152)$$

где  $R$  — радиус вершины недеформированной неровности, остальные обозначения в соответствии с рис. 4.66.

Решение (4.152) в области  $a \leq r \leq r_0$ , где  $h = h_s$ , постоянно и имеет следующий вид:

$$\frac{p a}{12\eta v} = C_1 \left( \frac{r_0}{a} - \frac{r}{a} \right) \cos \theta + p_m. \quad (4.153)$$

Для внешней области, где  $h$  переменная, дифференциальное уравнение (4.151) не имеет общего решения.

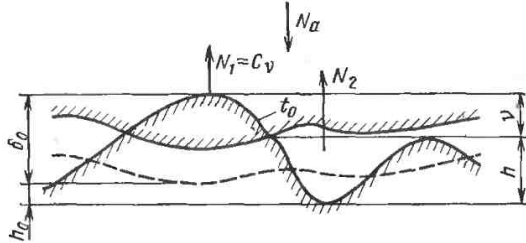


Рис. 4.67. Механизм передачи нагрузки при смешанном трении:

$v$  — упругая деформация;  
 $C$  — жесткость неровности;  
 $h_0$  — номинальная толщина клина после деформации;  
 $h$  — начальная толщина слоя деформированного металла

Численное решение, полученное с помощью конечных разностей, имеет следующий вид:

$$\frac{pa}{12\eta v} = \left( -\frac{1}{5} \frac{ra}{h^2} + C_2 \frac{r}{a} \right) \cos \theta + p_m. \quad (4.154)$$

Значения  $C_1$  и  $C_2$  можно вычислить на основании уравнения неразрывности струи и давления в направлении  $r$  для  $r = a$ . Они составляют

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\frac{hf}{a} (0,5 - 0,3k) - 0,5 \frac{hf}{a}}{\left( \frac{h_s}{a} \right)^3 \left[ \left( \frac{r_0}{a} \right)^2 + 1 \right] + \left( \frac{hf}{a} \right)^2 (1+k)^3 \left[ \left( \frac{r_0}{3} \right)^3 - 1 \right]} \\ C_2 &= \left[ \left( \frac{r_0}{a} \right)^2 - 1 \right] C_1 + \frac{1}{s} \frac{1}{\left( \frac{hf}{a} \right)^2 (1+k)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (4.155)$$

причем

$$k = a^2 / (2Rh_f). \quad (4.156)$$

На основании определенного распределения давления можно вычислить сдвигающие напряжения в слое жидкости

$$\tau = \frac{\eta}{h} v + \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (4.157)$$

Используя (4.151)–(4.153), получим для  $r < a$

$$\frac{\tau}{\eta v} = \frac{a}{h} + 6 \frac{h}{a} C_1 - \frac{1}{5} \left( \frac{a^2}{h^2} - \frac{2x^2 a^2}{Rh^3} \right); \quad (4.158)$$

для  $a \leq r \leq r_a$

$$\frac{\tau}{\eta v} = \frac{a}{h} + 6 \frac{h}{a} C_2 \left[ \left( \frac{r}{a} \right)^2 \times \left( \frac{a^2}{r^2} - \frac{2x^2 a^2}{r^4} \right) - 1 \right], \quad (4.159)$$

где  $x = r \cos \theta$ .

Используя приведенные зависимости, можно определить нормальную нагрузку  $N_2$  на отдельную неровность и силу трения  $F_2$ , возникающую в результате гидродинамических явлений, сопровождающих перемещение отдельной неровности:

$$N_2 = \int_b^r \int_0^{2\pi} p r dr d\theta; \quad (4.160)$$

$$F_2 = \int_b^{r_0} \int_0^{2\pi} \tau r dr d\theta. \quad (4.161)$$

Суммарная нормальная нагрузка  $N_a$  (рис. 4.67) и суммарная сила трения  $F_a$  отдельной неровности составляют

$$N_a = N_1 + N_2; \quad (4.162a)$$

$$F_a = F_1 + F_2, \quad (4.162b)$$

где  $N_2$  и  $F_2$  определяются соответственно по (4.160) и (4.161).

Если принять, что  $N_a$  и  $F_a$  относятся к произвольной неровности с высотой  $z$ , и принять для нее распределе-

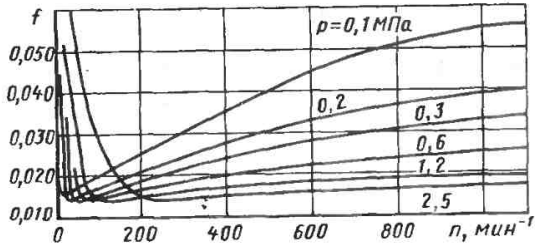


Рис. 4.68. Зависимость коэффициента трения  $f$  от частоты вращения вала  $n$  при разных значениях давления  $p$  подшипника скольжения (по Штрибеку)

ние Гаусса, то количество неровностей с высотой от  $z$  до  $z + dz$  составит

$$\varphi S \Phi(z) dz = \varphi S \left\{ \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \times \exp \left[ -\frac{(z-d)^2}{2\sigma^2} \right] \right\} dz, \quad (4.163)$$

где  $\varphi$  — количество неровностей на единицу поверхности;  $S$  — общая (номинальная) поверхность;  $\Phi(z)$  — функция плотности нормального распределения;  $\sigma$  — стандартное отклонение.

В этом случае суммарное макроскопическое нормальное усилие

$$N = \int S \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(z) N dz \right\} dS; \quad (4.164)$$

сила трения

$$F = \int S \left\{ \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(z) F_a dz \right] + \frac{h_2}{2} \frac{\partial p_m}{\partial x} \right\} dS, \quad (4.165)$$

где  $N$  и  $F$  определены (4.162а) и (4.162б) в виде функции  $z$ .

Второе слагаемое правой части (4.165)  $\frac{h_2}{2} \frac{\partial p_m}{\partial x}$  определяет силу гидродинамического трения, которую можно вычислить из (4.163) и которую надо прибавить к силе трения, определяемой взаимодействием неровностей.

#### 4.4.3. Влияние изменения нормальной нагрузки, вязкости и количества смазочного материала

Изменение нагрузки приводит к изменению начальной деформации  $\delta_0$ . Сумма начального зазора  $h_0$  и начальной деформации  $\delta_0$  для идеальной контактирующей пары является величиной постоянной и представляет собой некоторую часть суммарной неровности данных поверхностей.

В таком случае с изменением начальной деформации  $\delta_0$  будет изменяться отношение начального зазора  $h_0$  к высоте клина  $h$ , т. е.  $n_B = (h_0/h)$ .

Минимальное значение коэффициента трения для одинаковых узлов трения при разных нагрузках одинаково (рис. 4.68). Во время экспериментов при минимальном значении коэффициента трения через стык проходил электрический ток. Из этого следует, что имеет место металлический контакт. Измеренный для тока  $I = 0$  граничный коэффициент трения (начало жидкостного трения) больше  $f_{min}$ . Для этого случая может оказаться, что

$$f_{жид} + f_{сух} \leq f_{смеш}. \quad (4.166)$$

Это условие приведено на рис. 4.61, из которого следует, что твердые тела контактируют после преодоления минимального значения коэффициента трения.

С увеличением вязкости смазочного материала уменьшается граничная скорость  $v_B$  перехода в состояние жидкостного трения. Кроме того, экспериментально установлено, что с увеличением вязкости масла увеличивается  $f_{min}$ .

Смешанное трение часто возникает в условиях недостаточного количества смазочного материала. При рассмотрении случая, когда масла на контактирующих поверхностях достаточно для заполнения всех неровностей обеих поверхностей с учетом их контактных деформаций, средний объем смазочного материала, замкнутого между трущимися поверхностями при нулевой скорости скольжения, составляет:

$$V_0 = B_0 l_0 h_{s0}, \quad (4.167)$$

где  $B_0$  — ширина поверхности;  $l_0$  — длина поверхности;  $h_{s0}$  — средняя толщина масляной пленки.

Для принятой выше усредненной характеристики поверхности в первом приближении можно считать, что

$$h_{s0} = h_0 + 0,5h \quad (4.168)$$

или

$$h_{s0} = 0,5h(2n + 1). \quad (4.169)$$

При подъеме на высоту  $y_0$  объем масла

$$\begin{aligned} V &= Bl(h_{s0} + y_0) = V_0 = \\ &= \text{const}. \end{aligned} \quad (4.170)$$

Постоянный объем масла может быть сохранен только при уменьшении поверхности, покрытой маслом. Если принять, что такое уменьшение происходит в результате уменьшения длины (учет изменения ширины дает только количественные различия, не изменяя качественной картины), то

$$\begin{aligned} l &= l_0 \frac{B_0}{1 + y_0/h_{s0}} = \\ &= l_0 B_0 \frac{2n + 1}{(2n + 1) + 2x}, \end{aligned} \quad (4.171)$$

где  $x = y_0/h$ ;  $n = h_0/h$ .

Принимая отношение длины масляного клина  $a$  к длине поверхности, покрытой маслом,  $l$  постоянным, получим

$$a = a_0 k_a, \quad (4.172)$$

причем

$$k_a = B_0 \frac{2n + 1}{(2n + 1) + 2x}. \quad (4.173)$$

Недостаток масла приводит к уменьшению подъема тела и снижает влияние скорости на силу трения.

Наивыгоднейшие условия работы деталей машин, характеризующиеся минимальной интенсивностью изнашивания и минимальным коэффициентом смешанного трения, возникают при оптимальной шероховатости поверхности, т. е. при шероховатости, обеспечивающей максимальный гидродинамический эффект.

Подъемная сила  $N_D$  зависит от безвременного коэффициента  $k_m$  и длины масляного клина. Длинные наклонные клинья эффективнее коротких.

Суммарный подъем клиньев

$$\sum h = ih, \quad (4.174)$$

суммарная длина клиньев

$$\sum a = ia \quad (4.175)$$

и относительная деформация области микроклина

$$m = h_2/h, \quad (4.176)$$

поэтому суммарная деформация всех областей микроклиньев

$$\frac{m}{i} = h_2/(ih), \quad (4.177)$$

где  $i$  — количество малых клиньев на длине большого клина.

Суммарная подъемная сила всех малых клиньев

$$N_h = \text{const } k_m \sum a^2 = \text{const } k_m i a^2, \quad (4.178)$$

а подъемная сила большого клина

$$N_H = \text{const } k_M i^2 a^2, \quad (4.179)$$

где  $k_M$  — коэффициент пропорциональности относительной деформации.

$N_h = N_H$ , только если  $k_m$  пропорционально  $m$ , приближенно при  $m = m_{\min}$ , т. е. при небольшой минимальной щели клина  $h_2$ . По мере подъема (при росте  $m$ )  $k_M = k_m$ . При  $k_M = k_m$  подъемная сила  $N_H$  большого клина в  $i$  раз больше суммарной подъемной силы  $N_h$  всех маленьких клиньев.

На основании этих рассуждений можно сделать следующие выводы:

между высотой шероховатости, соответствующей высоте клина, и минимальным зазором (щелью) должно быть установлено определенное соответствие;

из двух поверхностей с одинаковыми углами неровностей в направлении движения лучше с точки зрения гидродинамического взаимодействия та, у которой неровности с большим перепадом.

Эти выводы справедливы только в крайнем случае, когда наклон неровностей зависит от отношения высоты неровностей к их шагу. Вторым крайним случаем будет неизменное отношение между глубиной и перепадом неровностей, т. е. сохранение постоянного угла неровностей при разной глубине. Для второго крайнего случая нет оптимальной глубины, потому что подъемная сила возрастает с увеличением длины клина, а следовательно, и глубины неровностей.

Коэффициент  $k_M$  будет максимальным при  $m = 0,83$ . Это значит, что при постоянной длине клина  $a$

$$\frac{h_0 + y_0}{k} = n + x = 0,83 \quad (4.180)$$

и тогда

$$h_{opt} = y_0 / (0,83 - n). \quad (4.181)$$

Суммарная шероховатость поверхности  $x$

$$\begin{aligned} H_{max} &= \delta_0 + h_0 + h_{opt} = \\ &= \delta_0 + (1 + n) h_{opt}. \end{aligned} \quad (4.182)$$

Оптимальная шероховатость является функцией подъема тела, причем все факторы, определяющие подъем, одновременно определяют оптимальную шероховатость.

Используя теорию сухого трения А. Ю. Ишлинского и И. В. Крагельского применительно к  $stick = slip$ , установлено, что с увеличением продолжительности контакта микрообластей трения происходит увеличение силы трения, поскольку под воздействием больших давлений в зонах трения наблюдается взаимное сцепление неровностей обоих материалов,

которые подвергаются одновременно упругим и пластическим деформациям [4.16]

При смешанном трении такая модель будет неточной, потому что она не учитывает влияния сопротивления вязкой жидкости, выдавливаемой из пространства между углублениями неровностей. При упругом контакте используется выражение для определения сопротивления сжатой круглой пластины из вязкой жидкости

$$N_p = \frac{3}{2} \pi \eta v_s \frac{r^4}{h^3}, \quad (4.183)$$

где  $v_s$  — скорость сжатия;  $r$  — радиус пластины;  $h$  — толщина пластины.

Круглая пластина выбрана для упрощения расчетов. При решении этой проблемы учитывается изменение контактной деформации по мере опускания пластины, что означает снижение нагрузки на масляную пленку. Схема расчета приведена на рис. 4.67.

Связь продолжительности контакта  $t$  с контактной деформацией  $\delta_0$  выражается зависимостью

$$t = k_t \left[ \frac{1 + S^3}{1 + s + z} - 1 \right];$$

$$k_t = \frac{\pi \eta a^4}{16 C_k \delta_0^3};$$

$$S = h_0 / \delta_0; \quad z = v / \delta_0. \quad (4.184)$$

Надо заметить, что для шероховатых поверхностей величина сопротивления трения будет больше, чем сопротивление, рассчитанное для данных величин.

На рис. 4.69 показана зависимость силы трения  $F$  и коэффициента трения  $f$  от продолжительности контакта при разных нагрузках:  $S_1 = 1$ ,  $S_2 = 0,5$ ,  $S_3 = 0,33$  при  $h_0 + \delta_0 = 20$  мкм,  $C_k = 10\,000 \cdot \text{Н/мм}$ ,  $\eta = 10$  МПа·с,  $a = 100$  мкм,  $f_0 = 0,3$ . Кривые на рис. 4.69 получены при начальной деформации  $\delta_0 = 0,5$ .

Мощность трения  $W$  (работа, выполненная силой трения в единицу времени) выражается зависимостью

$$W = F_{\text{смеш.}} v = k_T (\delta_0 - y_0) v + F_{\text{жид.}} v. \quad (4.185)$$

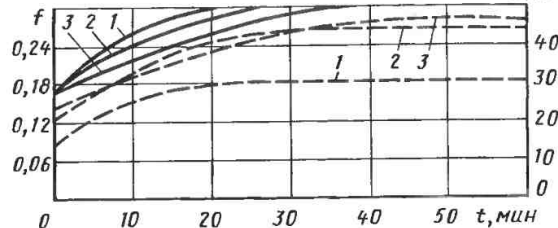
$F, \text{H}$ 

Рис. 4.69. Зависимость силы трения (пунктирная линия) и коэффициента трения  $f$  (сплошная линия) от продолжительности контакта  $t$  и нормальной нагрузки  $N$ , равной: 1 — 100 Н; 2 — 140 Н; 3 — 150 Н

## 4.5. ГАЗОВАЯ СМАЗКА

С газовой смазкой мы имеем дело тогда, когда в качестве смазочного материала применяется газ. Физические явления, определяющие суть смазывания (динамическое или статическое воздействие смазочного материала), одинаковы для газа и жидкости. Однако большая специфика вязкости и плотности проявляется от изменения газа.

### 4.5.1. Газодинамическая смазка

Газодинамическая смазка характеризуется тем, что между поверхностями соответствующей формы, находящимися в относительном движении, создается слой газа, полностью разделяющий эти поверхности, в котором возникает динамическое давление, уравновешивающее внешнюю нагрузку.

Из определения следует, что принцип газодинамической смазки аналогичен принципу гидродинамической смазки. Но так как в данном случае смазочным материалом является сжимаемый газ, имеются отличия от смазки жидкостью, которую можно считать несжимаемой. Эти отличия будут рассмотрены ниже.

**Распределение давления.** В слое жидкости при гидродинамической смазке возникают повышенное давление и разрежение. Прирост и падение давления не зависит от давления окружающей среды  $p_a$ . При газодинамической смазке изменение давления зависит от давления  $p_a$ . Поэтому при

анализе газодинамической смазки необходимо в уравнении Рейнольдса учесть абсолютное давление газа.

Очевидно, что при рассмотрении распределения давления при газодинамической смазке в системе отсчета для гидродинамического анализа также будут зоны повышенного и пониженного давления относительно давления  $p_a$ . В подшипниках с газодинамической смазкой из-за постоянного течения газа зона повышенного давления по всему контуру будут дополнением до угла  $2\pi$ . Явление это положительное, потому что зона разрежения увеличивает несущую способность подшипника. Оно разгружает вал благодаря подосу газа в зоне, противоположной области повышенного давления. Типичное распределение давления при газодинамической смазке радиального подшипника представлено на рис. 4.70.

**Изменения плотности.** В анализе газодинамической смазки необходимо

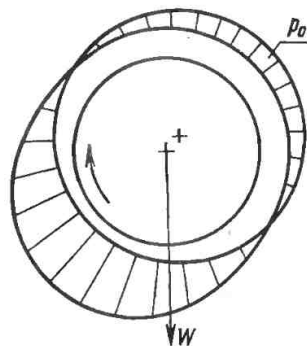


Рис. 4.70. Распределение давления в подшипнике скольжения при газодинамической смазке

#### 4.4. Характеристики подшипника скольжения с учетом сжимаемости газа

$n$ , об/мин $u$ , см/с $\epsilon$	230 182,9 0,39	805 641,3 0,1625	1730 1377,9 0,091
$p_0 - p_a$ , кПа	536,13/555,45	301,53/689,60	301,53/880,6
$p_{\min} - p_a$ , кПа	-407,10/-555,45	-325,68/-689,60	-349,83/-880,68
$p_0 - p_{\min}$ , кПа	943,23/1110,9	627,21/1380	651,36/1617,36
$\theta_0 - 180$ , градус	-28/-57	-43/-76	-43/-82
$\theta_{\min} - 180$ , градус	51/57	96/76	129/82
$\theta_{\min} - \theta_0$ , градус	79/114	139/152	172/164

Примечания: 1.  $n$  — частота вращения;  $u$  — скорость вращения вала;  $\epsilon$  — относительный эксцентриситет;  $p_0$  — максимальное давление в щели;  $p_a$  — давление подпитки;  $p_{\min}$  — давление в щели при минимальной толщине слоя масла;  $\theta_0$  — угол, определяющий максимальное давление относительно нормального;  $\theta_{\min}$  — угол, определяющий минимальную толщину слоя масла относительно нормальной нагрузки.

2. В числителе — экспериментальные данные, в знаменателе — теоретические.

учитывать изменение плотности газа. В табл. 4.4 показано влияние сжимаемости газа на характеристики подшипника. Здесь отчетливо видны различия между экспериментальными данными и данными, полученными по теории несжимаемых жидкостей, примененной к газовой смазке. Теоретические данные получены для воздуха, который рассматривается как несжимаемая жидкость при условии, что плотность у него постоянная и равна плотности окружающей среды. Теорию несжимаемых жидкостей можно использовать для оценки свойств подшипников с газодинамической смазкой только при очень маленьких (близких к нулю) значениях параметра подшипника

$$\Lambda = \frac{6\eta\omega}{\rho_a} \left( \frac{R}{c} \right)^2, \quad (4.186)$$

где  $R$  — радиус вала;  $c$  — радиальный зазор;  $\omega$  — угловая скорость.

Изменение вязкости. Вязкость газа возрастает с ростом температуры в отличие от вязкости жидкости. Обычно при анализе газодинамической смазки предполагаются изотермические условия работы. Это допущение справедливо при средних скоростях, когда по-

тери от трения невелики и не приводят к большому росту температуры. При больших скоростях в уравнении Рейнольдса необходимо учитывать изменение вязкости в зависимости от изменений температуры.

Возмущения течения. В газодинамических подшипниках нет возмущений течения такого типа, какие наблюдаются в гидродинамических подшипниках. Это значительно упрощает граничные условия. Однако в отдельных случаях появляются другие отступления от теории неразрывного течения. Если толщина слоя смазки соизмерима со средним свободным путем молекул газа, то перестают действовать законы неразрывности течения. Необходима дополнительная модификация уравнения Рейнольдса. Это явление надо учитывать для подшипников с газодинамической смазкой, работающих при очень маленькой толщине слоя смазки или при очень низком давлении окружающей среды. В таких подшипниках резко уменьшается нагрузочная способность, когда возрастает отношение среднего свободного пути молекул газа к толщине смазочного материала. Это снижение особенно заметно при небольших скоростях.

**Точность изготовления.** Смазывающие слои газа, возникающие при газодинамической смазке, намного тоньше аналогичных слоев при смазывании жидкостью. Их толщина часто одного порядка с шероховатостью поверхностей вала и втулки. Точность изготовления и шероховатость взаимодействующих поверхностей очень сильно влияют на эффективность их разделения с помощью слоя смазочного материала. Всякие дефекты формы таких поверхностей вызывают попеременное сжатие и расширение газа. В результате этого в слое газа возникают зоны повышенного и пониженного давления, которые искажают распределение давления и остальные параметры течения.

**Теплопередача.** Так как потери, выходяемые сдвигом, невелики, количество теплоты, отводимое из подшипников с газодинамической смазкой, меньше количества теплоты, отводимого из подшипников с гидродинамической смазкой. Поэтому влияние тепловых явлений нужно учитывать только при очень больших скоростях.

Подводя итог, надо сказать, что, хотя постоянная вязкость и менее сложные граничные условия упрощают анализ газодинамических подшипников, необходимость учета изменения плотности представляет немалую сложность. Даже применяя идеальные зависимости газодинамики, мы получим трудноразрешимые нелинейные дифференциальные уравнения.

Используя зависимости для идеального газа, уравнения Рейнольдса можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left( \frac{1}{\bar{\rho}^n \bar{h}^3} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \frac{1}{\bar{\rho}^n \bar{h}^3} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = \Lambda \frac{\left( \frac{1}{\bar{\rho}^n \bar{h}} \right)}{\partial \bar{x}}, \end{aligned} \quad (4.187)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} \Lambda &= \frac{6\eta\omega}{\rho_a} \left( \frac{R}{c} \right)^2; & \bar{p} &= p/\rho_a; \\ \bar{h} &= h/h_2; & \bar{\eta} &= \eta/\eta_a; & \bar{x} &= x/R; \\ & & \bar{z} &= z/R, \end{aligned} \right\} \quad (4.188)$$

где  $n$  — показатель политропы;  $\eta_a$  — вязкость окружающей среды;  $h_a$  — толщина слоя, при котором динамическое давление понизилось до  $\rho_a$  (см. рис. 4.70), остальные обозначения те же, что и в предыдущих выражениях.

Уравнение (4.187) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \frac{\bar{h}^3}{\bar{\eta}} \frac{\partial \left( \bar{\rho}^{\frac{n+1}{n}} \right)}{\partial \bar{x}} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \frac{\bar{h}}{\bar{\eta}} \frac{\partial \left( \bar{\rho}^{\frac{n+1}{n}} \right)}{\partial \bar{z}} \right] = \\ & = \Lambda \frac{n+1}{n} \left( \frac{\partial \left( \frac{1}{\bar{\rho}^n \bar{h}} \right)}{\partial \bar{x}} \right). \end{aligned} \quad (4.189)$$

Для изотермических условий ( $n = 1$ ) это уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left( \frac{\bar{h}^3}{\bar{\eta}} \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \frac{\bar{h}^3}{\bar{\eta}} \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial \bar{z}} \right) \right) = \\ & = 2\Lambda \frac{\partial \bar{p} \bar{h}}{\partial \bar{x}}. \end{aligned} \quad (4.190)$$

Уравнение (4.190) идентично уравнению (4.189) для жидкого смазочного материала. Решение, справедливое для жидкости, можно использовать для анализа газовой смазки. При этом необходимо установить зависимость между  $\bar{p}^{-2}$  и  $2\bar{p}\bar{h}$  для газа и  $\bar{p}$  и  $\bar{h}$  для жидкости. Для очень малых значений этих параметров (близких к нулю) распределение давления и несущую способность слоя газа можно определить по формулам для смазывания жидкостью подшипников с конечными размерами. При очень больших значениях  $\Lambda$  решение проблемы аэродинамической смазки близко к ее решению для бесконечного подшип-



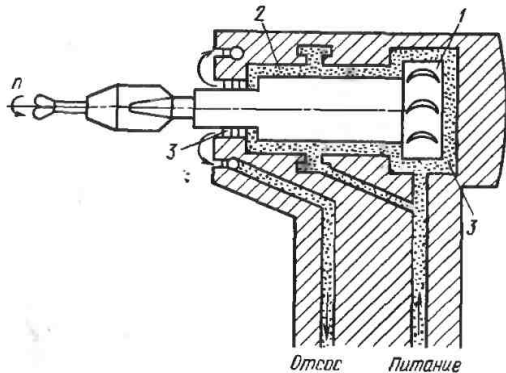


Рис. 4.71. Газодинамическая (2) и газостатическая (3) смазка подшипников шпинделя бормашины:

1 — турбина

ника, смазываемого маслом. Поскольку давление  $p$  должно быть конечным, из условия  $\Lambda \rightarrow \infty$  следует

$$\lim_{\Lambda \rightarrow \infty} \frac{\partial \left( \bar{p}^n h \right)}{\partial \bar{x}} \frac{1}{\Lambda} = 0, \quad (4.191)$$

потому что только в этом случае возможно существование конечного предела правой части (4.190).

Из этого условия следует

$$\bar{p} = (a/h)^n, \quad (4.192)$$

где  $a = \frac{h_1}{h_2}$ ,  $h_1$  — толщина слоя, при которой начинается рост динамического давления выше  $p_a$ ;  $h_2$  — толщина слоя, при которой кончается падение динамического давления до  $p_a$ .

Для больших значений  $\Lambda$  несущая способность очень мало зависит от скорости и при  $\Lambda \rightarrow \infty$  асимптотически стремится к

$$\bar{W} = \frac{W}{p_a B L} = a^n \int_0^1 \frac{1}{h^n} dx - 1. \quad (4.193)$$

Прогресс знаний о работе подшипников с газодинамической смазкой привел за последние 15 лет к их широкому распространению в разных отраслях промышленности [4.17].

Идею применения газа в качестве смазочного материала предложил Хирн еще в 1854 г. Но только в 1897 г. Кингсбери сконструировал первый подшипник с газовой смазкой. Современные газодинамические подшипники широко применяются в турбомашинах, в шпинделях машин, в контрольно-измерительных устройствах, в гироскопах и бормашинах.

На рис. 4.71 показан пример применения воздушной смазки подшипников шпинделя бормашины. Частота вращения шпинделя  $n = 420\,000$  об/мин, расход воздуха  $2040$  дм<sup>3</sup>/с при давлении  $0,36$  МПа. Распространение газовой смазки определяется следующими ее достоинствами: низкое сопротивление трения, доступность смазочного материала, отсутствие загрязнения поверхности подшипника, возможность применения в широком диапазоне температур в отличие от масла, применение которого ограничено из-за возможности замерзания или закипания.

Однако газодинамическая смазка имеет и серьезные недостатки: низкая несущая способность (давление в газодинамических подшипниках около  $10^5$  Па по сравнению с  $10^7$  Па при гидродинамической смазке), низкая стабильность работы, высокие требования к точности изготовления и шероховатости поверхности.

Газодинамические подшипники могут быть радиальными и упорными (рис. 4.72).

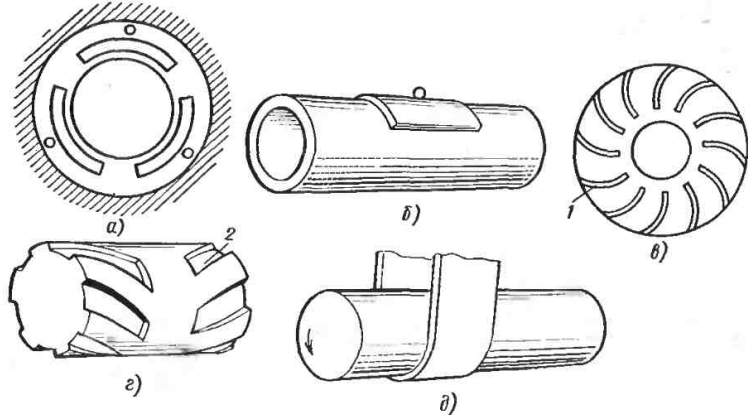


Рис. 4.72. Газодинамические подшипники: а, б — с подвижными вкладышами; в — упорный со спиральными канавками 1; г — радиальный со спиральными канавками 2; д — пленочный

#### 4.5.2. Газостатическая смазка

Газостатическая смазка характеризуется тем, что между контактирующими поверхностями, находящимися в относительном покое, создается слой газа, полностью разделяющий эти поверхности; статическое давление, которое в этом слое возникает в результате постоянной циркуляции газа вследствие давления, создаваемого соответствующим источником, уравновешивает внешнюю нагрузку.

Принцип действия газостатической смазки часто демонстрируется с помощью подшипника, показанного на рис. 4.73. Он состоит из основания

с углублением в виде шарового сегмента и металлического шара. Сопротивление трения в таком подшипнике очень мало. Благодаря этому шар можно свободно поворачивать. Долгое время после снятия внешней силы он продолжает вращаться.

Расход воздуха для создания смазывающего слоя, полностью разделяющего контактирующие поверхности, относительно мал. Для шара массой 15 кг он составляет всего 0,75 дм<sup>3</sup>/мин при давлении 0,015 МПа.

Анализ газостатической смазки из-за сходства явлений основан на тех же принципах, что и анализ гидростатической смазки.

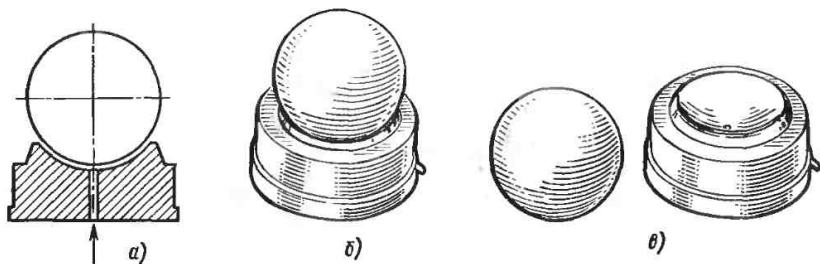


Рис. 4.73. Модель газостатического подшипника: а — разрез; б — общий вид; в — основные детали

#### 4.6. УПЛОТНЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СИСТЕМАХ СМАЗЫВАНИЯ

Даже при очень тщательной подгонке двух деталей, находящихся в относительном покое, между ними всегда имеется щель. Для обеспечения относительного движения двух деталей между ними обязательно должна быть щель. Для вращательного и аксиального движения валов в большинстве случаев в поперечном сечении щель имеет форму кольца.

Количество жидкости  $Q$ , протекающее через кольцевую щель в единицу времени, определяется по формуле

$$Q = 0,833\pi s^3 D_s \Delta p / (\eta l),$$

где  $s$  — ширина щели (рис. 4.74);  $D_s$  — средний диаметр щели:  $p = p_1 - p_2$  — повышение давления уплотняющего фактора;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости уплотнения;  $l$  — длина щели.

Эта формула применяется, если щель имеет одинаковую ширину  $s$  по всему контуру. При предельном эксцентриситете вала относительно отверстия, когда ширина щели по окружности изменяется от нуля до  $2s$ , количество жидкости, протекающей через щель, возрастает в 2,5 раза.

Задача уплотнения: прекращение или снижение до минимума количества жидкости или газа, протекающего через щель. Идеалом уплотнения было бы  $Q = 0$ , это было бы возможно, если бы  $s$ ,  $D_s$  или  $\Delta p$  равнялись нулю, либо  $l$  или  $\eta$  были бесконечно большими.

Из самого предназначения уплотнения следует, что  $\Delta p$  не может быть равно нулю, из конструкции деталей уплотнения следует, что  $D_s$  не может равняться нулю, а  $l$  не может быть бесконечно большой. Коэффициент  $\eta$  зависит исключительно от вида, свойств и температуры уплотнения. Из приведенного анализа рассматриваемой формулы вытекает, что количество жидкости  $Q$  зависит прежде всего от ширины  $s$ , которая в уравнении в третьей степени. Поэтому для обеспечения минимальных потерь жидкости след-

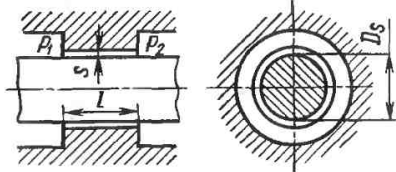


Рис. 4.74. Кольцевая щель

ствие негерметичности надо стремиться к минимальной ширине щели.

На рис. 4.75, а показано идеальное контактирование поверхностей двух деталей, которые, благодаря взаимному прилеганию на большой площади, обеспечивают герметичность. К сожалению, в действительности, в зависимости от вида обработки контактных поверхностей и чистоты поверхности, на поверхностях имеются неровности (рис. 4.75, б). Между неровностями имеется щель, через которую происходит дроссельное течение жидкости; дросселирование зависит от размеров и количества проходов между неровностями. Чем меньше проходы и чем их больше, тем больше дросселирование течения и тем больше герметичность. Если вокруг уплотняемого места на некотором расстоянии удастся добиться нулевых проходов, мы получим полную герметичность. При очень узкой щели течение жидкости, особенно густой, тоже прекращается в результате ее прилипания к стенкам щели (рис. 4.75, в).

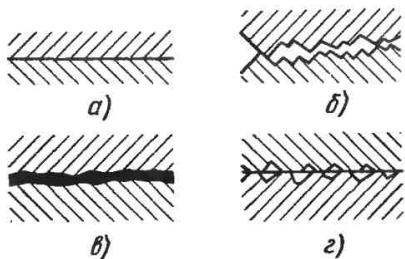


Рис. 4.75. Контакт двух деталей: а — идеальный; б — фактический; в — герметизация узкой щели благодаря адгезии жидкости; г — герметизация путем взаимного притирания поверхностей

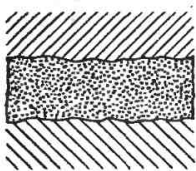


Рис. 4.76. Герметизация соединения двух деталей с помощью прокладки

Из сказанного следует, что герметичности можно достигнуть без применения специальных уплотнений, только путем тщательной подгонки контактирующих поверхностей обеих деталей. Взаимно притертые поверхности схематично в разрезе представлены на рис. 4.75, г. Однако такое уплотнение очень дорогое и слишком чувствительное к загрязнениям, которые могут испарять поверхности, ограничивающие щель, увеличить ее и уменьшить, таким образом, герметичность. Герметичности можно добиться за счет деформации уплотняемых поверхностей после приложения к ним большого усилия, в результате чего происходит вдавливание более твердого материала в мягкий или смятие более твердым материалом мягкого.

Щель (рис. 4.75, в) при неподвижном соединении уплотняют, смазывая ее стенки льняной олифой со свинцовым суриком, нитроцеллюлозным лаком или другим материалом; после сжатия соединяемых деталей этот материал со временем высыхает и твердеет, хорошо герметизируя соединение. На практике, за исключением прецизионных приборов и лабораторных машин и сравнительно немногочисленных случаев в промышленности, для получения необходимой герметичности применяются прокладки и уплотнения. На рис. 4.76 показаны две детали, герметизированные прокладкой. Поверхностные неровности этих деталей заполнены эластичным материалом прокладки.

Проблема герметичности имеет место во всех отраслях промышленности и народного хозяйства и касается [4,6, 4.7, 4.18]:

всех машин и устройств, в которых используется жидкость, газ или пар:

гидро- и пневмопроводах, водо- и газопроводах, паровых котлах и турбинах, энергетических и химических водопроводах;

всякого рода машин, устройств, приспособлений и инструментов, в которых применяются подшипники, направляющие и подобные элементы, требующие предохранения от внешних загрязнений (например, от пыли, атмосферных осадков, агрессивных паров и газов) и от вытекания наружу смазочного материала;

всевозможные баки, сосуды, содержимое которых надо предохранить от вытекания, испарения и т. п. и внутренность которых надо беречь от внешних загрязнений в виде пыли, воздуха и других факторов;

всевозможных жидкостей (воды, смазочных материалов и нефтепродуктов, химикалий), пара (насыщенного водяного пара, перегретого пара), газов (воздуха, технических газов) и их смесей, смеси жидкости и газа с твердыми телами (заиленная вода, запыленный воздух). Жидкостями могут быть кислоты, щелочи, едкие, красящие и ядовитые вещества, продукты, лекарства и тому подобные вещества с различными свойствами, концентрацией, температурой и давлением.

Роль и значение уплотнений по мере развития техники возрастают. Это непосредственно связано с динамичным развитием пневмо- и гидросистем, с развитием автоматизации, где гидравлика и пневматика занимают ведущие позиции рядом с электроинициацией. Значительное развитие энергетики, особенно основанной на высоком давлении, большой химии с ее химическими реакторами для очень высоких давлений и температур, разных агрессивных факторов были бы невозможны без обеспечения необходимой герметичности различных машин и устройств.

Уплотнение — это совокупность деталей, служащая для обеспечения герметичности. Техническое уплотнение — совокупность узлов или деталей машин — является частью машины или устройства, служащей для обеспечения герметичности.

Уплотнение может быть неподвижным, когда уплотняемые детали находятся в состоянии взаимного покоя,

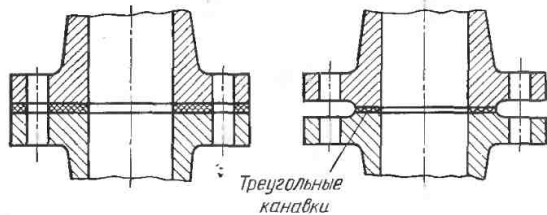
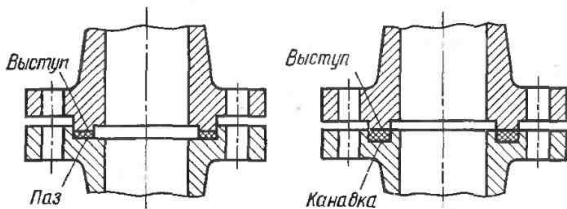


Рис. 4.77. Способы крепления прокладок



и уплотнением подвижного соединения, когда детали находятся в относительном движении. Уплотнение подвижных соединений относится к деталям, находящимся в различных видах движения: вращательном, возвратно-поступательном, винтовом, маятниковом и др.

**Прокладка** — это готовая уплотняющая деталь, сделанная из уплотнительного материала.

**Набивка** — это уплотнительный материал в виде шнура круглого или квадратного сечения, плетеного, витого или скрученного.

Из разных уплотнительных материалов делают различные уплотнения: а) из листовых вырезают, вырубают или вытаскивают прокладки для неподвижных уплотнений; б) из прорезиненной ткани вырезают, формуют уплотнения для подвижных и неподвижных соединений; в) набивку отрезают нужной длины и формируют кольца, обычно в сальниковых коробках, применяют для подвижных, реже неподвижных соединений, либо укладывают в углубления между стягиваемыми неподвижными деталями.

В целом уплотнение состоит из уплотняющего элемента в виде прокладки или кусков набивки; крепления

уплотнения; детали для регулирования (при необходимости) прижима уплотнения к уплотняемой поверхности.

На рис. 4.77 показаны различные варианты уплотнения неподвижного фланцевого соединения твердой прокладкой.

На рис. 4.78 показано подвижное уплотнение. Кольца из набивного материала 1 расположены рядом и дожимаются крышкой сальника 2 с помощью болтов 3 с гайками.

В некоторых случаях герметичности можно добиться без применения уплотнительных материалов с помощью притирания уплотняемых поверхностей или бесконтактных методов (лабиринтное, центробежное, червячное и другие уплотнения).

Иногда применяются сложные уплотнения, действующие на основании объединения различных способов уплотнения, например сальниковое уплотнение с притиранием деталей.

Типы и виды уплотнений будут рассмотрены с точки зрения их применения.

а) Уплотнения общего назначения.  
1) Для деталей машин общего применения.

Кольцевые асбесто-металлические прокладки (рис. 4.79) применяются

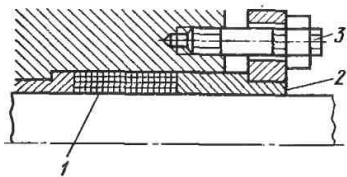


Рис. 4.78. Подвижная герметизация плунжера в сальнике с помощью набивки

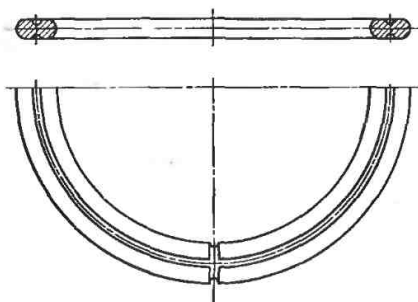


Рис. 4.79. Кольцевая асбесто-металлическая прокладка

в машиностроении, железнодорожном транспорте, судостроении, паровых котлах, арматуре, энергетических трубопроводах, химических устройствах и др.

Резиновые кольца и резиновые кольца с металлической вкладкой (рис. 4.80) — для масла или топлива при давлении до 100 кПа и температуре от  $-30$  до  $+110$  °С, двух видов:  $a$  — с металлической вкладкой 1 для повышения жесткости и  $b$  — в металлическом корпусе 2,  $a$  — для валов диаметром 6—1000 мм,  $b$  — диаметром 6—400 мм.

2) Для гидроприводов и гидроуправления.

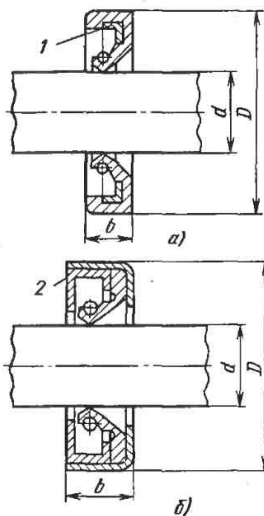


Рис. 4.80. Резиновые герметизирующие кольца

Резиновые или резиноподобные уплотнительные кольца круглого сечения для фланцевых соединений (при давлении от 630 до 4000 Н/см<sup>2</sup>). Внутренний диаметр кольца от 5 до 500 мм.

Уплотнительные кольца круглого сечения (рис. 4.81) — в основном для подвижных соединений (могут работать и в неподвижных соединениях) при давлении до 32 МПа, диапазон температур от  $-20$  до  $+110$  °С. Внутренний диаметр от 3,3 до 209,2 мм.

Уплотнительные манжеты (рис. 4.82) из пластмасс для соединений с возвратно-поступательным движением (плунжеров, поршней и т. п.) давление менее 4 МПа — более 10 МПа. Внутренний диаметр от 10 до 315 мм, внешний диаметр от 20 до 355 мм.

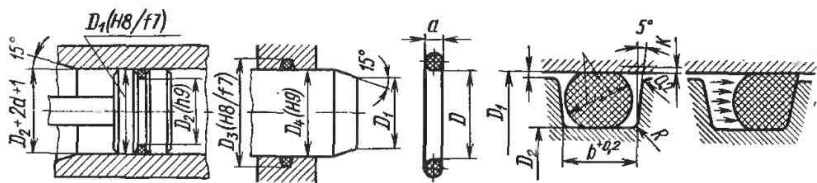


Рис. 4.81. Герметизация кольцами круглого сечения

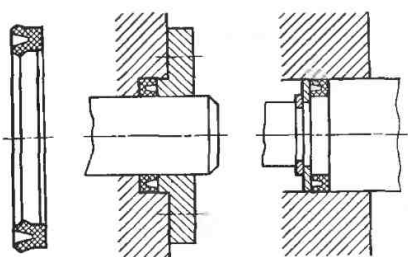


Рис. 4.82. Уплотнительная манжета из пластмассы

Уплотнительные резиновые манжеты (рис. 4. 83) для подвижных соединений без прокладок для сальников. Давление до 32 МПа, температура от  $-20$  до  $+100$  °С. Внутренний диаметр от 4 до 1000 мм, внешний диаметр от 12 до 1040 мм.

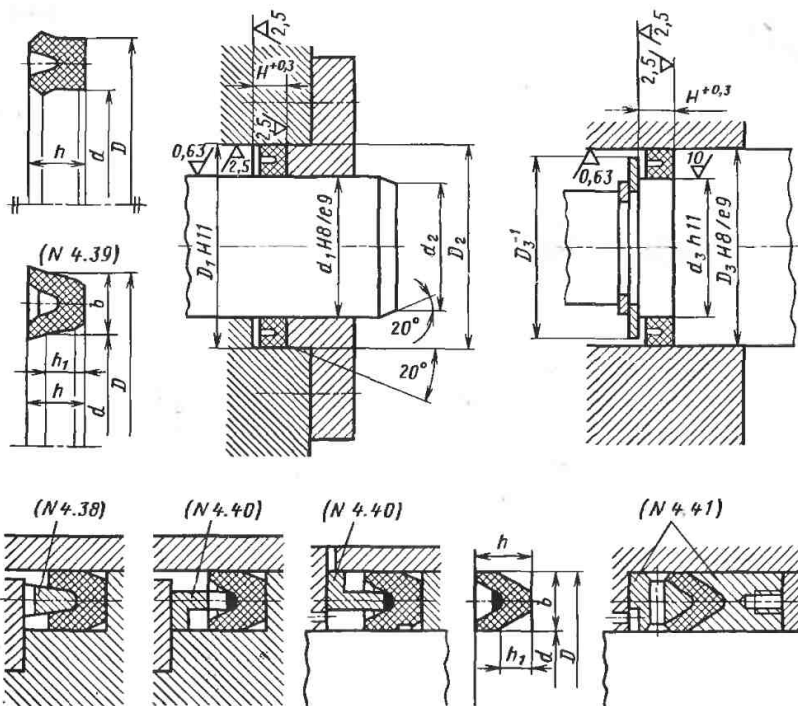


Рис. 4.83. Герметизация резиновыми манжетами

Уплотнительные манжеты для подвижных соединений из эластомеров без прокладок для сальников. Давление до 63 МПа, температура от  $-20$  до  $+100$  °С. Внутренний диаметр от 4 до 1000 мм, внешний диаметр от 12 до 1040 мм.

б) Уплотнения в машиностроении.

1) Для двигателей внутреннего сгорания.

Уплотнение головок, впускных и выпускных каналов двигателей.

Чугунные поршневые кольца диаметром от 150 мм для тяговых и стационарных двигателей внутреннего сгорания с цилиндрами от 30 до 150 мм.

Поршневые уплотнительные кольца прямоугольного сечения для дизельных корабельных и железнодорожных двигателей с цилиндрами от 155 до 1000 мм.

2) Для компрессоров.

4.5. Уплотнительные материалы и область их применения в уплотнении фланцевых соединений трубопроводов [4.4; 4.5]

Уплотнительный материал	Способ изготовления уплотнения	Примеры применения		
		Рабочее вещество	Температура, °C	Рабочее давление, МПа
<i>AK</i> — асбесто-каучуковая масса	Формование в матрицах или вырезание из плит	Водяной пар	450	5
<i>ANK</i> — асбесто-каучуковая масса из голубого асбестового волокна		Кислоты и их пары Аммиак $NH_3$ Сернистый ангидрид $SO_2$ , фреон 12 Холодильный рассол	250 150 150 -15—+5	5 2,5 2,0 0,2
<i>A</i> — уплотненный асбест	Вырезание из плит	Горячие газы Водяной пар	750 120	0,15 0,2
<i>AM</i> — асбесто-медь	Изготовление в специальных приспособлениях	Вода Водяной пар Водяной пар Горячие газы	250 250 425 700	10 3,5 1,6 5
<i>CN</i> — резина из натурального каучука	Формование в матрицах, вырезание из плит, склеивание из шнура	Вода, спирт, чистый воздух	30	0,3
<i>GS</i> — резина из синтетического каучука		Вода, спирт, бензин, масло Воздух с маслом Холодильный рассол	50 50 -15—+5	0,3 0,3 0,2
<i>GNP</i> — резина из натурального каучука с ткаными прокладками	Формование в матрицах, вырезание из плит	Вода, спирт, чистый воздух	60	10



<i>GSP</i> — резина из синтетического каучука с ткаными прокладками	Формование в матрицах, вырезание из плит	Вода, спирт, бензин, масло, воздух с маслом	90	10
<i>TIG</i> — импрегнированный и графитированный технический картон	Вырезание из плит	Вода Холодильный рассол	100 —15—+5	1 0,2
<i>TP</i> — грунтованный технический картон		Спирт, масло, бензин, воздух	40	1
<i>F</i> — фибра	Вырезание из плит, точение из прутка	Вода, масло, кислород	40	50
		Двуокись углерода $CO_2$	100	15
		Аммиак $NH_3$	150	2,5
		Сернистый ангидрид $SO_2$ , фреон 12	150	2
<i>Sk</i> — кожа	Вырезание	Вода, масло	60	50
<i>Ko</i> — прессованная пробка	Вырезание из плит	Бензин, масло, спирт	40	0,3
<i>Fi</i> — технический фетр		Бензин, масло	40	0,3
<i>O</i> — свинец	Вырезание или точение	Вода	200	1,6
		Кислоты	100	0,2
		Аммиак $NH_3$	150	2,5
		Двуокись углерода $CO_2$	100	15
		Сернистый ангидрид $SO_2$ , фреон 12	150	2
<i>M</i> — медь		Вода	30	100
		Вода	250	10
		Водяной пар	250	3,5
		Двуокись углерода $CO_2$	100	15

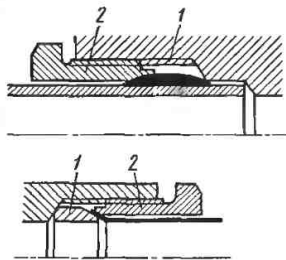


Рис. 4.84. Примеры герметизации конусом:

1 — герметизирующая муфта;  
2 — гайка

Поршневые кольца диаметром от 155 до 1000 мм.

3) Для турбин, насосов и компрессоров.

Уплотнительные кольца из графитированного угля.

4) Для строительных машин.

Кольца для уплотнения валов и втулок конвейерных цепей.

2) Трубопроводы и арматура гидросистем.

Медные уплотнительные кольца прямоугольного сечения для фланцевых соединений.

Медные уплотнительные кольца круглого сечения для фланцевых соединений, давление от 6,3 до 40 МПа.

3) Трубопроводы и арматура гидродвигателей, систем центральной смазки и топливных систем.

Конусная муфта для соединения гладких труб с внешним диаметром от 4 до 12 мм (рис. 4.84).

Конусная муфта для соединения гладких развальцованных трубок диаметром от 4 до 12 мм (рис. 4.84, б).

Виды применяемых уплотнений показаны на рис. 4.85, а материалы для их изготовления в табл. 4.5.

Проблемы, связанные с трением и износом уплотнений в узлах трения стали предметом ряда научных трудов [4.8—4.10, 4.18]. В основном они касаются подвижных уплотнений и ста-

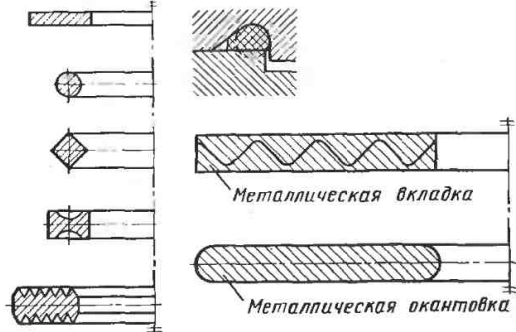


Рис. 4.85. Различные виды герметизирующих прокладок

вят своей целью повышение их износостойкости и обеспечение длительной герметичности узла трения.

#### 4.7. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ РОБОТОВ И МАНИПУЛЯТОРОВ

Всевозможные роботы и манипуляторы с точки зрения трибологии являются устройствами, которым надо обеспечить минимальное сопротивление для достижения точности движения в необычных условиях трения. Управление роботами и манипуляторами осуществляется на расстоянии с помощью шаговых электродвигателей, гидро- и пневмосистем. Специфика узлов трения роботов и манипуляторов заключается в том, что чаще всего они работают в условиях высокого вакуума (при монтаже и обработке интегральных схем, в космических исследованиях и т. п.), при очень высокой или очень низкой температуре (в металлургических, плазменных и криогенных технологических процессах), в условиях сильного излучения (при проведении ядерных исследований), в очень агрессивных средах (в технологических химических процессах), где выполняют определенные рабочие функции, которые не может выполнять человек.

Специфика их заключается также в том, что они нуждаются в эффективной смазке в течение длительного времени без дополнения или замены смазочного материала. Часто эти устройства смазываются на весь ресурс их функционирования. В качестве смазочного материала наиболее целесообразно применять пластичные смазочные материалы. Они делятся на вещества с низкой внутренней связностью обычно в виде порошков (мыло, воск, мягкие полимеры, мягкие металлы: индий, свинец, цинк, серебро, олово, медь) и вещества со слоистым строением, т. е. с анизотропной связностью (графит, сульфиды переходных металлов):  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{TiS}_2$ , селениды переходных металлов:  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ , окиси  $\text{SbO}_3$ , гидроокиси:  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mo}(\text{OH})_2$ , галогениды:  $\text{PbJ}_2$ ,  $\text{CdJ}_2$ ,  $\text{AgJ}$ ,  $\text{CdCl}_2$  и др., нитриды  $\text{BN}$ , сульфаты  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ . В зависимости от условий и среды работы узла трения подбирается смазочный материал.

Расчет нагрузок и сил трения в роботах и манипуляторах может производиться на основании теоретических положений, изложенных выше. Конкретные инженерные приложения расчета подшипников опор скольжения и качения для них приведены в т. 2, гл. 3, 4 и в т. 3, в гл. 2.

### Список литературы

- 4.1. Wysocki M. Systemy smarownicze w przemyśle ciężkim. Wyd. Śląsk, Katowice, 1971.
- 4.2. Michel E., Dörrfeld W. Poradnik smarownika. PWT, Warszawa, 1954.
- 4.3. Capala M., Magiera B. Smarowanie podstawowych maszyn i urządzeń. Wyd. SIMP, Warszawa, 1986.
- 4.4. Karasz Z. Urządzenia smarownicze i układy hydrauliczne. Wyd. SIMP, Warszawa, 1986.

- 4.5. Fuller D. D. Teoria i praktyka smarowania. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1960.
- 4.6. Praca zbiorowa: Poradnik Mechanika. WNT, Warszawa, 1976.
- 4.7. Osinski Z., Bajon W., Szucki T. Podstawy konstrukcji maszyn. PWN, Warszawa, 1986.
- 4.8. Pape J. G. Fundamental Research on a Radial Face Seal//ASLE Transactions, vol. 11, 1968, p 302—309.
- 4.9. Pape J. G. Vrakking—Viscoseal—Pressure Generation and Friction LOSS under Turbulent Conditions//ASLE Transactions, vol. 11, 1968. p. 310—320.
- 4.10. Müller H. K. An Automatic Basier Seal: Theory and Experiment//ASLE Transactions, vol. 13, n 4, 1971, p. 289—295.
- 4.11. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: ГИФМА, 1963. 472 с.
- 4.12. Ребиндер П. А. Физико-механическая механика. М.: Наука, 1979. 831 с.
- 4.13. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 399 с.
- 4.14. Матвеевский Р. М., Буяновский И. А., Лазовская О. В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. М.: Наука, 1978. 191 с.
- 4.15. Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М. Браун Э. Д. и др. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986. 248 с.
- 4.16. Ишлинский А. Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.
- 4.17. Пинегин С. В., Орлов А. В., Табачников Ю. Б. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
- 4.18. Контактные уплотнения вращающихся валов/Голубев Г. А., Кукин Г. М., Лазарев Г. Е., Чичинадзе А. В. М.: Машиностроение, 1970. 264 с.

### 5.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ИЗМЕНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Два твердых тела, введенные в силовое контактное взаимодействие и совершающие при этом относительное перемещение, образуют пару трения. Под фрикционным контактом понимают примыкающую к границе раздела контактирующих тел область, в которой сосредоточены процессы массопереноса, обуславливающие потери на трение и износ пары трения.

Рассмотрим фрикционный контакт (рис. 5.1). Вследствие шероховатости поверхностей и неоднородности их физико-механических свойств силовое взаимодействие тел при трении характеризуется локальностью, т. е. происходит на пятнах фактического контакта. Малые размеры пятен фактического контакта и незначительность суммарной площади их поверхности по сравнению с номинальной площадью контакта являются причиной больших фактических давлений. В результате возникают флуктуации напряжений и деформаций, локализуемые в окрестности пятен фактического контакта, что предопределяет зону фрикционного разрушения в виде тонкого подповерхностного слоя.

Вследствие физико-химических процессов взаимодействия поверхностей на их относительное перемещение при трении накладываются связи, реакции которых проявляются в виде касательных контактных напряжений. Появление дополнительных касательных поверхностных сил может существенно повысить нагруженность фрикционного контакта. Подповерхностный слой может быть в упругом или упругопластическом состоянии.

Соответственно фрикционный контакт называют упругим или пластическим. Толщина подповерхностного слоя зависит от напряженно-деформированного состояния, определяется критерием разрушения и соизмерима с диаметром пятна контакта.

При относительном сдвиге реальных тел вследствие гетерогенности субмикроструктуры материалов (атомно-молекулярная структура с дефектами) сдвиг не может быть реализован в одной плоскости скольжения. В него втягивается система плоскостей скольжения, и деформация сдвига, реализующая относительное скольжение тел, охватывает тонкий пограничный слой (третье тело). Стационарное состояние пограничного слоя рассматривается как динамическое равновесие процессов разрушения и восстановления физических связей дисперсионной природы. Мгновенные значения напряжения сдвига в нем определяют касательные напряжения фрикционных связей, которые в свою очередь следует рассматривать как компоненты внешних сил по отношению к подповерхностному слою. В кинематическом аспекте пограничный слой локализуется в себе разрыв скорости, обусловленный относительным перемещением тел, в чем и заключается его принципиальное отличие от подповерхностного слоя.

Фрикционный контакт имеет двухуровневую структуру и состоит из пограничного и подповерхностного слоев.

Движение вещества в пограничном слое определяет диссипацию энергии и процессы разрушения фрикционного контакта. В общем случае структура пограничного слоя сложна и не постоянна во времени. Для удобства анализа различают начальное (предварительное смещение), неустано-

5.1. Усредненные для микроскопического пограничного слоя значения коэффициента фрикционного упрочнения  $\psi$  (степень фрикционного упрочнения) сильных границ фрикционного контакта

Материал	Вид обработки	$\psi$
Медь М1	Отжиг	4
Медь М1	Отжиг с последующей пластической деформацией	2,0—2,5
Бронза ОФ—10—1	Состояние поставки	1,9—2,1
Сталь 45	То же	6
Сталь 45	Закалка HRC 51—55	1,4
Сталь ЭИ437А	Закалка HRC 48—51	2,9
Чугун СЧ 15-38	Состояние поставки	3,4
Свинец	То же	1

вившееся и установившееся (завершенная приработка) его состояния.

Пограничный слой в начальном состоянии можно рассматривать как матричный материал в состоянии пластического сдвига, микроструктурными особенностями которого являются дефекты различной природы: микропоры, образованные впадинами между микронеровностями контактирующих тел; субмикропоры, образованные впадинами между субмикронеровностями трущихся тел; субмикропоры материала как результат эволюции зародышевых микротрещин; граница раздела трущихся тел в пределах пятна фактического контакта. Обычно граница раздела является «сильной», т. е. обладающей большим напряжением течения областью микроструктуры пограничного слоя. В табл. 5.1 приведены значения коэффициента фрикционного упрочнения материала  $\psi$ , оценивающего этот вид неоднородности структуры, который является одной из основных причин возникновения растягивающих напряжений в пограничном слое при его деформировании.

При легких нагрузках на пару трения пограничный слой ограничен микроскопическими пятнами фактического контакта и наибольший масштаб дефектов его структуры определяется субмикропорами. Толщина такого пограничного слоя имеет микроскопические масштабы. При тяжелых на-

грузках протяженность третьего тела определяется контурными пятнами контакта и наибольшим дефектом его структуры являются микропоры. Толщина пограничного слоя в этом случае имеет микроскопические масштабы.

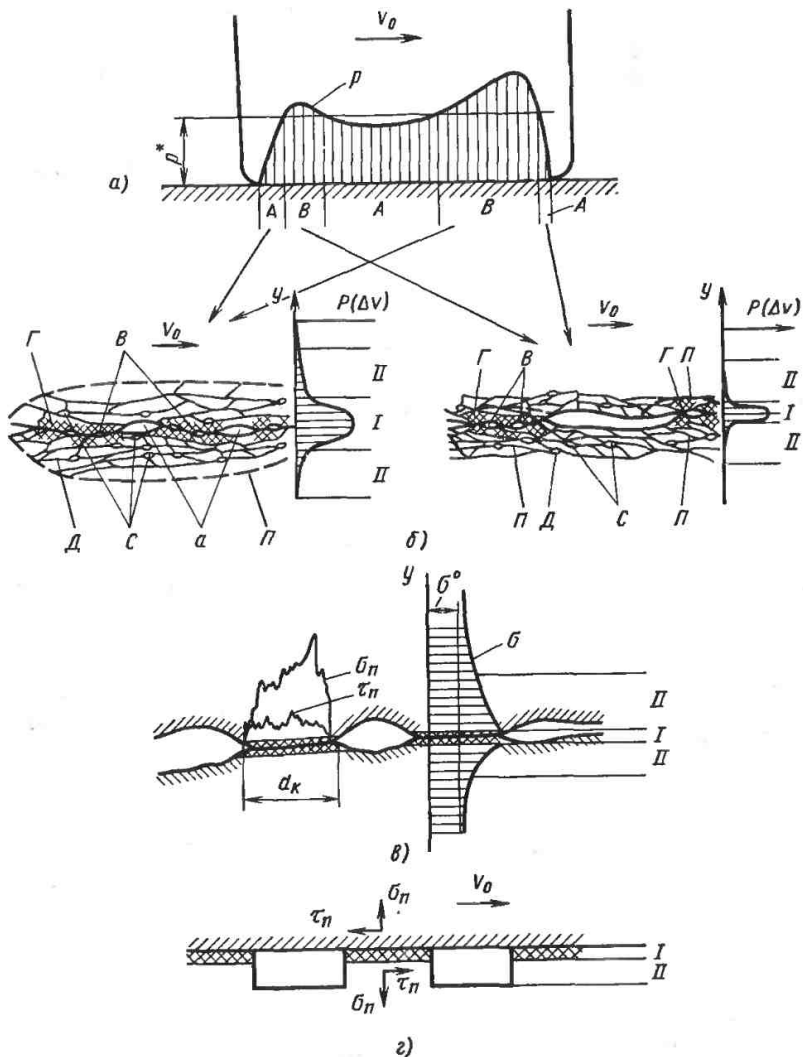
Достаточные экспериментальные данные, подтверждающие возможность использования континуальных подходов к процессам субмикроскопических масштабов, отсутствуют. Однако теоретические доводы в пользу этого имеются [5.1]. Для сохранения единства подходов к описанию состояния пограничного слоя независимо от его масштабов рассматривают пограничный слой как некую структурно-неоднородную среду, параметры которой связаны с природой и масштабами определяющих его состояние дефектов.

Усредненное по объему пограничного слоя напряжение его течения, оцениваемое касательным контактным напряжением, называемым часто удельной силой трения, подчиняется зависимости

$$\tau = \tau_0 + \beta \sigma_n, \quad (5.1)$$

а усредненная интенсивность деформации  $\Gamma$  сдвига в пограничном слое, пропорциональная отношению смещения  $x$  тел, вызывает увеличение объема (толщины) пограничного слоя [5.2]:

$$de^p = \beta d\Gamma. \quad (5.2)$$



**Рис. 5.1. Схема фрикционного контакта:**  
 а — схема пары трения «ползун—плоскость» и распределение макроскопических давлений  $p$  вдоль фрикционного контакта;  $A, B$  — области легких и тяжелых нагрузок;  $p^*$  — условное давление, разграничивающее легкие и тяжелые нагрузки;  $V_0$  — скорость скольжения ползуна; б — схема фрикционного контакта на микроуровне;  $I$  и  $II$  — пограничный и подповерхностный слои соответственно;  $\Gamma$  — граница фактического контакта;  $a$  — микропоры;  $b$  — субмикропоры границы  $\Gamma$ ;  $c$  — субмикропоры материала;  $d$  — дислокационные границы фрагментов с большеугловой кристаллографической разориентацией;  $\Pi$  — граница пластического течения, реализующего относительный сдвиг трущихся тел;  $P(\Delta V)$  — вероятность локализации в нормальном  $Y$  к поверхности контакта направлении разрыва скорости

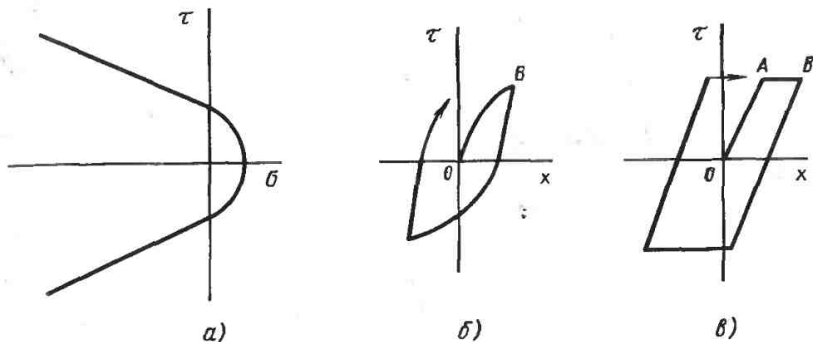


Рис. 5.2. Условие трения при сдвиге фрикционного контакта в зависимости от нормальных напряжений (а) и диаграммы сдвига фрикционного контакта при наличии микро-неоднородной (б) и идеальной бездефектной (в) структуры

Последнее ассоциируют с разрыхлением и дилатансией вследствие увеличения пор на различных масштабных уровнях. Информацию о структурной неоднородности третьего тела можно получить из диаграмм сдвига, изображенных на рис. 5.2, где приведены условия течения при сдвиге пограничного слоя и диаграммы  $\tau - X$  при наличии структурной неоднородности (аналог эффекта Баушингера) и в случае ее отсутствия. Одной из характеристик структурной неоднородности является функция плотности распределения микронапряжений  $f(\sigma')$ , которая связана с диаграммой сдвига следующим соотношением:

$$f(\sigma') = -B \frac{d^2\tau}{dX^2}, \quad (5.3)$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от вида неоднородностей микроструктуры. Для бесструктурного пограничного слоя диаграмма  $\tau - x$  превращается в ломаную  $OAB$  (рис. 5.2, в).

Параметр  $\beta$  в (5.1) можно использовать как обобщенную характеристику структурной неоднородности по-

граничного слоя, отражающую влияние отмеченной выше многоуровневой системы дефектов на движение в нем вещества (рис. 5.3).

При достижении разрыхлением критического значения  $V^*$ , которому соответствует перемещение  $X^*$ , поры сомкнутся и произойдет сдвиг (деформация скольжения). Поскольку поры расположены статистически неоднородно и по мере относительного сдвига тел происходят непрерывные разрушение и восстановление микроразъемов вещества пограничного слоя, движение в нем реализуется как эстафетное чередование актов пластического сдвига, разрыхления и разрушения в локальных зонах. При этом часть материала диспергируется (объем пограничного слоя возрастает) и образуются свободные частицы. Локальные изменения объемов пограничного слоя вследствие разрыхления и диспергирования вещества являются дополнительным источником флуктуации напряжений в подповерхностном слое.

Пограничный слой испытывает давление, развиваемое на пятнах факти-

относительного сдвига трущихся тел;  $\frac{XXX}{XXX}$  — сильная граница фактического контакта;  $\sigma$  — обобщенная схема фрикционного контакта;  $\sigma_n : \tau_n$  — нормальные и касательные контактные напряжения, действующие на границе пограничного и подповерхностного слоев;  $\sigma^0(Y)$  — распределение макроскопических напряжений в фрикционном контакте;  $\sigma(y)$  — распределение действительных (активных) напряжений, обусловленных структурной неоднородностью контакта;  $z$  — возможная идеализация фрикционного контакта твердого неизнашиваемого тела с деформируемым структурно-неоднородным телом

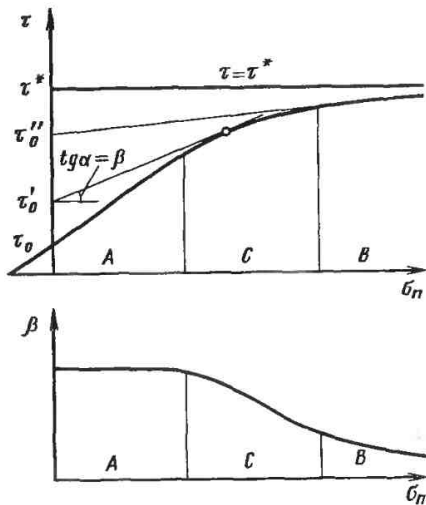


Рис. 5.3. Зависимость усредненного напряжения сдвига ( $\tau = \tau_0 + \beta \sigma_n$ ) пограничного слоя от нагрузки  $\sigma_n$ :

A, B, C — области легких, средних и тяжелых нагрузок;  $\tau^*$  — напряжение для идеального бесструктурного пограничного слоя ( $\beta = 0$ )

ческого контакта, которое в общем случае знакопеременно. Поэтому в (5.2) введен член, учитывающий влияние сжимающего давления  $\sigma_n$  на скорость разрыхления:

$$d\epsilon^p = (\beta + \beta_1 \sigma_n) d\Gamma, \quad (5.4)$$

где  $\sigma_n$  — безразмерное гидростатическое давление.

В общем случае  $\beta \neq \text{const}$  вследствие структурных изменений в веществе, связанных с физико-химическими и механическими процессами при трении.

Флуктуации напряжений в пограничном слое вызывают упругопластические деформации в подповерхностном слое. В этом случае эволюция его структуры также может включать стадии разрыхления и разрушения. Вследствие отсутствия в нем микропор и меньшего уровня напряжений, скорость разрыхления вещества в этом слое намного ниже скорости разрыхления его в пограничном слое.

Это в общем случае предопределяет появление наряду с высокочастотной низкочастотной моды более крупномасштабного разрушения фрикционного контакта. Разрыхление подповерхностного слоя при трении подтверждено экспериментально (рис. 5.4) [5.3].

Согласно [5.4] и учитывая, что  $\beta = \beta(t)$ , где  $t$  — время, степень разрыхления материала можно представить в виде

$$\frac{V}{V^*} = \int_0^t E(t - \tau) B(\tau) \beta(\tau) \times \times \frac{X(\tau) d\tau}{V^* [K(\tau)]}, \quad (5.5)$$

где  $K = \sigma/T$ ;  $T$  — интенсивность напряжений;  $E(t - \tau)$  — коэффициент наследственности, учитывающий заживление дефектов. При  $V = V^*$  материал подповерхностного слоя перейдет в диспергированное состояние, скачком увеличив объем до значения  $V_p^*$ . Количество диспергируемого вещества в единицу времени называют скоростью фрикционного разрушения  $\dot{m}_p$ . В момент диспергирования фрагменты разрушения подповерхностного слоя вовлекаются в движение и захватываются пограничным слоем, который скачком увеличивает свои размеры.

В следующей за начальной неустановившейся фазе движения в структуре пограничного слоя появляются новые элементы — фрагменты разрушения. Характер их движения может оказать существенное влияние на диссипативные свойства фрикционного контакта и процессы его разрушения. Типичным является ротационный механизм движения фрагментов разрушения. В этом случае их называют молями. Приобретая сферическую или цилиндрическую форму, моли под действием сил, возникающих в их контакте с поверхностями трущихся тел, совершают вращательное движение, перемещаясь к границе контактной зоны, разрыхляя и диспергируя подповерхностные слои по описанной выше схеме. Характеристикой их движения является коэффициент скольжения  $i =$



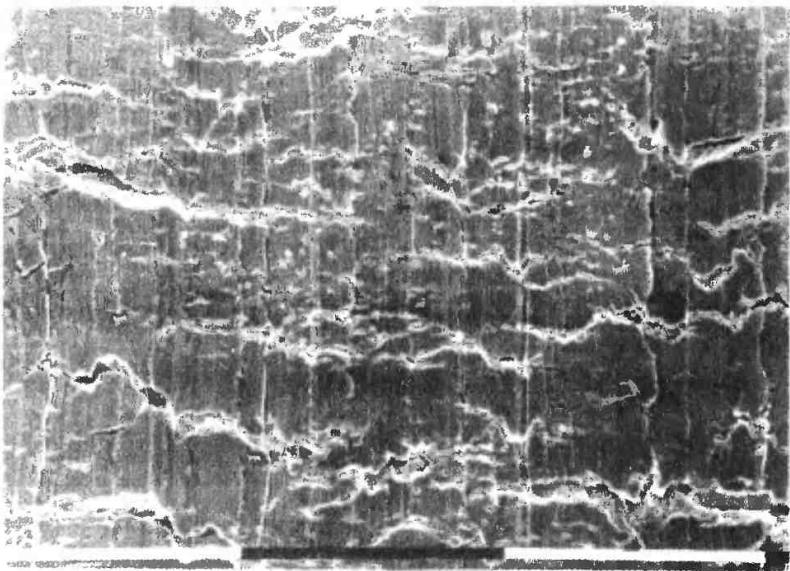


Рис. 5.4. Разрыхление приповерхностных слоев материала при трении

$= \omega/\omega_0$ , где  $\omega$  и  $\omega_0$  — угловые скорости моля при данной степени обжата и в предположении чистого качения. Значение  $i$  зависит от нагрузки  $P_i$  на моль, определяющей степень его обжата или внедрения в материал, адгезии его к поверхностям. При нагрузке  $P_i > P_{i \max}^*$ , являющейся своего рода потенциальным барьером движения моля, последний теряет способность к движению, шаржируя, намазываясь на поверхность либо разрушаясь. Существует также нижний предел давления, ниже которого моль перестает двигаться. В силу условия сдвига (5.1) при  $\sigma_n = 0$ ,  $\tau = \tau_0 > 0$  при полной разгрузке тел возможен вынос моля из контактной зоны. В интервале  $P_{i \max}^* > P_i > P_{i \min}^*$  зависимость  $i = i(P)$  имеет максимум. Локальная скорость молей зависит от их концентрации  $n$ , давления на них  $P_i$ , а также от  $\text{grad } \sigma_n$  и  $\text{grad } n$  и потенциальных барьеров их движения  $P_{i \max}^*$  и  $P_{i \min}^*$ . Поскольку нормальные напряжения  $\sigma_n$  вдоль поверхности трения распределены неравномерно, скорость движения молей

зависит от координат. При столкновении молей может произойти их объединение в конгломераты сферической формы, способность перемещаться у которых выше, чем у единичных молей.

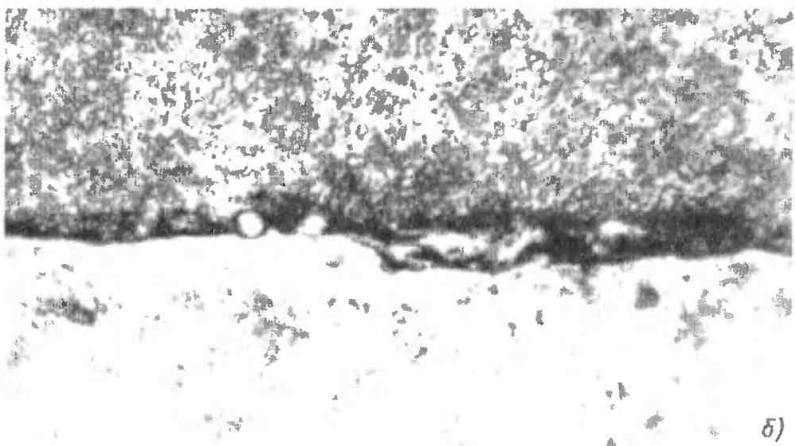
На рис. 5.5 изображены стадии разрыхления, диспергирования, ротации и объединения частиц износа в конгломераты. При таком механизме движения частиц износа скорость фрикционного разрушения  $\dot{m}_p$  соизмерима со скоростью  $l_t$  удаления частиц износа.

Другой схемой поведения молей является их объединение в конгломераты по аналогичной схеме с последующим пластическим «размазыванием» по поверхности. В результате образуется новая слоистая структура (рис. 5.6), называемая вторичной. Ротационные эффекты, турбулизируя массоперенос при образовании вторичных структур, определяют в значительной степени попадание в их состав различного рода примесей, их механическое перемешивание и последующее спекание на стадии «размазывания». При такой схеме движе-

ния скорость фрикционного разрушения намного превышает скорость выноса разрушенного материала из контактной зоны. После образования равномерного слоя вторичной структуры наступает установившееся состояние пограничного слоя, который приобретает субмикроскопическую толщину, периодически увеличивающуюся в моменты разрушения подповерхностного слоя.

При трении скольжения во фрикционном контакте происходит циркуляционный массообмен между пограничным и подповерхностным слоями по

следующей схеме: соприкосновение локальных микроучастков поверхностей — образование зоны схватывания с сильной границей — пластический сдвиг, вызывающий разрыхление и диспергирование — образование и ротация молей — намазывание их на поверхность в результате пластической деформации. Массоперенос в пограничном слое протекает в общем случае по трансляционной и ротационной схемам движения. Соотношение этих видов движения характеризуют коэффициент перемежаемости  $\gamma$ . При отсутствии ротационной моды  $\gamma = 0$ ,



при отсутствии трансляционной моды  $\gamma = 1$ . Вероятность  $P(\text{rot})$  образования молей при пластическом сдвиге матричного материала пограничного слоя можно оценить (рис. 5.7) по формуле

$$P(\text{rot}) = c(\beta + \beta_1\sigma) \frac{H}{L}, \quad (5.6)$$

где  $c$  — коэффициент;  $H$  — толщина пограничного слоя;  $L$  — расстояние

между соседними микрочастицами. Коэффициент  $\gamma$  является важной характеристикой движения, определяющей диссипативные свойства пограничного слоя. При  $\beta + \beta_1\sigma = 0$   $\gamma = 0$ .

В процессе движения и массообмена во фрикционном контакте часть вещества теряется, что и определяет износ сопряжения. На рис. 5.8, *a* изображен график, отражающий кинетику изнашивания. За меру износа выбрано

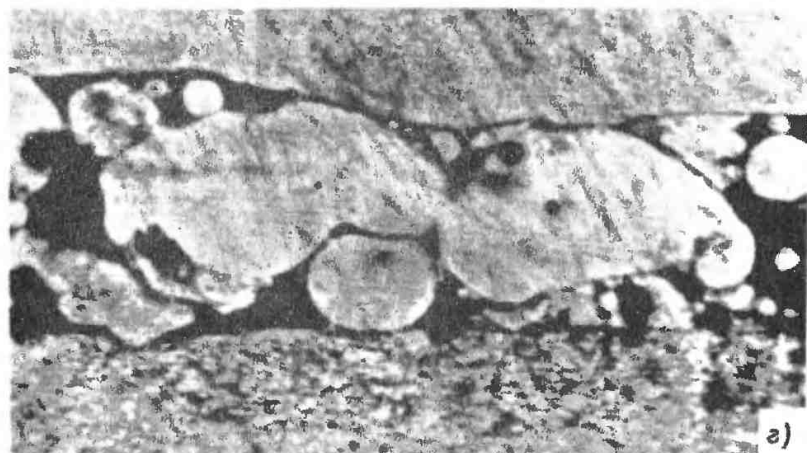
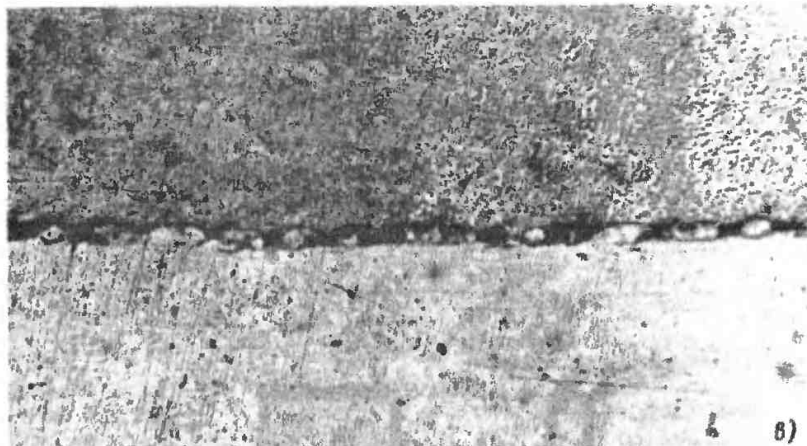


Рис. 5.5. Изменения состояния фрикционного контакта по мере относительного сдвига трущихся тел в стадиях:  
*a* — разрушения; *b* — диспергирования и выделения частиц износа; *в* — ротационного движения частиц износа; *г* — объединения частиц износа в конгломераты

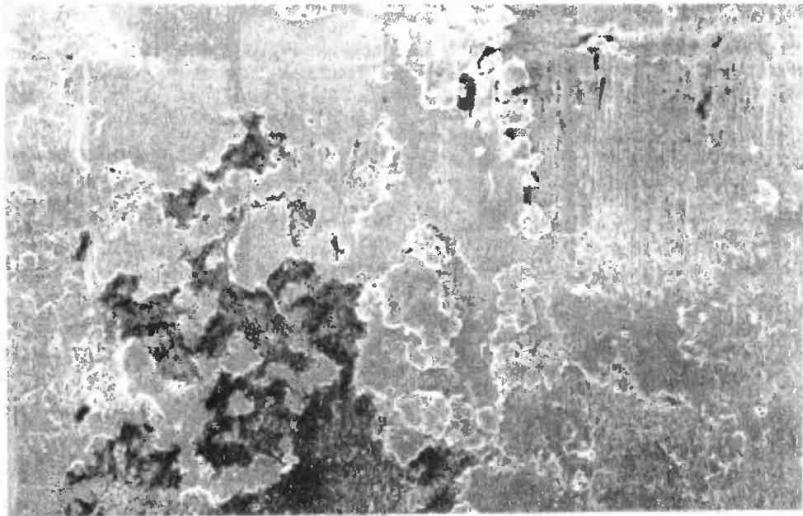


Рис. 5.6. Стадия «размазывания» частиц износа и образования «вторичных структур»

относительное перемещение у тел вдоль нормали к их контактному поверхностям. Положительное направление соответствует их размыканию. Для простоты принято, что тело *I* неизнашиваемое. На рис. 5.8, *a* *O* — начальное положение их границы;  $h_{r0}$  — начальная глубина упругопластической границы подповерхностного слоя;  $t_{v*}$  — время, за которое в упругопластическом материале достигается критическое разрыхление  $V = V^*$ . Линия

*O — a* — траектория смещения тела *I* при увеличении объема фрикционного контакта вследствие разрыхления и диспергирования в предположении, что диспергируемый материал не удаляется из пограничного слоя. Область, ограниченная линиями  $O - t_{v*} - c - d - h_{r0}$ , — часть фрикционного контакта, в которой степень разрыхления  $V < V^*$ . С учетом выноса частиц износа, скорость которого увеличивается с ростом их концентрации, действи-

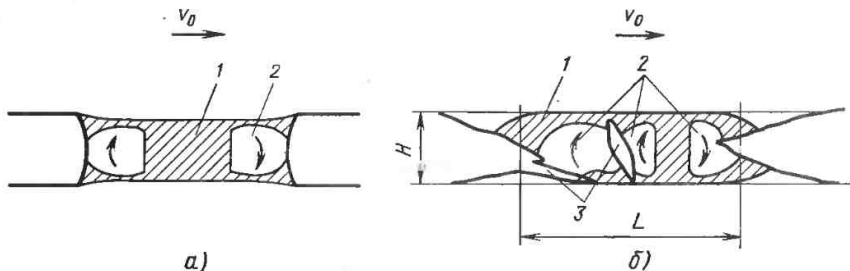


Рис. 5.7. Схема пластического течения при сдвиге элемента матричного материала (мостика схватывания) пограничного слоя:

*a* — схема среза «мостика схватывания» (по Р. Грину); *b* — схема среза разрушенного «мостика схватывания»; 1 — область пластического сдвига; 2 — область чистого вращения; 3 — субмикротрещины матричного материала; *H* — высота пограничного слоя; *L* — длина участка схватывания в пограничном слое

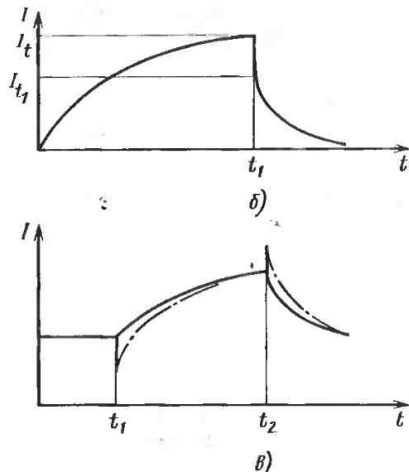
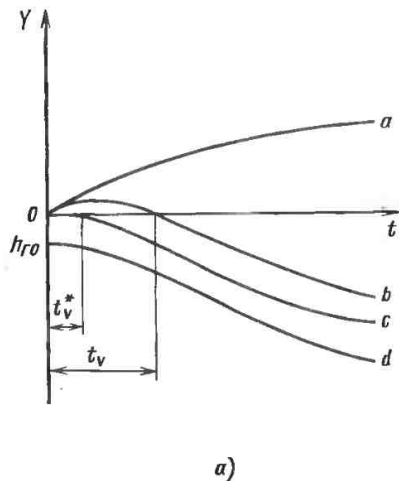


Рис. 5.8. Зависимость фрикционного разрушения и износа от времени — *a*; изменение скорости изнашивания при нагружении и разгрузке — *б*; при догрузке и полной разгрузке — *в*

тельная траектория смещения тела 1 за время  $t$  имеет вид линии  $0 - b$ ,  $t_v$  — время «отрицательного износа».

На рис. 5.8, *б* изображен график изменения скорости изнашивания во времени. Если через интервал  $t_1$  произвести разгрузку, то скорость изнашивания упадет от  $I_t$  до  $I_t'$ , а затем будет монотонно падать по мере уменьшения концентрации  $\kappa$  частиц. Под полной разгрузкой здесь следует понимать разгрузку до значения  $P$ , при котором фрикционное разрушение с данными пространственными масштабами прекратится, хотя такой вид зависимости в силу условия сдвига (5.1) сохранится и при полной разгрузке.

В зависимости от концентрации в пограничном слое молей и фрагментов разрушения в моменты догрузки возможно импульсное понижение скорости изнашивания, а в момент разгрузки — импульсное повышение его значений (рис. 5.8, *в*). Кинетика изнашивания в общем случае подчиняется закономерностям «старения», т. е. является в общем виде функцией параметров нагружения и времени

$$I(t) = f_1(P) + \int_0^t K(t-\tau) f_2[P(t)] d\tau, \quad (5.7)$$

где  $K(t-\tau)$  — ядро наследственности.

Адекватность модели (5.7) подтверждается экспериментальными данными. Как следует из вышеизложенного,  $K(t-\tau)$  содержит коэффициенты, являющиеся немонотонной функцией нагрузки  $P$ . Как при малых, так и при больших  $P$  эффект наследственности износа может ослабевать.

Начальный период изнашивания, определяемый интервалом времени  $t_v$  (см. рис. 5.8, *а*), характеризуется преобладанием разрушения фрикционного контакта над его износом. Если распределение поверхностных сил не изменяется во времени, а время работы сопряжения  $t \gg t_v$ , можно считать скорость изнашивания не зависящей от времени, придав ей вид, например,

$$I_t = K v_0^m P^n, \quad (5.8)$$

где  $v_0$  — скорость скольжения;  $P$  — нагрузка;  $m, n$  — показатели степени.

Если же  $t \approx t_V$  или нагрузки вдоль поверхности распределены неравномерно, этот эффект может проявиться в значительной степени. Более нагруженные в начальный момент времени участки поверхности еще сильнее нагружаются в силу их «выпучивания» вследствие разрыхления, а менее нагруженные — разгрузятся в силу замыкания поверхностей. Со временем по мере неравномерного износа поверхности давление выравнивается, однако при превышении определенного уровня значений параметра  $\beta$ , нагрузки и начальной степени неравномерности ее распределения процесс циклического перераспределения нагрузок не затухает и приобретает устойчивый автоколебательный характер. Этот эффект назван пластической нестабильностью контакта. Вызываемые им флуктуации микронапряжений могут достичь макроскопических размеров, что приводит к макроскопическим масштабам разрушения и заеданию.

Узлы трения современных машин, как правило, эксплуатируются в присутствии смазочного материала. Образующиеся граничные слои смазочного материала, оказывая пластифицирующее действие, ослабляют «сильные» области структуры фрикционного контакта и тем самым внутренние микронапряжения, что согласно (5.2) снижает скорость фрикционного разрушения. Смазочный материал оказывает и чисто механическое влияние на состояние пограничного слоя. Развиваемое им в микропорах гидростатическое давление способствует выравниванию его по всей области пограничного слоя. В процессе деформирования часть пор сжимается, испытывая расклинивающее действие со стороны жидкости, а другая расширяется. Вследствие кавитации равнодействующая сил порового давления смазочного материала избыточна, что определяет несущую способность смазочных слоев при несовершенной смазке.

Развиваемая подъемная сила определяется функцией пористости третьего тела  $\mu(V)$ , вязкостью смазочного материала  $\mu$ , интенсивностью скоро-

сти его деформации (пропорциональной скорости скольжения) и скоростью разрыхления пограничного слоя. Разрыхление, увеличивая объем микропор, снижает скорость сжатия сжимаемых и увеличивает скорость расширения расширяемых микропор, что снижает развиваемое в них расклинивающее гидростатическое давление. Отсюда следует важный вывод: фрикционное разрушение на стадиях как разрыхления, так и диспергирования материала влияет на условия смазывания фрикционного контакта. Это устанавливает органическую взаимосвязь процессов, называемых трением, изнашиванием и смазкой.

Взаимосвязь износа вследствие разрушения материала пограничного и подповерхностного слоев иллюстрируется на примере пространственной схемы фрикционного контакта на рис. 5.1, а под действием нагрузки  $P_0$ . Шероховатость моделируется системой  $M$  цилиндров произвольной высоты, но одинакового радиуса. Фрикционный контакт ограничен контурной областью  $\Omega$ . Поверхностный износ вследствие разрушения материала в пограничном слое (износ торцов цилиндров) в соответствии с (5.8) описывается уравнением

$$I = \frac{d\omega_y}{dt} = K v_j^m P_j^n. \quad (5.9)$$

Подповерхностное разрушение (разрушение цилиндров) с точки зрения теории разрыхления может быть описано уравнением Коффина—Менсона. Аппроксимировав это уравнение экспонентой, получим, что время до разрушения задается соотношением

$$t = \begin{cases} \frac{1}{A} \ln \frac{P_B - P_P}{P_J - P_P} & \text{при } P_P < P_J < P_B; \\ 0 & \text{при } P_J \geq P_B; \\ \infty & \text{при } P_J \leq P_P, \end{cases} \quad (5.10)$$

где  $P_B$  — нагрузка статического разрушения структурного элемента;  $P_P$  — нагрузка на столбик, соответствующая его пределу выносливости;  $A$  —

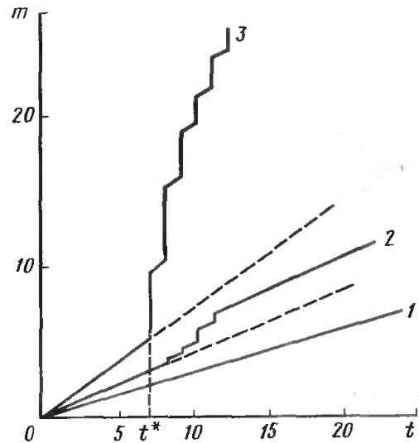


Рис. 5.9. Зависимость количества диспергированного при трении материала  $m$  от времени  $t$ ;  $t^*$  — начало «лавинного» подповерхностного разрушения

константа разрушения. Увеличением объемов столбиков вследствие разрыхления подповерхностного слоя пренебрегали. Суммарную скорость разрушения оценивали по формуле

$$\dot{m}_p = \frac{1}{t} \left( \sum_{i=1}^M \int_0^t \frac{d\omega_i}{d\tau} d\tau + Nh \right), \quad (5.11)$$

где  $N$  — количество разрушенных столбиков высотой  $h$  за время  $t$ .

На рис. 5.9 изображены зависимости разрушенного объема от времени. В зависимости от свойств фрикционного контакта и начальных условий изнашивание может развиваться по следующим трем схемам, воспринимаемым как стационарный поток отделения частиц износа вследствие только поверхностного разрушения (кривая 1), как квазипериодический, характерный для постоянной составляющей износа вследствие разрушения материала в пограничном слое с наложением периодической составляющей, обусловленной разрушением подповерхностного слоя (кривая 2), и наконец, как нерегулярный процесс

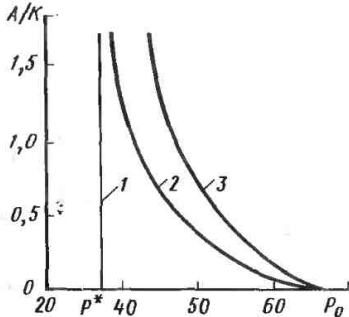


Рис. 5.10. Области поверхностного (1), смешанного (2) и подповерхностного (3) разрушений в пространстве параметров  $A/K - P_0$

отделения микроскопических фрагментов разрушения подповерхностного слоя (кривая 3), ассоциируемый часто с заеданием. На рис. 5.10 изображены зависимости нагрузки  $P_0$  перехода от одной из перечисленных схем фрикционного разрушения к другой. Цифрами 1—3 изображены области проявления 1—3-й схем в зависимости от соотношения параметров разрушения в пограничном и подповерхностном слоях. На рис. 5.11 изображены обобщенные результаты анализа дисперсионного состава частиц износа при трении подшипниковых материалов в диапазонах нагрузок  $\Delta P_1 < \Delta P_2 < \Delta P_3$ . Периодическое появление второй моды в распределении размеров частиц износа свидетельствует о включении механизма подповерхностного разрушения.

Несмотря на различную природу, масштабы и причины разрушения в пограничном и подповерхностном слоях оказывают сильное влияние друг на друга. Даже если доля общей потери массы, обусловленная одним из них, невелика, оказываемое им на другой регулирующее действие может быть существенным. Процессы поверхностного износа выступают в роли механизма фрикционной приспособляемости, выравнивающего распределение давления по поверхности.

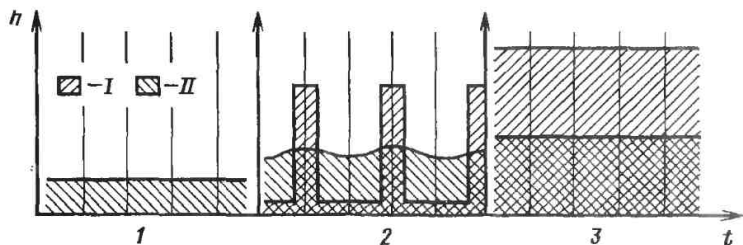


Рис. 5.11. Зависимость дисперсионного состава частиц износа от времени при легких (1), средних (2) и тяжелых (3) нагрузках:

I — частицы износа более 10 мкм; II — частицы износа менее 5 мкм

## 5.2. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ

Вопросам физики и химии процессов изнашивания в настоящее время посвящено много монографий [5.3, 5.6, 5.7 и др.]. В основном их проявления сводятся к масштабному эффекту.

Первый масштабный уровень — пограничный слой. Его толщина определяется субмикроструктурой трущихся материалов и имеет субмикроскопические масштабы. Масштабный эффект здесь имеет много проявлений, которые могут быть сведены к механическому, собственному масштабному и поверхностному.

Механический масштабный эффект обусловлен тем, что в силу микроскопических размеров очагов деформаций даже при весьма малых скоростях относительного скольжения тел локальные скорости пластических деформаций чрезвычайно велики (порядок  $10^3$ — $10^6$  с<sup>-1</sup>). Такие значения деформаций и скоростей деформаций включают высокоскоростные микромеханизмы деформирования и разрушения. Собственный масштабный эффект определяется ролью дефектов структуры. В общем случае сопротивление пластическому течению может быть представлено в виде [5.8]  $k = K(\tau_r; \tau_{п1}; \tau_6; \tau_{д1})$ , где  $\tau_r$  — напряжение работы источника дислокаций;  $\tau_{п1}$  — напряжение, связанное с действием сил зеркального изображения, препятствующее движению дислокаций в глубь материала от поверхности;  $\tau_6$  —

напряжение, связанное с собственным барьерным эффектом поверхности;  $\tau_{д1}$  — напряжение, связанное со взаимодействием дислокаций. Собственный масштабный эффект при трении обусловлен эффектом как малых размеров пластических областей ( $\tau_{д1}$ ), так и их расположением в поле влияния поверхности ( $\tau_6$ ).

В общем случае протекание микропластической деформации в приповерхностном слое происходит в две стадии. На первой начальной стадии аномальное поведение выражается в облегченном образовании и движении дислокации в приповерхностных слоях по сравнению с объемом. В результате вблизи поверхности образуется слой с повышенной плотностью дислокаций, препятствующий выходу полос скольжения на поверхность и тормозящий развитие в объеме пластической деформации, повышая тем самым напряжение течения.

Облегченные условия зарождения и движения дислокаций вблизи поверхности на начальном этапе деформирования приводят к более высоким скоростям и степени деформационного упрочнения. Сопротивление деформирования в окрестности границы  $\Gamma$  контакта (см. рис. 5.1) оказывается гораздо выше наблюдаемых в объеме. По мере расширения деформированной зоны релаксационные процессы облегчаются, что приводит к снижению напряжений пластического течения. В результате вблизи поверхности формируется прочная дислокационная сетка с высокой плотностью дефектов. При периодических нагрузках, харак-



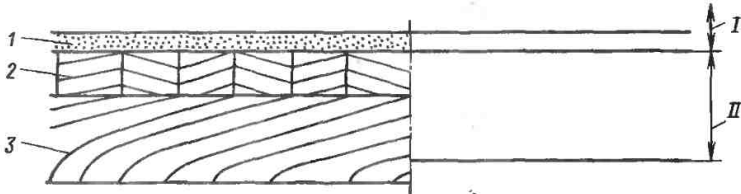


Рис. 5.12. Схемы физического (слева) и механического (справа) состояний фрикционного контакта:

1 — ПС; 2 — слой вторичной структуры; 3 — текстурированный подслоя; I — часть материала, захваченная пограничным слоем при трении; II — подповерхностный слой

терных для трения, в приповерхностный слой могут «засасываться» вакансии, которые в моменты сжатия конденсируются в дислокационные петли, упрочняющие материал у поверхности. Однако существуют и другие точки зрения на природу пластической деформации вблизи поверхности.

Собственный масштабный эффект приводит к сильной зависимости состояния поверхностей и процессов их деформирования от масштабов третьего тела и влияния окружающей среды. Перечисленные особенности и рассмотренные выше ротационные эффекты способствуют интенсификации массопереноса и химических реакций, что приводит к чрезвычайно высоким градиентам состояний материалов в пределах третьего тела.

Второй масштабный уровень задается подповерхностным слоем, нагруженность которого зависит от его механических свойств и распределения внешних сил. Толщина его значительно превосходит толщину поверхностного слоя и имеет микроскопические масштабы. Поэтому перечисленные компоненты масштабного эффекта проявляются в нем в значительно меньшей степени. Характерные временные масштабы параметров эволюции состояния подповерхностного слоя макроскопические.

Эволюция его свойств контролируется окислительными процессами, а также процессами структурного и деформационного упрочнения. Пластическая деформация поверхностного слоя и ротационные эффекты активируют его состояние, в результате чего скорости окислительных реакций

и диффузионных процессов резко возрастают, а условия фазовых превращений облегчаются. В результате образуются специфичные высокофрагментированные вторичные структуры. Толщина вторичных структур составляет доли или единицы микрометра.

Вторичные структуры, возникающие вследствие размазывания конгломератов молей и фрагментов разрушения, часто имеют резкую границу с нижележащим материалом, что во многих случаях предопределяет ее разрушение по схеме отслаивания. На рис. 5.12 приведена структурная схема фрикционного контакта. Физические свойства фрикционного контакта во многом определяют движение вещества в пограничном слое. Смена масштабов фрикционного разрушения, а также структурного состояния вещества поверхностных слоев происходит монотонно, следствием чего является монотонность протекания процессов изнашивания. Комбинации параметров внешних воздействий, соответствующих смене определяющих процессов изнашивания, называют критическими параметрами (точками). Наиболее распространенной является комбинация: нагрузка, скорость, температура (критерий  $Pv\theta$ ).

Монотонное увеличение нагрузки при прочих постоянных условиях позволяет выделить две критические точки, характеризующие смену квазистационарного разрушения; квазипериодического (усталостного) подповерхностного разрушения; квазистационарного подповерхностного разрушения, классифицируемого как адгезионное изнашивание. Недопу-

стимой формой адгезионного изнашивания является заедание.

Температура  $\vartheta$  является важнейшим показателем условий трения. Возникая в результате трения, температура изменяет свойства поверхностных слоев. При определенных значениях градиентов температуры, а соответственно и свойств материалов, в окрестности пограничного слоя происходит локальное ослабление связи вдоль границы контакта, снижается напряжение течения пограничного слоя и уменьшаются масштабы пограничного слоя. Соответственно уменьшается скорость разрыхления третьего тела, а скорость залечивания дефектов возрастает. В результате скорость изнашивания значительно уменьшается.

С дальнейшим возрастанием скорости скольжения трущихся тел распределение температуры становится более равномерным, и в движение вовлекаются глубинные слои. Таким образом, монотонному увеличению поверхностной температуры соответствуют две критические точки. Фрикционный нагрев в первую очередь определяется нагрузкой  $P$  и скоростью скольжения  $v$ . В качестве диссипативной характеристики третьего тела используют коэффициент трения  $f$ . Координаты критических точек определяют по соответствующим значениям критерия  $fPv$ .

Практически критических точек по параметру  $\vartheta$  больше. Важные значения имеют критические значения температуры  $\vartheta_{кр}$  десорбции граничных слоев смазочного материала, сопровождаемые резким усилением границы контакта, увеличением масштабов третьего тела и скорости его разрушения. Другой критической точкой является температура химической модификации  $\vartheta^*$ , с превышением которой перестройка структуры поверхностных слоев определяется электрохимическими реакциями.

Пластическая деформация снижает значения давления и температуры фазовых переходов. Это предопределяет относительно высокую вероятность изменения структуры вследствие фазовых изменений при трении и соответ-

ственно появлению новых критических точек.

Типичными являются критические точки образования «белых слоев», некоторых видов вторичных структур и т. д. Весьма распространенным в довольно широком диапазоне внешних воздействий является окислительное изнашивание, ограниченное снизу и сверху критическими значениями параметров внешних воздействий, называемых по терминологии Б. И. Костецкого условием перехода от схватывания I рода к окислительному изнашиванию и от последнего к схватыванию II рода (тепловому схватыванию).

Воздействие скорости скольжения в основном сводится к фрикционному нагреву. Источником теплоты является пограничный слой, что обуславливает появление градиентов температуры, направленных по нормали от поверхности трения. Поэтому критические точки по параметру «скорость», по существу, соответствуют температурным критическим точкам.

Другим проявлением скорости являются возбуждаемые в результате движения в пограничном слое вибрации. Вибрации, налагаемые от работы механизма, существенно влияют на флуктуации поверхностных сил. Поэтому значения критических точек зависят от динамических характеристик механизма или испытательной машины. Изменением жесткости всего лишь одного, даже стационарно нагруженного, элемента механизма можно существенно повлиять на работоспособность сопряжения, а соответственно, и на значения вышеупомянутых критических точек.

Вследствие взаимосвязи процессов массопереноса при трении, структурных изменений поверхностных слоев и их чувствительности к внешним воздействиям точность прогнозирования значений критических точек, как правило, основанного на экспериментальных данных, применительно к конкретным механизмам часто довольно низкая.

## 5.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ

К настоящему времени процессы изнашивания в чрезвычайно широком спектре внешних условий, в которых находятся узлы трения при эксплуатации, сведены к ряду классов, внутри которых закономерности их изнашивания приемлемо устойчивы. Ниже приведены характерные для практики машиностроения классы видов изнашивания.

### 5.3.1. Адгезионное, окислительное и коррозионно-механическое изнашивание

Адгезионное, окислительное и коррозионно-механическое изнашивание возникает в узлах трения машин и механизмов, работающих обычно в контролируемых условиях. Обычно это достигается использованием фильтров, уплотнений, соблюдением определенных требований эксплуатации и т. д.

Адгезионное изнашивание проявляется при высокой нагруженности сопряжений. (Нагруженность сопряжения определяется не столько нормальными, сколько касательными силами, и поэтому зависит от условий смазывания.) Вследствие локальных разрушений смазочного слоя граница фактического контакта тел становится «сильной» (см. п. 5.1), что приводит к увеличению флуктуации микронапряжений и, как следствие, износа.

Адгезионное изнашивание опасно еще и тем, что флуктуации микронапряжений могут достичь макроскопических размеров и соответственного увеличения зоны разрушения. Проявляется это в резком возрастании потерь на трение, фрикционного разогрева и износа. Увеличение толщины пограничного слоя вследствие разрушения может превзойти зазор в сопряжении и привести сопряжение к заклиниванию и поломке.

Окислительное изнашивание возникает при умерен-

ных условиях эксплуатации и отсутствии агрессивных сред или катализирующих условий. Диапазон скоростей изнашивания при окислительном изнашивании велик, однако для него характерен и довольно широкий диапазон внешних нагрузок на сопряжение, при котором оно сохраняет приемлемые для практики значения. Повышенные температуры способствует увеличению скорости изнашивания.

Коррозионно-механическое изнашивание является наиболее распространенным при эксплуатации машин и характеризуется образованием вторичных структур вследствие химических или электрохимических реакций.

Целенаправленное управление этими реакциями (например, введением в масла присадок) является основным путем повышения износостойкости сопряжений.

### 5.3.2. Эрозионное газо- и гидроабразивное изнашивание

Газо- и гидроабразивное изнашивание имеет общий признак — поверхностное разрушение под действием потока твердых частиц. Они могут быть как инородные частицы, так и фрагменты разрушения.

Под абразивным изнашиванием понимают изнашивание, при котором давление абразивной частицы на материал осуществляется за счет внешних сил, на нее действующих. Это имеет место, например, при попадании абразивных частиц в контакт двух трущихся тел, когда разделяющие поверхности частицы воспринимают внешнюю нагрузку на сопряжение, либо при трении о грунт, когда сила прижатия частицы определяется давлением, оказываемым массой частиц деформируемой части грунта и т. д.

Фрикционное разрушение при абразивном изнашивании подчиняется описанному в п. 5.1 кинетическим уравнениям с той лишь разницей, что абразивные частицы попадают в зону трения извне, а не в результате фрикционного разрушения. При абразивном изнашивании скорости фрикцион-

ного разрушения и потери массы близки по значениям. Поэтому скорость изнашивания велика и, как правило, вторичные структуры не образуются, а влияние внешней среды проявляется в той степени, в какой она влияет на разрушение материала. Наиболее общим свойством процессов абразивного изнашивания является установленная М. М. Хрущовым и М. И. Бабичевым линейная связь интенсивности изнашивания с твердостью

$$I = CHV.$$

Коэффициент  $C$  в общем случае не является константой и подчиняется закономерностям «старения».

Под эрозийным изнашиванием понимают изнашивание в результате омыwania изнашиваемого тела жидкостным или газовым потоком. Наиболее распространенными являются газо- и гидроабразивные подклассы эрозийного изнашивания абразивными частицами, увлекаемыми газовым или жидкостным потоками. Соответственно скорость изнашивания в первую очередь определяется кинетической энергией частиц, углом их соударения с поверхностью и концентрацией в потоке. Определенные затруднения при оценке углов атаки и скорости соударения вызваны тем, что при омывании тела потоком вблизи его поверхности возникает пограничный слой, который может быть турбулизированным. Погрешность оценки этих параметров, связанная с пренебрежением пограничным слоем, определяется соотношением масс абразивных частиц и внутренним трением омывающей среды, а также геометрией омываемой поверхности.

При эрозийном изнашивании среда оказывает сильное влияние на износостойкость. Пластическая деформация поверхностного слоя может быть значительной. Возможно образование вторичных структур.

Кавитационное изнашивание возникает тогда, когда в пограничном слое потока жидкости и омываемого тела наряду с зонами повышенного давления возникают зоны разрежения. Если давление падает ниже давления насыщенных паров

жидкости, в последней образуются газовые полости и нарушается сплошность потока. Попадая в зоны высоких давлений, эти полости схлопываются, вызывая эффекты гидравлических ударов. Возникающие флуктуации давлений вблизи поверхности интенсифицируют процессы ее разрушения и химические реакции.

Основными путями борьбы с кавитационным изнашиванием являются ламинаризация пограничного слоя, подбор материалов и введение добавок (например, эмульгаторов) в рабочую жидкость.

#### 5.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗНАШИВАНИЯ

Силовое взаимодействие трущихся тел происходит на поверхности контакта  $\Pi_K$  с номинальной площадью  $A_a$ . Область контакта, перемещаясь в процессе скольжения элементов пары трения по их поверхности, ометает на каждой из них участок  $\Pi_{Ti}$  с площадью  $A_{Ti}$  ( $i = 1, 2$ ), называемый поверхностью трения. Когда  $K_{вз} \neq 1$ , то  $A_{T1} \neq A_{T2}$  и  $A_{Ti} \geq A_a$  (рис. 5.13).  $A_a$  — параметр сопряжения,  $A_{Ti}$  — параметр отдельного элемента. Форма и размеры поверхности контакта и поверхностей трения зависят от геометрии и кинематики элементов сопряжения. При изучении изнашивания в качестве независимых переменных наряду с продолжительностью трения  $t_T$  выступают также путь  $L_T$  и работа  $W_T$  трения. Если обозначить через  $v_1, v_2$  — абсолютные скорости движения тел в точке контакта,  $v_{ск} = |v_1 - v_2|$  — скорость скольжения,  $F$  — силу трения, то перечисленные величины будут связаны между собой соотношениями:

$$dL_T = v_{ск} dt_T = \frac{1}{F} dW_T, \quad (5.12)$$

а при постоянстве силы трения и скорости скольжения:  $L_T = v_{ск} t_T = W_T/F$ . Далее всюду, где для изложения конкретный вид параметра наработки не играет роли, для обозначения независимой переменной будет использоваться символ  $\tau$ .

Линейный износ детали  $h(\tau)$  за наработку  $\tau$  определяется как изменение ее линейного размера, измеренного по направлению нормали к поверхности трения. Линейный износ детали есть функция не только ее наработки  $\tau$ , но и при каждой фиксированной наработке координат поверхности трения  $h = h(x, y, \tau)$ . Если в точке поверхности трения с координатами  $x, y$  линейный износ к моменту  $\tau$  составил  $h(x, y, \tau)$ , то объем, унесенный с элементарной площадки  $dA_T(x, y) = dx dy$ , составит  $dQ = h(x, y, \tau) dx dy = h dA_T$ , а общий износ со всей поверхности  $\pi_T$

$$Q(\tau) = \int_{\pi_T} \int h(x, y, \tau) dx dy = \int_{\pi_T} h dA_T. \quad (5.13)$$

Величину  $h(x, y, \tau)$  можно рассматривать как интенсивность распределения изношенного объема материала по поверхности трения. Если материал способен разрыхляться или уплотняться в процессе истирания, то объемная плотность его в данной точке поверхности трения есть также функция наработки:  $\rho = \rho(x, y, \tau)$ . В этом случае плотность распределения изношенной массы материала к моменту  $\tau$

$$m(x, y, \tau) = \int_0^{\tau} \left[ \frac{\partial h(x, y, u)}{\partial u} \times \rho(x, y, u) + \frac{\partial \rho(x, y, u)}{\partial u} \times h(x, y, u) \right] du, \quad (5.14)$$

потеря массы с элементарной площадки

$$dM(x, y, \tau) = m(x, y, \tau) dx dy = m dA_T,$$

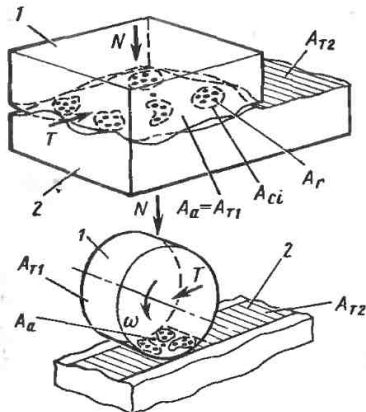


Рис. 5.13. Номинальная площадь контакта  $A_n$  сопряжения и площади трения  $A_{T1}$  и  $A_{T2}$  деталей пары трения: 1, 2 — детали кинематической пары в контакте

а массовый износ со всей поверхности трения

$$M(\tau) = \int_{\pi_T} \int m(x, y, \tau) dx dy = \int_{\pi_T} m dA_T. \quad (5.15a)$$

Для однородного материала, не изменяющего свою объемную плотность в процессе трения\*,  $\rho(x, y, \tau) = \rho = \text{const}$ ,

$$m(x, y, \tau) = \rho h(x, y, \tau); \quad M(\tau) = \rho Q(\tau). \quad (5.15б)$$

Если при этом распределение линейного износа по поверхности трения равномерно, то для фиксированной

\* Сказанное справедливо для значений износа, достаточно больших по сравнению со значением параметра  $R_{\text{max}}$  микрогеометрии. В противном случае следует учитывать повышенную пористость ПС, возникающую как за счет его шероховатости, так и за счет разрыхления материала в состоянии предразрушения.

наработки  $h(x, y, \tau) = h(\tau) = \text{const}$

$$h = \frac{Q}{A_T} = \frac{M}{\rho A_T}. \quad (5.15в)$$

При неравномерном распределении линейного износа (5.15 в) определяет его среднее по поверхности трения значение  $h = \bar{h}$  на основе результатов измерений объема или массы изношенного материала.

Далее в случаях, когда конкретный вид количественной характеристики износа не имеет значения, будет использоваться общий символ  $H$ .

Под износом сопряжения понимается изменение геометрических параметров, определяющих взаимное положение контактирующих тел при работе узла трения. В простейшем случае линейный износ сопряжения  $h_{1-2}$  определяется при фиксированном взаимном положении элементов 1—2 пары трения как сумма их линейных износов, измеренных в точке касания по направлению общей нормали к поверхности контакта  $n_K$ :

$$h_{1-2} = h_1 + h_2. \quad (5.16)$$

Другие параметры, определяющие износ сопряжения (например, взаимный перекос осей вала и втулки в подшипнике), вычисляются по результатам измерения линейного износа сопряжения в различных точках поверхности контакта и в различных положениях сопряженных тел. Обычно конструкция пар трения допускает и прямое измерение износа сопряжения в собранном состоянии. В ряде случаев рассматривают интегральные характеристики износа сопряжения — суммарный объем или массу изношенного материала:

$$H_{1-2} = H_1 + H_2. \quad (5.16а)$$

Введенные выше количественные характеристики износа суммируются по мере роста наработки сопряжения, т. е. являются характеристиками экстенсивными.

Важную группу параметров, используемых для количественного описания процесса, образуют удельные (на единицу поверхности трения  $\pi_T$ ) характеристики потока материала, уно-

симого при фрикционном разрушении за единицу наработки  $\tau$ :

$$I_\tau^H = \frac{dH}{A_T d\tau} = \kappa \frac{dH}{A_a d\tau}, \quad (5.17)$$

здесь  $\kappa = A_a/A_T$ . При наработках  $t_T$ ,  $L_T$  и  $W_T$  (5.17) определяет соответственно

скорость изнашивания

$$I_t^H = \kappa \frac{dH}{A_a dt_T}; \quad (5.17а)$$

интенсивность изнашивания

$$I_L^H = \kappa \frac{dH}{A_a dL_T}; \quad (5.17б)$$

энергетический показатель изнашивания

$$I_W^H = \kappa \frac{dH}{A_a dW_T}. \quad (5.17в)$$

Обратные (5.17) величины  $I_\tau^H = 1/I_\tau^H$  называются износостойкостью по соответствующей наработке  $\tau$  ( $t_T$ ,  $L_T$  или  $W_T$ ). Взаимосвязь между этими параметрами определяется взаимосвязями (5.12) между параметрами наработки и (5.15) между количественными характеристиками износа. Так, при однородности истираемого материала имеем согласно (5.15в) соотношения между линейной, объемной и массовой удельной плотностями потока изношенного материала

$$I_\tau^{\bar{h}} = I_\tau^Q = \frac{1}{\rho} I_\tau^M = \frac{d\bar{h}}{d\tau}, \quad (5.18)$$

где  $\bar{h}$  — средний по поверхности трения линейный износ.

В процессе эксплуатации качество функционирования трибосопряжений в первую очередь зависит от изменения линейных размеров их деталей, поэтому интенсивность линейного изнашивания  $I_\tau^{\bar{h}}$  является наиболее распространенной и принимается за базовую характеристику (в дальнейшем индексы при ней опускаются). Ее связи со скоростью и энергетическим показателем линейного (объемного) изнашивания определяются соотношениями:

$$I = \kappa \frac{dh}{dL_T} = \kappa \frac{dQ}{A_a dL_T} = \\ = \frac{1}{v_{СК}} I_t = F I_W. \quad (5.19)$$

Удобство интенсивности линейного изнашивания (и соответственно линейной износостойкости по пути трения  $I_L$ ) как технической характеристики процесса состоит также в том, что в отличие от других она безразмерна и ее значение не зависит от системы единиц определяющих величин.

При соответствующих обозначениях входящих величин определения (5.18), (5.19) сохраняют форму написания как для отдельных деталей, так и для сопряжения в целом. В первом случае под  $h$  следует понимать значение линейного износа некоторой детали в данной точке поверхности трения  $h_i$  при  $\tau = \tau_i$  ( $i = 1, 2$ ). Во втором случае дополнительно вводится понятие наработки сопряжения  $\tau_{1-2}$ , под которым понимают соответственно время работы сопряжения  $t_{1-2}$ , путь смещения  $dL_{1-2} = v_{СК} dt_{1-2}$  и работу трения  $dW_{1-2} = F dL_{1-2}$ . Тогда, исходя из (5.16), интенсивность линейного изнашивания сопряжения по некоторой наработке  $\tau$  можно представить в виде

$$I_{1-2}^{\tau} = \frac{dh_{1-2}}{d\tau_{1-2}} = \frac{I_1^{\tau} d\tau_1 + I_2^{\tau} d\tau_2}{d\tau_{1-2}} = \\ = \kappa_1 I_1^{\tau} + \kappa_2 I_2^{\tau}, \quad (5.20)$$

здесь  $\kappa_1 = d\tau_1/d\tau_{1-2}$ ,  $\kappa_2 = d\tau_2/d\tau_{1-2}$  — коэффициенты скольжения, отражающие долю от общего времени работы сопряжения, приходящуюся на время пребывания в контакте некоторой фиксированной точки поверхности трения данной детали. Для широко распространенных пар плоскопараллельного движения, ступенчатых или вращательных, эти коэффициенты определяются геометрическими характеристиками сопряжения:  $\kappa_i \approx A_a/A_{Ti}$  ( $i = 1, 2$ ).

### 5.5. КЛАССЫ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Анализ структуры отказов продукции машиностроения показывает, что надежность и работоспособность машин в целом зачастую определяется

работоспособностью их фрикционных сопряжений. Для объективного контроля и прогнозирования состояния узлов трения на всех стадиях их жизненного цикла необходимо введение нормативных унифицированных показателей триботехнического качества. Комплексным и наиболее универсальным показателем является интенсивность линейного изнашивания или износостойкость (5.17) сопряжения и его деталей (материалов) при испытаниях в регламентированном для каждого типа изделий стандартном режиме.

Значения износостойкости на практике колеблются в широких пределах  $I = 10^3 \div 10^{13}$ . Поэтому естественной для нее является логарифмическая шкала. Для отнесения изделия к определенному классу его износостойкость представляют в показательной или логарифмической форме  $I = \alpha_K 10^K$ ,  $\lg I = K + \lg \alpha_K$ , где  $1 \leq \alpha_K < 10$ , соответственно мантисса логарифма  $0 \leq \lg \alpha_K < 1$ , а характеристика логарифма  $K$  — целое число, обозначающее номер класса износостойкости. Устанавливаются десять классов износостойкости — от 3 до 12 класса включительно (табл. 5.2). Нижняя граница  $I$  в каждом классе не входит в его состав.

### 5.2. Классы износостойкости

К	И	К	И
3	$10^3-10^4$	8	$10^8-10^9$
4	$10^4-10^5$	9	$10^9-10^{10}$
5	$10^5-10^6$	10	$10^{10}-10^{11}$
6	$10^6-10^7$	11	$10^{11}-10^{12}$
7	$10^7-10^8$	12	$10^{12}-10^{13}$

### 5.3. Разряды износостойкости

Разряд износостойкости	$\alpha_K$	$\lg \alpha_K$
1	1,0—1,59	0—0,2
2	1,59—2,51	0,2—0,4
3	2,51—3,98	0,4—0,6
4	3,98—6,31	0,6—0,8
5	6,31—10,0	0,8—1,0

**5.4. Износостойкость распространенных трибоспрямлений [5.9]**

Узел трения; тип машины	Изнашиваемая деталь; материал	Условия изнашивания		Интенсивность изнашивания $I$	Класс износостойкости КИ
		Контртело; материал	Параметры нагружения; среда		
Цилиндро-поршневая группа двигателя автомобиля	Поршневое кольцо; чугун серый Гильза цилиндра; чугун серый	Гильза цилиндра; чугун серый Поршневое кольцо; чугун серый	$v_{ск} = 7 \div 20$ м/с	$10^{-12} - 10^{-11}$	КИ 12—11
			Жидкая смазка, масло М10Г1	$10^{-11}$	КИ 11
Цилиндро-поршневая группа компрессора	Поршневое кольцо; графит (АО—1500)	Гильза цилиндра; чугун серый	Влажная двуокись углерода; $q = 0,4$ МПа $v_c = 3$ м/с $g = 8$ МПа $v_c = 1,2$ м/с	$5 \cdot 10^{-11}$  $5 \cdot 10^{-10}$	КИ 11/4  КИ 10/4
Токарный станок	Направляющие; чугун СЧ 21-40	Салазки суппорта; чугун СЧ 21-40	$q = 0,05 \div 0,5$ МПа $v_c = 0,01$ м/с; жидкая смазка	$10^{-10} - 10^{-9}$	КИ 10—9
Колодочный тормоз	Колодка тормозная; фрикционная пластмасса	Бандаж колеса или барабан; специальный чугун	$q = 1$ МПа $v_c = 10$ м/с	$10^{-7} - 10^{-6}$	КИ 7—6
Дисковый тормоз	Тормозной элемент; фрикционная пластмасса	Тормозной диск; чугун легированный	$q = 2,5$ МПа $v_c = 25$ м/с	$10^{-10} - 10^{-6}$	КИ 10—6
Камерный тормоз	Тормозная накладка; фрикционная пластмасса	Барабан; сталь углеродистая	$q = 1$ МПа $v_c = 15$ м/с	$10^{-9} - 10^{-6}$	КИ 9—6



Подшипник скольжения	Вал; сталь с твердым смазочным покрытием (ТСП) типа ВНИИНП	Втулка; сталь углеродистая	$10^{-8}$ МПа, температура 373 К $q \approx 20$ МПа $v_c = 0,5$ м/с	$10^{-8}-10^{-7}$	КИ 8-7
Зубчатые передачи мелко модульные	Шестерня; металло-керамика ВАМК	Зубчатое колесо; металло-керамика типа ВАМК	Вакуум $10^{-8}$ ; температура 473 °С	$10^{-8}-10^{-7}$	КИ 8-7
	Шестерня; сталь с ТСП типа ВНИИНП	Зубчатое колесо; сталь с ТСП типа ВНИИНП	$q = 1$ ГПа $v_c = 1$ м/с	$10^{-6}-10^{-5}$	КИ 6-5
Торцовые уплотнения скважного насоса	Манжетные уплотнения; МГФФ	Сталь углеродистая, легированная	Вода; $q = 1$ МПа $v_c = 3$ м/с	$5 \cdot 10^{-10}$	КИ 10/4
	2П-1000-Ф	Силицированный графит	$q = 5$ МПа $v_c = 3$ м/с	$5 \cdot 10^{-11}$	КИ 11/4
Резцы (точение на токарном станке)	Твердый сплав ВК-8	Заготовка, сталь углеродистая	$v_c = 2$ м/с $q = 400$ МПа	$5 \cdot 10^{-8}$	КИ 8/4
	Минералокерамика ЦМ-332		СОЖ	$5 \cdot 10^{-8}$	КИ 6/4
Материальный инструмент	Калибр-скоба с измерительным наконечником из сплава марок ВК	Вал; сталь ШХ15	$q = 40$ МПа $v_c$ — мала	$7 \cdot 10^{-11}$	КИ 11/5
	Резьбовой калибр; сталь У10А термообработанная	Гайка; чугун СЧ 12-28		$2 \cdot 10^{-10}$	КИ 10/2

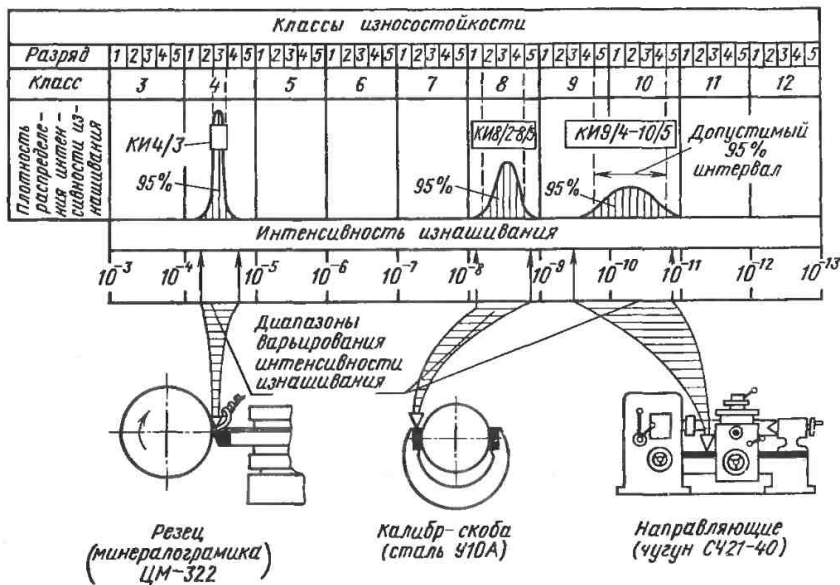


Рис. 5.14. Шкала износостойкости изделий серийного и массового производства

Каждый класс износостойкости разбивается на пять разрядов. Отнесение к определенному разряду производят в соответствии с табл. 5.3.

Для отнесения к классу износостойкости партии однотипных изделий по результатам испытаний выборки заданного объема оценивают  $P$  %-ный допустимый (толерантный) интервал рассеяния результатов ( $P$  — требуемая доля исследуемой совокупности, попадающая в допустимый интервал, выбирается в зависимости от степени ответственности решения равной 0,95 или 0,99). Границы этого интервала, округленные до границ ближайшего разряда, принимаются в качестве характеристики партии (рис. 5.14).

Для обозначения класса износостойкости устанавливается буквенно-цифровой символ, в котором первые два места занимают прописные буквы КИ, далее следует обозначение номера класса арабскими цифрами от 3 до 12 и после косой черты — арабские цифры от 1 до 5, соответствующие номеру разряда в данном классе. Так, например, КИ 10/4 обозначает чет-

вертый разряд десятого класса износостойкости, что соответствует диапазону  $3,58 \cdot 10^{10} \leq I < 6,31 \cdot 10^{10}$ . В тех случаях, когда необходимо указать диапазон износостойкости, выходящий за границы одного класса или разряда в данном классе, то после буквенных символов через тире указываются два цифровых обозначения, соответствующих заданному интервалу. Так, КИ 9/2—10/4 означает интервал износостойкости между вторым разрядом девятого класса и четвертым разрядом десятого, т. е.  $1,59 \times 10^{10} \leq I < 6,31 \cdot 10^{10}$ .

Типичные значения интенсивности изнашивания, режимы трения ряда деталей распространенных сопряжений и соответствующие им классы износостойкости приведены в табл. 5.4.

На основе приведенной шкалы износостойкости Госстандарт СССР готовит выпуск рекомендаций «Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения», в которых при сохранении общей структуры может отличаться порядок нумерации классов и разрядов износостойкости.

## 5.6. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗНОСА ПРИ УСТАЛОСТНОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИЯХ

Основной задачей количественной теории износа твердых тел является, во-первых, формулировка аналитических моделей процесса на базе современных физических представлений о механизмах фрикционного разрушения материалов и, во-вторых, разработка с учетом этих моделей методов расчетной оценки износостойкости конкретных триботехнических конструкций с использованием определенного набора исходных данных о свойствах материалов пары трения, геометрии контактирующих тел, режима нагружения, скорости и т. д. Расчетные зависимости процесса изнашивания являются необходимой основой для решения широкого круга актуальных технических задач, в частности, таких, как:

целенаправленное создание новых материалов пар трения (разработка рецептов и выбор технологических режимов для получения материалов, оптимальных по износостойкости);

обоснованное назначение материалов и конструкций деталей для проектируемого сопряжения по заданным условиям его работы;

расчет показателей надежности узла трения на стадии его проектирования;

планирование материально-технического снабжения и ремонтного производства проектируемых изделий;

разработка программ ускоренных испытаний на износ;

прогнозирование износостойкости механизма при изменении условий его эксплуатации и т. п.

Таким образом, расчет на износ наряду с расчетами на прочность, жесткость и усталостную долговечность призван стать важной областью инженерных расчетов в машиностроении.

В основу теории фрикционной усталости как механизма изнашивания при трении положены следующие фундаментальные факты экспериментальной трибологии [5.6, 5.7, 5.10].

1. Дискретный характер фактического поля сил контактного взаимодействия, возникающий как прямое следствие микро- и макрогеометрических несовершенств строения ПС реальных тел, а также микронеоднородности физических свойств приповерхностных слоев.

2. Наличие в ТС стационарного режима изнашивания, занимающего во условиях нормальной работы основную долю ресурса сопряжения и характеризующегося постоянством во времени всех интенсивных параметров процесса.

3. Существование в процессе изнашивания критических точек (см. п. 5.1).

4. Усталостный характер фрикционного разрушения. Систематические эксперименты, предпринятые с единичными инденторами, позволили установить основные факты элементарного разрушения, состоящие в следующем. В широком практически важном диапазоне внешних условий нагружения фрикционное взаимодействие не приводит к прямому разрушению. Элементарный акт поверхностного разрушения проявляется как процесс порогового типа с латентным периодом, длительность которого намного больше периода между единичными фрикционными взаимодействиями и возрастает с уменьшением нагрузки. Эти и ряд других, более тонких исследований, дали основания для применения к интерпретации механизма износа феноменологических методов описания циклической прочности и соответствующих им кинетических моделей деформационного, энергетического или иного типа накопления повреждений в ПС. Таким образом, концепция фрикционной усталости — четвертый краеугольный момент теории.

Однако перечисленные исходные положения теории фрикционной усталости являются еще достаточно общими и позволяют развивать на их основе различные подходы к решению задачи. На сегодня существует несколько версий, реализующих модель усталостного механизма разрушения фрикционного контакта. Основные различия между этими моделями за-

ключаются в выборе критерия предельного состояния материала при усталости, определяющего условия его разрушения. В энергетической теории износа условие разрушения определяется накоплением в критическом объеме материала предельной для данного типа структуры плотности энергии (с учетом энергии, запасенной в начальном состоянии); эта энергия, близкая к энергии плавления, является константой материала и не зависит от вида напряженного состояния. Однако она сильно зависит от вида изнашивания, которым определяется критический объем, ответственный за разрушение. Но именно этот момент теории разрешен недостаточно, и корректное нахождение предельной плотности накопленной энергии практически возможно пока только для случая прямого микрорезания. В теории, основанной на термодинамическом подходе, родственном энергетическому, вводится энтропийный критерий разрушения. Термофлуктуационный вариант теории дополняет механический критерий усталостного разрушения фрикционного контакта, принятый в исходной модели И. В. Крагельского, условием его термодинамической стабильности, существенным, в частности, для трения полимеров, у которых влияние термодинамических эффектов на состояние материала и кинетические особенности его поведения проявляются уже при сравнительно низких температурах. Эти представления приводят к утверждению активационного характера всякого процесса разрушения, для осуществления которого необходимо подвести энергию, превосходящую некоторый барьер, относительная величина которого переменна и управляется не только механическим напряжением, но и температурой. Ниже рассматривается наиболее разработанная на сегодня количественная модель фрикционной усталости, основанная на механическом критерии разрушения, которым постулируется некая неотрицательная функция — мера повреждения, зависящая от условий нагружения и свойств материала. Она отражает накопление повреждений при циклическом нагружении, приводящее к локальному на-

рушению сплошности материала и его отделению в виде частицы износа. При всем разнообразии подходов к формулировке условий разрушения различные усталостные теории в ряде случаев обнаруживают тесную взаимосвязь.

Общие аналитические зависимости получены для простейшей расчетной схемы, именуемой в последующем основной.

В соответствии с этой схемой рассматривается изнашивание двух номинально плоских тел в стационарном (установившемся) режиме сухого или граничного трения. Изнашиваемое тело гладкое и деформируемое, истирающее (контртело) — жесткое и шероховатое. Номинальное давление, скорость скольжения и температура трения постоянны во времени и равномерно распределены по поверхности контакта.

Рассмотрена оценка интенсивности изнашивания для следующих модификаций основной расчетной схемы: а) шероховатое тело обладает упругими свойствами; б) истираемое тело также обладает шероховатостью; в) на поверхности контакта имеется равномерное температурное поле; г) основные параметры фрикционного контакта испытывают случайные вариации.

## 5.7. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ

В соответствии с условиями основной расчетной схемы интенсивность изнашивания выражается формулой

$$I = \xi \frac{be^{v+1} R_{\max}}{(v+1)nl} \eta_c, \quad (5.21)$$

где  $R_{\max}$  — максимальная высота неровностей поверхности;  $\varepsilon = p/R_{\max}$  — относительное сближение контактирующих тел под нагрузкой;  $p$  — абсолютное сближение;  $\eta_c = A_c/A_a$ ;  $A_c$  — контурная площадь контакта;  $\xi$  — коэффициент, учитывающий отличие геометрической ха-

характеристики поверхности — опорной кривой  $t_p(\epsilon)$  — от относительной площади фактического контакта  $\eta_r = A_r/A_c = \xi t_p(\epsilon)$ , возникающее из-за деформации неровностей под нагрузкой;  $0,5 \leq \xi < 1$  ( $\xi = 0,5$  при упругом контакте;  $\xi = 1$  при пластическом контакте);  $b, \nu$  — параметры степенной аппроксимации начального участка опорной кривой.

Относительное сближение  $\epsilon$  и средний диаметр элементарной зоны фактического контакта  $l$  определяются по формулам:

$$\epsilon_y = \left( \frac{q_a \phi}{\eta_c b K_v} \sqrt{R/R_{\max}} \right)^{2/(2\nu+1)}; \quad (5.22)$$

$$l_y = 2 \sqrt{RR_{\max} \epsilon_y / \nu}, \quad (5.23)$$

где  $q_a$  — номинальное давление;  $\phi = (1 - \mu^2)/E$  — постоянная упругости истираемого материала;  $R$  — средний радиус кривизны вершин микронеровностей,

$$K_v = \Gamma(\nu + 1) [2 \sqrt{\pi} \Gamma(\nu + 3/2)]^{-1}, \quad (5.24)$$

где  $\Gamma$  — гамма-функция; для пластического взаимодействия

$$\epsilon_{\Pi} = \left( \frac{q_a}{\text{HB} b \eta_c} \right)^{1/\nu}; \quad (5.25)$$

$$l_{\Pi} = 2 \sqrt{2RR_{\max} \epsilon_{\Pi} / \nu}. \quad (5.26)$$

Число циклов фрикционного взаимодействия, приводящее к разрушению, вычисляется по формулам:

$$n_y = (\sigma_0 / \sigma_e)^{t_y},$$

$$n_{\Pi} = (e_0 / e_e)^{t_{\Pi}}, \quad (5.27)$$

где  $\sigma_0, t_y, e_0, t_{\Pi}$  — константы фрикционной усталости истираемого материала, приведенные в табл. 5.5 (в дальнейшем для удобства записи индексы при  $t$  опускаются);  $\sigma_e$  и  $e_e$  — амплитудные значения соответственно действующего напряжения и деформации на контакте.

При упругом контакте напряжение  $\sigma_e$ , действующее при сближении  $\epsilon_y$ , вычисляется по формуле

$$\sigma_e = K_f^y l_y \sqrt{\nu} (2R\phi)^{-1},$$

$$\text{где } K_f^y =$$

$$= \begin{cases} \frac{2}{\pi} \sqrt{4f^2 (1 - \mu + \mu^2) + (1 - 2\mu)} & \text{при } \sigma_B^p / \sigma_B^c \approx 1; \\ \frac{4}{\pi} f (1 + \mu) & \text{при } \sigma_B^p / \sigma_B^c \ll 1, \end{cases} \quad (5.28)$$

$\sigma_B^p$  и  $\sigma_B^c$  — пределы прочности материала соответственно при растяжении и сжатии.

Для хрупких и высокоэластичных материалов характерно соотношение  $\sigma_B^p / \sigma_B^c \ll 1$ . Материалы, склонные к значительным пластическим деформациям, имеют одинаковую прочность на растяжение и на сжатие, т. е.  $\sigma_B^p / \sigma_B^c \approx 1$ .

Действующая деформация при пластическом контакте определяется по формуле

$$e_e = \frac{K_f^{\Pi} l_{\Pi} \sqrt{\nu}}{2 \sqrt{2R}}, \quad (5.29)$$

здесь

$$K_f^{\Pi} = \sqrt{\frac{2(\sigma_T + 2f \text{HB})}{(\sigma_T - 2f \text{HB})}}, \quad f < \frac{\sigma_T}{2 \text{HB}} \leq 0,4, \quad (5.30)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести.

Формула для более точного вычисления  $K_f^{\Pi}$  имеет вид

$$K_f^{\Pi} = \sqrt{2(\sigma_T + 2\tau_T) / (\sigma_T - 2\tau_T)}, \quad (5.30a)$$

где  $\tau_T = \tau_0 + \beta_0 \text{HB} < \sigma_T / 2$  — тангенциальное напряжение на фрикционном контакте, где  $\tau_0$  и  $\beta_0$  — адгезионные параметры.

Число циклов до разрушения с учетом (5.28) и (5.29) для соответствующей

5.5. Приближенные значения усталостных параметров для некоторых материалов узлов трения [5.9]

Материал	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\epsilon_y$	$e_0$	$\epsilon_{II}$	Примечания
1. Медь			0,39	2	Пп. 1—23 — по результатам испытаний на фрикционную усталость
2. Алюминий			0,34	2	
3. Армко-железо			0,32	2	
4. Латунь			0,17	2	
5. Сталь 45	1050	7,9	0,095	1,3	
6. Сталь 55			0,095	1,3	
7. Сталь 40X			0,095	1,3	
8. Сталь 50Г			0,14	1,3	
9. ФМК-11 (металлокерамика)			0,26	2	
10. Чугун ЧНМХ	660	4—7		2—3	
11. Электрографит	250	6—7			
12. Протекторная резина БСК	160—270	3—4			При $T = 20^\circ C$ $E = 2 - 3$ МПа При $T = 100^\circ C$
13. Уплотнительная резина БСК	22	4			
14. Поликарбонат	840	2,9			
15. Полиформальдегид	147	1,3			
16. ЭД-5 (без наполнителя)	180	4—5			
17. К-82 (прессматериал)	1420	3,1	0,3	5,1	
18. Фторопласт-4	63	4,4	1,3	1,58	
19. Ретинак ФК-24А	365	12,6	1,0	2—3	
20. АФ-Зам	280	13	2,34	2—3	
21. Капролон	630	2,6			
22. Графитопласт АТМ-2	560	7,7			
23. Графитопласт АТМ-2А	776	7,4			
24. Ст3	650	8—14			Пп. 24—56 — по результатам испытаний на объемную усталость
25. Ст5	535	10—11			
26. Ст.6	600	11—12			
27. Сталь 10	400—490	10—14			
28. Сталь 15	400—700	9—14			
29. Сталь 20	500—650	10—12			
30. Сталь 30	700	13—14			
31. Сталь 35	650	15			
32. Сталь 40	620—740	9—13			
33. Сталь 45	1700	10—11			
34. То же	3000	8—9			
35. »	3700	5—6			HRC 10 HRC 20 HRC 35 HRC 50
36. »	3500	5—6			
37. »	700—1000	5—6			
38. Сталь 50	520	2,0			Нормализация Хромирование
39. Сталь 20X	590	2,0			
40. То же	3650	2,0			

Материал	$\sigma_0$ , МПа	$t_y$	$e_0$	$t_{II}$	Примечания
41. Сталь 20X	1250	2,0			Хромирова- ние Различная термообра- ботка
42. Сталь 20XH	600—2200	8—15			
43. Сталь 40X	1150—3200	2—3			
44. То же	3200—5750	4—5			
45. Сталь 35Г2	1350	1,6			
46. Сталь 35ГС	1160—1200	6—9			
47. Сталь ШХ-15	1700—8200	2—7			
48. Сталь 22К	620	3—4			
49. Сталь 1Х18Н	970	8—9			
50. Сталь 30ХГСА	1360	9—10			
51. Серый чугун	500—1120	5—7			
52. Чугун магнитный	1600—1900	3—5			
53. Чугун легированный	750	8—11			
54. Чугун ВЧ 60-2	720	8			
55. Полиамид	130—180	2—4			
56. Поликарбонат	700	2—3			

щего вида контактного взаимодействия вычисляют по формулам:

$$n_y = \left( \frac{2R\delta\sigma_0}{K_f^y I_y \sqrt{v}} \right)^{t_y} K_{tv}, \quad (5.31)$$

$$n_{II} = \left( \frac{2\sqrt{2R} e_0}{K_f^{II} I \sqrt{v}} \right)^{t_{II}} K_{tv}, \quad (5.31a)$$

где  $K_{tv} = \Gamma(v+t/2)/[\Gamma(v)\Gamma(1+t/2)]$ ,  
(5.31б)

$K_{tv}$  — коэффициент, учитывающий эффект суммирования усталостных повреждений при нестационарном нагружении площадки фактического контакта, возникающем вследствие случайного характера микрогеометрии контактирующих тел.

С учетом (5.21)—(5.31б) общую аналитическую зависимость для расчета интенсивности изнашивания определяют по формулам:

при упругом контакте

$$I_y = C (q_a \delta / K_v)^{1+\beta t} (K_f^y / \sigma_0)^t \times \\ \times (R_{\max} / R)^{\frac{t(1+\beta)}{2}} (\eta_c b)^{-\beta t}; \quad (5.32)$$

при пластическом контакте

$$I_{II} = C \sqrt{2} (q_a / HB)^{\frac{1+\beta t}{1-\beta}} (K_f^{II} / e_0)^t \times \\ \times (R_{\max} / R)^{\frac{1+t}{2}} \frac{\beta(1+t)}{1-\beta} (\eta_c b)^{-\beta}, \quad (5.32a)$$

где  $C = \sqrt{v} \Gamma(v) \Gamma(1+t/2) [4(v+1) \Gamma(v+t/2)]^{-1}$ ,  $\beta = (2v+1)^{-1}$ .

Для расчета интенсивности изнашивания при микрорезании (5.32) и (5.32 а) принимают вид:

для хрупких материалов при переходе от упругого контакта к микрорезанию

$$I_{m/y} = C_{m/y} q_a \delta, \quad (5.32б)$$

где  $C_{m/y} = \sqrt{v} [4(v+1) K_v]^{-1}$ ;

для материалов с ясно выраженной текучестью, у которых переход к

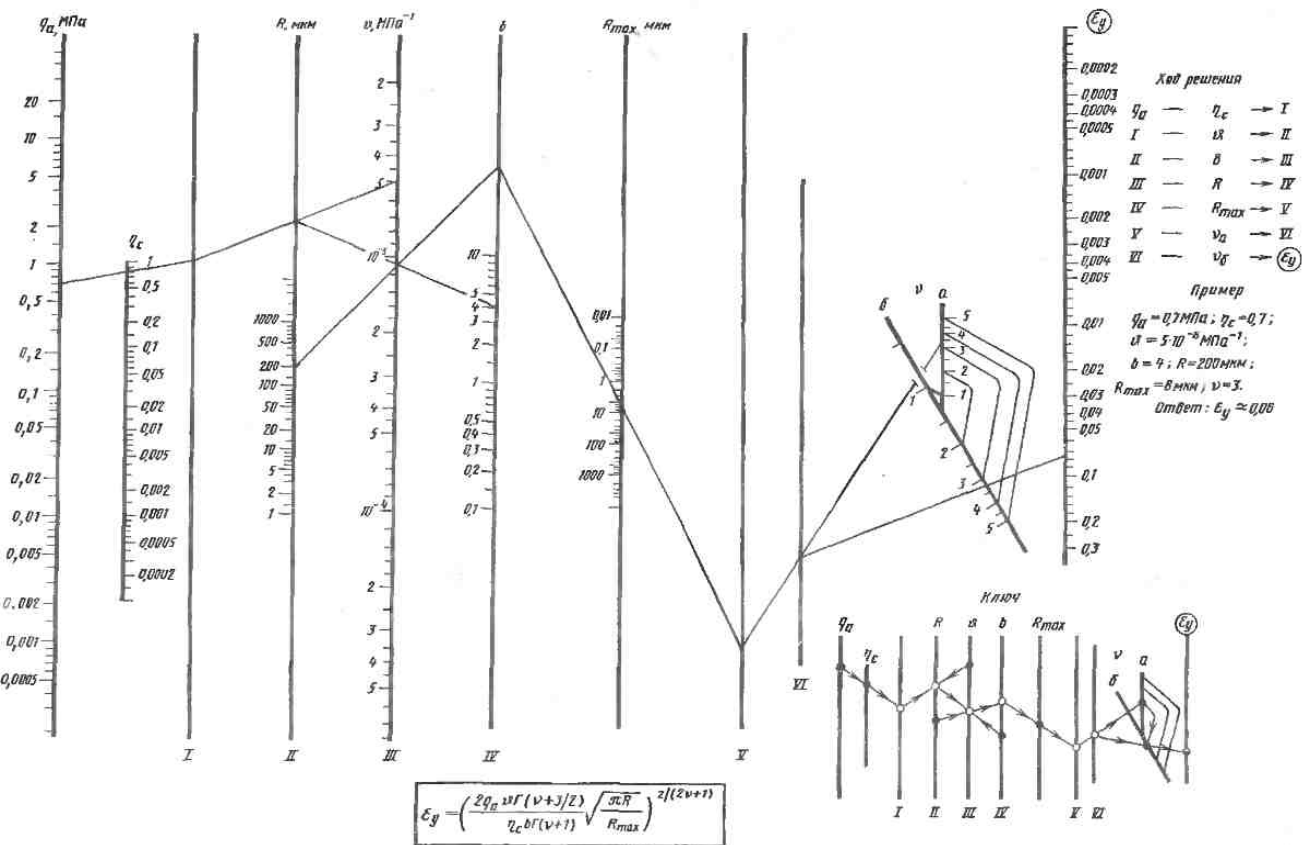


Рис. 5.15. Номограмма для определения контактного сближения при упругом взаимодействии



микрорезанию происходит в условиях пластического контакта

$$I_{M/\Pi} = C_{M/\Pi} (q_a/HV)^{1+1/(2\nu)}, \quad (5.32B)$$

$$\text{где } C_{M/\Pi} = \sqrt{(v/2) R_{\max}/R} \times \\ \times [2(v+1)(b\eta_c)^{1/2\nu}]^{-1}.$$

Критерием перехода от упругого взаимодействия к пластическому в условиях фрикционного контакта служит условие

$$\sigma_e \geq c\sigma_T, \quad n_y > 1, \quad (5.33)$$

где  $c = 5 \div 10$ .

Условие микрорезания:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для хрупких материалов } n_y \approx 1, \\ \text{для пластичных материалов } n_{\Pi} \approx 1. \end{array} \right\} \quad (5.33a)$$

При наличии независимых данных о механическом состоянии ПС материала в заданных условиях контактирования (например, результатов материаловедческого или рентгеноструктурного анализа) вид контактного взаимодействия определяется на основе этих данных.

Для анализа основных закономерностей изнашивания удобны (5.32) и (5.32a). Для расчета целесообразнее использовать менее громоздкие промежуточные формулы (5.21)—(5.31б).

Для упрощения расчетов может быть использована серия цепных номограмм, соответствующих основным этапам получения расчетных соотношений (5.32), (5.32a).

Серия состоит из шести основных номограмм и одной вспомогательной для определения коэффициента  $K_{tv}$  в (5.31). Общая схема проведения технического расчета, определяющая последовательность применения номограмм, следующая:  $v \rightarrow I \rightarrow n \xleftarrow{K_{tv}} I$ .

Для расчета контактного сближения  $v$  предназначены номограммы (рис. 5.15 и 5.16), построенные согласно (5.22) и (5.25);  $I$  — средний диаметр элементарной фактической

зоны контакта нотографируется по (5.23) и (5.26) в единой номограмме (рис. 5.17).

Для расчета разрушающего числа циклов фрикционного взаимодействия  $n$  используются зависимости (5.31), (5.31a), представленные на номограммах (рис. 5.18 и 5.19). Интенсивность изнашивания определяется для любого вида контакта по номограмме (рис. 5.20), построенной по (5.21). Коэффициент  $K_{tv}$  номографирован на номограмме VII (рис. 5.21) в соответствии с (5.31б).

Для расчета интенсивности изнашивания при микрорезании по номограмме VI (см. рис. 5.18) следует принять  $n = 1$ .

Вид контактного взаимодействия определяется по номограмме (см. рис. 5.18) с учетом (5.33) и (5.33a). Для проверки условия (5.33) перехода к пластическому контакту на номограмме оцифрована промежуточная шкала  $V - (\sigma)$  приведенных контактных напряжений.

Принятое построение номограмм позволяет получить в качестве промежуточных результатов основные характеристики фрикционного контакта, имеющие в ряде случаев самостоятельный интерес (например, оценка сближения при расчете на контактную жесткость).

Каждая номограмма поясняется схемой хода решения, ключом и иллюстрируется числовым примером. Ключ представляет собой графическое изображение хода решения на шкалах. Зачерненными кружками показаны значения входных переменных, незачерненными — промежуточные результаты, полужачерненными — ответные значения.

Большой диапазон изменения входных переменных, принятых при составлении номограмм, обеспечивает возможность их применения для расчета интенсивности изнашивания различных машиностроительных материалов в разнообразных условиях трения.

Рекомендуется следующий порядок проведения технического расчета на износ:

а) по формулам упругого контакта последовательно вычисляют значения

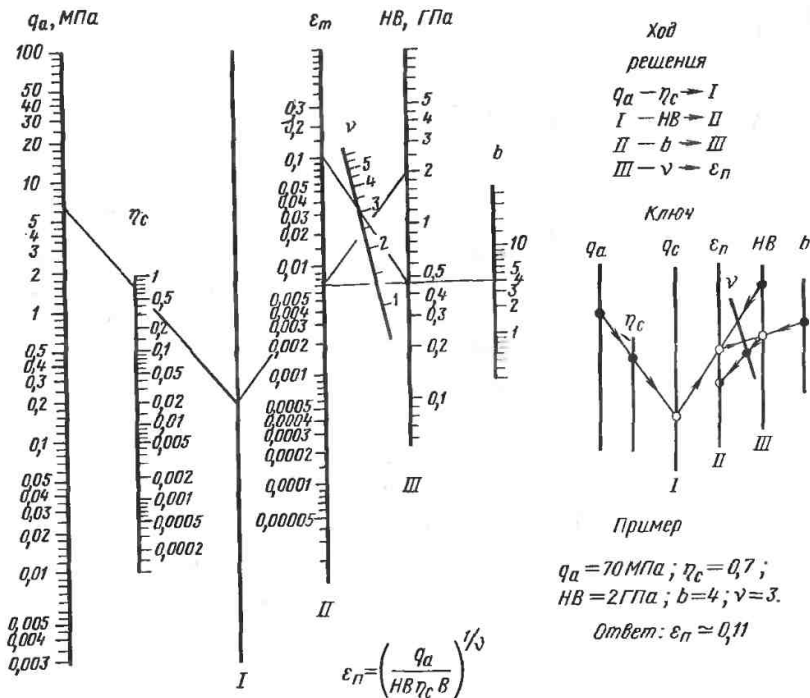


Рис. 5.16. Номограмма для определения контактного сближения при пластическом взаимодействии

$\varepsilon_y, I, n_y$ . Если истираемый материал имеет  $\sigma_B^p / \sigma_B^c \approx 1$ , то в расчете  $n$  по номограмме (см. рис. 5.18) используются шкалы и сетчатая номограмма  $n_1$ , если же  $\sigma_B^p / \sigma_B^c \ll 1$ , то используется номограмма  $n_2$ ;

б) если  $n_y \approx 1$ , то, полагая для расчета  $n_y = 1$ , по рис. 5.20 определяют значение интенсивности изнашивания при микрорезании  $I = I_{м/у}$  (расчет закончен);

в) при  $n_y > 1$  по номограмме определяют приведенные контактные напряжения  $\sigma_e$  и проверяют выполнение (5.33);

г) если (5.33) не выполняется, по номограмме (см. рис. 5.20) вычисляют интенсивность изнашивания при

упругом контакте  $I = I_y$  (расчет закончен);

д) при выполнении неравенства (5.33) производят расчет  $\varepsilon_n, I_{II}, n_{II}$  по номограммам (см. рис. 5.16, 5.17, 5.19, 5.21) (пластический контакт);

е) вычисляют значения интенсивности изнашивания  $I = I_{II}$  по номограмме рис. 5.20 при  $n_{II} > 1$  или  $I = I_{м/п}$  при  $n_{II} \approx 1$ , полагая для расчета  $n_{II} = 1$  (расчет закончен).

Если коэффициент  $k$ , определенный в (5.20), не равен 1, то результат расчета необходимо умножить на соответствующее значение коэффициента  $k$ .

Если известны значения параметров  $\tau_0$  и  $\beta_0$ , то при определении числа циклов до разрушения в условиях пластического контакта следует вна-

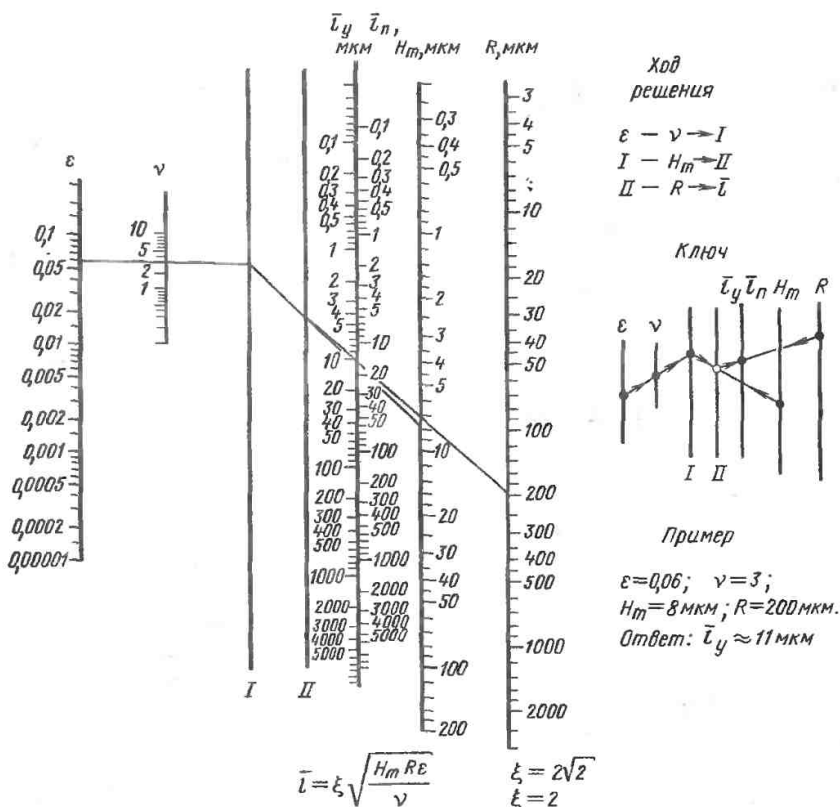


Рис. 5.17. Номограмма для определения среднего диаметра единичного контакта

чале вычислить  $\tau_T$  по формуле  $\tau_T = \tau_0 + \beta_0 H \nu$  и вести расчет по номограмме с использованием шкал ( $\tau$ ) и Ia (вместо HВ и  $f$ ).

Пример 5.1. Оценить линейный износ радиального цилиндрического манжетного уплотнения за 100 ч работы в паре со стальным закаленным валом при следующих исходных данных.

**Конструктивные размеры и условия работы.** Диаметр вала  $D = 58$  мм; частота вращения вала  $n_B = 3000$  об/мин,  $f = 0,5$ ;  $q_a \approx 0,1$  МПа;  $\eta_c = 1$ ; средняя температура, измеренная в зоне контакта,  $T = 60^\circ \text{C}$ ; распределение давления равномерное.

**Физико-механические и фрикционно-усталостные характеристики манжеты (при температуре  $60^\circ \text{C}$ ).** Материал — резина ИРП-1356;  $E = 15,0$  МПа;  $\Phi = 5 \cdot 10^{-2}$  МПа $^{-1}$ ;  $\sigma_0 = 15,0 \div 18,0$  МПа;  $t = 4,5$ ;  $\mu = 0,5$ .

**Параметры микрогеометрии поверхности вала.**  $b = 1,75 \div 2$ ;  $\nu = 1,28 \div 1,5$ ;  $R = 150$  мкм;  $R_{\max} = 1,1$  мкм.

**Решение.** Как следует из задания, эпюра контактных давлений практически равномерна, окружные скорости и пути трения постоянны по длине контакта, следовательно, расчет может быть произведен непосредственно по

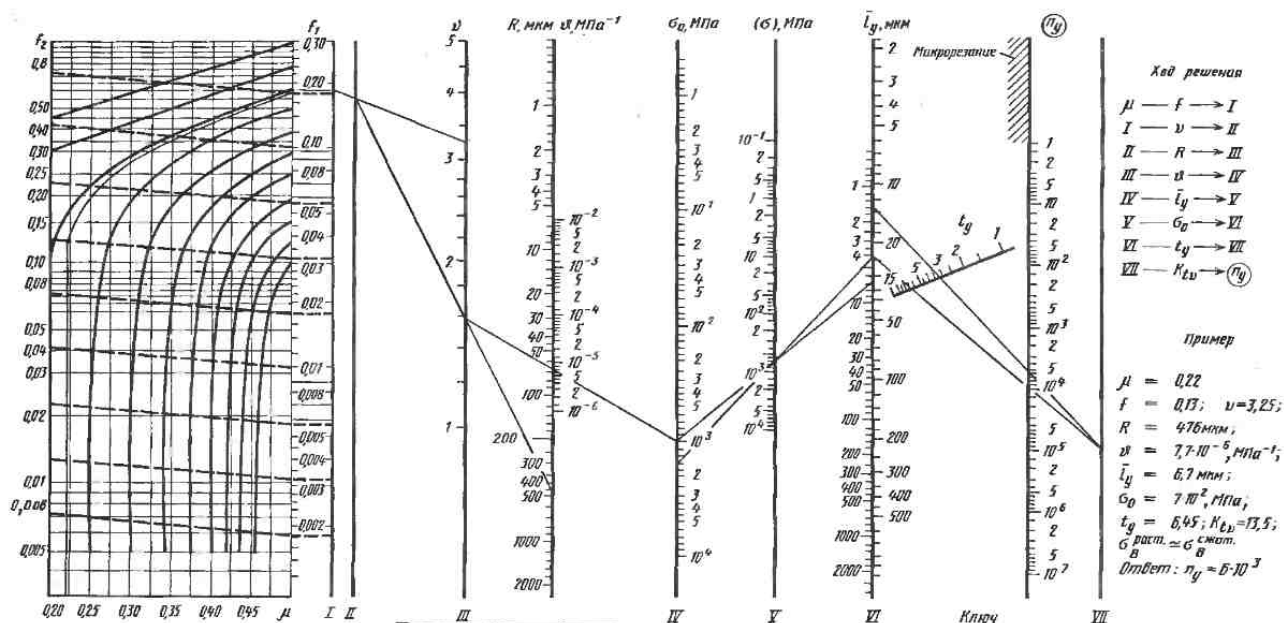


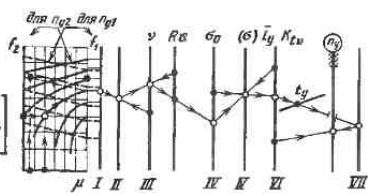
Рис. 5.18. Номограмма для определения разрушающего количества взаимодействий при упругом контакте

$$n_{y1} = \left( \frac{\pi \kappa \sigma_\sigma \nu}{2 l_y f_1 (1 + \mu) \sqrt{\nu}} \right) t_g \kappa_{lv},$$

при  $\sigma_b \text{ раст.} < \sigma_b \text{ сжат.}$

$$n_{y2} = \left( \frac{\pi \kappa \sigma_\sigma \nu}{l_y \sqrt{[4 f_2^2 (1 + \mu + \mu^2) + (1 - 2\mu)^2] \nu}} \right) t_g \kappa_{lv},$$

при  $\sigma_b \text{ раст.} \approx \sigma_b \text{ сжат.}$



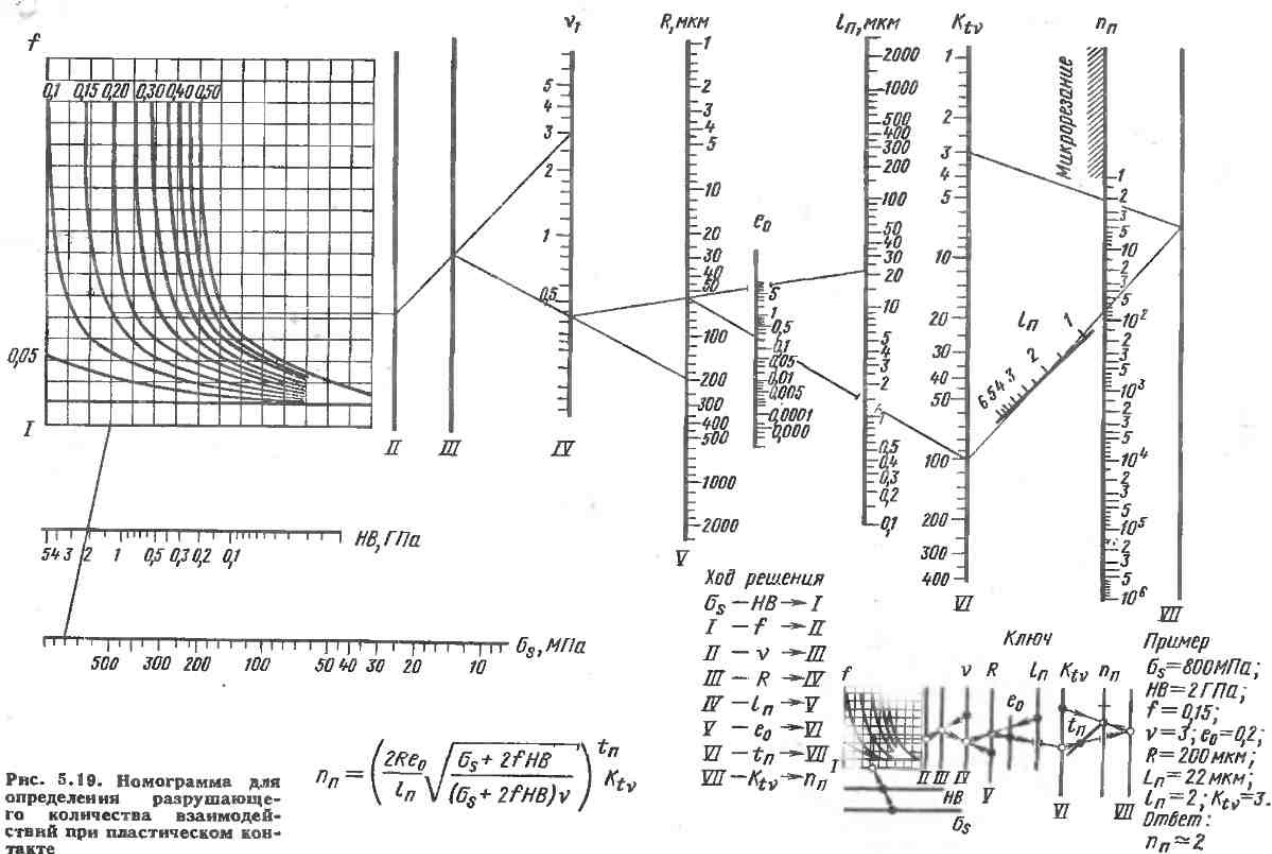
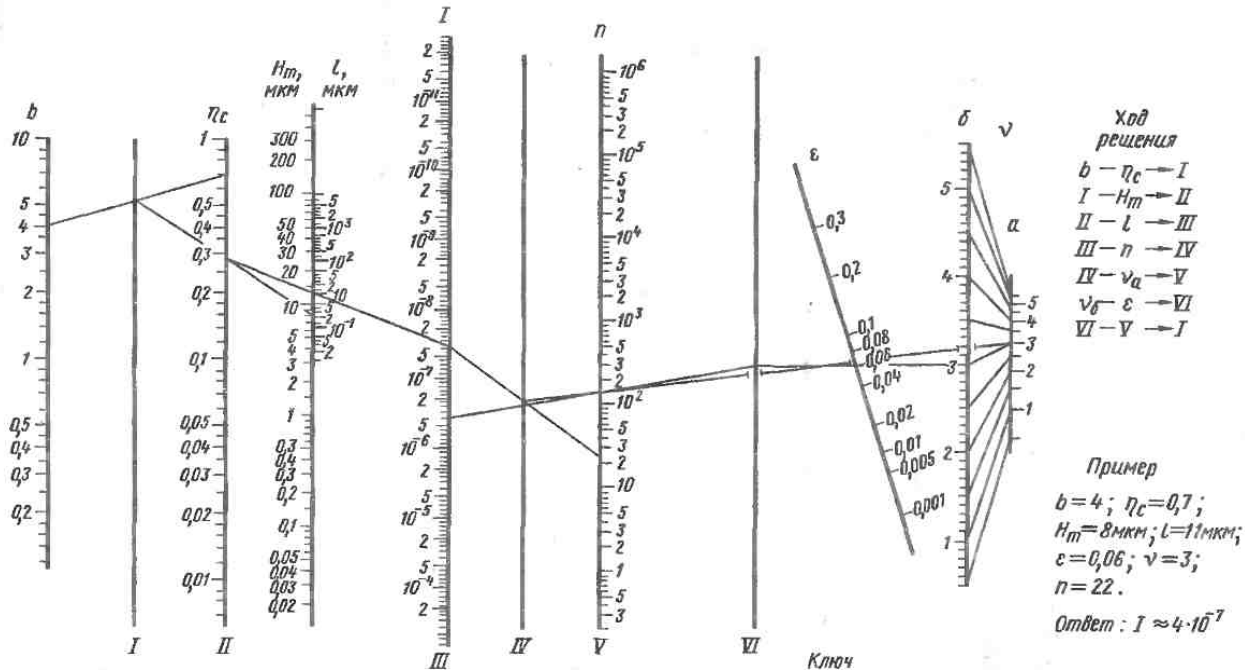


Рис. 5.19. Номограмма для определения разрушающего количества взаимодействий при пластическом контакте

$$n_n = \left( \frac{2R\epsilon_0}{L_n} \sqrt{\frac{\sigma_s + 2fHB}{(\sigma_s + 2fHB)v}} \right)^{t_n} K_{tv}$$



$$I = \frac{b H_m \epsilon^{\nu+1}}{n L (\nu+1)} \eta_c$$

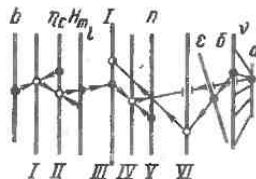


Рис. 5.20. Номограмма для определения интенсивности линейного изнашивания при трении скольжения

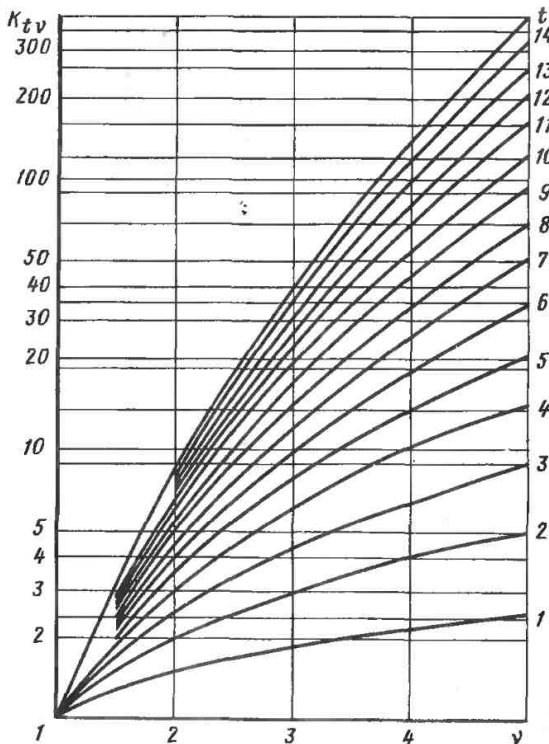


Рис. 5.21. Номограмма для определения значений коэффициента  $K_{tv}$

основным зависимостям с учетом температуры. В данных условиях трения резина ведет себя упруго, что и определяет выбор расчетных формул (номограмм).

Имеем  $A_{T1} = A_{T2} = A_a = \pi D d_T$ , где  $d_T$  — ширина манжеты  $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ , и путь трения за один оборот  $L_0 = L_{01} = L_{02} = L_0 = \pi D = \pi 58 = 0,182$  м.

Принимая для расчета значение  $\sigma_0 = 15,0$  МПа,  $b = 2$ ,  $\nu = 1,5$ , по номограммам в соответствии с последовательностью, указанной на схеме методики, получаем:  $\epsilon_y = 0,4$ ;  $I_y = 13,2$  мкм;  $K_{tv} = 1,97$ ;  $n_y = 5 \times 10^7$ ;  $I = 6,3 \cdot 10^{-11}$ .

Износ при заданной наработке  $\tau = 100$  ч определяется из выражения  $h = I_y L_T$ , где  $L_T = L_0 n_y \tau = 0,182 \times$

$\times 3000 \cdot 100 \cdot 60 = 3,28 \cdot 10^6$  м. Тогда  $h = 6,3 \cdot 10^{-11} \cdot 3,28 \cdot 10^6 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$  м.

Определение интенсивности изнашивания поверхностей трения в условиях, отличных от основной расчетной схемы. В основной расчетной схеме истираемое тело предполагается гладким. Это допущение практически оправдано, если шероховатость поверхности контртела в 2—3 раза и более превышает шероховатость истираемого тела. В противном случае такая идеализация может оказаться чрезмерной и учет шероховатости поверхности истираемого тела осуществляют приведением задачи к основной расчетной схеме — контакту шероховатой и идеально гладкой поверхностей. Для этого вычисляют эквивалентные характеристики микрогеометрии по формулам, полученным на основании свертки

двух функций распределения (опорных кривых):

$$R = R_1 R_2 (R_1 + R_2)^{-1}, \quad R_{\max} =$$

$$= R_{\max 1} + R_{\max 2}, \quad v = v_1 + v_2,$$

$$b = b_1 b_2 K_b R_{\max}^v (R_{\max 1}^{v_1} R_{\max 2}^{v_2})^{-1},$$

где  $K_b = \Gamma(v_1 + 1) \Gamma(v_2 + 1) / \Gamma(v + 1)$ .

Другим ограничением рассмотренного ранее расчета является условие недеформируемости изнашивающего шероховатого контртела. Оно соответствует таким ситуациям, когда требуется определить износ тела, механические свойства которого намного ниже свойств контртела, например при оценке износа резинового уплотнения на стальном валу. Однако если требуется для той же пары трения оценить износ более жесткого тела или если механические свойства контактирующих тел сопоставимы, то принятая схема требует корректировки.

Учет упругих свойств контртела проводится введением корректирующего множителя  $k_I$  в (5.32):

$$I_1 = k_I I_y, \quad (5.34)$$

где  $k_I = (1 + \psi)^{-(v+1) t / (2v+1)}$ ,  $\psi = \vartheta_2 / \vartheta_1$ ,  $\vartheta_1, \vartheta_2$  — коэффициенты эластичности соответственно истираемого тела и контртела;  $I_y$  — интенсивность изнашивания, рассчитанная по (5.32). Если интерес представляют также промежуточные результаты расчета  $\epsilon_y, I_y, n_y, \sigma_\epsilon$ , то соответствующие корректирующие множители имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} k_\epsilon &= (1 + \psi)^{-1 / (2v+1)}; \\ k_I &= (1 + \psi)^{v / (2v+1)}; \\ k_n &= (1 + \psi)^{(v+1) t / (2v+1)}; \\ k_\sigma &= (1 + \psi)^{-(v+1) / (2v+1)}. \end{aligned} \right\} \quad (5.34a)$$

Основная схема расчета не включает в рассмотрение температурный и скоростной факторы; их учет производят в неявной форме. Под влиянием температуры внешней среды, фрикционного самонагрева, приближенно пропорционального мощности трения, происходит изменение физико-механических свойств материалов пары

трения. Зависимости, отражающие эти изменения, непосредственно вводятся в расчетные соотношения. Таким образом получают параметрическую форму температурно-скоростной зависимости для интенсивности изнашивания.

Например, известна температурная зависимость твердости металлов в виде  $HB_T = HB_0 \exp(-\alpha_T / T)$ , где  $HB_0$  — твердость металла, измеренная при комнатной температуре;  $\alpha_T$  — температурный коэффициент твердости. Вместе с тем, как следует из (5.32a),

$$I_{II} = HB \frac{1 + \beta t}{\beta - 1} K_{HB}. \quad \text{Таким образом,}$$

$$I_{II} = [HB_0 \exp(-\alpha_T / T)]^{\frac{1 + \beta t}{\beta - 1}} K_{HB}.$$

Кроме этого, температурно-скоростной фактор вызывает появление термических напряжений, изменяющих механическое состояние ПС в зоне контакта, и этим дополнительно влияет на интенсивность изнашивания даже при неизменных физико-механических характеристиках (см. п. 5.8).

Если температура не известна, то для ее определения можно использовать рекомендации, приведенные в гл. 3, 4.

Основные факторы, определяющие износ, часто подвержены случайным вариациям, которые проявляются либо как нестабильность внешних условий (например, давления) во времени, либо в виде случайной неоднородности свойств (например, твердости) в партии однотипных деталей. Статистические характеристики интенсивности изнашивания, которая при этом также испытывает случайное рассеяние, определяют с помощью вероятностных методов.

Как следует из (5.32), (5.32a), зависимость интенсивности изнашивания от большинства определяющих факторов носит степенной характер:

$$I = K_\theta \theta^{m_\theta}, \quad (5.35)$$

где  $\theta$  и  $m_\theta$  — соответственно значение некоторого фактора и показатель степени при нем. Выражения показателя степени  $m_\theta$  для различных факторов  $\theta$  следующие:



$\theta$	Пластический контакт	Упругий контакт
$q_a$	$(1 + \beta t)/(1 - \beta)$	$1 + \beta t$
$\theta$	—	$1 - t(1 - \beta)$
НВ	$(1 + \beta t)/(\beta - 1)$	—
$\sigma_0$	—	$-t$
$e_0$	$-t$	—
$R_{\max}$	$(t + 1)/2$	$t(1 - \beta)/2$
$R$	$-(t + 1)/2$	$-t(1 - \beta)/2$
$K_f^y$	—	$t$
$K_f^n$	$t$	—

$K_\theta$  — коэффициент, численно равный интенсивности изнашивания при единичном значении фактора  $\theta$  и имеющий размерность  $[K_\theta] = [\theta]^{-m_\theta}$ . В ряде случаев удобнее использовать эквивалентную (5.35) форму записи:  $I = (0/\theta_0)^{m_\theta}$ . Здесь нормировочный коэффициент  $\theta_0 = K^{-1/m_\theta}$  независимо от величины  $m_\theta$  всегда имеет ту же размерность, что и фактор  $\theta$ . Кроме того, полезно иметь в виду, что итоговые зависимости (5.32) и (5.32a) фактически уже представлены в виде степенной комбинации безразмерных величин, сгруппированных сообразно основным типам переменных задачи в комплексы: нагрузочный  $\pi_q$ , фрикционно-усталостный  $\pi_\Phi$  и микрогеометрические  $\pi_{1G}$  и  $\pi_{2G}$ , так что

$$I = C \pi_q^{m_q} \pi_\Phi^{m_\Phi} \pi_{1G}^{m_{1G}} \pi_{2G}^{m_{2G}}. \quad (5.35a)$$

Содержание каждого комплекса  $\pi_\theta$  и соответствующего показателя  $m_\theta$  без труда раскрывается прямым сопоставлением (5.32), (5.32a) и (5.35a). Таким образом, если варьирует некоторый фактор  $\theta$ , то выбор нормирующей постоянной  $\theta$  может быть основан на естественной форме записи (5.32), (5.32a) и степенной характер зависимости (5.35) приобретает вид  $I = C_j (\theta/\bar{\theta})^{m_\theta} = C_j \pi_\theta^{m_\theta}$ , где  $C_j$  определяется произведением членов

(5.35a), постоянных по условию задачи. Значение  $K_\theta$  может быть определено по формулам или номограммам основной расчетной схемы при  $\theta = 1$ .

Для переменных, вариация которых на практике встречается наиболее часто (например, давление), постоянные  $K_\theta$  и  $m_\theta$  могут быть определены и из специально поставленного независимого эксперимента для различных пар трения. Будучи инвариантными к изменению переменной в рамках одного вида изнашивания, эти параметры являются удобными характеристиками для формирования банков данных по износостойкости. В табл. 5.6 приведены значения  $K_\theta$  и  $m_\theta$ , полученные В. В. Грибом и Г. П. Кузиной.

Если известны статистические характеристики варьирующего фактора  $\theta$  — среднее значение  $\bar{\theta}$  и коэффициент вариации  $V_\theta = S_\theta/\bar{\theta}$  (здесь  $S_\theta$  — среднее квадратическое отклонение  $\theta$ ), то соответствующие статистические характеристики для интенсивности изнашивания или износостойкости  $I$  определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} \bar{I} &= I(\bar{\theta})(1 + \xi^{\bar{\theta}}); \\ V_I &= \sqrt{\xi^S}/(1 + \xi^{\bar{\theta}}); \\ \bar{I} &= I(\bar{\theta})(1 + \xi^{\bar{\theta}}); \\ V_I &= V_I. \end{aligned} \right\} \quad (5.35b)$$

где  $I(\bar{\theta}) = K_\theta \bar{\theta}^{m_\theta}$ ;  $I(\bar{\theta}) = (K_\theta \bar{\theta}^{m_\theta})^{-1}$ ;

$$\xi^{\bar{\theta}} = 0,5 m_\theta (m_\theta - 1) V_\theta^2; \quad \xi^S = m_\theta^2 V_\theta^2.$$

Важно отметить, что для  $I = I^{-1}$  из (5.35b) имеем  $\bar{I} = \bar{I}^{-1} (1 + \xi^{\bar{\theta}})^2$ .

Когда одновременно варьируют несколько коррелированных факторов  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$  со средними  $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \dots, \bar{\theta}_p$ , коэффициентами вариации  $V_{\theta_1}, V_{\theta_2}, \dots, V_{\theta_p}$ , и коэффициентами корреляции  $\rho(\theta_i, \theta_j) = \rho_{ij}$ ,  $i = 1, p$ ;  $j = 1, p$ ;

5.6. Коэффициенты  $K_q$  и  $m_q$  в степенном законе изнашивания и предельное среднее давление  $q_{пр}$  для различных сочетаний конструкционных и смазочных материалов

Сочетание материалов		Для детали 1		Для детали 2		$q_{пр}$ , МПа
деталь 1 *	деталь 2 *	$K_{q1}^{**}$	$m_{q1}$	$K_{q2}^{**}$	$m_{q2}$	
<i>Смазка — солидол (ГОСТ 4366—76)</i>						
Сталь 20X (цементированная) HRC 60—62	Сталь 20X (цементированная) HRC 60—64	$1,19 \cdot 10^{-11}$	2,0	$3,74 \cdot 10^{-11}$	1,91	10
	Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60	$2,17 \cdot 10^{-11}$	1,85	$8,81 \cdot 10^{-11}$	1,52	40
Сталь 3ХХ15 HRC 60—62	Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60	$7,22 \cdot 10^{-12}$	1,66	$1,52 \cdot 10^{-11}$	1,78	30
	Сталь 20X (цементированная) HRC 60—62	$8,78 \cdot 10^{-12}$	1,58	$1,55 \cdot 10^{-10}$	1,23	40
Сталь 45 HRC 38—43	Сталь 40X ТВЧ HRC 54—56	$2 \cdot 10^{-11}$	1,0	$3,45 \cdot 10^{-11}$	1,16	15
	Сталь 20X (цементированная) HRC 60—61,5	$2,93 \cdot 10^{-11}$	1,97	$1,38 \cdot 10^{-11}$	1,66	20
Сталь 45 HRC 38—43	Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60	$5,75 \cdot 10^{-12}$	1,76	$9,50 \cdot 10^{-11}$	1,0	40
СЧ 21-40	Сталь 45 ТВЧ HRC 52—60	$3,31 \cdot 10^{-11}$	2,89	$2,80 \cdot 10^{-10}$	1,39	5
	Сталь 40X ТВЧ HRC 51—57	$3,28 \cdot 10^{-11}$	2,9	$4,07 \cdot 10^{-12}$	2,58	5
СЧ 21-40	Сталь 20X (цементированная) HRC 58—62,5	$1,78 \cdot 10^{-10}$	1,87	$1,09 \cdot 10^{-10}$	1,42	7,5
	Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60	$5,63 \cdot 10^{-10}$	1,42	$1,05 \cdot 10^{-10}$	1,50	7,5
Бр.ОФ10—1	Сталь 20X (цементированная) HRC 60—62	$1,76 \cdot 10^{-10}$	1,58	$7,60 \cdot 10^{-12}$	1,77	15
	Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60	$8,51 \cdot 10^{-13}$	2,03	$3,42 \cdot 10^{-11}$	1,18	35
Бр.АЖ9—4	Сталь 45 HRC 39—45	$2,60 \cdot 10^{-2}$	1,43	$5,76 \cdot 10^{-10}$	1,00	2,5
	Сталь 40X HRC 43—47	$1,17 \cdot 10^{-10}$	2,60	$9,55 \cdot 10^{-11}$	1,32	5

Сочетание материалов		Для детали 1		Для детали 2		$q_{пр}$ МПа	
деталь 1 *	деталь 2 *	$K_{q1}^{**}$	$m_{q1}$	$K_{q2}^{**}$	$m_{q2}$		
Бр.АЖ9—4	Сталь 45 ТВЧ HRC 42—59	$5,00 \cdot 10^{-10}$	2,88	$10^{-10}$	1,40	5	
Бр.ОЦС5—5	Сталь 39ХМЮА (азотированная) HRC 60	$3,38 \cdot 10^{-10}$	1,67	$1,31 \cdot 10^{-10}$	1,19	7,5	
	Сталь 45 HRC 47—50	$7,11 \cdot 10^{-11}$	2,11	$3,45 \cdot 10^{-11}$	1,16	10	
Бр.ОЦС5—5—5	Сталь 45 ТВЧ HRC 52—56	$1,42 \cdot 10^{-10}$	1,66	$1,30 \cdot 10^{-12}$	1,52	25	
	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59—62	$1,01 \cdot 10^{-9}$	1,26	$5,26 \cdot 10^{-12}$	1,26	7,5	
	Сталь 40Х HRC 45—48	$4,93 \cdot 10^{-10}$	1,11	$1,54 \cdot 10^{-10}$	1,37	7,5	
	Сталь 40Х ТВЧ HRC 45—48	$5,03 \cdot 10^{-12}$	2,25	$3,98 \cdot 10^{-12}$	1,83	30	
	Сталь 20Х (цементированная) HRC 60—61	$1,93 \cdot 10^{-10}$	1,87	$4,00 \cdot 10^{-11}$	1,00	10	
	Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60	$3,75 \cdot 10^{-11}$	1,61	$3,99 \cdot 10^{-12}$	1,70	35	
	Спеченный порошковый материал Бр. Гр. Спеченный порошковый ЖГр	Сталь 09Г2С (прокат)	$9,41 \cdot 10^{-10}$	1,87	$5,51 \cdot 10^{-10}$	1,24	10
		Сталь 09Г2С (прокат)	$8,61 \cdot 10^{-10}$	1,40	$8,51 \cdot 10^{-10}$	1,10	10
	<i>Смазка — солидол (ГОСТ 4366—76) + 10 % меди</i>						
	Сталь 45 HRC 33—47	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59,5—64	$1,03 \cdot 10^{-12}$	2,29	$2,52 \cdot 10^{-12}$	1,50	40
<i>Смазка — ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267—74)</i>							
Сталь 45 HRC 33—47	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59,5—64	$8,72 \cdot 10^{-13}$	3,02	$4,51 \cdot 10^{-13}$	3,10	20	
Сталь 20Х (цементированная)	Сталь 20Х (цементированная)	$1,88 \cdot 10^{-12}$	1,96	$2,08 \cdot 10^{-11}$	1,50	40	

Сочетание материалов		Для детали 1		Для детали 2		$q_{пр}$ МПа
деталь 1 *	деталь 2 *	$K_{q1}^{**}$	$m_{q1}$	$K_{q2}^{**}$	$m_{q2}$	
HRC 60—65	HRC 60—64 Сталь 38ХМЮА (азотированная)	$1,65 \cdot 10^{-13}$	2,50	$1,14 \cdot 10^{-12}$	2,14	40
<i>Смазка — ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267—74) + 10% меди</i>						
Сталь 45 HRC 33—47	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59,5—64	$3,93 \cdot 10^{-11}$	1,52	$3,60 \cdot 10^{-13}$	2,64	25
<i>Смазка — ВНИИП-242 (ГОСТ 20421—75)</i>						
Сталь 45 HRC 33—47	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59,5—64	$1,90 \cdot 10^{-13}$	2,84	$3,87 \cdot 10^{-14}$	3,16	35
<i>Смазка — Униол-1 (ТУ 38-УССР-201150—73)</i>						
Сталь 45 HRC 33—47	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59,5—64	$3,74 \cdot 10^{-11}$	1,61	$4,79 \cdot 10^{-11}$	1,56	20
<i>Смазка — 158 (ТУ 38 101320—72)</i>						
Сталь 20Х (цементированная) HRC 60—65	Сталь 20Х (цементированная) HRC 61—62 Сталь 38ХМЮА (азотированная) HRC 60—65	$1,28 \cdot 10^{-11}$	1,95	$8,59 \cdot 10^{-12}$	2,83	10
		$4,45 \cdot 10^{-13}$	2,32	$1,10 \cdot 10^{-11}$	1,62	40
<i>Смазка — литол-24 (ГОСТ 21150—75)</i>						
Сталь 45 HRC 33—47	Сталь 20Х (цементированная) HRC 59,5—64	$3,38 \cdot 10^{-13}$	2,69	$1,08 \cdot 10^{-12}$	2,44	35

\* Деталь 1 — неподвижна, деталь 2 перемещается относительно точки приложения нагрузки.

\*\* Размерность коэффициента МПа<sup>-mq</sup>.

$i < j$ , то обобщение (5.35) и (5.35а) определяется формулами

$$I = K_p \prod_{i=1}^p \theta_i^{m_i}; \quad \text{И} = \frac{\prod_{i=1}^p \theta_i^{-m_i}}{K_p};$$

$$\bar{I} = I(\bar{\theta}_1, \dots, \bar{\theta}_p) \left( 1 + \sum_{i=1}^p \xi_i^{\bar{\theta}} + \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \xi_{ij}^{\rho} \right);$$

$$\bar{\text{И}} = \text{И}(\bar{\theta}_1, \dots, \bar{\theta}_p) \times \left( 1 + \sum_{i=1}^p \xi_i^{\bar{\theta}} + \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \xi_{ij}^{\rho} \right);$$

$$V_I = V_{\text{И}} =$$

$$= \frac{\left( \sum_{i=1}^p \xi_i^{\bar{\theta}} + \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \xi_{ij}^{\rho} \right)^{1/2}}{1 + \sum_{i=1}^p \xi_i^S + \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \xi_{ij}^{\rho}},$$

где  $\xi_i^{\bar{\theta}} = 0,5 m_i (m_i - 1) V_{\theta_i}^2$ ,  $\xi_i^S = m_i^2 V_{\theta_i}^2$ ;

$$\xi_{ij}^{\rho} = 2 m_i m_j V_{\theta_i} V_{\theta_j} \rho_{ij};$$

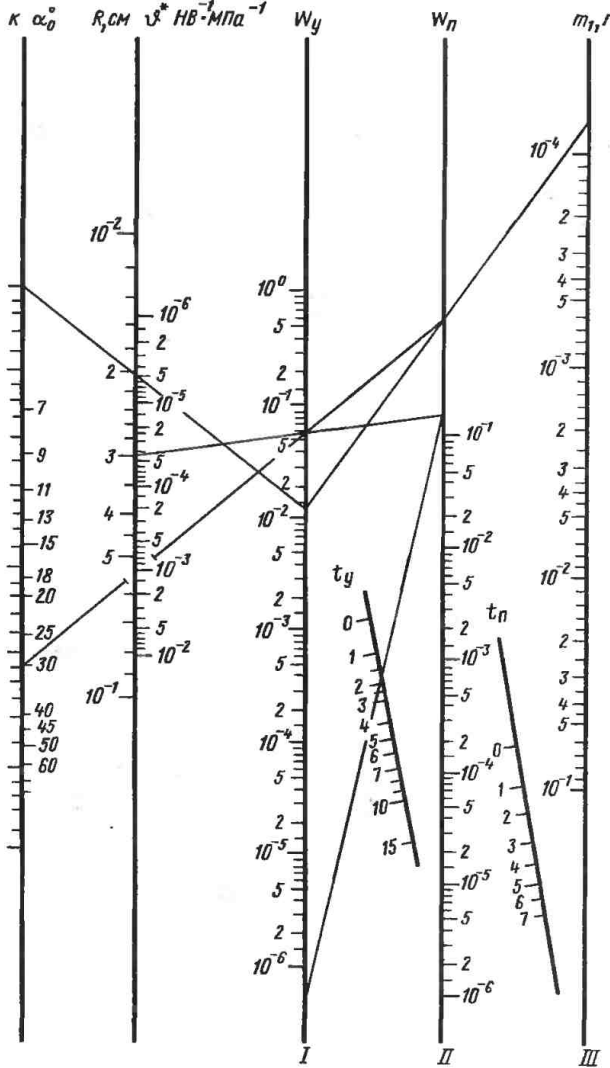
$$I(\bar{\theta}_1, \dots, \bar{\theta}_p) = K_p \prod_{i=1}^p \bar{\theta}_i^{m_i};$$

$$\text{И}(\bar{\theta}_1, \dots, \bar{\theta}_p) = K_p^{-1} \prod_{i=1}^p \bar{\theta}_i^{-m_i};$$

$$\prod_{i=1}^p x_i = x_1 x_2 \dots x_p;$$

$m_i = m_{\theta_i}$ , а коэффициент  $K_p = K_{\theta_1, \dots, \theta_p}$  определяется, как и прежде, по формулам или номограммам при значениях  $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_p = 1$ . Если случайные величины  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$  или некоторая часть из них некоррелирована, то соответствующие  $\xi_{ij}^{\rho} = 0$  и формулы (5.35б) упрощаются.

Расчетная модель эрозионного износа поверхности твердого тела потоком абразивных частиц. Разрушение ПС материалов потоком жестких частиц — распространенный в технике процесс, который используют в ряде случаев как направленную технологическую операцию (дробеструйная, пескоструйная обработка). Часто разрушение является неизбежным побочным результатом основного рабочего процесса — эрозионным изнашиванием. В технической литературе разрушение ПС детали в указанных условиях характеризуют безразмерной интенсивностью, определенной в отличие от  $I_{\tau}^{\text{н}}$  по (5.17) как отношение массы изношенного материала  $M_{\tau}$  к массе частиц  $M_a$ , вызвавших износ  $I_{\theta} = dM_{\tau} / dM_a$ . Процесс разрушения поверхности в этих условиях рассматривают с позиций фрикционной усталости, полагая, что поток жестких сферических частиц радиусом  $R$  и массой  $m_1$  ударяется с начальной скоростью  $v_0$  о плоскую поверхность изнашиваемого материала под углом атаки  $\alpha_0$ . Воздействия отдельных частиц предполагают независимыми. При скольжении частицы в процессе соударения интенсивность изнашивания нестационарна, так как непрерывно изменяется глубина внедрения частицы в материал поверхности, а следовательно, и диаметр пятна контакта. Мгновенная интенсивность изнашивания при скольжении  $I_L^Q = dQ / (A_{\tau} dL) = Q_{\tau} / (A_{\tau} n I)$ , где  $dL$  — элементарный путь трения. По сравнению с чистым скольжением расчет в этом случае отличается тем, что глубина внедрения  $p(\tau)$  единичной абразивной частицы при ударе и путь ее скольжения  $L(\tau)$  в деформированном материале определяются из решения соответствующих уравнений динамики движения:  $m_1 d^2 p / d\tau^2 = -N(p)$ ;  $m_1 d^2 L / d\tau^2 = -F(p)$ , где  $m_1$  — масса частицы;  $N$  и  $F$  — соответственно нормальное и касательное усилия. Деформированный объем  $Q_{\tau}$  находится интегрированием элементарного объема по траектории движения частицы с учетом различных соотношений между выталкивающей силой нормальной реакции и силой трения. В связи



$$W_y = \left( \frac{m_1 V_0^2 \sin^2 \alpha_0 v^*}{R^3} \right)^{\frac{t_y+5}{5}}$$

$$W_n = \left( \frac{m_1 V_0^2 \sin^2 \alpha_0}{R^3 4\pi HB} \right)^{\frac{t_n+5}{4}}$$

Ход решения:

- $V_0 \rightarrow v; \left( \frac{1}{HB} \right) \rightarrow I$
- $I \rightarrow m_1 \rightarrow II$
- $II \rightarrow \alpha_0 \rightarrow I$
- $I \rightarrow R \rightarrow II$
- $II \rightarrow t_y \rightarrow W_y$
- или  $II \rightarrow t_n \rightarrow W_n$

Пример

- $V_0 = 10^4$  см/с;
  - $v^* = 5 \cdot 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>;
  - $m_1 = 7 \cdot 10^{-5}$  г;
  - $\alpha_0 = 30^\circ$ ;
  - $R = 3 \cdot 10^{-2}$  см;
  - $t_y = 2$ .
- Ответ:  $W_y = 7 \cdot 10^{-7}$

Ключ

$R v^* m_1$   
 $V_0 \alpha_0 (HB)^{-1} W_y W_n t_1$

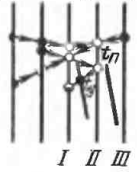


Рис. 5.22. Номограмма для определения энергетического комплекса  $W$  при оценке интенсивности изнашивания потоком твердых частиц

со сложностью и громоздкостью получающихся выражений для наиболее типичного случая, при котором тангенциальная компонента скорости не гасится полностью в материале и имеет место отскок частицы, составлена серия из пяти номограмм (рис. 5.22—5.25), в которой используются два безразмерных комплекса: энергетический

$$W_y = \left( \frac{m_1 v_0^2 \vartheta^* \sin^2 \alpha_0}{R^3} \right)^{(t+5)/5}; \quad (5.36)$$

$$W_{\Pi} = \left( \frac{m_1 v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{R^3} \frac{1}{4\pi H\bar{B}} \right)^{(t+5)/5} \quad (5.36a)$$

и фрикционно-усталостный

$$N_y = (K_f^y / (\sigma_0 \vartheta^*))^t; \quad (5.37)$$

$$N_{\Pi} = (\sqrt{2} K_f^{\Pi} / e_0)^t, \quad (5.37a)$$

где  $\vartheta^* = \vartheta/\pi$ ; коэффициенты  $K_f^y$  и  $K_f^{\Pi}$  определены ранее.

Окончательная расчетная формула имеет вид

$$I_0 = \chi \frac{\rho_T}{\rho_a} W A / N, \quad (5.38)$$

где  $\chi_y = 0,55$ ;  $\chi_{\Pi} = 0,86$ ;  $\rho_a \rho_T$  — плотности материала частицы и тела.

Функция  $A = A(f, t, \alpha_0)$  может быть представлена в виде

$$A = C_0 A_0 / \Psi_0, \quad (5.39)$$

где  $C_0 = C_0(f)$ ,  $\Psi_0 = \Psi_0(\alpha_0, f)$ ,  $A_0 = A_0(t)$ .

Энергетические комплексные параметры  $W_y$  и  $W_{\Pi}$  рассчитывают по номограммам на рис. 5.22. По рис. 5.23, а вычисляют значение  $N_y$ , по рис. 5.23, б — значение  $N_{\Pi}$ , а по рис. 5.24 — значение  $A$ . Интенсивность изнашивания  $I_0$  определяют по рис. 5.25. Анализ результатов, полученных в этой модели, позволяет рассмотреть форму лунки, образованной единичным соударением, а также зависи-

мость интенсивности эрозии от угла  $\alpha_0$ . Эта зависимость имеет характерный экстремум, положение которого колеблется от 10 до 45° в зависимости от сочетания фрикционных, усталостных и механических свойств материала, что соответствует экспериментальным данным [5.10].

**Пример 5.2.** При подготовке к окраске крышка редуктора подвергается дробеструйной обработке. Определить время, необходимое для снятия слоя заданной толщины  $\delta$ .

*Исходные данные.* Дробь стальная литая (ДСЛ) радиусом  $R = 0,6$  мм и крышка редуктора (обрабатываемая деталь) — сварная из стали Ст3 имеют следующие параметры:  $E = 2,1 \times 10^5$  Па;  $\mu = 0,3$ ;  $\rho_a \rho_T = 7,85$  г/м<sup>3</sup>;  $t = 1,5$ ; коэффициент трения  $f = 0,1$ .

*Режим обработки.*  $v_0 = 60$  м/с;  $\alpha_0 = 30^\circ$ ; плотность потока дроби  $\Phi_{\Pi} = 2$  кг/(м<sup>2</sup>·с); толщина снимаемого слоя  $\delta = 0,2$  мм.

*Решение.* 1. Определенне интенсивности изнашивания. Вычисляют

$$\vartheta^* = \vartheta_1^* + \vartheta_2^* = 2 \frac{1 - 0,3^2}{\pi \cdot 2,1 \cdot 10^6} = 1,37 \cdot 10^{-7} \text{ ГПа}^{-1}.$$

По номограмме (см. рис. 5.24) находят  $C_0 = 1$ ;  $\Psi_0 = 6,8$ ;  $A_0 = 15$ . Отсюда  $A = 1 \cdot 15 / 6,8 = 2,2$ . По номо-

граммам (рис. 5.22 и 5.23, а) последовательно вычисляют  $N_y = 4 \cdot 10^3$ ;  $W_y = 4 \cdot 10^{-6}$ . По номограмме (см. рис. 5.25) для  $\rho_a = \rho_T = 7,85$  г/м<sup>3</sup> и значениям  $N_y$ ,  $W_y$ ,  $A$ , найденным выше, получают  $I_0 = 1,6 \cdot 10^{-4}$ .

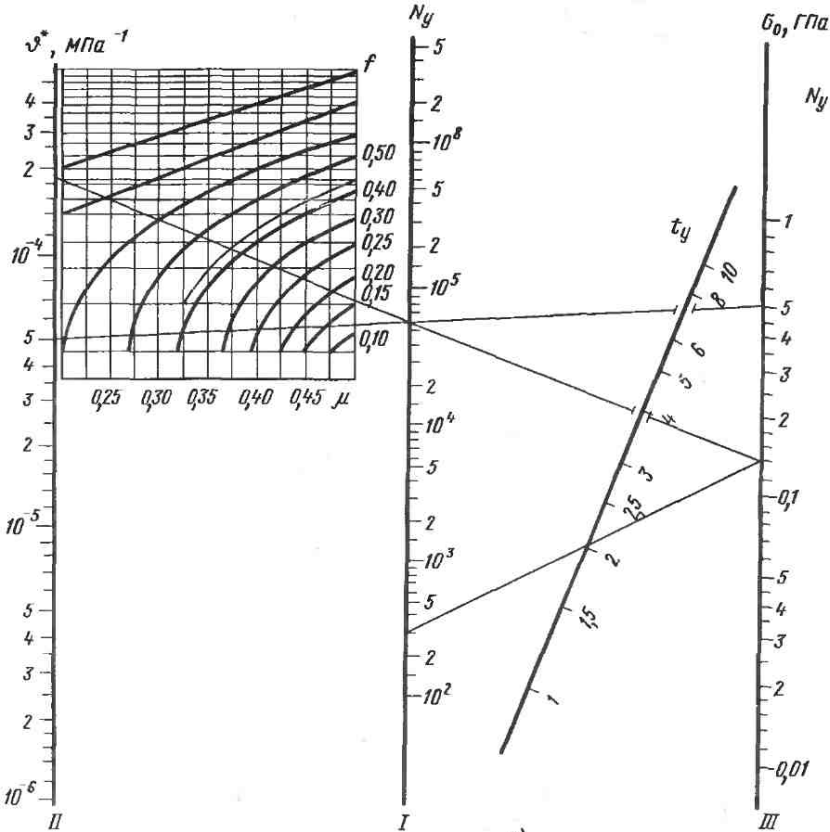
2. Определение времени, необходимого для снятия слоя толщиной 0,2 мм. Вычисляют массу дроби, падающей на обрабатываемую поверхность за время  $\tau_{\delta}$ :  $M_a = \Phi_a \tau_{\delta} S$ , где  $\Phi_a = \Phi_{\Pi} \sin \alpha_0$ ;  $S$  — площадь обрабатываемой поверхности.

Масса металла, подлежащего снятию,  $M_T = \delta \rho_T S$ .

По определению

$$I_0 = M_T / M_a = \frac{\delta \rho_T S}{\Phi_{\Pi} \tau_{\delta} \sin \alpha_0 S},$$

откуда  $\tau_{\delta} = \delta \rho_T (I_0 \Phi_{\Pi} \sin \alpha_0)^{-1}$ . Таким образом,  $\tau_{\delta} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 7,85 (1,6 \cdot 10^{-2} \times 2 \sin 30^\circ)^{-1} \approx 100$  с = 1,7 мин.



$$N_y = \left( \frac{\sqrt{4f^2(1-\mu-\mu^2) + (1-2\mu)^2}}{\sigma_0 \nu^*} \right) t_y$$

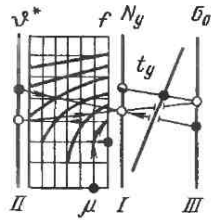
Ход решения:

- $\nu^* - \sigma_0 \rightarrow I$
- $\mu - f \rightarrow II$
- $II - I \rightarrow III$
- $III - t_y \rightarrow N_y$

Пример

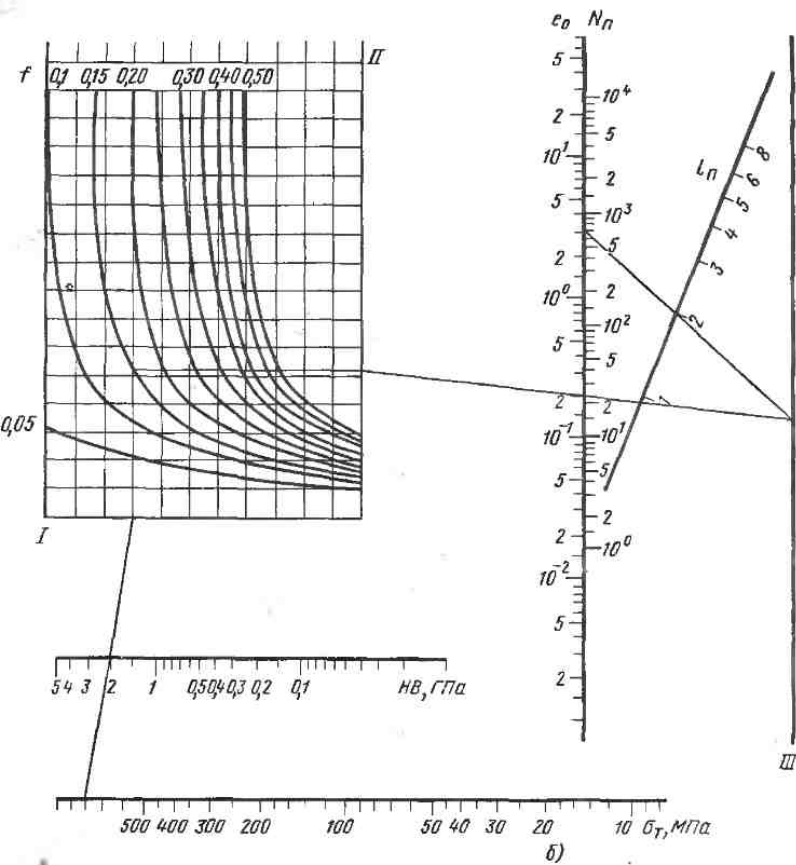
$\sigma_0 = 0,5 \text{ ГПа};$   
 $\nu^* = 5 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1};$   
 $\mu = 0,325;$   
 $f = 0,15;$   
 $t_y = 2$   
 Ответ:  $N_y = 3 \cdot 10^2$

Ключ



а)





$$N_n = \left( \frac{2}{e_0} \sqrt{\frac{\sigma_T + 2HBf}{\sigma_T + 2HBf}} \right)^{t_n}$$

Ход решения:

$\sigma_T - HB \rightarrow I$

$I - f \rightarrow II$

$II - e_0 \rightarrow III$

$III - t_n \rightarrow N_n$

Пример

$\sigma_T = 800 \text{ МПа};$

$HB = 200 \text{ кгс/мм}^2;$

$f = 0,15;$

$e_0 = 0,2;$

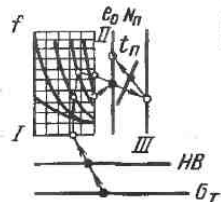
$t_n = 2$

Ответ:

$N_n \approx 7 \cdot 10^2$

Рис. 5.23. Номограммы для определения фрикционно - усталостного комплекса  $N$  при оценке интенсивности изнашивания потоком твердых частиц:

$\alpha$  — упругий контакт;  
 $\beta$  — пластический контакт



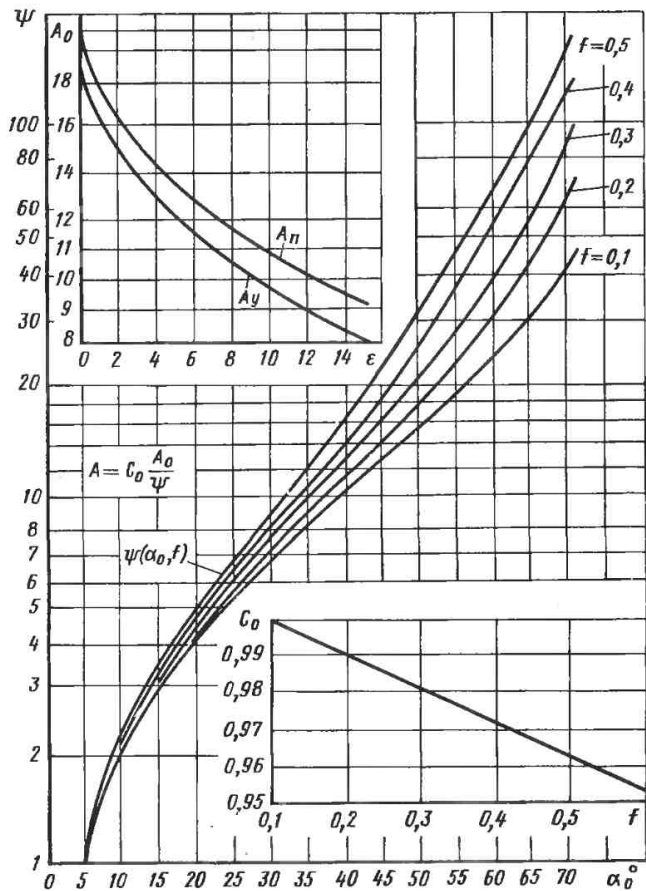


Рис. 5.24. Номограмма для определения коэффициента  $A$  при оценке интенсивности изнашивания потоком твердых частиц

Зависимости теории фрикционной усталости являются аналитической формой выражения основных представлений о механизме изнашивания. При этом они непосредственно не связаны с конструктивными особенностями конкретных сопряжений, для которых характерно наличие существенно неравномерных распределений контактного давления, скорости скольжения, температуры трения и т. п.

Для определения износостойкости триботехнических конструкций раз-

внт относительно самостоятельный класс контактных задач триботехники, куда эти зависимости входят наряду с определяющими законами поведения твердых тел при силовом нагружении, нагреве и т. д., и позволяют получить в явной форме вид и числовые значения параметров элементарного закона изнашивания, справедливого для дифференциально малого участка поверхности контакта. В п. 5.8 на конкретных примерах изложена методика решения задач износостойкости триботехнических конструкций.

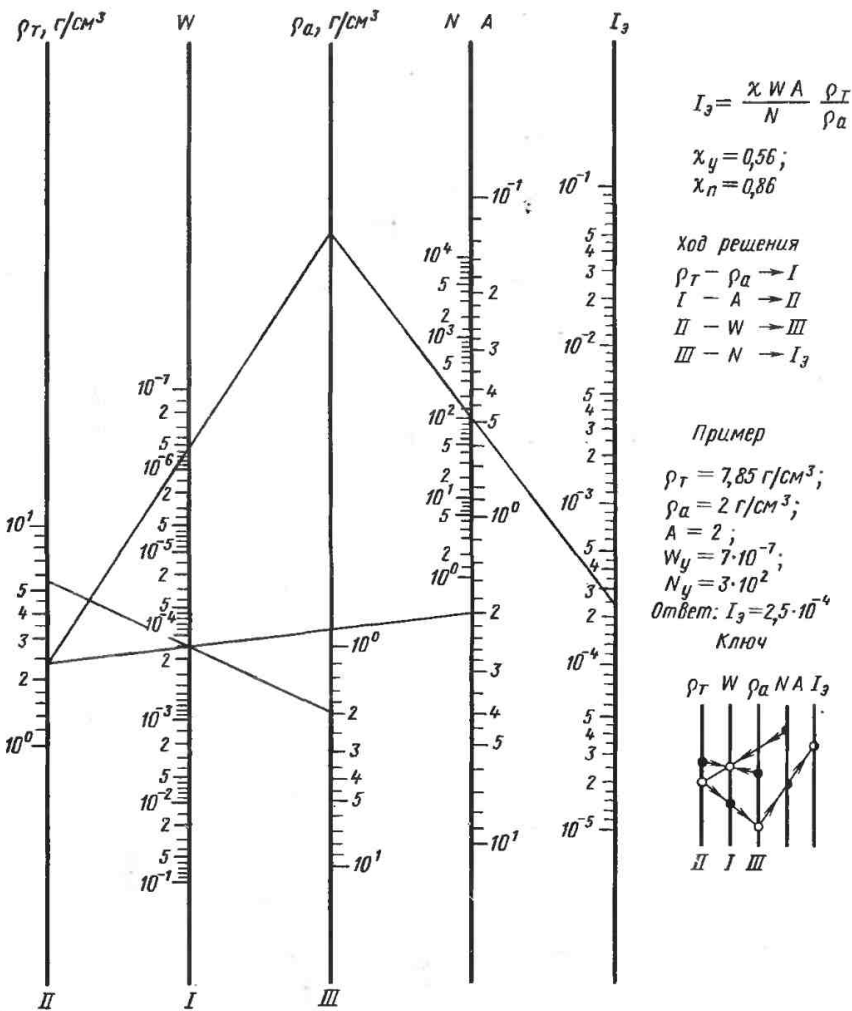


Рис. 5.25. Номограмма для определения интенсивности изнашивания  $I_3$  потоком твердых частиц

**5.8. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ТРЕНИЯ И ДЕТАЛИ МАШИН, МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА НА ИЗНОС**

Одна из центральных задач триботехники состоит в оценке триботехнической надежности подвижных сопряжений машин. В идеальном и мето-

дическом плане эта комплексная проблема распадается на ряд самостоятельных направлений исследований, включающих теорию износа материалов; износ подвижных сопряжений; теорию предельных состояний подвижных сопряжений по триботехническим параметрам.

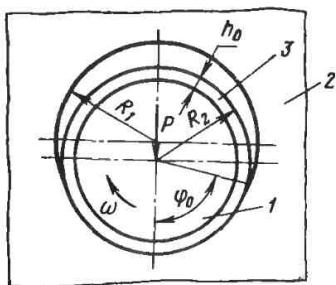


Рис. 5.26. Расчетная схема ПСК с обратной парой трения (износ цапфы): 1 — цапфа; 2 — втулка

Расчет триботехнической надежности подвижных сопряжений машин является заключительным звеном в этом перечне проблем и сводится к определению вероятности выхода триботехнических показателей сопряжения за предельные границы.

В теории износа подвижных сопряжений наметились две тенденции исследований. В одной из них развиваются представления о пространственно-временной нестабильности внешних условий работы трибосопряжения и его свойств; таким образом, ТС рассматривается как объект, характеризуемый набором случайных параметров. Другая предполагает наличие детерминированных условий эксплуатации, свойств и параметров сопряжения. Этот подход является наиболее простым, и в настоящее время в рамках этого подхода получены существенные результаты. В дальнейшем изложении именно на нем и будет сосредоточено все внимание.

Впервые задача об износе сопряжения решалась для системы жестких тел [5.11], при этом условие неразрывности контакта составлялось с учетом только перемещений, обусловленных износом контактирующих поверхностей.

Затем была поставлена задача об износе деформируемых тел как контактная задача с переменными во времени граничными условиями [5.12]. При таком подходе был исследован ряд одномерных, двумерных и пространственных задач.

Ниже изложены примеры расчета на износ подвижных сопряжений машин, которые объединяет общий методологический подход, учитывающий эволюцию контактных параметров сопряжений при изнашивании. При этом используются различные постановки задач: в одних учитывается упругость контактирующих тел, в других тела считаются жесткими, в третьих принимается во внимание лишь контактная деформация, обусловленная шероховатостью поверхностей.

В качестве объектов расчетов выбраны наиболее распространенные узлы машин различного назначения, для которых эти методы расчета в той или иной мере получили апробацию в исследовательской работе и на практике. Чаще всего цель расчета состоит в определении ресурса работы сопряжения, хотя возможны и другие постановки задач, которые также будут рассмотрены.

### 5.8.1. Подшипники скольжения

**Основные допущения.** В общем виде расчетная схема подшипника скольжения (ПСК) (рис. 5.26) представляет собой сопряжение двух цилиндрических тел, радиусы которых мало отличаются ( $R_1 > R_2$  и  $(R_1 - R_2)/R_2 \ll 1$ ). Внутренний цилиндр 1 вращается вокруг своей оси и соответствует цапфе ПСК, а тело с круговым вырезом 2 — втулке ПСК. При расчете на износ ПСК используются следующие основные допущения.

Нагрузка, скорость скольжения, температура, окружающая среда и другие внешние условия остаются неизменными в процессе изнашивания.

Механические, физические и триботехнические свойства материалов сопрягаемых деталей остаются неизменными в процессе эксплуатации.

Силы трения в контакте цапфы с втулкой не влияют на размеры зоны контакта и распределение давления (это условие с высокой точностью выполняется при  $f < 0,3$ ).

Нагрузка, действующая в сопряжении, равномерно распределена по оси цапфы и не вызывает объемных пла-

### 5.7. Основные характеристики, используемые при расчете ресурса ПСК

Наименование	Условное обозначение	Единица измерения
Модуль упругости	$E_i^*$	Па
Коэффициент трения	$f$	
Толщина антифрикционного элемента (АЭ)	$h_{0i}$	м
Параметры степенного закона изнашивания для материала:		
а) цапфы или АЭ, закрепленного на ней	$K_2$ $m_2$	Па $\frac{1}{m_2}$
б) втулки или АЭ, закрепленного на ней	$K_1$ $m_1$	Па $\frac{1}{m_1}$
Длина цапфы	$l_2$	м
Нормальная нагрузка в сопряжении	$P$	Н
Радиус цапфы или наружный радиус АЭ, закрепленного на цапфе	$R_2$	м
Радиус втулки или внутренний радиус АЭ, закрепленного на втулке	$R_1$	м
Коэффициент линейного расширения	$\alpha_i^*$	$K^{-1}$
Начальный радиальный зазор	$\Delta(0)$	м
Предельно допустимый радиальный зазор в сопряжении	$\Delta^*$	м
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_i^*$	Вт/(м·К) $\equiv$ Вт/(м·К) $^{-1}$
Коэффициент Пуассона	$\mu_i^*$	
Угловая скорость вращения цапфы	$\omega$	$c^{-1}$

\* Индексы  $i = 1, 2, 3$  относятся к материалам втулки, цапфы и АЭ соответственно.

стических деформаций в сопрягаемых деталях.

Ось цапфы в процессе эксплуатации остается параллельной оси втулки.

Интенсивность изнашивания материалов сопрягаемых деталей является степенной функцией давления, т. е.  $I = Kq^m$ , где  $K$  и  $m$  — параметры ( $m \geq 1$ );  $q$  — давление на контакте.

Цапфа в процессе изнашивания сохраняет форму кругового цилиндра.

Вводятся специфические для каждой схемы расчета допущения, которые в каждом конкретном случае будут оговорены особо (табл. 5.7 и 5.8).

**Расчет ресурса ПСК с обратной парой трения. Расчетная модель [5.13].** В обратной паре трения цапфа является тем элементом сопряжения, который в большей мере, чем втулка, подвержен износу. Обычно это до-

стигается благодаря тому, что на цапфе располагают АЭ. Известны различные конструктивные решения такого типа ПСК. Чаще всего АЭ выполняются в виде кольцевой втулки, закрепленной на цапфе, или облицовывают цапфу тонким слоем твердого смазочного материала. Возможны случаи, когда цапфа не имеет АЭ.

При расчете ресурса такого ПСК ставится следующее дополнительное условие: втулка в процессе эксплуатации не изнашивается, т. е. ресурс сопряжения полностью определяется износом цапфы (идеальная обратная пара), который не должен превосходить некоторого наперед заданного предельного значения.

Это условие выполняется с тем большей точностью, чем больше отношение коэффициентов интенсивности изнаши-

5.8. Вспомогательные характеристики, используемые при расчете ресурса ПСК

Наименование	Условное обозначение	Единица измерения	Номер формулы или таблицы
Размер площадки контакта (половина длины дуги контакта)	$a$	м	(5.43)
Относительный ресурс сопряжения	$F(m_2, y^*)$ $F(\chi, m_2, y^*)$		(5.53), табл. 5.9 (5.54), табл. 5.10
Вспомогательная функция	$F_{\bar{1}}(m_{\bar{1}}, \varphi_0)$		Табл. 5.13
Износ цапфы	$h_2$	м	(5.77)
Износ втулки	$h_{\bar{1}}$	м	(5.78)
Относительный износ сопряжения	$h^l$		(5.73)
Предельный износ сопряжения	$h^*$	м	(5.49), (5.72)
Безразмерная толщина АЭ	$h'_0$		(5.62)
Максимальная интенсивность изнашивания	$I_{\max}$		(5.46)
Коэффициент постели	$k_s$	Па <sup>-2</sup>	(5.63)
Безразмерная нагрузка	$p^2$		(5.61)
Давление в центре площадки контакта	$q_m$	Па	(5.42)
Продолжительность стационарного режима изнашивания	$T$	с	(5.68)
Временной параметр процесса изнашивания	$T_0$	с	(5.47)
Продолжительность нестационарного режима изнашивания	$\tilde{T}$	с	(5.66)
Безразмерное время нестационарного режима изнашивания	$\tilde{T}^l$		(5.55), (5.56), (5.69), (5.70)
Ресурс сопряжения	$T^*$	с	(5.75)
Безразмерный предельный износ	$y^*$		(5.50)
Коэффициент относительной износостойкости материалов	$\beta_{\bar{1}, 2}$		(5.71)
Отношение износа цапфы к износу втулки	$\delta$		(5.76)
Относительный зазор	$e_0$		(5.41)
Предельный угол контакта при бесконечно большом времени изнашивания	$\varphi_{\infty}$		Рис. 5.29
Предельный угол контакта при нестационарном режиме изнашивания	$\tilde{\varphi}_0$		(5.64)
Предельный угол контакта сопряжения в момент исчерпания ресурса	$\varphi_0^*$		(5.67), табл. 5.14
Условный предельный угол контакта	$\bar{\varphi}_0^*$		(5.74)
Контактно-термический параметр	$\chi$		(5.48)
Коэффициент нестационарности изнашивания	$\psi$		(5.51)

вания материалов цапфы (АЭ) и втулки. Если, например,  $K_2/K_1 > 30$  (при  $m_1 = m_2 = 1$ ), то износ втулки не превышает 10 % износа цапфы. Это соотношение можно рекомендовать в качестве априорной оценки применимости модели идеальной обратной пары. При расчете учитывается кинетика изменения контактных параметров сопряжения в процессе эксплуатации, обусловленная изменением диаметра цапфы (АЭ). Контактные параметры определяются в соответствии с теорией локального упругого контакта для тел цилиндрической формы. В связи с этим накладываем дополнительное условие  $2\varphi_0 \leq 45^\circ$ .

В расчете могут быть учтены деформации сопрягаемых элементов, обусловленные фрикционным нагревом. Необходимость их учета регламентируется критерием  $M_\theta$ .

*Последовательность расчета износа цапфы (рис. 5.26).*

1. Вычисляют значения  $\Delta(0)$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $q_m(0)$  и  $a(0)$  в начальный момент времени:

$$\Delta(0) = R_1 - R_2(0); \quad (5.40)$$

$$\varepsilon_0 = \Delta(0)/R_2(0); \quad (5.41)$$

$$q_m(0) = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 P}{\pi(1 + \varepsilon_0) \vartheta l_2 R_2(0)}}; \quad (5.42)$$

$$a(0) = \sqrt{\frac{4(1 + \varepsilon_0) P \vartheta R_2(0)}{\pi \varepsilon_0 l_2}}; \quad (5.43)$$

где

$$\vartheta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}. \quad (5.44)$$

2. Проверяют применимость гипотезы о локальности деформаций. При этом должно выполняться условие

$$2 \arcsin \frac{a(0)}{R_2(0)} < 0,7. \quad (5.45)$$

3. Определяют максимальную интенсивность изнашивания на начальной площадке контакта:

$$I_{\max}(0) = K_2 q_m^{m_2}(0). \quad (5.46)$$

4. Вычисляют параметр  $T_0$

$$T_0 = \frac{4\pi\Delta(0)}{a(0) I_{\max}(0) \omega}. \quad (5.47)$$

5. Определяют значение параметра  $\chi$ :

$$\chi = f P \omega R_2(0) \frac{(1 + \mu_1) \alpha_1 + (1 + \mu_2) \alpha_2}{(\lambda_1 + \lambda_2) \vartheta l_2 q_m(0)}. \quad (5.48)$$

6. Рассчитывают значения  $h^*$ ,  $y^*$  и  $\psi$ :

$$h^* = \Delta^* - \Delta(0); \quad (5.49)$$

$$y^* = h^*/\Delta(0); \quad (5.50)$$

$$\psi = \sqrt{\frac{1 + y^*}{1 - \varepsilon_0 y^*}}. \quad (5.51)$$

7. Оценивают необходимость учета теплового расширения тел. С этой целью рассчитывают

$$M_\theta = m_2 \chi \psi^{-1}. \quad (5.52)$$

Если  $M_\theta \leq 0,2$ , то расчет ведут без учета температурных деформаций, в противном случае они учитываются.

8. Определяют относительный ресурс сопряжения. Для случая  $M_\theta \leq 0,2$

$$\begin{aligned} F(m_2, y^*) &= \\ &= \frac{\Gamma\left(\frac{m_2 + 3}{2}\right)}{2\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{m_2 + 2}{2}\right)} \int_0^{y^*} [\psi(y)]^{1 - m_2} dy, \end{aligned} \quad (5.53)$$

где  $\Gamma(x)$  — гамма-функция.

Значения функции  $F(m_2, y^*)$  приведены в табл. 5.9. Если  $\varepsilon_0 y^* \ll 1$ , то относительный ресурс сопряжения подсчитывают по приближенным формулам:

$$\begin{aligned} F(m_2, y^*) &= \\ &= \frac{\Gamma\left(\frac{m_2 + 3}{2}\right)}{\sqrt{\pi} (3 - m_2) \Gamma\left(\frac{m_2 + 2}{2}\right)} \times \\ &\times \left\{ (1 + y^*)^{\frac{3 - m_2}{2}} - 1 \right\} \text{ при } m_2 \neq 3; \end{aligned} \quad (5.53a)$$

### 5.9. Значения функции $F_2(m_2, y^*)$ (см. формулу (5.53))

$y^*$	$m_2 = 1,00$	$m_2 = 1,50$	$m_2 = 2,00$
0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,15	0,16	0,16
1,00	0,31	0,31	0,31
1,50	0,47	0,45	0,43
2,00	0,63	0,59	0,54
3,00	0,95	0,84	0,71
4,00	1,27	1,08	0,92
5,00	1,59	1,31	1,08
6,00	1,90	1,53	1,23
7,00	2,22	1,74	1,36
8,00	2,54	1,94	1,49
9,00	2,86	2,14	1,61
10,00	3,18	2,33	1,73

$$F(m_2, y^*) = \frac{4}{3\pi} \ln(1 + y^*)$$

при  $m_2 = 3$ . (5.536)

Для случая  $M_\theta > 0,2$

$$F(\chi, m_2, y^*) = \frac{\Gamma\left(\frac{m_2 + 3}{2}\right)}{2\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{m_2 + 2}{2}\right)} \times \int_0^{y^*} [\psi(y)]^{1-m_2} \times$$

$$\times \exp\{0,43(m_2 - 1)\chi\psi^{-1}(y)\} dy. (5.54)$$

Значения этой функции приведены в табл. 5.10.

9. Ресурс сопряжения, выраженный в единицах времени, подсчитывают по формулам:

для случая  $M_\theta \leq 0,2$

$$T^* = T_0 F(m_2, y^*), (5.55)$$

для случая  $M_\theta > 0,2$

$$T^* = T_0 F(\chi, m_2, y^*). (5.56)$$

Настоящая методика позволяет определить контактные параметры сопряжения в любой момент времени  $t$  в зависимости от достигнутого уровня износа  $y = \Delta(t)/\Delta(0) - 1$ .

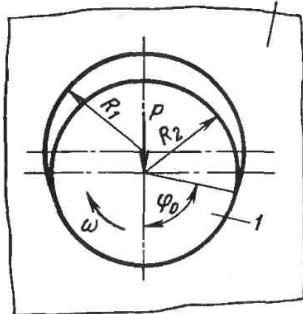


Рис. 5.27. Расчетная схема ЛСК с обратной парой трения (износ АЭ, закрепленного на цапфе):

1 — цапфа; 2 — втулка; 3 — АЭ

Если  $M_\theta < 0,2$ , то

$$a(y) = a(0) \psi^{-1}(y); (5.57)$$

$$q_m(y) = q_m(0) \psi(y). (5.58)$$

Если  $M_\theta > 0,2$ , то

$$a(\chi, y) = a(0) \psi^{-1}(y) \times \exp\{-0,43\chi\psi^{-1}(y)\}; (5.59)$$

$$q_m(\chi, y) = q_m(0) \psi(y) \times \exp\{0,43\chi\psi^{-1}(y)\}, (5.60)$$

где  $\psi(y)$  — износ АЭ.

В зависимости от конструктивных особенностей и условий эксплуатации АЭ подразделяют на тонкослойные и массивные (рис. 5.27): если  $h_0/a > 10$  — АЭ массивный; если  $h_0/a < 0,1$  — АЭ тонкослойный.

Принципиально схема расчета для тонкослойного или массивного АЭ остается той же самой, что для износа цапфы. Отличие заключается в том, что в случае массивного АЭ в расчетах по (5.42)—(5.44) и (5.48) вместо упругих ( $E_2, \mu_2$ ) и теплофизических ( $\alpha_2, \lambda_2$ ) характеристик материала цапфы используют соответствующие характеристики материала АЭ ( $E_3, \mu_3, \alpha_3, \lambda_3$ ), а при тонкослойном покрытии учитывают упругие свойства материала цапфы и теплофизические свойства материала покрытия.



Б.10. Значения функции  $F(\chi, m_2, y^*)$

$y^*$	$\chi = 0,5$ при $m_2$ равном			$\chi = 1,5$ при $m_2$ равном			$\chi = 3,0$ при $m_2$ равном			$\chi = 4,5$ при $m_2$ равном			$\chi = 6,0$ при $m_2$ равном		
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,16	0,15	0,14	0,16	0,12	0,09	0,16	0,09	0,05	0,16	0,07	0,03	0,15	0,05	0,01
1,00	0,32	0,29	0,26	0,32	0,24	0,18	0,32	0,18	0,10	0,32	0,14	0,06	0,31	0,10	0,03
1,50	0,48	0,43	0,37	0,48	0,35	0,26	0,48	0,27	0,16	0,48	0,21	0,09	0,47	0,16	0,05
2,00	0,64	0,55	0,47	0,64	0,46	0,34	0,64	0,36	0,21	0,63	0,28	0,13	0,63	0,22	0,07
3,00	0,96	0,79	0,65	0,95	0,68	0,48	0,95	0,54	0,30	0,95	0,43	0,19	0,95	0,35	0,12
4,00	1,28	1,02	0,81	1,27	0,88	0,61	1,27	0,72	0,40	1,27	0,58	0,26	1,27	0,48	0,18
5,00	1,50	1,24	0,95	1,59	1,08	0,73	1,59	0,89	0,49	1,59	0,73	0,33	1,59	0,60	0,23
6,00	1,91	1,44	1,09	1,91	1,27	0,84	1,91	1,06	0,58	1,91	0,88	0,40	1,90	0,73	0,28
7,00	2,23	1,65	1,22	2,23	1,46	0,95	2,23	1,22	0,66	2,23	1,03	0,47	2,22	0,86	0,33
8,00	2,55	1,84	1,34	2,55	1,64	1,05	2,55	1,39	0,74	2,55	1,17	0,53	2,54	0,99	0,38
9,00	2,87	2,03	1,45	2,86	1,82	1,15	2,86	1,54	0,82	2,86	1,32	0,60	2,86	1,12	0,44
10,00	3,19	2,22	1,56	3,18	1,99	1,24	3,18	1,70	0,90	3,18	1,46	0,66	3,18	1,25	0,49

При расчете износа ПСК с АЭ независимо от толщины последнего параметры степенного закона изнашивания  $K_2$  и  $m_2$ , естественно, являются характеристиками триботехнических свойств АЭ.

Наиболее трудным является вопрос, к какому типу следует отнести конкретный АЭ. Весьма приближенно можно руководствоваться следующими соображениями: твердые смазочные покрытия толщиной в несколько десятков микрометров можно относить к числу тонкослойных АЭ, а различного рода втулки, толщина которых измеряется миллиметрами, — к числу массивных АЭ.

Иногда вопрос о типе АЭ может быть решен на основе несложных расчетных оценок. Например, можно рассчитать площадку контакта в ПСК по (5.43), используя при этом вместо  $E_2$  и  $\mu_2$  величины  $E_3 < E_2$  и  $\mu_3$ . Если окажется, что  $h_0/a < 0,1$ , то тем более это условие выполняется для реального сопряжения и АЭ следует отнести к числу тонкослойных.

**Пример 5.3.** Рассчитать ресурс ПСК с АЭ, выполненным в виде покрытия, расположенного на цапфе, при следующих исходных данных:  $R_2(0) = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м;  $L_2 = 5 \cdot 10^{-2}$  м;  $\Delta(0) = 5 \cdot 10^{-5}$  м;  $h_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  м;  $P = 4,9 \times 10^3$  Н;  $\omega = 0,785$  с $^{-1}$ ;  $\Delta^* = 2 \times 10^{-4}$  м;  $f = 0,1$ ;  $E_1 = E_2 = 1,96 \times 10^{11}$  Па;  $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ ;  $E_3 = 0,11 \times 10^{10}$  Па;  $\mu_3 = 0,4$ ;  $\lambda_1 = 0,37$  Вт  $\times$  (м  $\cdot$  К) $^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 1,3 \cdot 10^{-5}$  К $^{-1}$ ;  $\lambda_3 = 0,97$  Вт  $\cdot$  (м  $\cdot$  К) $^{-1}$ ;  $\alpha_3 = 9 \cdot 10^{-5}$  К $^{-1}$ ;  $m_2 = 1,5$ ;  $K_2 = 1,56 \cdot 10^{-19}$  Па $^{-1,5}$ . При расчете будем полагать, что покрытие тонкослойное.

По (5.41)–(5.43) вычислим  $\epsilon_0$ ,  $q_m(0)$  и  $a(0)$ . При этом в соответствии с допущением о тонкослойности покрытия значение  $\phi$  рассчитывается по формуле

$$\phi = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} = \frac{2(1 - 0,09)}{1,96 \cdot 10^{11}} = 9,28 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1};$$

$$q_m(0) = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,9 \cdot 10^3}{3,14(1 + 2 \cdot 10^{-3})9,28 \cdot 10^{-12} \times 5 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}} = 1,64 \cdot 10^7 \text{ Па};$$

$$a(0) = \sqrt{\frac{4(1 + 2 \cdot 10^{-3})4,9 \cdot 10^3 \cdot 9,28 \times 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}} = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Применимость гипотезы о локальности деформаций подтверждается наблюдением условия (5.45)

$$2 \arcsin \frac{3,81 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-2}} = 0,304 < 0,7.$$

Вычислим максимальную интенсивность изнашивания (5.46)

$$I_{\max}(0) = 1,56 \cdot 10^{-19} (1,64 \cdot 10^7)^{1,5} = 1,04 \cdot 10^{-8}.$$

По (5.47) рассчитаем

$$T_0 = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{3,81 \cdot 10^{-3} \cdot 1,04 \cdot 10^{-8} \cdot 0,785} = 2,02 \cdot 10^7 \text{ с}.$$

Определим значение  $\chi$ . При этом в (5.48) величины  $\mu_2$ ,  $\alpha_2$  и  $\lambda_2$  следует заменить на  $\mu_3$ ,  $\alpha_3$  и  $\lambda_3$ , поскольку на цапфе расположен АЭ

$$\chi = 0,1 \cdot 4,9 \cdot 10^3 \cdot 0,785 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \times (1 + 0,4) 9 \cdot 10^{-5} + (1 + 0,3) 1,3 \cdot 10^{-5} \times \frac{37 + 0,97}{(37 + 0,97) 9,28 \cdot 10^{-12} \times 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1,64 \cdot 10^7} = 4,75.$$

Рассчитаем значения  $y^*$  по (5.50) и  $\psi$  по (5.51):

$$y^* = \frac{2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-5}} = 3;$$

$$\psi(y^*) = \sqrt{\frac{1 + 3}{1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 3}} \approx 2.$$

Оценим значение параметра  $M_\theta$  по (5.52):

$$M_\theta = 1,5 \cdot 4,75 \cdot 0,5 = 3,56 > 0,2.$$

Следовательно, при расчете ресурса необходимо учитывать температурные деформации тел.

По табл. 5.10 находим значение  $F$  для  $\chi = 4,75$ ;  $m_2 = 1,5$ ;  $y^* = 3$ :

$$F(4,75; 1,5; 3) = 0,41.$$

Наконец, по (5.56) рассчитаем ресурс подшипника скольжения:

$$T^* = 2,02 \cdot 10^7 \cdot 0,41 = 0,83 \cdot 10^7 \approx 2,3 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

Расчет подшипника скольжения с прямой парой трения. Расчетная модель [5.14]. Традиционной конструктивной схемой ПСК является прямая пара трения, в которой роль АЭ выполняет втулка подшипника скольжения (рис. 5.28).

При расчете такого ПСК делаются следующие дополнительные допущения.

Цапфа в процессе эксплуатации не изнашивается, т. е. ресурс сопряжения полностью определяется износом АЭ (идеальная прямая пара).

Цапфа и обойма втулки считаются недеформируемыми телами, а деформации локализованы в АЭ.

Толщина АЭ мала по сравнению с размерами соприкасающихся тел, т. е.  $h_0/R_2 \ll 1$ .

Первое допущение выполняется тем точнее, чем больше отношение коэффициентов интенсивности изнашивания АЭ и цапфы. Можно руководствоваться такой оценкой, если  $K_1/K_2 > 5$ , то с погрешностью, не превышающей 10 %, допустимо считать цапфу неизнашиваемым элементом.

Второе и третье допущения основаны на сложившейся практике конструирования опор скольжения, которая состоит в том, что модули упругости цапфы и обоймы на два-три порядка превосходят модуль упругости АЭ, а последний выполняется в виде тонкостенной втулки или тонкослойного покрытия.

Следствием этих допущений является то, что АЭ ведет себя подобно телу

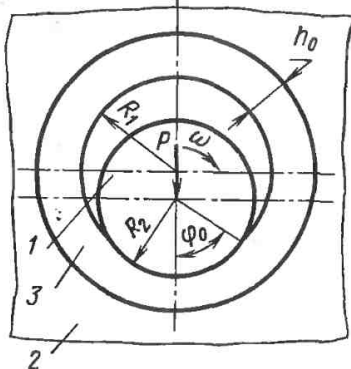


Рис. 5.28. Расчетная схема ПСК с прямой парой трения (износ АЭ, закрепленного во втулке):

1 — цапфа; 2 — втулка; 3 — АЭ

Винклера, т. е. его осадка пропорциональна давлению.

В методе расчета учитывается кинематика изменения контактных параметров сопряжения в процессе его эксплуатации и эволюция формы рабочей поверхности АЭ, обусловленная его изнашиванием. В связи с этим выделены две стадии процесса — начальная стадия (нестационарный режим), в течение которой изменение контактных параметров носит ярко выраженный нелинейный характер, и установившийся режим, когда на площадке контакта устанавливается распределение давления, близкое к косинусоидальному, а скорость изнашивания почти не меняется во времени.

*Последовательность расчета.*

1. Вычисляют безразмерную нагрузку и толщину АЭ по формулам

$$P' = (k_3 P) / (l_2 R_2); \quad (5.61)$$

$$h_0^* = h_0 / \Delta (0), \quad (5.62)$$

$$\text{где } k_3 = \frac{(1 - 2\mu_3)(1 + \mu_3)}{(1 - \mu_3) E_3}. \quad (5.63)$$

Если при этом оказывается, что  $1 < h_0^* < 100$  и  $0,5 \cdot 10^{-3} < P' < 4 \cdot 10^{-3}$ , то максимальный износ за время нестационарного режима составляет не более 0,1 начальной толщины АЭ. Учитывая, что скорость изнашивания в нестационарном режиме больше, чем

5.11. Значения функции  $N(P', h'_0)$ 

$h'_0$	$P' = 0,1 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,3 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,5 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,7 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,9 \cdot 10^{-3}$	$P' = 1,0 \cdot 10^{-3}$	$P' = 3 \cdot 10^{-3}$	$P' = 5 \cdot 10^{-3}$	$P' = 7 \cdot 10^{-3}$	$P' = 9 \cdot 10^{-3}$
1	0,0662	0,1114	0,1424	0,1669	0,1883	0,1983	0,3332	0,4306	0,5098	0,5769
21	0,2836	0,5014	0,6667	0,8080	0,9124	0,9533	1,2625	1,3528	1,3992	1,4277
41	0,3970	0,7334	0,9494	1,0680	1,1423	1,1703	1,3799	1,4388	1,4679	1,4851
61	0,4931	0,9058	1,0891	1,1828	1,2413	1,2635	1,4284	1,4731		
81	0,5783	1,0152	1,1704	1,2492						

в установившемся, для соотношения продолжительности нестационарного режима изнашивания  $T$  и ресурса  $T^*$  эта оценка заведомо справедлива. Если по условию задачи можно пренебречь нестационарным режимом изнашивания, то переходят сразу к п. 4 и в дальнейшем считают  $\tilde{\varphi}_0 = 0$ ,  $\tilde{T} = 0$ . В противном случае переходят к следующему пункту методики расчета.

2. С помощью табл. 5.11 и 5.12 находят значения вспомогательных функций  $N(P', h'_0)$ ,  $M(P', h'_0)$  и  $E(P', h'_0)$ .

3. Определяют угол контакта сопряжения в момент окончания нестационарного режима изнашивания

$$\tilde{\varphi}_0 = N(P', h'_0) \quad (5.64)$$

и безразмерную продолжительность нестационарного режима

$$\tilde{T}' = \exp\{m_1 M + L\}, \quad (5.65)$$

по которой затем рассчитывают реальное время нестационарного режима

$$\tilde{T} = \tilde{T}' \frac{\Delta(0)}{\omega R_2 K_1} \left(\frac{R_2 I_2}{P}\right)^{m_1}. \quad (5.66)$$

4. Определяют предельное значение угла контакта в сопряжении, соответствующее предельно допустимому смещению оси вала относительно оси втулки:

$$\varphi_0^* = \arccos \frac{\Delta(0)}{\Delta^*}. \quad (5.67)$$

5. Вычисляют продолжительность установившегося режима изнашивания, в конце которого радиальный зазор в сопряжении станет равным  $\Delta^*$ :

$$T = \left(\frac{R_2 I_2}{P}\right)^{m_1} \frac{\Delta(0)}{K_1 \omega R_2} \times \\ \times [F_1(m_1, \varphi_0^*) - F_1(m_1, \tilde{\varphi}_0)]. \quad (5.68)$$

Значения функции  $F_1(m_1, \varphi_0)$  приведены в табл. 5.13.

6. Определяют ресурс сопряжения:

$$T^* = \tilde{T} + T. \quad (5.69)$$

*Частный случай.* Если  $m_1 = 1$  и продолжительность нестационарного режима изнашивания составляет малую долю от ресурса подшипника (в случае  $1 < h'_0 < 100$  и  $0,5 \cdot 10^{-3} < P' < 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $T/T^* \geq 0,95$ ), ресурс рассчитывают по формуле

$$T^* = \frac{I_2 \Delta(0)}{K_1 \omega P} \left( \frac{\varphi_0^*}{\cos \varphi_0^*} - \sin \varphi_0^* \right) - \frac{k_3 h_0}{K_1 \omega R_2}. \quad (5.70)$$

**Пример 5.4.** Определить ресурс подшипника скольжения при следующих значениях исходных параметров:  $R_2 = 10^{-2}$  м;  $I_2 = 2 \cdot 10^{-2}$  м;  $\Delta(0) = 10^{-4}$  м;  $h_0 = 10^{-3}$  м;  $P = 4 \cdot 10^3$  Н;  $\Delta^* = 5 \times 10^{-4}$  м;  $\omega = 3,14$  с $^{-1}$ ;  $K_1 = 3,82 \times 10^{-18}$  Па $^{-1,4}$ ;  $m_1 = 1,4$ ;  $E_3 = 10^9$  Па;  $\mu_3 = 0,4$ .

5.12. Значения функции  $M$  (в числителе) и  $L$  (в знаменателе)

$n_0$	$P' = 0,1 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,3 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,5 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,7 \cdot 10^{-3}$	$P' = 0,9 \cdot 10^{-3}$	$P' = 1,0 \cdot 10^{-3}$	$P' = 3,0 \cdot 10^{-3}$	$P' = 5,0 \cdot 10^{-3}$	$P' = 7,0 \cdot 10^{-3}$	$P' = 9,0 \cdot 10^{-3}$
1	$\frac{-1,8987}{-8,0699}$	$\frac{-1,6516}{-5,8842}$	$\frac{-1,4334}{-5,2240}$	$\frac{-1,2876}{-4,8247}$	$\frac{-1,1764}{-4,5300}$	$\frac{-1,1406}{-4,3668}$	$\frac{-0,6864}{-3,0527}$	$\frac{-0,4287}{-2,5039}$	$\frac{-0,2407}{-2,1924}$	$\frac{-0,1122}{-1,9309}$
21	$\frac{-0,8242}{-3,4685}$	$\frac{-0,2503}{-2,2493}$	$\frac{-0,0680}{-1,6842}$	$\frac{0,3502}{-1,4433}$	$\frac{0,5191}{-1,2322}$	$\frac{0,5744}{-1,1341}$	$\frac{0,8094}{-0,0799}$	$\frac{0,8586}{0,3158}$	$\frac{0,8890}{0,5557}$	$\frac{0,9115}{0,7250}$
41	$\frac{-0,5087}{-2,6858}$	$\frac{0,2057}{-1,5653}$	$\frac{0,5782}{-1,1643}$	$\frac{0,6959}{-0,8005}$	$\frac{0,7485}{-0,5426}$	$\frac{0,7660}{-0,4435}$	$\frac{0,8801}{0,4415}$	$\frac{0,9231}{0,7919}$	$\frac{0,9530}{1,0047}$	$\frac{0,9714}{1,1644}$
61	$\frac{-0,2697}{-2,2781}$	$\frac{0,5200}{-1,2709}$	$\frac{0,7151}{-0,7336}$	$\frac{0,7761}{-0,4027}$	$\frac{0,8105}{-0,1886}$	$\frac{0,8208}{-0,0970}$	$\frac{0,9151}{0,7215}$	$\frac{0,9581}{1,0503}$		
81	$\frac{-0,0982}{-1,9534}$	$\frac{0,6572}{-0,9892}$	$\frac{0,7701}{-0,4498}$	$\frac{0,8155}{-0,1588}$						

5.13. Значения функции  $F_1(m_1, \varphi_0)$ 

$\varphi_0$ , градус	$m_1 = 1,0$	$m_1 = 1,2$	$m_1 = 1,4$	$m_1 = 1,6$	$m_1 = 1,8$	$m_1 = 2,0$
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001
15	0,012	0,010	0,008	0,007	0,006	0,005
20	0,029	0,026	0,022	0,020	0,017	0,015
25	0,059	0,054	0,049	0,045	0,041	0,038
30	0,105	0,099	0,093	0,089	0,084	0,080
35	0,172	0,167	0,163	0,159	0,156	0,153
40	0,269	0,268	0,267	0,268	0,269	0,271
45	0,404	0,411	0,420	0,430	0,441	0,454
48	0,509	0,524	0,542	0,561	0,583	0,606
51	0,637	0,664	0,693	0,726	0,762	0,801
54	0,795	0,836	0,882	0,933	0,989	1,049
57	0,988	1,050	1,118	1,193	1,276	1,367
60	1,229	1,317	1,414	1,523	1,643	1,775
63	1,532	1,692	1,792	1,945	2,115	2,303
66	1,920	2,090	2,281	2,494	2,732	2,996
69	2,428	2,663	2,927	3,223	3,555	3,926
72	3,118	3,443	3,809	4,222	4,686	5,208
74	3,728	4,133	4,593	5,112	5,697	6,357
76	4,518	5,030	5,611	6,269	7,014	7,857
78	5,578	6,234	6,981	7,830	8,792	9,893
80	7,071	7,931	8,914	10,033	11,306	12,753
81	8,070	9,067	10,209	11,510	12,993	14,681
82	9,322	10,493	11,833	13,365	15,111	17,101
83	10,937	12,331	13,930	15,758	17,846	20,229
84	13,100	14,793	16,738	18,965	21,512	24,422
85	16,144	18,260	20,693	23,483	26,677	30,331
86	20,751	23,506	26,679	30,322	34,498	39,280

Определим безразмерные параметры  $P'$  и  $h'_0$  по (5.61) и (5.62)

$$P' = \frac{(1 - 2 \cdot 0,4)(1 + 0,4) 4 \cdot 10^3}{10^3 (1 - 0,4) 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2}} =$$

$$= 9,34 \cdot 10^{-3};$$

$$h'_0 = \frac{10^{-3}}{10^{-4}} = 10.$$

Поскольку предельный износ подшипника  $h^* = \Delta^* - \Delta(0)$  составляет  $4 \cdot 10^{-4}$  м и отношение его к первоначальной толщине АЭ равно 0,25 и, кроме того, параметр  $P$  не удовлетворяет условию, оговоренному в п. 1, то доля нестационарного режима изнашивания в общем ресурсе сопряже-

ния уже значительна и ее следует учесть при расчетах.

Определим значения вспомогательных функций  $N$ ,  $M$  и  $L$ , пользуясь табл. 5.9 и 5.10. Поскольку в них отсутствует строка  $h'_0 = 10$  и столбец  $P'_1 = 9,34 \cdot 10^{-3}$ , то предстоит вычислить значения этих функций. Хороший результат дает метод параболической интерполяции по трем узлам. Выбирая в качестве узлов интерполяции  $P'_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ ;  $P'_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ ;  $P'_3 = 9 \cdot 10^{-3}$  и  $h'_{0,1} = 1$ ;  $h'_{0,2} = 21$  и  $h'_{0,3} = 41$ , вычислим, например, сначала значения этих функций в точках  $(9,34 \cdot 10^{-3}; 1)$ ,  $(9,34 \cdot 10^{-3}; 21)$  и  $(9,34 \cdot 10^{-3}; 41)$  (интерполяция по  $P'$ ), а затем (интерполяция по  $h'_0$ ) значение этих функций в точке  $(9,34 \cdot 10^{-3}; 10)$ .

В итоге получим  $N(9,34 \cdot 10^{-3}; 10) = 1,0641$ ,  $M(9,34 \cdot 10^{-3}; 10) = 0,4762$ ,  $L(9,34 \cdot 10^{-3}; 10) = -0,4326$ .

Определим угол контакта в сопряжении в момент окончания нестационарного режима изнашивания по (5.64)

$$\begin{aligned}\bar{\varphi}_0 &= \frac{180}{\pi} N(9,34 \cdot 10^{-3}) = \\ &= \frac{180}{3,14} 1,0641 \approx 61^\circ\end{aligned}$$

и безразмерную продолжительность нестационарного режима по (5.65)

$$\tilde{T}' = \exp\{1,4 \cdot 0,4762 - 0,4326\} = 1,26.$$

Тогда реальное время нестационарного режима по (5.66)

$$\begin{aligned}\tilde{T} &= 1,26 \frac{10^{-4}}{3,14 \cdot 10^{-2} \cdot 3,82 \cdot 10^{-18}} \times \\ &\times \left( \frac{10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^3} \right)^{1,4} = \\ &= 6,31 \cdot 10^4 \text{ с.}\end{aligned}$$

Вычислим предельное значение угла контакта по (5.67)

$$\varphi_0^* = \arccos \frac{10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}} = 78^\circ 30'.$$

С помощью табл. 5.13 определим значения функции  $F_1(m_1, \varphi_0)$  при  $\varphi_0 = \bar{\varphi}_0$  и  $\varphi_0 = \varphi_0^*$ :

$$F_1(1,4; 61^\circ) = 1,53;$$

$$F_2 = (1,4; 78^\circ 30') = 7,41,$$

а затем по (5.68) вычислим продолжительность стационарного режима изнашивания:

$$\begin{aligned}T &= \left( \frac{10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^3} \right)^{1,4} \times \\ &\times \frac{10^{-4}}{3,82 \cdot 10^{-18} \cdot 3,14 \cdot 10^{-2}} \times \\ &\times (7,41 - 1,53) = 2,94 \cdot 10^5 \text{ с.}\end{aligned}$$

В заключение вычислим ресурс подшипника скольжения по (5.69):

$$\begin{aligned}T^* &= 6,31 \cdot 10^4 + 2,94 \cdot 10^5 = \\ &= 3,57 \cdot 10^5 \text{ с} \approx 100 \text{ ч.}\end{aligned}$$

**Расчет ресурса подшипника скольжения с учетом износа цапфы и втулки.** Если значения износостойкости материалов цапфы и втулки не сильно разнятся, то предположение о неизнашиваемости одного из этих элементов является грубым. В этом случае износ сопряжения определяется износом как втулки, так и цапфы.

При расчете ресурса такого подшипника скольжения сделаем следующие дополнительные предположения: контактирующие тела считаются жесткими; интенсивность изнашивания каждого из сопрягаемых тел является линейной функцией давления.

Начальное состояние сопряжения в соответствии с первым допущением характеризуется нулевым углом контакта и соответственно бесконечно большими контактными давлениями. В дальнейшем по мере износа цапфы и втулки угол контакта сопряжения увеличивается, в связи с чем меняются контактные давления. Излагаемая далее методика учитывает кинетику изменения этих параметров в процессе эксплуатации.

Ресурс сопряжения определяется допустимым изменением первоначального зазора, которое складывается из износа цапфы и максимального износа втулки в середине дуги контакта.

*Последовательность расчета.*

1. Вычисляют параметр  $\beta_{1,2}$ :

$$\beta_{1,2} = K_2 / (\pi K_1). \quad (5.71)$$

2. Рассчитывают значения  $h^*$  и  $h'$ :

$$h^* = \Delta^* - \Delta(0); \quad (5.72)$$

$$h' = \Delta(0) / h^*. \quad (5.73)$$

3. Используя табл. 5.14, по вычисленным значениям  $\beta_{1,2}$  и  $h'$  отыскивают предельный угол контакта  $\varphi_0^*$ .

4. С помощью графика, приведенного на рис. 5.29, определяют значение угла  $\varphi_0$ .

5.14. Значения предельного угла контакта  $\varphi_0^*$

$h'$	$\beta_{1,2} = 0,2$	$\beta_{1,2} = 0,4$	$\beta_{1,2} = 0,6$	$\beta_{1,2} = 0,8$	$\beta_{1,2} = 1,0$	$\beta_{1,2} = 2,0$	$\beta_{1,2} = 3,0$	$\beta_{1,2} = 4,0$
0,1	1,336	1,234	1,158	1,097	1,047	0,887	0,795	0,733
0,2	1,276	1,185	1,115	1,060	1,014	0,864	0,776	0,716
0,3	1,224	1,140	1,076	1,025	0,982	0,841	0,757	0,700
0,4	1,177	1,100	1,041	0,933	0,953	0,819	0,739	0,684
0,5	1,135	1,065	1,009	0,964	0,926	0,799	0,722	0,669
1,0	0,979	0,926	0,884	0,849	0,819	0,716	0,652	0,607
2,0	0,797	0,762	0,733	0,708	0,686	0,609	0,559	0,523
4,0	0,617	0,596	0,577	0,561	0,547	0,493	0,457	0,431
6,0	0,523	0,507	0,493	0,481	0,470	0,428	0,399	0,377
8,0	0,461	0,449	0,438	0,428	0,419	0,385	0,360	0,341
10,0	0,418	0,408	0,398	0,390	0,383	0,353	0,331	0,314

5. По найденным значениям  $\varphi_\infty$  и  $\varphi_0^*$  рассчитывают условное значение предельного угла контакта:

$$\bar{\varphi}_0^* = \varphi_0^* \frac{\pi}{2\varphi_\infty} \quad (5.74)$$

6. Ресурс сопряжения рассчитывают по формуле

$$T^* = \frac{1}{2\beta_{1,2} + 1} \frac{l_2 \Delta(0)}{K_1 \omega P} \times \left( \frac{\bar{\varphi}_0^*}{\cos \bar{\varphi}_0^*} - \sin \bar{\varphi}_0^* \right) \quad (5.75)$$

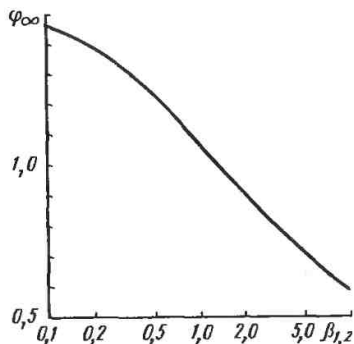


Рис. 5.28.

Иногда необходимо оценить износ каждого элемента сопряжения в отдельности. Изложенная здесь постановка задачи позволяет это сделать.

Сначала находят отношение износа цапфы к износу втулки:

$$\delta = \frac{h_2}{h_1} =$$

$$= \frac{(h' + 1) \cos \varphi_0^* - h'}{1 - [(h' + 1) \cos \varphi_0^* - n']}, \quad (5.76)$$

а затем вычисляют отдельно износ цапфы

$$h_2 = h^* / (1 + \delta) \quad (5.77)$$

и износ втулки

$$h_1 = \delta h^* / (1 + \delta). \quad (5.78)$$

Пример 5.5. Рассчитать ресурс подшипника скольжения при следующих исходных данных:  $R_2 = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $l_2 = 5 \cdot 10^{-2}$  м;  $\Delta(0) = 5 \cdot 10^{-5}$  м;  $P = 5 \cdot 10^3$  Н;  $\Delta^* = 3,0 \cdot 10^{-4}$  м;  $\omega = 1,57$  с $^{-1}$ ;  $K_1 = 2,5 \cdot 10^{-16}$  Па $^{-1}$ ;  $K_2 = 1,57 \cdot 10^{-16}$  Па $^{-1}$ .

Из (5.71) получаем

$$\beta_{1,2} = \frac{1,57 \cdot 10^{-16}}{3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-16}} = 2.$$



Вычисляем значения  $h^*$  по (5.72) и  $h'$  по (5.73)

$$h^* = 3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5} = 2,5 \cdot 10^{-4};$$

$$h' = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 0,2.$$

По табл. 5.14 для определенных ранее значений  $h'$  и  $\beta_{1,2}$  отыскиваем предельный угол контакта  $\varphi_0^* = 0,863$ .

С помощью графика, приведенного на рис. 5.29, определяем  $\varphi_\infty = 0,912$ .

Вычисляем значение  $\bar{\varphi}_0^*$  по (5.74):

$$\bar{\varphi}_0^* = 0,863 \frac{3,14}{2 \cdot 0,912} = 1,4864.$$

В заключение рассчитываем ресурс сопряжения по (5.75):

$$T^* = \frac{1}{2 \cdot 2 + 1} \times \\ \times \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-16} \cdot 1,57 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \times \\ \times \left( \frac{1,4864}{\cos 1,4864} - \sin 1,4864 \right) = \\ = 4,33 \cdot 10^6 \text{ с.}$$

Износ каждого из элементов подвижного сопряжения в момент времени  $t = T^*$  рассчитывается по (5.77) и (5.78). Для данного примера

$$\delta = \frac{(0,2 + 1) \cos 0,863 - 0,2}{1 - [(0,2 + 1) \cos 0,863 - 0,2]} = \\ = 1,38;$$

$$h_2 = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{(1 + 1,38)} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$h_1 = \frac{1,38 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4}}{(1 + 1,38)} = 1,45 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Аналогично решаются и некоторые обратные задачи, когда по заданному ресурсу сопряжения требуется подобрать, например, геометрические размеры тел, нагрузку и т. п. Однако если вопрос сводится к подбору материалов пары трения, то задача становится очень сложной, поскольку параметр  $\beta_{1,2}$ , характеризующий относительную

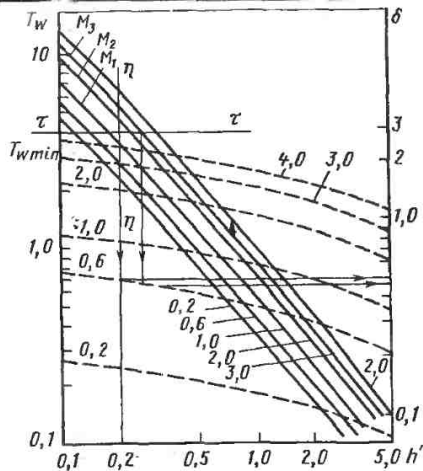


Рис. 5.30. Номограмма для расчета ресурса ПСК:

—  $T_W = f(h')$ ; — — —  $\delta = f(h')$ ; числа возле кривых соответствуют значению параметра  $\beta_{1,2}$

износостойкость элементов сопряжения, входит неявным образом в выражение в скобках, стоящее в правой части (5.76). Определенную помощь здесь оказывает графическое представление результатов расчетов, которое в силу своей наглядности существенно упрощает поиск решения задачи.

На рис. 5.30 приведена такая система графиков, построенная в координатах  $T_W$ ,  $h'$  и  $\delta$ ,  $h'$  где  $T_W = \frac{1}{2\beta_{1,2} + 1} (\bar{\varphi}_0^* / \cos \bar{\varphi}_0^* - \sin \bar{\varphi}_0^*)$  — параметр, зависящий от  $\beta_{1,2}$  и  $h'$ .

Рассмотрим другую задачу. Требуется подобрать материал покрытия цапфы подшипника скольжения и толщину покрытия, если заданы характеристики сопряжения:  $l_2$ ,  $\Delta(0)$ ,  $K_1$ ,  $\omega$ ,  $P$ . Кроме того, известно, что долговечность подшипника должна быть не меньше  $T_{\min}^*$ , а суммарный износ сопряжения при этом не должен быть больше  $h_{\max}^*$ . В качестве материала покрытия могут быть использованы, скажем, три материала  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ , характеризующиеся соответственно коэф-

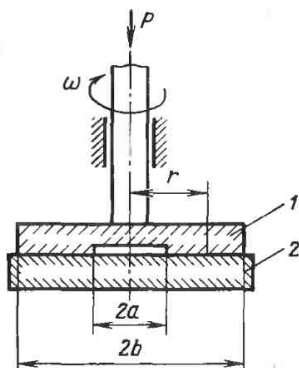


Рис. 5.31. Расчетная схема осевого ПСК

коэффициентами интенсивности изнашивания  $K_3^{(1)}$ ,  $K_3^{(2)}$ ,  $K_3^{(3)}$ .

По исходным данным вычислим минимальное значение параметра  $T_{W \min} = T_{\min}^* / [I_2 \Delta (0) / (K_1 \omega P)]$  [см. формулу (5.75)]. Этому значению на рис. 5.30 соответствует прямая  $\tau-\tau$ . Через точку на оси абсцисс, соответствующую  $h^* = h_{\max}^*$ , проведем прямую  $\eta-\eta$ . Условиям задачи будут удовлетворять лишь те кривые, отличающиеся по параметру  $\beta_{1,2}$ , которые проходят через часть плоскости, ограниченную снизу и слева прямыми  $\tau-\tau$  и  $\eta-\eta$  соответственно. Пусть, например, для материала  $M_2$  ( $\beta_{1,2}^{(1)} = \frac{K_2^{(1)}}{\pi K_1}$ ) зависимость  $T_W$  от  $h'$  проходит вне этой части плоскости, а для материалов  $M_2$  и  $M_3$  — внутри нее. Следовательно, условиям задачи будут удовлетворять материалы  $M_2$  и  $M_3$ .

Поскольку за ресурс сопряжения цапфа не должна изнашиваться на величину, большую, чем толщина покрытия, то его минимальную толщину можно считать равной износу цапфы. Последний для двух материалов  $M_1$  и  $M_2$  может быть найден с помощью графиков, построенных в системе координат  $\delta$ ,  $h'$ , и последующих расчетов по (5.77) и (5.78). Максимальная толщина покрытия для данного материала получается при условии, что

$h^* = h_{\max}^*$ , а минимальная — при значении  $h^*$ , соответствующем пересечению кривой  $T_W = f(h')$  с прямой  $\tau-\tau$ .

### 5.8.2. Осевые опоры скольжения

Расчетная схема осевого подшипника скольжения представлена на рис. 5.31. Он состоит из плоской кольцевой пяты 1, опирающейся на подпятник 2. Пята вращается с угловой скоростью  $\omega$  и нагружена осевой силой  $P$ . Поскольку участки рабочих поверхностей пяты и подпятника, расположенные на разных расстояниях от оси вращения, изнашиваются с разной скоростью (у них разные пути трения), условие неразрывности контакта в процессе эксплуатации может быть выполнено лишь с учетом конечной жесткости контакта. В связи с этим рассмотрим задачу об износе такого сопряжения, считая, что пята и подпятник являются жесткими, а их контактные деформации  $\omega$ , обусловленные шероховатостью, пропорциональны давлению  $q$ , т. е.  $\omega = kq$ . При этом, несмотря на износ сопрягаемых тел, шероховатость поверхностей сохраняется, и в первом приближении деформационные свойства ее можно считать независимыми от времени.

Кроме того, предполагается, что интенсивность изнашивания каждого из сопрягаемых тел является линейной функцией давления, т. е.  $I = Kq$ .

Кинетика изменения контактных давлений в сопряжении в процессе износа описывается дифференциальным уравнением

$$k_2 \ddot{q}(r', t) + \frac{K_2 b \omega}{(1 + \beta)} (r' + \beta) \dot{q}(r', t) = F_2(t), \quad (5.79)$$

где  $k_2 = k_1 + k_2$ ;  $K_2 = K_1 + K_2$ ;  $\beta = a/(b - a)$ ;  $\dot{g} = \partial \bar{g} / \partial t$ ;  $r' = (r - a)/(b - a)$ ;  $F_2(t) = \frac{2K_2 b \omega}{(1 + \beta)(1 + 2\beta)} \times \int_0^1 (\rho + \beta)^2 q(\rho, t) d\rho$ ,  $k_i$  — коэффи-

циент податливости упругого слоя, м·Па<sup>-1</sup>;  $K_2$  — коэффициент интенсивности изнашивания, Па<sup>-1</sup>;  $a$  и  $b$  — внутренний и наружный радиусы пяты, м;  $t$  — текущее время, с;  $q(r', t)$  — давление на контакте, Па,  $q(0)$  — давление в начальный момент времени;  $F_2(t)$  — функция, пропорциональная скорости сближения тел в процессе износа  $v(t)$ ,  $F_2(t) = k_{\Sigma} v(t)$ ,  $i = 1, 2$  — индексы, относящиеся к пяте и подпятнику.

Численный анализ (5.79) показал, что скорость изнашивания сопряжения может быть представлена в виде

$$v(t) = v_0 e^{-\lambda t/t^*} + v_{\infty} (1 - e^{-\lambda t/t^*}), \quad (5.80)$$

где

$$v_0 = v(0) = \frac{2}{3\pi b} K_{\Sigma} P \times \frac{(1 + \beta) [(1 + \beta)^3 - \beta^3]}{(1 + 2\beta)^2};$$

$$v_{\infty} = v(\infty) = \frac{1}{2\pi b} K_{\Sigma} P (1 + \beta);$$

$$t^* = \frac{3k_{\Sigma}}{2K_{\Sigma} b} \times \frac{(1 + 2\beta)(1 + \beta)}{(1 + \beta)^3 - \beta^3} —$$

характерное время;  $\lambda$  — параметр, зависящий от  $\beta$  (рис. 5.32). Износ сопряжения  $h$  за время  $t$  подсчитывается по формуле

$$h(t) = v_0 \left\{ \frac{t^*}{\lambda} \left( \frac{v_{\infty}}{v_0} - 1 \right) \times \left[ \exp \left( -\frac{\lambda t}{t^*} \right) - 1 \right] + \frac{v_{\infty}}{v_0} t \right\}. \quad (5.81)$$

Если  $t \gg t^*/\lambda$ , то

$$h(t) \approx v_{\infty} t + \frac{t^*}{\lambda} (v_0 + v_{\infty}). \quad (5.82)$$

Если  $t \ll t^*/\lambda$ , то

$$h(t) \approx v_0 t. \quad (5.83)$$

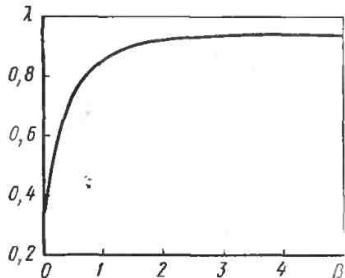


Рис. 5.32.

### 5.8.3. Уплотнения

Уплотнение — это устройство, предназначенное для обеспечения герметичности. Любое уплотнение включает в себя герметизатор и уплотнительную поверхность. В зависимости от относительной скорости между герметизатором и уплотнительным элементом различают подвижные и неподвижные уплотнения.

Если между герметизатором и уплотнительным элементом в процессе эксплуатации возникают силы трения, то уплотнение называют контактным, в противном случае оно относится к классу бесконтактных уплотнений. Важнейшими показателями работоспособности уплотнений являются: степень герметичности, ресурс работы, коэффициент работоспособности. Износ — одна из основных причин, в результате которой подвижные контактные уплотнения утрачивают свою работоспособность.

Основные проявления износа сводятся к ухудшению качества рабочих поверхностей уплотнений, изменению первоначальной формы герметизатора и усилия прижатия его к уплотняемой поверхности. Количественным показателем, характеризующим время, в течение которого уплотнение сохраняет свою работоспособность, является ресурс.

Остановимся подробнее на торцовых и манжетных уплотнениях (МУ) валов, которые получили наибольшее распространение в технике.

Для расчета ресурса по износу торцовых уплотнений может быть использована та же самая методика, которая

была изложена в параграфе 5.8.2. При этом следует учесть, что осевое усилие в торцовом уплотнении может меняться в процессе изнашивания, это вносит некоторые особенности в упомянутый расчет.

Большое разнообразие конструктивных форм МУ, используемых материалов, условий и режимов эксплуатации породило многообразие методических подходов к расчету их ресурса.

Рассмотрим наиболее простую схему расчета, которая позволяет учесть эффект уменьшения контактного давления в результате изменения линейных размеров сопрягаемых тел при износе.

Расчетная схема представляет собой цилиндрическое соединение с натягом. Контактные давления в сопряжении обусловлены лишь силами упругости. Для определенности считаем, что изнашивается лишь герметизатор. Скорость изнашивания связана с контактными давлениями степенной зависимостью вида  $I_t = K' q^m$  ( $m \geq 1$ ), где  $K'$  и  $m$  — параметры закона изнашивания. В процессе эксплуатации меняется натяг между уплотнением и валом, что приводит к изменению контактных давлений. Зависимость давления от времени наработки  $t$  имеет вид

$$q(t) = \left[ \frac{K'}{k} t (1 - m) + (q(0))^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}} \text{ при } m \neq 1;$$

$$q(t) = q(0) \exp \left[ -\frac{K'}{k} t \right] \text{ при } m = 1,$$

где  $K'$  — коэффициент скорости изнашивания, Па<sup>m</sup>·с<sup>-1</sup>·м;  $k$  — коэффициент пропорциональности между упругими перемещениями сопряженных поверхностей и контактными давлениями, м·Па<sup>-1</sup>;  $q(0)$  — контактное давление при  $t = 0$ .

Если известно предельное давление  $q^*$ , то ресурс уплотнения  $T^*$  определяется по формулам

$$T^* = \frac{k}{K'} [(q^*)^{1-m} - (q(0))^{1-m}] \text{ при } m \neq 1, \quad (5.84)$$

$$T^* = \frac{k}{K'} \ln \frac{q(0)}{q^*} \text{ при } m = 1. \quad (5.85)$$

Для резиновых МУ, работающих при номинальных давлениях  $q_a$ , отвечающих условию  $q_a > 5 \cdot 10^{-2} E$ , где  $E$  — модуль упругости материала МУ, коэффициент  $K'$  может быть вычислен по следующей формуле:  $K' = 0,03\omega r \times \left( \frac{3,3f}{\sigma_0} \right)^m$ , где  $f$  — коэффициент трения;  $\sigma_0$  — константа фрикционной усталости материала МУ, Па (см. табл. 5.5);  $\omega$  — угловая скорость вращения вала, с<sup>-1</sup>;  $m$  — параметр закона изнашивания материала уплотнения (см. табл. 5.6), его значения колеблются в пределах  $m = 3 \div 6$ ;  $r$  — номинальный радиус сопряжения МУ с валом, м.

#### 5.8.4. Поршневые кольца

Поршневые компрессионные кольца (ПК) относятся к герметизирующим элементам широкого класса машин (двигатели, компрессоры и т. п.). Задача об износе ПК решается в следующей постановке. Кольцо прижимается к стенке цилиндра за счет сил упругости, которые возникают в нем при облегании внутренней поверхности цилиндра. Скорость изнашивания материала кольца пропорциональна давлению, т. е.  $I_t = K q$ , где  $q$  — давление;  $K$  — коэффициент скорости изнашивания. Несмотря на изменение размеров поперечного сечения кольца вследствие износа, его момент инерции  $J$  считается постоянным. Кольцо рассматривается как круговой разомкнутый брус малой кривизны (рис. 5.33). Цилиндр считается жестким неизнашиваемым телом.

Такая постановка задачи позволяет изучить кинетику изменения давления между кольцом и стенкой цилиндра. Для решения вопроса о долговечности кольца по критерию износа необходимо располагать данными о критическом (минимальном) давлении, при котором эксплуатационные характеристики сопряжения выходят за допустимые пределы. При этом условии ресурс ПК определяется тем моментом

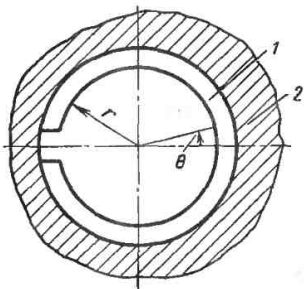


Рис. 5.33. Поршневое кольцо (расчетная схема):

1 — поршневое кольцо; 2 — цилиндр

времени, когда в какой-либо точке окружности кольца давление достигнет критического значения.

Давление в произвольный момент времени представляется в виде сходящегося ряда. Если погрешность расчетов, не превышающую 4% во всем диапазоне значений времени наработки считать допустимой, то можно ограничиться первыми шестью членами этого ряда. Тогда выражение для распределения контактного давления в произвольный момент времени будет иметь вид:

$$q'(\theta, t') = \sum_{n=1}^6 B_n U_n(\theta) \exp(-\lambda_n^2 t'), \quad (5.86)$$

$$\text{где } B_1 = \left( \frac{2 \cos L_1^+ \pi \sin L_1^- \pi}{L_1^- \cos L_1^- \pi} + \frac{2 \sin L_1^+ \pi}{L_1^+} \right) \left/ \left[ \frac{\pi \cos^2 L_1^+ \pi}{\cos^2 L_1^- \pi} + \frac{(3\lambda_1 - 2) \cos^2 L_1^+ \pi \sin L_1^- \pi}{\lambda_1 L_1^- \cos L_1^- \pi} + \frac{(3\lambda_1 + 2) \sin 2L_1^+ \pi}{2\lambda_1 L_1^+} + \pi \right]; \right.$$

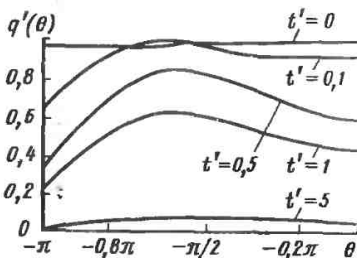


Рис. 5.34. Кинетика изменения распределения давления между кольцом и цилиндром в процессе эксплуатации

$$B_n = \left( \frac{2 \operatorname{sh} \Lambda_n^- \pi \cos \Lambda_n^+ \pi}{\Lambda_n^- \operatorname{ch} \Lambda_n^- \pi} + \frac{2 \sin \Lambda_n^+ \pi}{\Lambda_n^+} \right) \left/ \left[ \frac{\pi \cos^2 \Lambda_n^+ \pi}{\operatorname{ch} \Lambda_n^- \pi} + \frac{(3\lambda_n - 2) \cos^2 \Lambda_n^+ \pi \operatorname{sh} \Lambda_n^- \pi}{\lambda_n \Lambda_n^- \operatorname{ch} \Lambda_n^- \pi} + \frac{(3\lambda_n + 2) \sin 2\Lambda_n^+ \pi}{2\lambda_n \Lambda_n^+} + \pi \right]; \right.$$

$$L_1^\pm = \sqrt{1 \pm \lambda_1}; \quad \Lambda_n^\pm = \sqrt{\lambda_n \pm 1};$$

$$U_1(\theta) = \cos L_1^+ \theta +$$

$$+ \cos L_1^+ \pi \cos L_1^- \theta / \cos L_1^- \pi;$$

$$U_n(\theta) = \cos \Lambda_n^+ \theta +$$

$$+ \cos \Lambda_n^+ \pi \operatorname{ch} \Lambda_n^- \theta / \operatorname{ch} \Lambda_n^- \pi;$$

$$t' = K' E J t / r^4; \quad q'(\theta, t') = q(\theta, t) r^3 / E J,$$

$\theta$  — угловая координата (замок кольца имеет угловую координату  $\theta = \pm\pi$ );  $E$  — модуль упругости кольца;  $t$  — текущее время;  $r$  — радиус кривизны кольца;  $q$  — давление. Параметры  $\lambda_i$  имеют следующие значения:  $\lambda_1 = 0,80$ ;  $\lambda_2 = 2,32$ ;  $\lambda_3 = 6,69$ ;  $\lambda_4 = 13,16$ ;  $\lambda_5 = 21,63$ ;  $\lambda_6 = 32,12$ .

На рис. 5.34 приведены эпюры распределения давления между кольцом и цилиндром в различные моменты времени. Наиболее безопасная зона с точки зрения обеспечения требуемой

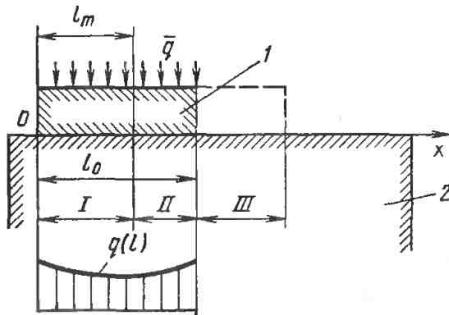


Рис. 5.35. Расчетная схема прямолинейной направляющей:  
1 — ползун; 2 — направляющая

герметичности лежит в области  $\theta \approx \pm 0,6\pi$ , где давления имеют максимальные значения. Область, примыкающая к замку, является тем местом, где вероятнее всего возможно нарушение контакта между цилиндром и кольцом вследствие износа последнего.

### 5.8.5. Направляющие

Расчет износа прямолинейных направляющих производится при следующих предположениях: интенсивность изнашивания пропорциональна контактному давлению, т. е.  $I = Kq$ , где  $K$  — коэффициент интенсивности изнашивания; распределение давления между ползуном и направляющей сохраняется неизменным в процессе эксплуатации и определяется с учетом деформаций ползуна, который моделируется упругой балкой, лежащей на упругом основании.

Расчетная схема сопряжения представлена на рис. 5.35. В случае равномерно распределенной нагрузки, приложенной к ползуну, распределение давления в зоне контакта с направляющей описывается соотношением

$$q(l) = a_0 + \frac{4a_2}{l_0^2} \left( l - \frac{l_0}{2} \right)^2$$

$$\text{при } l_0 \geq l \geq 0,$$

$$\text{где } a_0 = \frac{8252 + 29\alpha}{13440 + 29\alpha} \bar{q}; \quad a_2/3 = \\ = \frac{5188}{1344 + 29\alpha} \bar{q}; \quad \alpha = \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu_0^2} \frac{\pi E_0 b l_0^3}{EJ};$$

$\bar{q}$  — среднее давление распределенной нагрузки;  $l_0$  — длина ползуна;  $b$  — ширина ползуна;  $\mu$ ,  $E$ ,  $\mu_0$ ,  $E_0$  — коэффициент Пуассона и модуль упругости ползуна и направляющей соответственно;  $J$  — момент инерции сечения ползуна.

### 5.15. Значения пределов интегрирования в (5.87)

$l_m/l_0$	Участок	Пределы участка	Предел интегрирования	
			$l_1$	$l_2$
Меньше 1	I	$0 \leq x \leq l_m$	0	$x$
	II	$l_0 \geq x \geq l_m$	$x - l_m$	$x$
	III	$l_m + l_0 \geq x \geq l_0$	$x - l_m$	$l_0$
Больше 1	I	$0 \leq x \leq l_0$	0	$x$
	II	$l_0 \leq x \leq l_m$	0	$l_0$
	III	$l_m \leq x \leq l_0 + l_m$	$x - l_m$	$l_0$

Когда ползун совершает однонаправленные возвратно-поступательные движения по направляющим с максимальным ходом  $l_m$ , распределение износа по длине направляющей описывается соотношением

$$h(x) = \frac{KL}{l_m} \left[ 2(a_0 + a_2)l - 4a_2 \frac{l^2}{l_0} + \frac{8}{3} a_2 \frac{l^3}{l_0^2} \right]_{l_1}^{l_2}, \quad (5.87)$$

где  $L$  — путь трения ползуна.

Значения пределов  $l_1$  и  $l_2$  в (5.87) выбираются в зависимости от того, какому участку принадлежит точка с координатой  $x$  и каковы соотношения между  $l_0$  и  $l_m$  (табл. 5.15).

Иллюстративные примеры инженерной методики прикладного расчета износа различных пар трения приведены в разд. 7.9 этого тома. Для расчета износа различных узлов трения и деталей машин можно рекомендовать также последние работы У. А. Икрамова, М. А. Левитина и В. В. Гриба.

### Список литературы

5.1. Друкер Д. Континуальная теория пластичности в микро- и макромасштабах. Механика, Периодический сборник переводов иностранных статей, 1967, № 5, 105, с. 126—158.

5.2. Новожилов В. В. О пластическом разрыхлении. ПММ, т. 29, вып. 4, 1965, с. 681—689.

5.3. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 208 с.

5.4. Макушок Е. И., Калиновская Т. В., Белый А. В. Массоперенос в процессах трения. Минск; Наука и техника, 1978. 271 с.

5.5. Алексеев Н. М., Горячева И. Г. Чекина О. Г. Контактное взаимодействие шероховатых тел с учетом процессов фрикционного разрушения. Трение и износ, 1987, том VIII, № 6, с. 977—984.

5.6. Боуден Ф. П., Табор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 54 с.

5.7. Костецкий Б. И., Натансон М. Э., Бершадский Л. И. Механохимические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 170 с.

5.8. Горячева И. Г. Расчетная оценка износа поршневых колец двигателей внутреннего сгорания. В сб.: «Теория и практика расчетов деталей машин на износ». М.: Наука, 1983. с. 123—128.

5.9. Методика расчетной оценки износостойкости поверхностей трения деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1979. 100 с.

5.10. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

5.11. Проников А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

5.12. Коровчинский М. В. Локальный контакт упругих тел при изнашивании их поверхностей. В кн.: Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.: Наука, 1971. с. 130—140.

5.13. Блюмен А. В., Харач Г. М., Эфрос Д. Г. Расчетная оценка интенсивности изнашивания и ресурса сопряжения вал—втулка с обратной парой трения. Вестник машиностроения, 1976, № 2. С. 29—32.

5.14. Солдатенков И. А. Установившийся режим при изнашивании тонкого упругого покрытия в радиальном подшипнике скольжения. Трение и износ, том VII, № 3, 1986. С. 452—459.

# Глава 6. САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

## 6.1. ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСНОСТИ (ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ПРИ ТРЕНИИ)

**Самоорганизация в узлах трения.** Анализ нагруженных подвижных соединений в живой природе показывает, что имеется всего два типа узлов трения — открытые и закрытые. В открытых узлах трения работает твердый материал по твердому — это зубы животных. Закрытые узлы трения — суставы живых организмов, «сконструированные» на принципах, которые в машиностроении не применяют. Здесь на твердой кости располагается мягкий хрящ, на поверхности которого имеется тонкая подвижная полимерная пленка. Сопряженная поверхность имеет такую же структуру. В суставе в паре трения работают два одинаковых материала, причем мягкий по мягкому. Заметим, что подобные пары трения (у мыши, слона, рыбы, птицы) являются универсальными узлами, обладающими «безызносностью».

Известно, что биологические системы обладают способностью к самовосстановлению и могут работать десятилетиями без износа.

Долгое время существовало как бы противоречие законов развития живой и неживой природы. Основной закон термодинамики Клаузиуса предсказывает рост энтропии, т. е. беспорядка в замкнутой системе. Эволюционная теория Дарвина, наоборот, устанавливает, что в основе отбора лежит повышение степени организованности биологических систем. Эти взаимно противоположные законы развития можно представить графически (рис. 6.1) [6.1]. Однако в последние десятилетия биологическая эволюция стала рассматриваться с кибернетических позиций и понятий автоматического регулирования и обратной

связи, что в значительной степени сблизило эти два основных закона развития мира. Помимо сказанного, основную роль в указанном сближении следует отнести спонтанному формированию структур в открытых системах на молекулярном уровне. Сейчас установлено [6.1], что в открытых системах (рис. 6.2), которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности.

В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов новые структуры могут возникать в природе в тех случаях, когда выполняются следующие четыре необходимых условия [6.1—6.3]: 1) система является термодинамически открытой, т. е. может обмениваться веществом  $m$  и (или) энергией  $E$  со средой; 2) динамические уравнения системы нелинейны; 3) отклонение от равновесия превышает критическое значение; 4) микроскопические процессы происходят кооперированно (согласованно).

Второй закон термодинамики связан с первым условием: в системах, способных к формированию структур, он не нарушается, а лишь проявляется в более общем виде. Второе и третье условия указывают, что нужно отойти от привычных линейных физических представлений и вступить в нелинейную область, где при определенных условиях упорядочение может произойти самопроизвольно [6.1]. Четвертое условие отражает причинность образования процессов, идущих на микроскопическом уровне, при наличии особых связей, которые ведут к спонтанному возникновению структур.

Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определенных вну-



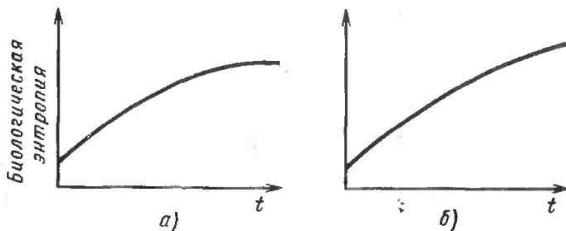


Рис. 6.1. Рост витронии в соответствии со вторым законом термодинамики Клаузиуса (а) и рост степени организованности в соответствии с законом Дарвина (б)

трених и внешних условиях. Вместе с тем это свойство не связано с каким-то особым классом веществ.

Узел трения в неживой природе удовлетворяет требованиям самоорганизации. Он представляет собой открытую систему. К нему подводится энергия от электродвигателя, вращающего механизм, или от двигателя внутреннего сгорания. Как правило, узлы трения смазываются. Смазочный материал состоит из множества одинаковых элементов, в данном случае — молекул. В нем могут быть мицеллы, ионы металлов. Все это создает условия для самоорганизации и новых структур.

До последнего времени считалось, что трение является разрушительным процессом. Обратное утверждение было абсурдом, как и то, что можно создать узел трения, который бы не изнашивался. Однако природа позаботилась и о машинах.

Рассмотрим один из примеров самоорганизации — узел трения компрессора домашнего холодильника. Компрессор холодильника, как уже отмечалось, работает десятки лет в тяжелых условиях (постоянные пуски и остановки) практически без износа. Детали трения выполнены из стали, смазочным материалом служит смесь 50 % масла и 50 % фреона. В процессе работы на поверхностях трения — шейках коленчатого вала (шатунной и коренных), сопряженных подшипниках, поршне и цилиндре — самопроизвольно образуется тонкая медная пленка толщиной 1—2 мкм. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в смазочном материале в резуль-

тате незначительного коррозионного процесса медных трубок охладителя. К месту контакта деталей трения ионы приносит охлаждающая смесь из фреона и масла, исполняющая также роль смазочного материала (рис. 6.3).

Как установлено А. К. Прокопенко, активность смазочно-фреоновой смеси по отношению к медным трубкам охладителя повышается в результате образования в зоне трения при начальной работе компрессора слабых кислот (окисление масла). После того как в зоне контакта образуется пленка меди, условия трения деталей изменяются: снижается давление, уменьшается сила трения и падает температура. В результате процессы, образующие пленку меди (окисление масла и растворение меди трубок) могут прекратиться.

В установившемся режиме трения медная пленка не разрушается. Она может переходить с одной поверхности трения на другую. Продукты износа удерживаются в зазоре электрическими силами.

На основании рассмотренного примера можно утверждать, что трение может сопровождаться эволюционными

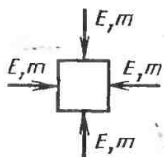


Рис. 6.2. Потенциальная возможность спонтанного образования структуры в открытой системе

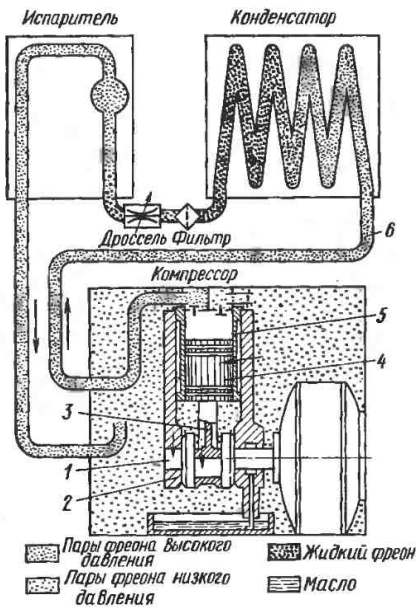


Рис. 6.3. Схема смазывания компрессора домашнего холодильника:

1 — коленчатый вал; 2 — подшипник коленчатого вала; 3 — шатун; 4 — поршень; 5 — цилиндр; 6 — змеевик из медных труб (места отложения меди показаны стрелками)

процессами, в результате которых разрушение поверхностей становится второстепенным. Главным выступает созидательный характер трения, который обусловлен обменом узла трения с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов меди, из которых формируется тонкая медная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания.

Металлическую защитную пленку, образующуюся в процессе трения, называют сервовитной (от лат. *servo-witte* — спасать жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образующееся потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно ее создает. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений

неживой природы. Их изучение только началось. Установленное явление образования сервовитной пленки в зоне трения названо избирательным переносом (ИП).

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатости поверхностей стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения.

Теперь вспомним принцип работы узла трения, созданного природой, — сустава живого организма. Как мы уже говорили, здесь мягкий материал работает по мягкому. Нагрузки распределяются равномерно по поверхности трения, поэтому на единицу площади приходится незначительная нагрузка. Это способствует продлению жизни узла трения.

К настоящему времени по ИП опубликовано много работ [6.4, 6.5]. В них используются термины, которые утвердились и известны широкому кругу читателей, например, сервовитная пленка или металлоплакирующий смазочный материал.

Появление новых терминов связано с особенностями и специфичностью процессов, происходящих при ИП. Основными особенностями являются диффузионно-вакансионный механизм сдвига (внутреннее трение сервовитной пленки), структура сервовитной пленки, отсутствие при трении многократных ударов неровностей поверхностей — трение непрерывное и протекает на плоских площадках контакта, многофакторность защиты от изнашивания.

## 6.2. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА

В зависимости от вида смазочного материала, материалов, участвующих в работе пары трения, и условий трения механизм формирования сервовитной пленки на поверхностях трения может быть различным.

1. Формирование сервовитной пленки в паре бронза—сталь при смазывании глицерином. Глицерин является

модельной жидкостью, которая легче других реализует режим ИП при трении пары бронза—сталь. В первый период работы пары происходит растворение поверхности трения бронзы. Глицерин действует при трении как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо, алюминий и др.) уходят в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. После уноса атомов легирующих элементов с поверхности бронзы деформация ее при трении вызывает диффузионный приток новых атомов легирующих элементов к поверхности, которые затем уходят в смазочный материал. Таким образом, слой бронзы, который деформируется при трении, освобождается от легирующих элементов и становится в основном медным. В нем образуется большое количество вакансий, часть из них нигилирует, образуя поры, которые заполняются молекулами глицерина.

Глицерин, как известно, является восстановителем окиси и закиси меди, поэтому поверхность трения медной пленки свободна от окисных пленок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, так как имеет свободные связи. В результате стальная поверхность постепенно покрывается тонким слоем меди. Поскольку слой меди, образующийся на бронзовой поверхности, утоняется вследствие его переноса на стальную поверхность, то происходит дальнейшее растворение бронзовой поверхности. Этот процесс продолжается до тех пор, пока на обеих поверхностях, стальной и бронзовой, не образуется слой меди толщиной 1—2 мкм (рис. 6.4).

После того как медная пленка покроет бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не смогут взаимодействовать с бронзой и «вытягивать» атомы легирующих элементов, процесс растворения бронзы прекращается, и наступает установившийся режим ИП.

Процесс образования сервоитной пленки на стальной поверхности происходит дискретно. Частицы меди с бронзовой поверхности переносятся на вершины неровностей стальной поверх-

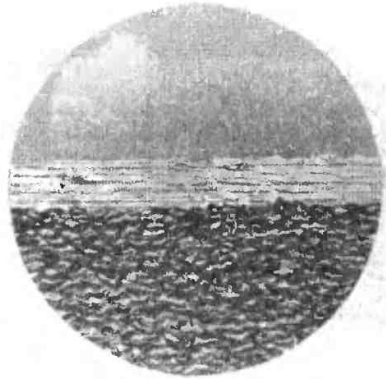


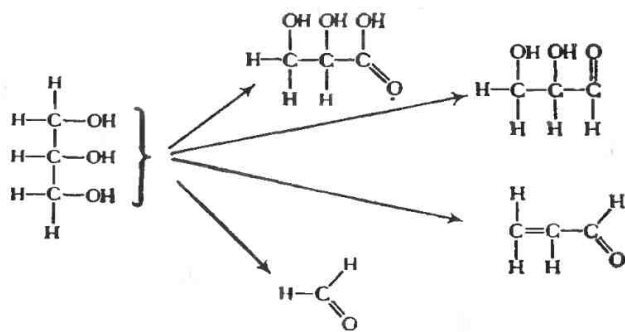
Рис. 6.4. Пленка меди на стальной поверхности (косой срез)

ности, т. е. на те участки стали, которые непосредственно контактируют с бронзой. Затем происходит постепенное «сползание» накопившейся меди во впадины неровностей.

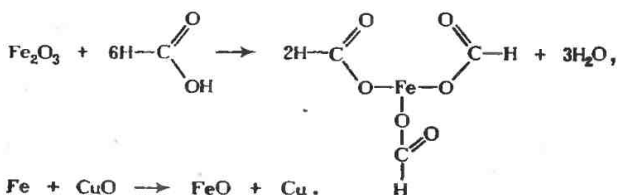
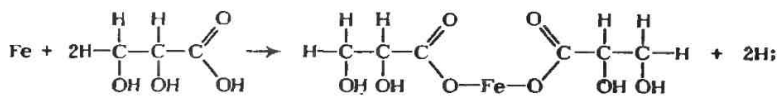
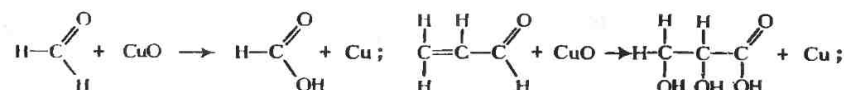
Образование пленки меди на бронзовой поверхности происходит в результате электрохимического процесса — процесса растворения металла. Согласно закону электрохимической кинетики скорость анодного растворения должна возрастать при увеличении потенциала, однако в нашем случае этого не происходит. Вследствие образования сервоитной пленки между анодными и катодными участками поверхности бронзы процесс растворения может полностью прекратиться, наступит установившийся режим трения. Если по каким-либо причинам медная пленка разрушится, то вновь произойдет растворение бронзы и поверхность будет обогащаться медью, пока снова не наступит пассивное состояние.

В процессе образования сервоитной пленки в глицерине происходят изменения. Ю. С. Симаков и А. А. Поляков установили следующие химические превращения глицерина:

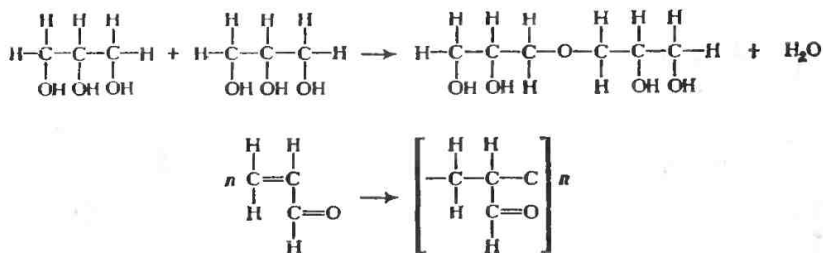
а) механохимические превращения с уменьшением молекулярной массы:



б) взаимодействие продуктов пре- продуктов коррозии и растворение  
 вращения; происходит восстановление активных металлов и их соединений:

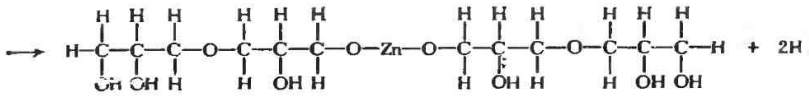
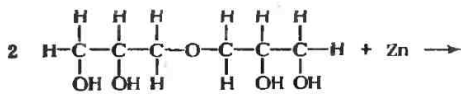


в) образование высокомолекулярных соединений, а также полимеров трения:



Образующиеся полимеры трения создают дополнительный слой (помимо меди), разделяющий основной металл

пары трения от непосредственного контактирования;



г) образование ПАВ; ПАВ, обладая активностью, адсорбируются на поверхности деталей трения и могут вступать в химическое взаимодействие с поверхностями, образуя хемосорбционные слои; они участвуют также в мицеллообразовании (рис. 6.5).

Помимо отмеченного происходят и каталитические превращения. Поверхность меди при отсутствии окисной пленки может вызвать дегидрогенизацию спирта. В результате выделяется свободный водород, который активно участвует в процессе трения — восстанавливает окисные пленки на медном сплаве и стали, поддерживая процесс безокислительного трения. При температуре более 65 °С повышается выделение водорода и режим ИП переходит в водородное изнашивание. Поверхность стали в большой степени насыщается водородом, растрескивается и в виде порошка переносится на поверхность бронзы.

Мы рассмотрели механизм образования сервовитной пленки в паре бронза—сталь в среде глицерина. Глицерин имеет простую химическую фор-

мулу и легко реализует режим ИП. В реальных конструкциях глицерин как смазочный материал не применяют. Ранее в самолетных гидросистемах в качестве гидрожидкостей применяли спиртоглицериновую смесь, где осуществлялись все вышеописанные процессы. Впоследствии спиртоглицериновую смесь заменили более сложной в химическом отношении гидрожидкостью АМГ-10. В этой жидкости режим ИП в паре бронза—сталь осуществлялся при более высоком давлении. Жидкость АМГ-10 менее активна в химическом отношении, чем спиртоглицериновая смесь.

При высоких давлениях режим ИП в паре бронза—сталь может наблюдаться при смазывании узлов трения ЦИАТИМ-201 и обычными минеральными маслами, особенно в узлах трения с возвратно-поступательным движением. Как установлено О. Н. Курловым, кинематика узла трения существенно влияет на процесс образования сервовитной пленки. В обратной паре трения режим ИП проявляется в большей степени, чем в прямой.

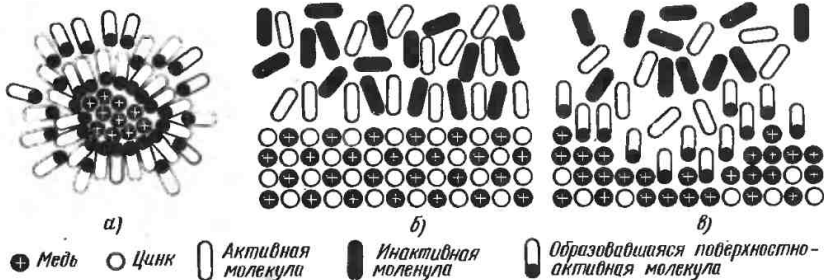


Рис. 6.5. Мицеллообразование и взаимодействие ПАВ с бронзовой поверхностью: а — мицелла; б — начальный период растворения; в — поверхность бронзы после растворения обогащена медью

2. Сервовитная пленка может образовываться в узле трения сталь—сталь при работе с металлоплакирующими смазочными материалами, содержащими мелкие частицы бронзы, меди, свинца, серебра и др. При использовании смазки ЦИАТИМ-201 с добавками порошка меди, бронзы или латуни, а также свинца в паре сталь—сталь поверхности деталей покрываются тонкой пленкой, состоящей из металла применяемых порошков. В процессе работы порошки частично растворяются в смазочном материале и в результате восстановления окисных пленок прочно схватываются со сталью, образуя сервовитную пленку. Такие пленки пластичных металлов пористы и содержат в порах смазочный материал. Коэффициент трения при высоких нагрузках снижается, а стальные поверхности не изнашиваются. При трении сдвиг поверхностей трения происходит внутри образующихся пленок по диффузионно-вакансионному механизму [67]. При хорошо восстанавливающих свойствах смазочного материала можно для реализации ИП вводить закись или окись меди. Сервовитная пленка образуется в результате восстановления окислов меди в процессе трения 6.6.

3. В промышленности М. В. Голубом и Е. Н. Грискиным разработан ряд порошковых твердоспеченных материалов, работающих в режиме ИП. Шихта для твердоспеченного материала готовится из тонкодисперсных смесей порошков ВК3, ВК6, ВК8 или из указанных смесей с добавлением литого карбида вольфрама ( $WC + W_2C$ ), релита зернистостью 0,1—0,25 мм в отношении 1 : 3.

В качестве связующего материала применяют сплавы, содержащие медь (главным образом медно-никелевые сплавы), которые обладают жидкотекучестью и обеспечивают высокую прочность порошкового материала. Порошковые материалы могут работать в режиме ИП при смазывании нефтью, нефтепродуктами и сточными водами. Сервовитная пленка образуется на поверхности твердых составляющих сплава в результате механического выдавливания мягкой составляющей и ее последующего растворения. Сплавы

способны работать в одноименной паре (композиционный материал по композиционному материалу). Такое сочетание материалов работоспособно только благодаря образованию сервовитной пленки, которая обеспечивает смазывание твердых составляющих порошковой композиции. Эти составляющие без пленки меди не могут нести нагрузку, происходят задиры поверхностей.

4. Сервовитная пленка может образоваться при трении политетрафторэтилена (ПТФЭ), наполненного закисью меди, о сталь при смазывании глицерином. Сервовитная пленка разрушается в результате восстановления закиси меди до чистой меди. Стальная поверхность покрывается слоем меди.

5. Неожиданным было обнаружение сервовитной пленки меди на узорных подшипниках скольжения турбин и турбокомпрессоров. Подшипник состоит из упорного стального гребня, неподвижно закрепленного на вращающемся валу, и корпуса, внутри которого размещены по окружности плавающие подушки (сегменты). Сегменты изготавливались из бронзы БрОФ8,0—0,30, на которую наплавляли баббитовый слой толщиной несколько миллиметров. Такая конструкция, известная под названием подшипников Митчеля, применяется издавна в упорных подшипниках скольжения. Б. П. Кузовкин совместно с сотрудниками Института проблем материаловедения АН УССР предложил наносить на поверхность бронзового сегмента бронзофторопласт путем напекания слоя порошка оловянной бронзы БрОФ8,0—0,30 с частицами сферической формы и пропитки слоя суспензией фторопласта 4Д с последующей калибровкой фторопластового слоя. На слое фторопласта и сопряженной стальной поверхности образовывалась сервовитная пленка.

В результате длительных промышленных испытаний была установлена значительно большая износостойкость и надежность работы новых подшипников.

6. В последние годы В. О. Гречко под руководством А. С. Кужарова выявлен оригинальный механизм образования сервовитной пленки в паре тре-

ния сталь — волокна ПТФЭ, наполненного тонкой медной проволокой. В зарубежной практике широко применяют подшипники скольжения из ПТФЭ, наполненного бронзой. При работе таких подшипников в паре со стальным валом в ряде случаев образуется сервовитная пленка меди. Однако механизм работы таких подшипников выяснен еще недостаточно. Высокие антифрикционные свойства подшипников объясняли большой смазочной способностью ПТФЭ, обусловленной низким межмолекулярным взаимодействием в полимере и, как следствие, облегченным проскальзыванием образующихся при трении тонких (менее 1 нм) пластинообразных кристаллических полос. Роль порошка бронзы сводилась к фактору, повышающему теплопроводность покрытия. Подчеркивали также особые свойства ПТФЭ, в частности его высокую инертность.

Для понимания механизма трения ПТФЭ следует учитывать возможность химического взаимодействия продуктов его трибохимических превращений с металлами и их роль в процессе трения. Оказалось, что при тяжелых режимах трения и высоких температурах ПТФЭ, несмотря на свою «классическую» инертность, бурно реагирует с некоторыми металлами.

Применяя ряд физических методов анализа, А. С. Кужаров и В. О. Гречко пришли к выводу, что ИП реализуется при трении ПТФЭ, наполненного медной проволокой в паре со стальным валом. Поверхность стали и ПТФЭ обогащается медью, на которой формируется, кроме того, металлополимерный слой в виде координационного соединения. Структура фрикционного контакта, обеспечивающая режим ИП при трении медно-фторопластового композита, представлена на рис. 6.6.

Приведенная структура граничного слоя состоит из связанного с поверхностью кристаллической решетки стали слоя сервовитной пленки меди и металлополимерного слоя (1—16 нм), ориентированного в направлении трения, закрепление которого на поверхности сервовитной пленки осуществляется в результате комплексобразования.

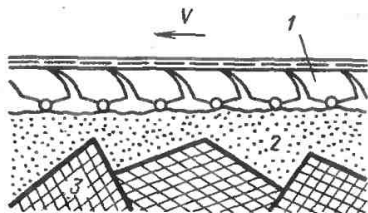


Рис. 6.6. Структура граничного слоя, образующегося при трении медно-фторопластового композита по стали:

1 — слой комплексов; 2 — сервовитная пленка меди; 3 — сталь

Таким образом, высокие триботехнические свойства медно-фторопластовых композитов связаны с реализацией ИП при трении без смазочного материала вследствие образования координационных соединений с двухвалентной медью. Наличие смазочного материала в таких композициях улучшает триботехнические характеристики во всем диапазоне нагружения, особенно при легировании смазочных материалов комплексообразующими присадками (работы В. А. Белого).

### 6.3. СТРУКТУРА СЕРВОВИТНОЙ ПЛЕНКИ

Свойства медной пленки, появляющейся в процессе трения, иные, чем у обычной меди, получаемой восстановлением медных руд. Это различие связано условиями образования пленки. Так, в узлах трения компрессора домашнего холодильника пленки меди образуется из ионов меди, поступающих в смазочный материал из медных труб охладителя. Образуется она только в зоне трения при наличии смазочного материала и при невысокой температуре. Механизм ее формирования еще недостаточно выяснен, хотя свойства исследованы многими современными методами.

При трении пары бронза—сталь в среде глицерина пленка на поверхностях трения образуется в результате распада медного сплава (твердого раствора) при низких температурах, смазочный материал и сдвиговые деформации облегчают диффузионные про-

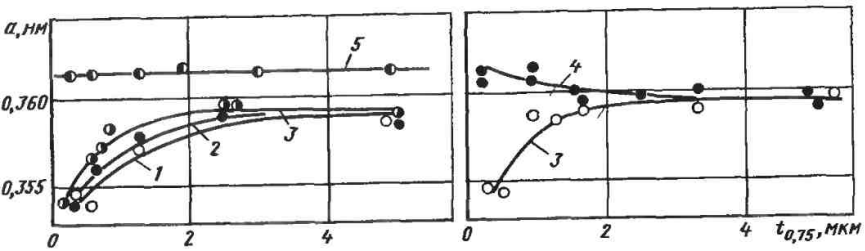


Рис. 6.7. Зависимость параметра  $a$  кристаллической решетки от глубины зоны деформации меди  $t_{0,75}$  при трении о сталь в среде глицерина:

1, 2 — малое время испытания; 3 — установившийся режим трения; 4 — последующий жидкотемпературный отжиг; 5 — исходное состояние

цессы, чего нет при выплавке меди из руды.

Структуру пленки исследовали различными методами.

1. На электронном микроскопе изучали пленку меди на стали и бронзе, образовавшуюся при трении пары бронза—сталь в среде глицерина. Фотографии поверхности на электронном микроскопе ЭМ-7 получены с помощью угольно-серебряных реплик. Фотографии позволили установить, что сервоитная пленка имеет микропористость, причем некоторые поры имеют огранку. Это так называемые отрицательные кристаллы, которые образуются в результате коагуляции (слияния) вакансий, в избытке имеющихся в пленке.

Таким образом, исследование пленки на электронном микроскопе показало, что пленка толщиной 1—2 мкм имеет рыхлую, пористую структуру. Этот вывод подтверждает следующий опыт. Тщательно промытый и высушенный образец с медной пленкой на поверхности выдерживали в вакуумном шкафу. В результате на поверхности «выпотевал» глицерин, появление которого свидетельствовало, что в пленке находились поверхностно-активные компоненты смазочного материала.

2. Определение параметра решетки. Параметр решетки сервоитной пленки, образовавшейся при трении бронзы по стали в среде глицерина, меньше, чем параметр решетки бронзы. По мере приближения к поверхности он может уменьшаться вплоть до значения

0,0354 нм и на большей глубине приближается к параметру основного металла. На рис. 6.7 приведены результаты исследования изменения параметра кристаллической решетки меди при трении о сталь в среде глицерина [6.7].

Изменение параметра решетки в первую очередь свидетельствует о перераспределении легирующих элементов в ПС сплава при трении, диффузионные процессы при трении способствуют глубоким структурным превращениям в ПС твердых тел и являются одним из ведущих звеньев в механизме контактного взаимодействия [6.7]. Закономерности кинетики диффузионных процессов являются основой при выборе сплава для достижения режима ИП и устойчивости этого эффекта.

3. Радиоизотопный анализ и метод оже-спектроскопии подтверждают полученные данные о перераспределении легирующих элементов сплава при трении. Они указывают на резкое различие содержания легирующих элементов в ПС (вплоть до полного их растворения при формировании сервоитной медной пленки) при разных условиях трения, в частности при использовании смазочных сред разной природы. Установлено [6.7] наличие на рентгенограммах двух систем дифракционных линий, соответствующих материалам с резко различающимися периодами кристаллических решеток, что свидетельствовало о существовании межфазной границы, разделяющей основной материал образца и приле-



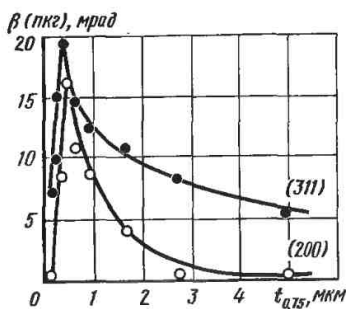


Рис. 6.8. Зависимость физической ширины рентгеновских линий меди  $\beta$  от глубины зоны деформации  $t_{0,75}$  при трении в установившемся режиме

гающий к нему сервовитный слой. Послойный эмиссионный микроспектральный анализ (с использованием лазерного луча) показал, что под сервовитной пленкой на границе со сталью имеется слой окислов меди, легирующих элементов или примесей толщиной около 0,1 мкм.

4. Структуру пленки изучали [6.7] с помощью специально разработанного метода «скользящего пучка» рентгеновских лучей. Пучок направляли к поверхности под малым углом (не более  $1^\circ$ ), что позволяло исследовать ПС толщиной 0,1—0,01 мкм. Исследования показали, что верхний слой пленки имеет значительные структурные изменения по сравнению с нижележащими слоями. За критерий структурных изменений принимали истинную (физическую) ширину линий на рентгенограммах  $\beta$ , которая для чистых металлов и равновесных твердых растворов является результирующей среднего размера блоков и дисперсий упругой деформации кристаллической решетки (микроскажений) и служит характеристикой плотности содержащихся в металле дислокаций.

На рис. 6.8 представлены результаты изменения ширины интерференционных линий (200) и (311) меди по глубине образцов после испытаний на трение. Ширина интерференционных линий по глубине ПС меняется. В ПС толщиной 0,3 мкм ширина линий с течением времени падает. Максимальная ширина линий наблюдается ие

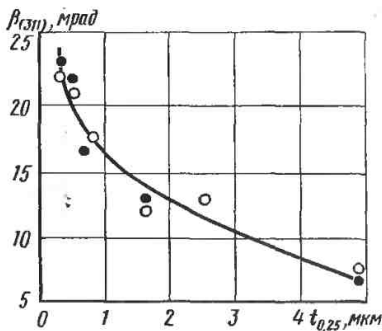


Рис. 6.9. Зависимость физической ширины рентгеновской линии меди  $\beta_{(311)}$  от глубины зоны деформации  $t_{0,25}$  при трении в вазелиновом масле (светлые точки — малое время испытаний, темные — установившийся режим)

на самой поверхности, а в более глубоком слое меди. Таким образом, можно утверждать, что при ИП в самом верхнем слое нет скопления дислокаций, т. е. не накапливаются повреждения, приводящие к разрушению поверхности. При трении образцов меди со сталью в неактивном смазочном материале (вазелиновом масле) кривая изменения физической ширины рентгеновской линии меди по глубине зоны деформации при трении не имеет спада в верхних слоях. Здесь нет разрывов дислокаций — происходят накопление повреждений (рис. 6.9) и, как следствие, разрушение поверхности.

Физико-химические исследования структуры сервовитной пленки дали основание высказать предположение, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплавленному. Она неспособна к наклепу, имеет малые сдвиговые усилия, пориста. Пленка в верхней части не имеет окислов, способна к схватыванию, при трении ее частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую, т. е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения. Трение бронзы о сталь в условиях ИП можно уподобить скольжению тела по льду, при котором низкий коэффициент трения вместо воды обеспечивает пленка расплавленного металла.

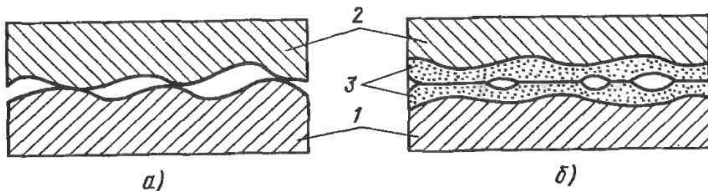


Рис. 6.10. Схема контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б):  
1 — сталь; 2 — бронза; 3 — пленка меди

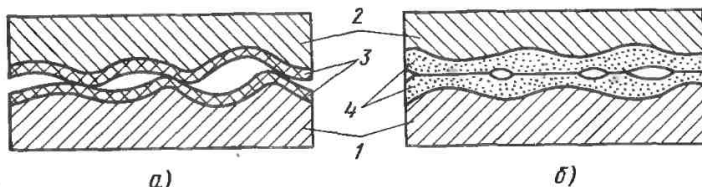


Рис. 6.11. Образование на поверхности контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б):  
1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки; 4 — серовитная пленка

#### 6.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УМЕНЬШЕНИЯ ИЗНОСА И СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ИЗБИРАТЕЛЬНОМ ПЕРЕНОСЕ

Рассмотрим факторы, которые проявляются при ИП и обеспечивают малые силы трения и безызносность.

Контактирование поверхностей трения через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. При обычном трении как без смазки, так и при наличии граничной смазочной пленки детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01—0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают весьма высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и, следовательно, к интенсификации изнашивания. Из приведенных на рис. 6.10 схем контакта стальной и бронзовой детали видно, что если при граничной смазке контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. В результате

площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей трения испытывает лишь упругие деформации.

Толщина серовитной пленки достигает 1—2 мкм; это соответствует размерам неровностей (или перекрывает их) большинства деталей общего машиностроения. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное, площади контакта плоские. Имеющиеся методы определения площадей контакта, формулы сближения поверхностей, кривые опорной поверхности, а также методы и приборы для исследования свойств контакта не годятся для условий ИП.

Предотвращение процесса окисления металла на поверхности трения. При трении с граничной смазкой и трении без смазки поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками (рис. 6.11), которые, как известно, предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание. Однако окисные пленки хрупки, неспособны многократно деформироваться и поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь, в результате их защитное дей-

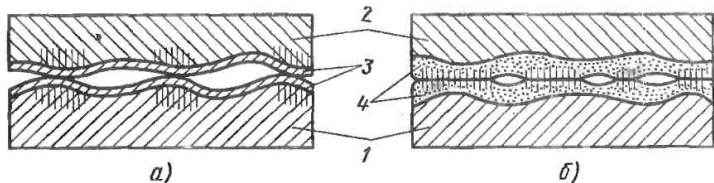


Рис. 6.12. Схема распространения деформаций в местах контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки; 4 — сервовитные пленки

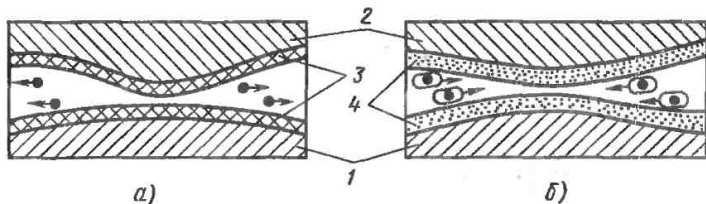


Рис. 6.13. Схема движения частиц износа в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки; 4 — сервовитные пленки

ствие ослабевает. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, но при этом увеличивается объем их разрушения.

В режиме ИП трение происходит без окисления поверхностей и поэтому не сопровождается образованием окисных пленок. Защиту поверхностей от окисления выполняют плотные слои положительно заряженных адсорбированных ПАВ, которые образуются в процессе трения и предотвращают поступление кислорода к сервовитной пленке. Отсутствие окисных пленок уменьшает работу выхода электрона и способствует протеканию хемосорбционных процессов, в результате создается дополнительная защита от изнашивания.

При обычном трении окисные пленки препятствуют выходу дислокаций на поверхность. Это ускоряет наклеп ПС и его разрушение. Сервовитная пленка не наклеивается и может многократно деформироваться без разрушения, так как при отсутствии окисных пленок дислокации в ней легко разрежаются.

Реализация эффекта Ребиндера. Почти все смазочные материалы содержат ПАВ, что предопределяет возможность пластификации ПС материала деталей в результате эффекта Ребиндера и

снижения сил трения между ними. При обычном трении окисные пленки препятствуют проникновению среды (и вместе с ней ПАВ) к металлу, чем снижается эффект Ребиндера; в результате пластические деформации участков контакта охватывают более глубокие слои (рис. 6.12, а). При ИП окисные пленки отсутствуют, и действие эффекта Ребиндера реализуется в полной мере, в результате деформируется лишь сервовитная пленка; подповерхностные слои металла деформации не претерпевают (рис. 6.12, б). Поскольку молекулы ПАВ находятся в порах сервовитной пленки, не исключается скольжение и внутри пленки по принципу диффузионно-вакансионного механизма, но с малой затратой энергии. Все это значительно уменьшает трение и износ.

Перенос частиц с одной поверхности трения на другую и удержание их в зоне контакта электрическим полем. Продуктами износа при трении с граничной смазкой являются в основном окислы, которые не имеют электрического заряда, свободно уносятся из зоны трения и, перемещаясь между контактирующими поверхностями, оказывают на них абразивное действие (рис. 6.13, а). Поэтому нужно принять

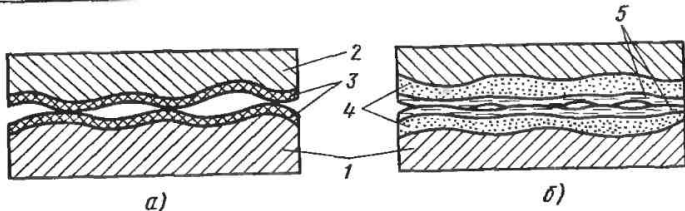


Рис. 6.14. Схема контакта деталей при наличии смазочного материала со специальными присадками при граничной смазке (а) и ИП (б): 1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки; 4 — сервоитные пленки; 5 — полимерные пленки

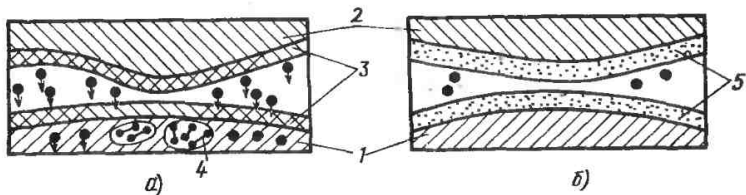


Рис. 6.15. Схемы движения водорода в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б): 1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки; 4 — скопление ионов водорода и их молибдация; 5 — сервоитные пленки

все меры для удаления продуктов износа из смазочной системы.

При наличии на поверхности трения сервоитной пленки продукты износа состоят из частиц меди; их поверхность пориста и весьма активна, поэтому частицы покрываются адсорбционным слоем ПАВ. Такие частицы (мицеллы) имеют электрический заряд и под действием его сосредотачиваются в зазорах (рис. 6.13, б). Кроме того, при ИП частицы износа могут переноситься с одной поверхности трения на другую и схватываться, не вызывая повреждения этих поверхностей.

При ИП процессы схватывания материала сервоитной пленки с основой не являются вредными, как при обычном трении.

Образование продуктов полимеризации смазочного материала на поверхности сервоитной пленки. Для повышения несущей способности смазочной пленки при трении в смазочный материал вводят специальные добавки (например, смесь метилового эфира многоосновной кислоты и полиаминов), которые при трении полимеризуются и создают на поверхностях трения дополнительный защитный слой, предотвращающий их непосредственный

контакт. Однако в условиях граничной смазки такая пленка образуется с трудом, так как окисная пленка препятствует (будучи инактивной) реакции поликонденсации и полимеризации (рис. 6.14, а).

При избирательном переносе окисные пленки отсутствуют, а сервоитная пленка является мощным катализатором полимеризации. Полимерная пленка образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала (рис. 6.14, б); она предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей и снижает пиковые давления.

Защита поверхностей трения от водорода. Водородное изнашивание [6.8] по масштабам проявления занимает одно из первых мест в процессе трения как продукт разложения водяных паров, топлив, смазочных материалов, СОЖ, а также при деструкции в зоне контакта полимеров. Водород легко диффундирует в глубь металла, способствует образованию зародышей трещин в результате молибдации в дефектах решетки и в конечном счете вызывает разрушение ПС детали (рис. 6.15, а). Водородное изнашива-

тны, как правило, сопровождается коррозийно-механическое и абразивное изнашивание.

Поскольку изучение водородного изнашивания только началось, методы защиты от него для многих деталей еще не разработаны, и пока наиболее эффективной защитой является ИП. Образующаяся при ИП медная пленка снижает нагрузки до уровней, при которых образование водорода практически не происходит; кроме того, медная пленка является хорошей защитой от проникновения водорода в сталь (рис. 6.15, б).

Необходимо отметить, что помимо рассмотренных факторов особое строение и специфические свойства сервоитной пленки (малая плотность дислокаций, большое количество вакансий) также обеспечивают в совокупности уменьшение сил трения и интенсивности изнашивания.

В заключение отметим, что факторы, обуславливающие безызносность, следующие:

контактирование поверхностей происходит через мягкий слой металла, основной металл испытывает пониженное (в 10 раз) давление;

металлическая пленка при деформации в процессе трения не наклепывается и может многократно деформироваться без разрушения;

трение происходит без окисления поверхностей, эффект Ребиндера реализуется в большой степени;

продукты износа переходят с одной трущейся поверхности на другую и обратно, в зоне трения продукты износа удерживаются электрическими силами.

ИП позволяет: 1) при изготовлении машин экономить металл (15—20 %) за счет большей грузоподъемности (в 1,5—2 раза) пар трения; 2) увеличить срок работы машин (в 2 раза), сократить период приработки двигателей (в 3 раза) и редукторов (до 10 раз), соответственно сократить расход электроэнергии; 3) в подшипниках скользящих и качения уменьшить расход смазочных материалов (до 2 раз); 4) повысить КПД глобидных редукторов с 0,7 до 0,85; винтовой пары с 0,25 до 0,5; 5) увеличить экономию драгоценных металлов (золота, платины, серебра) в приборах в 2—3 раза за счет большей надежности электрических контактов.

Дальнейшее развитие работ по созданию практически неизнашиваемых узлов трения машин, оборудования и приборов с использованием ИП — одна из важнейших проблем современной триботехники.

Опыт применения ИП в промышленности показывает, что успех перехода на использование принципиально новых смазочных материалов для узлов трения, новых технологических процессов, новых материалов и конструкций узлов трения достигался только в тех случаях, когда проводилась систематическая научно-исследовательская работа применительно к конкретным узлам трения машин данной отрасли. Попытка расширить внедрение новых методов повышения износостойкости узлов путем простой передачи промышленным предприятиям технических материалов или даже опытных смазочных материалов не приводила и не может привести к положительным результатам. Знание основ теории трения и изнашивания в машинах оказывается недостаточным, требуется изучение специальных разделов физикохимии, трибохимии, трибофизики, механохимии и др. При проведении работ по ИП необходимо организовать обучение специалистов в системе повышения квалификации. Опыт реализации преимуществ ИП в узлах трения механизмов должен быть тщательно изучен, в головных НИИ отраслей должны быть созданы лаборатории, которые накапливали бы этот опыт и разрабатывали свою техническую документацию.

## 6.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В УЗЛАХ ТРЕНИЯ МАШИН

За последние 15 лет использование ИП значительно расширилось. В настоящее время трудно указать область машиностроения или приборостроения, в которой ИП не был бы применен или апробирован [6.9]. Продолжается расширение НИИ по разработке новых смазочных материалов, реализующих

ИП при трении. Так, Московский технологический институт Миибыта РСФСР совместно с Куйбышевским филиалом ВНИИ НП разработал металлолакирующую присадку МКФ-18 для илудстриальных масел. Присадка нашла применение на трикотажном и обувном оборудовании предприятий Миибыта РСФСР (авторы А. К. Прокопенко, В. Н. Быстров, В. Н. Францев и др.).

В насосном оборудовании нефтепроводов внедрены торцовые уплотнения, работающие в режиме ИП. Срок службы насосов повысился с 10 до 30 тыс. ч. Экономический эффект, по данным Миннефтехимпрома СССР, от применения новых уплотнений (автор М. В. Голуб) за десятую пятилетку составил 2 млн. руб. Разработаны новые манжетные уплотнения на основе полиуретанов для химического оборудования, работающие в режиме избирательного переноса (автор Л. А. Кольцов). Долговечность уплотнений возросла в 10 раз.

На ряде текстильных предприятий применяют новые металлолакирующие смазочные материалы, которые позволили, по данным Пензенского политехнического института, повысить долговечность узлов трения в 2—4 раза, увеличить период времени между смазочными работами до 10 раз и снизить электропотребление при эксплуатации текстильных машин на 5—10 %.

Разработана технология финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) цилиндров автомобильных двигателей. По данным исследований, проведенных в ГДР, срок службы цилиндров с ФАБО повышается на 20—25 %, при этом снижается расход топлива двигателями на 2,8 %.

ИП проявляется при трении стали по стали, стали по чугуно, чугуна по чугуно, стали по металлокерамике, стали по металлополимеру, стали по стеклу, стали по бронзе, стали по алюминиевым сплавам и др.

ИП проявляется при смазке деталей минеральными и синтетическими маслами, пластичным смазочным материалом, морской и пресной водой, СОЖ, жидкостями для гидравлических систем, нефтью и нефтепродуктами,

смесью масла с фреоном, кислотами и щелочными средами, применяемыми в химических производствах.

ИП применяется или апробирован в машинах: самолетах (узлы трения шасси и планера), автомобилях (узлы передней подвески, двигатель автомобиля, карданные шарниры), металлообрабатывающих станках (направляющие, пара винт—гайка), паровых машинах (цилиндр—поршневое кольцо), дизелях тепловозов (цилиндр—поршневое кольцо), металлопрессовом оборудовании (подшипники скольжения), редукторах (червяк—колесо), химическом оборудовании (подшипники скольжения и качения, уплотнения), водяных насосах (узлы разгрузки, уплотнения), механизмах морских судов (подшипники скольжения), магистральных нефтепроводах (уплотнительные устройства), электробурах (уплотнения), холодильниках (трещащие детали компрессоров), гидронасосах (узлы трения), нефтепромысловом оборудовании (узлы трения насосов).

ИП применяется в приборах (слаботочные электрические контакты из благородных металлов).

ИП может повысить стойкость режущего инструмента.

## 6.6. ВОЗМОЖНОСТИ ФИНИШНОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ БЕЗАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА И ТРЕНИЯ В ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Как известно, износостойкость зависит от окончательной (финишной) технологической обработки поверхностей деталей. Имеются обширные экспериментальные исследования по влиянию шероховатости поверхностей трения на интенсивность изнашивания деталей. Для широко распространенных сочленений выявлены оптимальные значения параметра шероховатости, при которых износ деталей минимален. Установлено, что от финишной обработки деталей зависит не только первоначальный (приработочный) износ, но

и установившийся износ, т. е. первоначальная приработка может влиять на интенсивность изнашивания при длительной эксплуатации машин.

В последние годы разработаны новые технологические процессы финишной обработки деталей, которые позволяют снизить прирабочный износ деталей и повысить антифрикционные свойства сочленения (улучшить смазывание деталей, снизить коэффициент трения). К таким методам можно отнести вибрационную обработку поверхностей трения и алмазное выглаживание.

Однако использованы еще не все резервы повышения износостойкости деталей при применении новых видов финишной обработки. Например, окончательную обработку зеркала цилиндра двигателей внутреннего сгорания производят хонингованием, перед которым цилиндры шлифуют, развертывают или растачивают. Хонингование выполняется в несколько этапов. Этот процесс может обеспечить требуемую шероховатость поверхности зеркала цилиндра и определенную направленность выступов неровностей (выступы направлены под определенным углом к оси зеркала цилиндра), которые создают наилучшие условия удержания смазочного материала на рабочей поверхности. Однако при этом обрабатываемая поверхность в большей или меньшей степени насыщается абразивом от брусков хонов; несмотря на последующую продувку цилиндра сжатым воздухом, абразивные частицы остаются на рабочей поверхности и в труднодоступных местах (в стыках неподвижных посадок и т. п.). Эти частицы в процессе работы вымываются маслом и вызывают повышенный износ деталей. Это же относится к обработке шеек коленчатых валов.

В связи с изложенным крайне необходимо разработка нового технологического метода окончательной обработки деталей, при котором вообще исключалась бы абразивная обработка поверхности. К таким методам относятся разработанные нами финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО). Малая производительность прежней оснастки ограничивала применение этого метода. В последние годы было проведено исследова-

ние по применению ФАБО для обработки зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания. Новая высокопроизводительная оснастка и химические составы обеспечивают высокое качество антифрикционного покрытия.

Сущность ФАБО состоит в том, что поверхность трения детали покрывается тонким слоем латуни, бронзы или меди путем использования явления переноса металла при трении. Перед нанесением покрытия обрабатываемую поверхность обезжиривают и покрывают глицерином или смесью, состоящей из двух частей глицерина и одной части 10 %-ного раствора соляной кислоты. В процессе трения окисная пленка на поверхности стали разрушается, поверхность медного сплава пластифицируется, и создаются условия для его схватывания со сталью. Толщина перенесенного слоя бронзы или латуни 1—2 мкм.

Существует принципиальная разница в переносе материала при ИП и ФАБО. При ИП в случае трения бронзы по стали в среде глицерина или смазки ЦИАТИМ-201 из твердого раствора бронзы происходит выделение атомов меди. Атомы легирующих элементов, растворяясь, уходят в смазочный материал, атомы меди, соединяясь в группы, переносятся на сталь. Этот процесс происходит медленно, за множество (не за один-два) проходов. При ФАБО состав перенесенного материала не отличается от исходного. Материал переносится крупинками, которые прочно схватываются со сталью и имеют между собой определенную связь. Детали, подвергаемые ФАБО, могут быть шлифованы, развернуты, проточены или хонингованы. Шероховатость поверхности должна быть не ниже  $Ra = 2,5 \div 1,25$  мкм.

Преимущество ФАБО перед другими финишными операциями состоит в том, что этот метод чрезвычайно прост и не требует сложного оборудования. ФАБО придает стальной или чугунной поверхности высокие антифрикционные свойства. После ФАБО цилиндр двигателя внутреннего сгорания как бы превращается на первый период работы в бронзовый, коэффициент трения между поршневым кольцом и зеркалом цилиндра уменьшается

в 2 раза. Это может существенно отличаться на мощности двигателя.

Первые опыты по применению ФАБО для цилиндров двигателя показали большое преимущество этого метода перед хонингованием.

Шейки коленчатых валов также целесообразно подвергать ФАБО, поскольку они и сопрягаемые с ними вкладыши лимитируют время приработки двигателей и часто подвергаются ремонтам. В этом направлении предстоит исследовательские работы.

В настоящее время проводятся исследовательские работы по повышению ресурса восстановленных деталей цилиндро-поршневых групп тракторных двигателей методами ФАБО. Главная задача этих исследований — обеспечение высокой надежности работы цилиндров и сопряженных с ними поршневых колец за счет исключения микрорадириров, газовой эрозии колец, повышенного износа сопряжения вследствие чрезмерной шероховатости отдельных участков зеркала цилиндра и т. д.

Известно, что цилиндры по высоте изнашиваются неравномерно (в верхней части цилиндра наблюдается больший износ). Чтобы увеличить ресурс работы цилиндра, ФАБО можно подвергать только его верхнюю часть. (Работа выполнена профессором Польцером в ГДР.) Это приводит к выравниванию эпюры износа цилиндра и уменьшению износа поршневых колец.

Таким образом, применение ФАБО позволяет уменьшить задиры цилиндров, сократить время их приработки и увеличить ресурс двигателей, что даст возможность получить значительный экономический эффект.

## 6.7. НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА ВОДОРОДНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Водородное изнашивание, как один из процессов разрушения поверхностей при трении скольжения, установлено всего лишь 15—20 лет назад Д. Н. Гаркуновым и А. А. Поляковым, однако по этому вопросу уже опубликовано несколько книг и около 100 журнальных статей. За рубежом явление водородного изнашивания при трении

скольжения находится в начальной стадии изучения.

Из всех видов разрушения поверхностей при трении скольжения, по-видимому, водородное изнашивание наиболее трудно поддается изучению, несмотря на то что оно обнаруживается в узлах трения машин различных отраслей техники и по широте проявления может быть сравнимо с абразивным изнашиванием. Процессы, происходящие при водородном изнашивании, находятся на стыке таких областей науки, как электрохимия, органическая химия, катализ, химия полимеров и смазочных материалов, механохимия и др.

Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в ПС трущихся деталей. Он выделяется из материалов пары трения или из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.) и ускоряет изнашивание. Водородное изнашивание состоит из следующих процессов, происходящих в зоне трения:

интенсивного выделения водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающей источник непрерывного поступления водорода в ПС стали или чугуна;

адсорбции водорода на поверхностях трения;

диффузии водорода в деформируемый слой стали, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения;

особого вида разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования и эффектом накопления водорода, характерным для разрушения, — мгновенным образованием мелкодисперсного порошка материала.

В технической литературе в течение многих лет публикуются результаты многочисленных исследований по влиянию водорода на снижение объемной прочности материалов, особенно при воздействии циклических нагрузок. Однако само явление водородного изнашивания установлено недавно вследствие следующих причин.



1. Невероятно было предположить, что при трении может выделяться диффузионно-свободный водород из смазочного материала, пластмассы или воды. При нормальных давлениях и температуре водород из этих веществ не выделяется. При повышенных температурах в процессе трибодеструкции пластмассы или смазочного материала водород также не выделяется при первичных процессах, он выделяется при вторичных процессах.

2. До последнего времени считали, что при трении максимальная температура возникает на поверхности трущейся детали. Известно, что водород очень легко диффундирует под действием температурного градиента в нагретые участки тела. Это свойство используют для обезводороживания деталей после их наводороживания, например при гальваническом хромировании. Поэтому считали, что при трении в случае повышенных температур процесс наводороживания невозможен. Более того, полагали, что имеющийся в детали водород будет уходить из зоны трения. Такие детали, как цилиндры авиационных двигателей, после хромирования не обезводороживали.

Только в последние годы теоретически А. В. Кудинов, а затем экспериментально В. Я. Матюшенко и Г. П. Шпеньков [6.10, 6.11] установили, что при тяжелых режимах трения максимальная температура образуется не на поверхности, а на некоторой глубине. Это создает условия, при которых водород, если он будет адсорбирован на поверхности детали, под действием температурного градиента диффундирует в глубь поверхности, там концентрируется и вызывает охрупчивание ПС.

Область проявления водородного изнашивания весьма обширна. Практически все трущиеся поверхности стальных и чугунных деталей содержат повышенное количество водорода и, следовательно, подвержены повышенному изнашиванию. Наличие в воздухе паров воды создает благоприятные условия для водородного изнашивания, не говоря уже о разложении в зоне контакта смазочного материала, топлива или пластмассы.

Водородное изнашивание может быть вызвано не только водородом, который образуется при трении, но и водородом, который может образоваться при различных технологических процессах. При выплавке чугуна в доменном процессе из влаги дутья образуется водород, который и попадает в металл (такой водород называют биографическим). При термической обработке, например в результате азотирования (при диссоциации аммиака), выделяющийся водород диффундирует в сталь. Наводороживание стальных изделий происходит при электроосаждении кадмия, цинка, хрома и никеля. Одним из способов устранения водорода при гальванических покрытиях является термообработка изделий при температуре 200 °С.

Для удаления окалина, продуктов коррозии стальные изделия подвергают травлению в кислоте. Погружение стали в раствор кислоты приводит к растворению железа на анодных участках и выделению водорода на катодных участках с одновременным внедрением водорода в сталь. В результате накопления газообразного водорода на поверхности детали могут быть даже вспучивания.

Атмосферная коррозия металла может вызвать абсорбцию водорода в том случае, если она протекает в промышленной атмосфере, содержащей сернистый ангидрид и кислую серноокислую соль.

Водород, проникший в сталь, при трении будет постепенно диффундировать в поверхность и вызывать ее изнашивание.

## 6.8. ОТЛИЧИЕ ВОДОРОДНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ОТ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ

Водородное изнашивание не имеет общих черт с водородным охрупчиванием стали ни по источникам наводороживания, ни по интенсивности и характеру распределения водорода в стали, ни по характеру разрушения. Водородное изнашивание связано только с процессом трения и обусловлено трением. Для него характерны высокая

локальная концентрация водорода в ПС стали, возникающая из-за больших градиентов температуры и напряжений при трении, которые обуславливают накопление водорода и особый характер роста трещин, приводящий к сплошному разрушению слоя стали.

Водородное изнашивание представляет собой эволюционный процесс, направленный на разрушение поверхностей трения. Трение создает условия для образования диффузионно-способного водорода из смазочного материала, топлива, пластмассы, паров воды и других материалов. Далее, трение обеспечивает адсорбцию водорода на поверхность трущейся детали (стальной или чугунной) путем создания ювенильных поверхностей. Трение благодаря деформации тонких ПС образует гидридофильную зону на стальной или чугунной поверхности детали, которая своеобразно «впитывает» водород. В результате трения диффундирующий водород концентрируется на некоторой глубине от поверхности трения, где располагается максимум температуры при трении. Глубина концентрации водорода зависит от режимов трения и участвующих в нем материалов. Чем тяжелее режим трения, тем глубже находится максимум температуры. Все указанные выше процессы отличают водородное изнашивание от водородной хрупкости металлов.

Последним этапом водородного изнашивания является своеобразное разрушение стальной поверхности. Под нею одновременно образуются многочисленные трещины, которые, сливаясь, могут мгновенно превратить ПС детали в порошок. При водородном охрупчивании образуется и развивается только одна трещина, которая и приводит к разрушению детали. Как видим, и здесь имеется коренное отличие водородного изнашивания от водородного охрупчивания.

При водородном изнашивании концентрация водорода под поверхностью настолько велика, что никакой другой источник наводороживания не может создать и десятой доли подобной концентрации.

За последние 20 лет интенсивно развивается новый подход к изучению

физических, химических и биологических систем на основе синергетики — дисциплины, которую можно характеризовать как направление в современном естествознании. В основе этой дисциплины лежат самоорганизующиеся процессы в результате кооперирования отдельных элементов (подсистем), с одной стороны, и развития термодинамики открытых систем, с другой.

Основополагающими в этой области являются работы И. Пригожина, Глендсдорфа (Бельгия), Хакена (ФРГ) и Эбелинга (ГДР).

ТС является открытой и в ней могут происходить кооперативные явления. Такие разделы триботехники, как избирательный перенос и водородное изнашивание, могут быть, по нашему мнению, отнесены к синергетике. Оба явления характеризуются рядом последовательных этапов и кооперативным действием отдельных элементов. Синергетический подход к изучению ИП и водородного изнашивания дает возможность глубже проникнуть в механизм явлений, что облегчит разработку новых эффективных методов борьбы с изнашиванием машин и оборудования. Так, из последовательных этапов проявления водородного изнашивания (рис. 6.16) достаточно разорвать одно звено (этап), как может нарушиться вся цепь процессов. В одних случаях выделившийся водород можно связать химически с другими элементами или веществами, в других — «отогнуть» водород электрическим или магнитным полем, в третьих — затруднить процесс диффузии водорода в глубь металла.

Как установлено Д. Н. Гаркуновым и А. А. Поляковым [6.12], имеются два основных вида изнашивания поверхности стальных и чугунных деталей под воздействием водорода: изнашивание диспергированием и изнашивание разрушением.

**Водородное изнашивание диспергированием (ВИДИС).** При этом виде изнашивания каких-либо изменений в ПС деталей вследствие обычного износа при диспергировании не наблюдается. Водород усиливает (в зависимости от его количества в ПС) диспергирование стали или чугуна. На по-

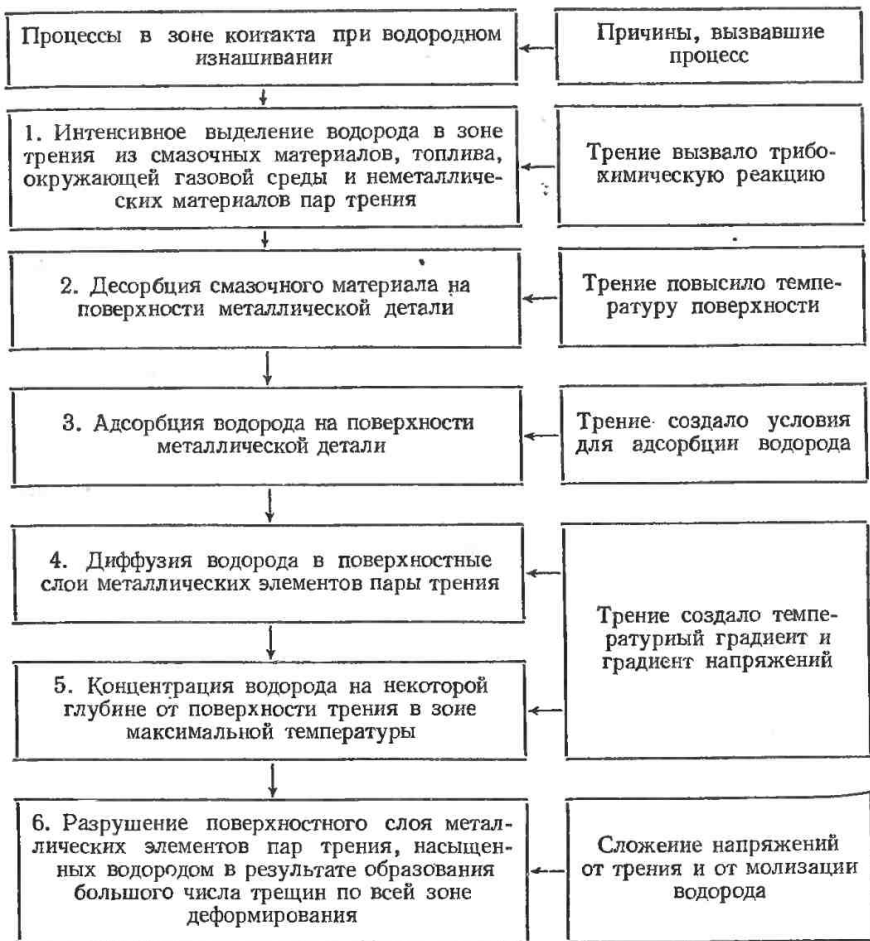


Рис. 6.16. Схема этапов водородного изнашивания

верхностях трения нет вырывов, задигов, заметного переноса материала с одной поверхности трения на другую; они могут иметь блеск и очень мелкие царапины, которые не видны невооруженным глазом и направлены вдоль направления движения.

При изучении износостойкости наводороженных стальных образцов (наводороживание производилось электролитическим способом) установлено [6.10], что при незначительном наво-

дороживании износостойкость образцов из стали 45 несколько увеличивается, а при дальнейшем наводороживании падает. Это связано с тем, что при начальном наводороживании несколько повышается твердость стали.

На рис. 6.17 представлена зависимость изменения относительной микротвердости стали (отношение микротвердостей наводороженной стали 45 к ненаводороженной в процентах) от времени наводороживания. Микротвер-

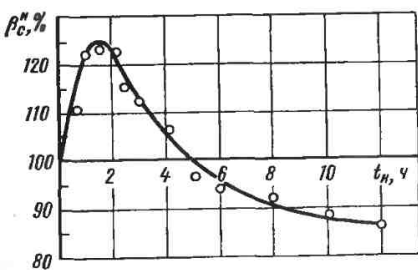


Рис. 6.17. Зависимость относительной микротвердости стали  $\beta_c^H$  от времени выдержки  $t_H$  в наводороживаемой среде

дость увеличивается в первый период (1,5 ч) наводороживания, когда происходит процесс насыщения стали водородом, сопровождающийся упрочнением ПС. Далее микротвердость при наводороживании падает и становится меньше исходной. Уменьшение микротвердости стали при насыщении ее водородом свидетельствует о разрыхлении ее ПС, снижении износостойкости.

Зависимость количества поглощенного водорода и интенсивности изнашивания стали от времени выдержки в наводороживающей среде приведена на рис. 6.18.

Испытания образцов на изнашивание проводили на машине трения 77МТ-1 при возвратно-поступательном движении. Вначале испытывали ненаводороженные образцы. Нижний образец (2×4×6 см) был из стали 45, а верхний (0,5×1,5×3,5 см) из чугуна

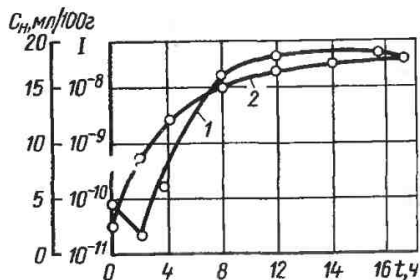


Рис. 6.18. Зависимость количества поглощенного водорода  $S_H$  (кривая 2) и интенсивности изнашивания  $I$  (кривая 1) от времени выдержки  $t$  в наводороживающей среде

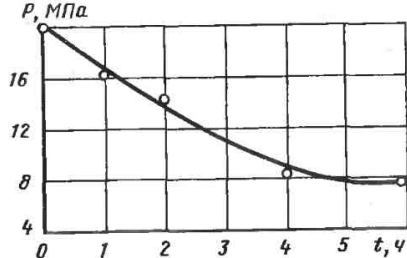


Рис. 6.19. Зависимость предельной нагрузки до заедания  $P$  от времени наводороживания стали  $t$

СЧ 21. Наводороживание проводили в 26 %-ном растворе серной кислоты по методике, изложенной в [6.11]. Интенсивность изнашивания оценивали величиной  $I = m/(LA_{ap})$ , где  $m$  — масса изношенного слоя;  $L$  — путь трения;  $A_a$  — номинальная площадь изношенного слоя;  $\rho$  — плотность материала.

Исследования показали, что интенсивность изнашивания при наводороживании вначале может уменьшиться на небольшую величину, а в дальнейшем увеличиться на два порядка.

Установлено также, что при наводороживании значительно уменьшается нагрузка до заедания стальных образцов при трении с бронзой (рис. 6.19). Испытания проводили на машине трения АЕ-5, в которой три стальных образца, расположенные под углом 120°, истирались о плоскую сторону вращающегося диска. Масло подавали каплями в центральную часть диска. Из приведенного графика следует, что наибольшее падение нагрузки до заедания происходит после 4—5 ч наводороживания.

Водородное изнашивание разрушением (ВИРАЗ). Этот вид изнашивания имеет специфическую особенность: ПС стали или чугуна разрушается мгновенно на глубине до 1—2 мкм. Это происходит, когда ПС накапливает большое количество водорода. Ранее отмечалось, что процесс трения создает условия высокой концентрации водорода в ПС стали. Трение десорбирует смазочный материал, и водород получает возможность занять большее

Рис. 6.20. Участки переноса закаленной стали со стального ротора на бронзовый золотник (показаны стрелками)  $\times 100$



число адсорбционных центров на поверхности. Концентрация водорода в стали непрерывно возрастает. Водород попадает в зародышевые трещины, полости, межкристалльные границы и другие места. При трении происходит периодическое деформирование ПС и объем дефектных мест (полостей) изменяется. Поступающий в полости водород молизуется и, не имея возможности выйти обратно при уменьшении объема, стремится расширить полость, создавая высокое напряжение. Повторение цикла вызывает эффект накопления водорода, продолжающийся до тех пор, пока внутреннее давление в полостях не вызовет разрушения стали по всем развившимся и соединившимся трещинам.

Рассмотрим повреждения различных деталей и узлов трения от ВИРАЗ.

1. При эксплуатации керосиновых насосов наблюдались случаи катастрофического износа поверхностей стальных закаленных роторов и сопряженных с ними бронзовых золотников. Ротор изготовлен из стали 12ХНЗА, твердость поверхности НRC 60, твердость золотника из бронзы НВ 61. Внешне разрушение проявлялось как износ стальной поверхности на глубину 0,03 мм и намазывание

микроскопических лепестков стали темного цвета на поверхность бронзового золотника (рис. 6.20). Идентичность материала этих лепестков с материалом ротора установлена спектральным анализом. На роторе по всей поверхности трения имелись относительно глубокие кольцевые царапины. На участках золотника, где частиц стали не было, наблюдались «вымывание» одной из фазовых составляющих бронзы и следы серого налета на поверхности.

Как выяснилось, ротор имел небольшой перекоп относительно золотника, что могло привести к повышенной скорости изнашивания поверхностей трения. В керосине, который одновременно служит смазочным материалом для насоса, допускается незначительное количество примесей коррозионно-активных соединений серы (меркаптанов). Вследствие высокой сорбционной способности они могут накапливаться на металлических поверхностях. В обычных условиях работы эти соединения при допустимом их содержании в керосине не вызывают коррозии. С повышением температуры возникает хемосорбция, физическая адсорбция уменьшается и, следовательно, снижается механическое за-



Рис. 6.21. Поверхность пластмассовой тормозной колодки с намазыванием чугуна (светлые полосы)

щитное действие адсорбционного слоя. В этих условиях трение приводит к значительному ускорению коррозии. Происходят избирательное анодное растворение медного сплава, образование меркаптидов, выделение водорода на меди и диффузия его в сталь.

Золотники топливных насосов, а также лопатки роторов насосов и сопряженные с ними детали не всегда имеют повреждения от водородного изнашивания в виде крупных задигов и микропереноса. Некоторые детали работают в режиме ВИДИС. Однако за несколько часов работы линейный износ трущихся поверхностей может составить 0,5 мм и более (при нормальной работе износ до 0,01 мм).

2. Перенос чугуна в узлах трения чугун — пластмасса, применяемых в некоторых тормозных устройствах машин, наблюдается часто. Это является одной из причин частых смен тормозных пластмассовых колодок. На рис. 6.21 представлены колодки из пластмассы после эксплуатации. Ра-

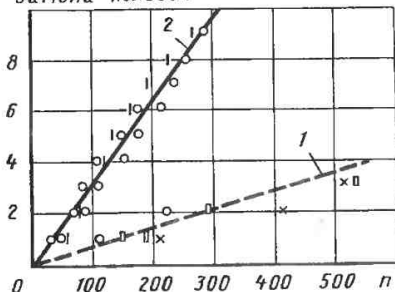


Рис. 6.22. Срок службы тормозных колодок механизма торможения в зависимости от числа  $n$  торможений:

1 — колодки из ретинакса; 2 — колодки из пластмассы 22

бочая поверхность колодок почти сплошь покрыта тонкой чугунной пленкой. Срок службы таких колодок очень низкий, иногда не превышал 40—50 торможений. Взамен пластмассы был создан фрикционный материал ретинакс с большей износостойкостью. Однако чугун переносился и на этот материал, хотя и при более высоких температурах, давлении и в течение более длительного времени, чем при испытаниях колодок из пластмассы. Этим, вероятно, можно объяснить, что срок службы тормозных колодок из ретинакса в несколько раз выше, чем колодок из пластмассы [6.13] (рис. 6.22).

3. Процессы переноса стали и чугуна на пластмассовые тормозные элементы автомобилей рассматривали А. Г. Георгиевский и М. Н. Олина. При трении асбестосмоляного образца с чугуном, легированным никелем и хромом, при температуре 400—500 °C происходит перенос пластмассы на чугун. При дальнейшем повышении температуры на поверхности чугунных образцов наблюдается увеличение толщины неметаллической пленки, которая при температуре 900 °C достигает 100 мкм. Пленка неоднородна по строению: прилегающая к металлу более светлая часть подобна окисной. В дальнейшем чугун переносится на пластмассу. Предварительно на некоторой глубине от поверхности трения



Рис. 6.23. Частицы чугуна на рабочей поверхности тормозной колодки легкового автомобиля,  $\times 3$

образуется тонкая трещина, которая местами выходит на поверхность. На отдельных участках наблюдается закатывание пластмассы в металлическую поверхность. Чугун переносится сплошным слоем; отделившись от основного материала посредством образования трещины часть чугуна хрупко разрушается на отдельные агломераты зерен. В процессе трения происходит охрупчивание чугуна в тонком ПС.

Позднее перенос чугуна на пластмассовый элемент автомобиля изучали М. М. Бородулин и И. И. Васильев. При намазывании чугуна фрикционные качества пары трения снижаются, а на поверхности контртела образуются глубокие кольцевые выработки. Тормозные барабаны быстро выходят из строя. Явление намазывания в тормозных транспортных средствах было впервые обнаружено при работе тормозных накладок в горных условиях (температурный режим наиболее тяжелый); при работе на равнинной местности на первой стадии эксплуатации это явление остается незаметным.

В зависимости от напряженности работы тормозного элемента образуются повреждения как на тормозном барабане, так и на накладке или колодке из фрикционной пластмассы. На поверхности пластмассовой колодки легкового автомобиля в наиболее нагруженной части имеются частицы

чугуна в виде небольших вытянутых по направлению движения лепестков размером до  $1-1,5 \text{ мм}^2$  (рис. 6.23).

В тормозных устройствах грузовых автомобилей повреждения колодок имеют большие размеры, хотя характер повреждения тот же. Частицы чугуна, перенесенного на колодку грузового автомобиля, показаны на рис. 6.24.

Явление переноса чугуна на пластмассу затрудняет объяснение его механизма с прежних, давно установившихся позиций о контактных взаимодействиях, развитых ранее еще В. Д. Грозиним. Согласно этим представлениям в процессе контактирования и взаимодействия микрообъемы материала находятся в объемно-напряженном состоянии сжатия. В наших исследованиях [6.12] неоднократно наблюдалась при трении стали по электролитическому хрому высокая пластичность последнего.

Повышение хрупкости чугуна при трении по пластмассе можно объяснить только его наводороживанием.

Работы по изучению водородного изнашивания в тормозных устройствах проводят в ГИР [6.14]. В результате тонких физико-химических методов исследования (хроматографический, термогравиметрический, термический и др.) получена исчерпывающая информация о реакциях, происходящих в

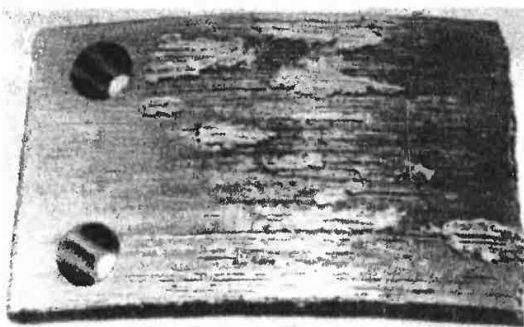


Рис. 6.24. Участки переноса чугуна на колодку тормоза грузового автомобиля



Рис. 6.25. Участки переноса стали на тормозную колодку колеса железнодорожного вагона

зоне контакта на различных температурных уровнях. При трении стали о композитный материал на основе смол материал подвергается механической и термической деструкции и термоокислительным реакциям, активируемым динамической нагрузкой.

Количество адсорбированного водорода на поверхности зависит от наличия легирующих элементов. Износ, вызванный водородом, будет определяться условиями адсорбции водорода, а также изменением числа вакансий на поверхности, т. е. количеством водорода, протифундированного в сталь. Максимальная адсорбция водорода на железе соответствует достижению температуры 77 °С, т. е. периоду, когда начинается десорбция продуктов распада органических соединений с низкой молекулярной массой. Эта десорбция прекращается при температуре около 127 °С, а адсорбция водорода продолжается до достижения 427 °С. В таких условиях происходит интенсивное наводороживание, и число вакансий на поверхности возрастает. Содержание водорода в стали увеличивается.

Сталь на поверхности обезуглерожи-

вается:  $\text{Fe}_2\text{C} + 4\text{H} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{CH}_4$ . В результате наводороживания цементит дает губчатый феррит с очень плохими механическими свойствами. Реакция обезуглероживания подтверждена рентгеноструктурным фазовым анализом [6.14]. Одним из методов борьбы с водородным изнашиванием является введение в тормозной материал 2—30 % окиси меди, которая восстанавливается водородом до чистой меди. Этот металл-наполнитель не только изменяет некоторые свойства фрикционного материала (например, теплопроводность), но и заметно влияет на процесс трения: ликвидируется перенос стали на фрикционный материал. Введение в тормозной материал алюминия как наполнителя не дало положительных результатов. Окислы алюминия имеют высокую твердость и вызывают абразивное изнашивание обоих элементов пары трения. В целом наполнитель не должен быть тверже, чем сопряженная поверхность, и его температура плавления должна быть ниже, чем у сопряженного материала [6.14].

4. Тяжелые условия работы тормозных пластмассовых колодок железнодорожного транспорта вызывают боль-



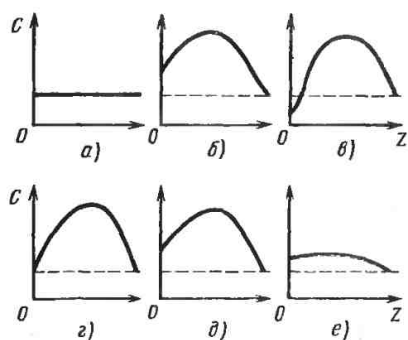


Рис. 6.26. Динамика перераспределения концентрации водорода в стальном образце (схема):

*a* — исходное состояние; *b* — состояние в процессе трения; *c* — состояние по окончании трения; *d* — начало десорбции; *e* — максимум десорбции; *e* — конец десорбции

шие повреждения поверхностей трения в результате переноса материала бандажа колеса. На рис. 6.25 показана изношенная пластмассовая тормозная колодка. Пластмасса у конца колодки изношена до металлического каркаса. На ее рабочей поверхности заметен значительный перенос стали.

5. Наводороживание и разрушение стальной поверхности трения могут возникнуть в таких сочленениях, как баббитовый подшипник — шейка колчатого вала. Например, перенос стали вала компрессора на поверхность подшипника возникал в процессе приработки подшипника после изготовления компрессора; смазочный материал содержал коррозионно-активные присадки, предназначенные для ускорения приработки. После разрушения ПС вала частицы стали распределялись по поверхности баббита, подобно тому, как это наблюдалось на подшипниках керосиновых насосов.

Динамика распределения концентрации водорода в поверхностном слое при трении. При трении накопление водорода в ПС происходит более интенсивно, его концентрация в ПС более высокая, чем при электролитическом наводороживании. Распределение водорода не носит стабильного характера, поскольку температура в ПС и напряжения, вызываемые тре-

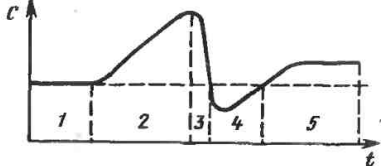


Рис. 6.27. Изменение концентрации водорода в локальной зоне поверхностного слоя стали на различных этапах:

1 — исходное состояние; 2 — состояние в процессе трения; 3 — состояние по окончании трения; 4 — возврат концентрации; 5 — начало десорбции

нием, меняются в зависимости от условий трения. В связи с этим процесс трения сопровождается сложной динамикой распределения концентрации водорода как в ПС, подвергаемом трению, так и в слоях, расположенных на глубине до 3—4 мм.

В работе [6.8] предложена следующая схема распределения концентрации водорода в стальном образце (рис. 6.26). В процессе трения концентрация водорода в ПС выше, чем в исходном состоянии. Это естественно, потому что процесс наводороживания в данном случае отражает именно прирост концентрации водорода по сравнению с исходной.

Перераспределение концентрации водорода в локальной зоне ПС на различных этапах трения и отдыха представлено на рис. 6.27. Интерес представляют этапы трения 3—5. Чтобы объяснить такое поведение водорода, нужно представлять, что является движущей силой диффузионных процессов, связанных с перераспределением концентрации водорода как в ПС, так и в объеме металлического тела. Этими силами являются градиенты температуры, напряжений и концентрации водорода.

Об определении концентрации водорода в образцах после испытания на трение. Водород при нормальной температуре обладает высокой подвижностью в сталях, за исключением аустенитных хромоникелевых. Только при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$  его подвижность настолько понижается, что ею можно пренебречь. Поэтому при изготовлении деталей и после их испытания на трение и износ в целях определения

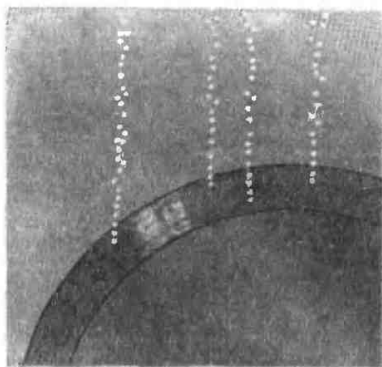


Рис. 6.28. Треки пузырьков водорода, выделяющегося из погруженной в глицерин стали после трения

содержания в них водорода, а также при хранении образцов надо учитывать потери водорода. Необходимо до минимума уменьшить время механической обработки и возможный разогрев стали при изготовлении образцов. Поверхность трения детали или образца следует подвергать резкому охлаждению.

Особенно большие потери водорода происходят с поверхности трения

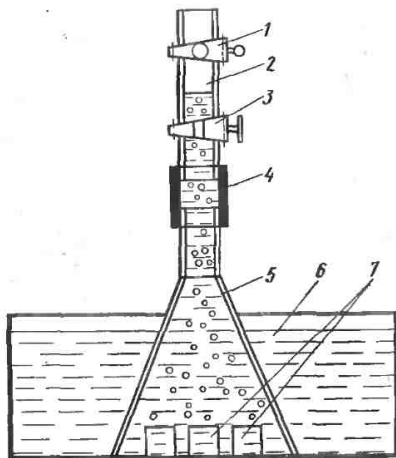


Рис. 6.29. Схема отбора выделяющегося газа:

1, 3 — краны; 2 — собранный газ; 4 — резиновая трубка; 5 — стеклянная воронка; 6 — ванна со спирто-глицериновой смесью; 7 — стальные образцы

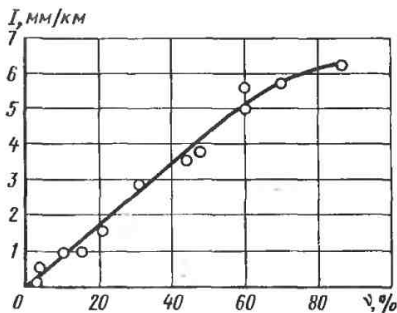


Рис. 6.30. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  пары трения малоуглеродистая сталь — малоуглеродистая сталь от относительной влажности  $v$  при длине пробега 100 м, давлении 1 МПа и скорости скольжения 0,05 м/с

при высокотемпературных испытаниях на трение и изнашивание. В процессе трения пары ретинакс — сталь Ст3 при нагрузке 8 МПа в течение 5 мин при частоте вращения 750 мин<sup>-1</sup> на торцовой машине трения сразу же после остановки наблюдалось интенсивное выделение пузырьков газа с поверхности стали. В некоторых случаях газ выходил из образца под большим давлением, что было заметно по характерным трекам серии мелких пузырьков, следующих один за другим (рис. 6.28).

В. Я. Матюшенко собрал газ, выделяющийся из серии образцов, в микробюретку (рис. 6.29) и проанализировал на газовом хроматографе типа ЛХМ7А. Было установлено, что выделяющийся газ содержит более 75 % водорода.

В ряде испытаний при изучении водородного изнашивания целесообразно использовать тонкие образцы (в виде фольги). В этом случае удается более точно определить содержание водорода.

Влияние влажности воздуха на изнашивание. Влажность воздуха оказывает сильное воздействие на интенсивность изнашивания металлов. Это имеет большое значение для машин массового применения, эксплуатирующихся на открытом воздухе, особенно для нашей страны с обширными районами повышенной влажности. Приведем не-

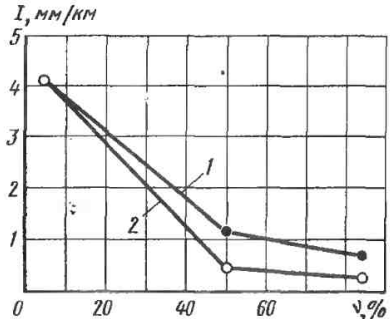
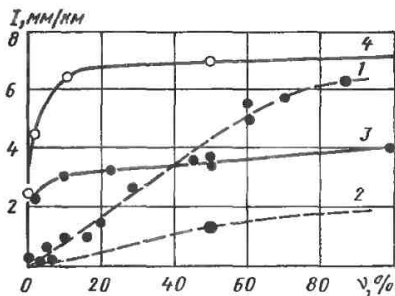


Рис. 6.31. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  сталей от влажности  $v$  в вакууме (кривые 1, 2) и на воздухе (кривые 3, 4) при различном давлении  $p$  и скорости скольжения  $v$ :

1 — малоуглеродистая сталь — малоуглеродистая сталь,  $p = 1$  МПа,  $v = 0,05$  м/с; 2 — сталь 45 — сталь 45,  $p = 1$  МПа,  $v = 0,05$  м/с; 3 — сталь СК45 — сталь СК45,  $p = 0,765$  МПа,  $v = 0,005$  м/с; 4 — сталь СК45 — сталь СК45,  $p = 1$  МПа,  $v = 0,2$  м/с

Рис. 6.32. Зависимость интенсивности изнашивания сталей от относительной влажности  $v$  воздуха при давлении 50 кПа и скорости скольжения 0,05 м/с:

1 — малоуглеродистая сталь — малоуглеродистая сталь; 2 — сталь С60 — сталь С60

которые результаты исследований по влиянию влажности воздуха на изнашивание металлов; к сожалению, работ в этом направлении выполнено мало.

Н. Уетц изучал влияние влажности воздуха на изнашивание металлов при скольжении на машине Зибеля и Кейля, где торцовые поверхности двух трубчатых образцов скользили одна по другой (без смазочного материала) со скоростью 0,05 и 0,02 м/с при различном давлении. Эксперименты проводили на воздухе с различной влажностью и в вакууме при различном давлении водяного пара. Перед испытаниями образцы шлифовали, обезжировали и высушивали.

Усредненные данные о влиянии влажности на интенсивность изнашивания при пробеге 100 м представлены на рис. 6.30. С ростом относительной влажности (до 50 %) износ линейно возрастает, а затем замедляется. В области относительной влажности 50 % поверхность трения полностью покрывается мономолекулярным слоем воды. Характерно, что продукты износа при влажности 5 % имеют темный серо-коричневый цвет (вероятно, это  $Fe_2O_3$ ). При влажности 50 и 90 % продукты

износа имеют вид серого металлического порошка.

Влияние влажности особенно резко проявляется при трении малоуглеродистой стали. При увеличении влажности с 5 до 90 % износ возрос в 150 раз. В этих же условиях в парах трения сталь 45 по стали 45 износ увеличился в 22 раза, бронза по бронзе в 3,5 раза, латунь по латуни в 1,6 раза.

Интенсивность изнашивания пары сталь 45 — сталь 45 при давлении 1 МПа была низкой (0,12 мм/км). При повышении влажности до 5 % она возросла в 18 раз, а при повышении влажности до 100 % — в 23 раза.

На рис. 6.31 представлена зависимость интенсивности изнашивания образцов от влажности в вакууме и в атмосфере, полученная Н. Уетцом. При низкой влажности интенсивность изнашивания в вакууме больше, чем на воздухе, поскольку в последнем случае на поверхностях трения образуются окислы. При большой влажности (свыше 40 %) интенсивность изнашивания в вакууме достигает предельного значения и далее уже не изменяется с увеличением влажности.

Эксперименты показали, что влажность оказывает меньшее влияние на интенсивность изнашивания цветных металлов.

При меньших нагрузках установлена обратная зависимость влияния

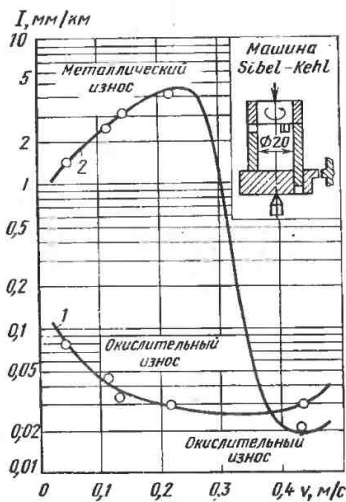


Рис. 6.33. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  пары трения сталь С45—сталь С45 при давлении 1 МПа от скорости скольжения  $v$  при относительной влажности воздуха 5 % (кривая 1) и 50 % (кривая 2)

влажности на интенсивность изнашивания (рис. 6.32). Уменьшение последней с увеличением влажности объясняется образованием окисного слоя на поверхностях скольжения и полированием поверхностей.

Влияние скорости скольжения поверхностей на интенсивность изнашивания показано на рис. 6.33. После достижения определенной скорости скольжения происходит повышение температуры поверхностей. В результате фактическая влажность уменьшается и происходит резкое снижение скорости изнашивания. Здесь наблюдается переход от металлического изнашивания (термин Уетца) к окислительному.

Все приведенные данные о влиянии влажности на интенсивность изнашивания металлов были получены Уетцом в 1968 г., когда о водородном изнашивании еще не было известно. В настоящее время полученные зависимости можно объяснить образованием в зоне контакта водорода в результате разложения воды. Бронза и латунь в меньшей степени охрупчиваются и насыщаются водородом. Окисление так-

же существенно влияет на износ поверхностей. Несомненно, что при большой влажности возможны коррозионные процессы на поверхностях трения.

Водородное изнашивание при трении качения. До настоящего времени почти не было исследований влияния старения масла на интенсивность изнашивания подшипников качения. Лишь в некоторых работах, в частности в работах Л. Грунберга, утверждалось, что химический состав и вид смазочного материала могут непосредственно влиять на сопротивление усталости подшипников качения и зубчатых передач. Установлено, что химические процессы в масле в результате действия присадки могут в 10 раз и более увеличить сопротивление контактной усталости. Снижение же сопротивления контактной усталости проявляется особенно в большой степени в виде точечной коррозии стальных шариков под действием воды, находящейся в масле, и водородной хрупкости.

Первые сведения о наводороживании при трении качения появились в 1963 г., когда Л. Грунберг и другие провели исследования влияния присутствия воды в минеральном масле на ускорение разрушения шарикоподшипников, изготовленных из обычных сталей.

Был предложен механизм ускоренного разрушения шарикоподшипников, основанный на возникновении вакансионной диффузии водорода в высоконапряженную сталь и ее охрупчивании. Эту гипотезу проверяли на четырехшариковой машине со смазочным материалом, содержащим 6 % тритиевой воды высокой активности. На испытуемом приводном шарике образовались питтинги, на остальных трех шариках напряжения были меньше и признаков поверхностных усталостных разрушений не наблюдалось. После испытания в тритиевой воде шарики промывали в ацетоне, погружали в жидкий сцинтиллятор и подсчитывали радиационную активность. Было зарегистрировано 1000—2000 имп/с. Не подверженная усталости часть шариков давала 40 имп/с при фоне около 30 имп/с. Активность на поврежденном участке со временем уменьшалась и через 5 сут приближалась к уровню

естественного радиационного фона. Описанный эксперимент подтверждает гипотезу, что в присутствии воды водород внедряется в металл, подвергаемый поверхностному усталостному воздействию. Уменьшение радиационной активности со временем может быть объяснено выводом трития из металла.

Для узлов трения современной техники (особенно для тяжело нагруженных подшипников авиационных двигателей) представляют интерес исследования по изучению причин снижения сопротивления усталости при качении, обусловленного присутствием воды в смазочном материале или топливе при эксплуатации машин и механизмов.

Механизм понижения работоспособности тел качения при наличии воды в смазочном материале сложен; он включает взаимосвязь циклически изменяющихся напряжений и химических реакций на поверхности, ведущих к коррозии и водородному изнашиванию. При повышении качества сталей и уменьшении вследствие этого числа подповерхностных неметаллических включений, вызывающих усталостное разрушение при качении соприкасающихся деталей, более важное значение приобретают химические реакции с водой, приводящие к наводороживанию и, как следствие, к образованию поверхностных дефектов — концентраторов напряжений.

Количественная оценка влияния воды на контактную усталость выполнена Шапбергом на четырехшариковой машине. Верхний образец вращался с частотой  $1730 \text{ мин}^{-1}$ , а нижние три шарика были разделены сепараторами и свободно двигались в кольце. Смазочным материалом служил очищенный парафин с кинематической вязкостью  $13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре  $50^\circ\text{C}$ . Шарика диаметром  $12,7 \text{ мм}$  изготовляли из дегазированной в вакууме стали K52100 твердостью HRC 63 Американского института черной металлургии. Кольца были из той же стали и имели твердость HRC 59. Смазывание циркуляционное, расход парафина  $70 \text{ мл/мин}$ . Воду в смазочном материале строго дозировали. Испытания проводили до появления

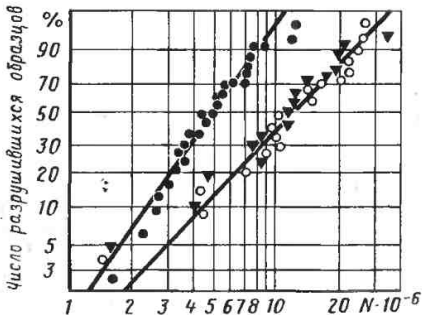


Рис. 6.34. Влияние воды на контактную прочность при качении:

○ — обезвоженное масло, образующее эмульсию; ● — масло + 1 % морской воды; ▲ — масло + 1 % морской воды + 0,1 % ИПАЭ

на поверхности металла небольшой язвы или скола.

Результаты испытаний, приведенные на рис. 6.34, показывают влияние содержания воды в смазочном материале на усталостную долговечность образцов. Постоянные углы наклона кривых на рисунке свидетельствуют о постоянстве режима смазки во всем диапазоне напряжений. Смазочный материал в данном эксперименте можно рассматривать как нейтральный, служащий только носителем воды.

Установлено также, что растворенная в смазочном материале вода значительно повышает интенсивность изнашивания катящихся тел. Опыты, проведенные при сравнительно низком максимальном контактном напряжении по Герцу ( $3240 \text{ МПа}$ ), при котором пластическая деформация не обнаруживалась, показали, что присутствие в смазочном материале  $120 \text{ мг/л}$  воды привело к шестикратному увеличению количества материала, собранного на фильтре, по сравнению с количеством материала, собранным при отсутствии воды в масле. Влияние воды на износ видно из данных табл. 6.1.

Частицы износа были подвергнуты рентгеновскому анализу. В них обнаружены окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и моногидрат этой окиси  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . Последний образовывался только в том

### 6.1. Влияние воды в смазочном масле на износ

Напряжение по Герцу, МПа	Время обкатки, ч	Концентрация воды в смазочном материале К·10 <sup>-4</sup> , %	Износ, мг
6500	32,4	10	0,124
	21,3	100	0,194
	72,3	10	0,114
	42,3	100	0,232
3240	354	10	1,8
	292	120	10,8

случае, если в смазочном материале находилась вода. К сожалению, при исследовании не был проведен анализ содержания в продуктах износа свободного водорода.

Механизм влияния воды на снижение контактной усталости, по мнению Р. Шацберга, состоит в следующем. Поверхностные микротрещины, образованные в условиях контакта при качении, действуют как тонкие капилляры. Смазочный материал заполняет эти капилляры, а растворенная в нем вода, конденсируясь в вершинах трещин, образует богатую водой фазу. Циклические напряжения, сконцентрированные у вершины трещины, водная коррозия и водородное охрупчивание действуют совместно, увеличивая скорость роста трещины. Вода может привести к образованию небольших коррозионных повреждений, которые становятся концентраторами напряжений.

Р. Шацберг указывает методы предотвращения снижения контактной усталости при качении, обусловленной присутствием воды в смазочном материале. Экспериментально установлено, что с помощью присадок можно снизить вредное действие воды и повысить долговечность подшипников. Результаты опытов, проведенных на четырехшариковой машине, показывают, что добавка 0,1 % изопропиламинэтанола (ИПАЭ) полностью нейтрализует вредное влияние 1 %

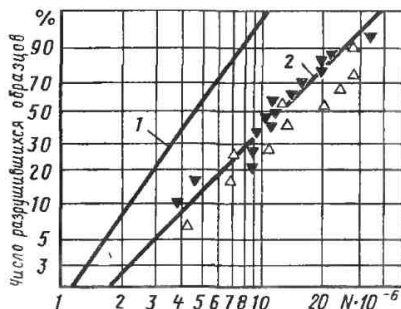


Рис. 6.35. Влияние концентрации присадки ИПАЭ (%) на эффективность ингибирования:

1 — влажный смазочный материал; 2 — обезвоженный смазочный материал; ▲ — масло +1 % морской воды +0,1 % ИПАЭ; △ — масло +1 % морской воды +0,25 % ИПАЭ

воды, образующей со смазочным материалом эмульсию.

На рис. 6.35 представлены вероятностные кривые Вейбулла, которые свидетельствуют о влиянии 1 % воды на усталостную долговечность и уменьшении этого влияния при введении в смазочный материал 0,1 % ИПАЭ.

Поскольку большинство смазочных материалов содержит некоторое количество воды, то добавление ИПАЭ может увеличить усталостную долговечность. Однако, как утверждает Р. Шацберг, использование ИПАЭ целесообразно в случаях, для которых уже доказано, что присутствие воды в смазочном материале вызывает существенное снижение усталостной долговечности образцов.

Г. Хейнике также отмечает, что наличие воды (в смазочном материале или воздухе) нужно учитывать в процессах трения и изнашивания металлов. Даже в условиях глубокого вакуума, например при масс-спектроскопическом исследовании, всегда можно обнаружить воду в остаточном газе. Если совершенно удалить воду, то можно наблюдать поразительные эффекты. Известно, что графит при полном удалении воды в значительной степени утрачивает хорошие смазывающие свойства. Характерно, что вода

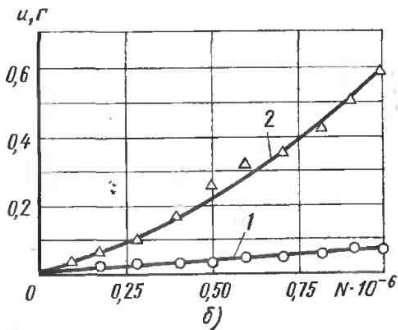
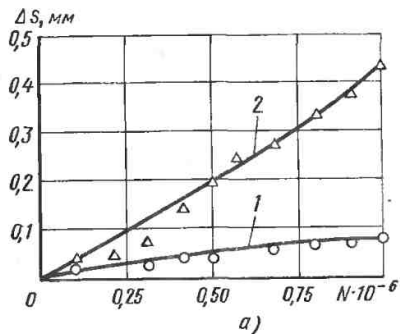


Рис. 6.36. Влияние добавок водорода (кривая 1) и кислорода (кривая 2) в воду на увеличение радиального зазора  $\Delta s$  (а) и износ  $u$  (б) шарикоподшипников в зависимости от количества циклонагрузений  $N$

оказывает влияние на свойства графита при низких концентрациях.

Уменьшить наводороживание тел качения в результате действия воды при эксплуатации можно применением в подшипниках качения режима ИП. В этом случае образование на контактной поверхности тонкой медной пленки предотвращает проникновение воды и водорода в микротрещины и может в значительной степени повысить контактную прочность.

При рассмотрении влияния воды на износ подшипников нельзя обойти тот факт, что введение в воду водорода не оказало заметного влияния на интенсивность изнашивания подшипников качения [6.14]. Введение же в воду кислорода привело к значительному увеличению радиального зазора в подшипниках (рис. 6.36). Опыты проводили при температуре 93 °С. При повышении температуры до 260 °С износ увеличивался в 10 раз. Концентрации, мг/кг, добавок в воду ( $pH = 6,5-7,5$ ), используемую при испытаниях, приведены ниже:

$O_2$ . . . . .	1—3
$H_2$ . . . . .	90—110
Деаэрированная вода . . . . .	Нет

## 6.9. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ИЗНАШИВАНИЯ И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании первых исследований можно указать общие направления уменьшения и предупреждения наводороживания при трении и дать рекомендации по подавлению водородного изнашивания применительно к узлам машин [6.8, 6.12].

1. При выборе материалов для узлов трения необходимо учитывать степень их наводороживания и охрупчивания. Введение в сталь хрома, титана, ванадия снижает проникновение в нее водорода. Наклеп стали может увеличить поглощение водорода. Холоднодеформированная сталь может поглотить в 1000 раз больше водорода, чем отожженная. Водородная хрупкость проявляется в большей степени в сталях ферритного класса. В закаленных или слабоотпущенных углеродистых и низколегированных сталях хрупкое разрушение может быть даже при ничтожно малом количестве водорода.

Необходимо, где возможно, исключать из узлов трения полимеры, способные к быстрому разложению и выделению водорода. Введение в тормозные материалы на основе полимеров измельченной на куски латунной проволоки благоприятно сказывается на фрикционных характеристиках.

Наличие растворенного водорода в некоторой степени может служить защитой против щелевой коррозии.

2. Полезно применять для узлов трения, если имеется вероятность водородного изнашивания, смазочные материалы, которые мало подвержены гидрогенизации. Уменьшение в керосине меркаптанов, тиоспиртов уменьшает возможность протекания химической реакции на поверхностях трения пары сталь—бронза и может исключить образование водорода.

3. В некоторых случаях в смазывающие жидкости полезно вводить ингибиторы проникновения водорода. Многие полярные органические соединения тормозят проникновение водорода в металлы при коррозии и катодной поляризации. Одной из эффективных и хорошо изученных присадок является дибензилсульфоксид, который при сильно отрицательных потенциалах катодов (для железа приблизительно 0,76 по водородной шкале) восстанавливается в дибензилсульфид, адсорбируясь на поверхности металла.

В парах трения сталь—медный сплав необходимо исключить из последнего примеси сурьмы, соединений мышьяка, серы и другие, способствующие выделению водорода.

4. Коррозионные процессы в узлах трения можно подавлять путем изменения режимов работы: снижением температуры, скорости скольжения давления. Так, для пары трения бронза—сталь при работе в глицерине или в спиртоглицериновой смеси основным фактором наводороживания является температура. При 65—70 °С наводороживание происходит в несколько раз интенсивнее, чем при температуре 60 °С.

5. Проникновение водорода можно существенно снизить, если из зоны наводороживания удалить (при их наличии) вещества, способствующие проникновению водорода: сероводород, фосфороводород, соединения мышьяка, селена, сурьмы, теллура. Действие сероводорода состоит в том, что он тормозит реакции рекомбинации атомарного водорода. На основании изложенного выше предложены новые подходы в создании рецептов износостойких и эффективных фрикционных пластмасс [6.8].

6. В ряде случаев водородное изнашивание может быть снижено введе-

нием в материалы медьсодержащих добавок, которые реализуют режим ИП. Так, введение во фрикционный материал ретинакс тонкоизмельченной латушной проволоки уменьшает наводороживание контртела, повышает фрикционные свойства ретинакса. Введение закиси меди в древесные материалы снижает выделение водорода при трении, а латунирование титана повышает его задиристость при работе со сталью.

7. Оригинальный метод борьбы с водородным изнашиванием разработан Ю. А. Евдокимовым, В. И. Колесниковым и В. И. Тер-Оганесяном. Они установили, что при трении пластмассовой детали о стальную в зависимости от состава пластмассы детали могут заряжаться: стальная отрицательно, а пластмассовая положительно, или наоборот. Когда стальная деталь заряжается отрицательно, происходят ее усиленное наводороживание (водород заряжен положительно) и интенсивное разрушение при трении.

8. Затормозить проникновение водорода на поверхности трения можно путем создания положительного электрического потенциала по отношению к наводороживаемой детали. Например, предложено приспособление для предотвращения износа валков при холодной прокатке с использованием водородсодержащих смазочных материалов [Пат. 2244379 (ФРГ)]. Между прокатными валками и прокатным материалом или только между валками образуется электрический потенциал, и в соответствии с условиями прокатки в рабочем зазоре выделяется повышенное количество водорода, образующегося за счет использования водородсодержащих смазочных материалов.

9. В целях «подавления» водорода во время его образования в зоне фрикционного контакта при создании новых фрикционных материалов для автомобилей во фрикционную пластмассу вводили закись меди или другие добавки, которые связывались с водородом химически [6.8]. Износостойкость фрикционного материала и сопряженного контртела при этом повышается в несколько раз. И самое главное, исчезает один из основных поро-



ков фрикционного материала — намятие на него стали или чугуна.

10. Как установлено В. Я. Матюшенко и М. А. Андрейчиком, в процессе технологических операций происходит усиленное наводороживание металлических деталей. Приобретенный водород локализуется в приповерхностном слое, где концентрация его более чем в 20 раз выше концентрации в сердцевине детали. Методом вакуум-плавления для ряда последовательных технологических операций получены следующие значения количества водорода, см<sup>3</sup>/100 г: токарная обработка без применения СОЖ — 0,4; то же, с применением СОЖ — 5,6; закалка — 12,6; отпуск — 6,8; цементация — 15,4; отжиг — 14; закалка — 18,8; обработка холодом — 17,7; отпуск — 17,4; старение — 15,1.

Разработан метод удаления технологического водорода путем полирования ПС (последняя технологическая обработка). При полировании помимо незначительного удаления ПС детали верхние слои металла нагреваются и деталь подвергается своеобразной термической обработке. Поскольку максимум температуры при полировании находится на поверхности, водород диффундирует на поверхность и десорбируется.

Программа исследований. Водородное изнашивание и ИП при трении, рассмотренные в этой главе, это два совершенно противоположных явления. Все процессы, протекающие при водородном изнашивании, направлены на то, чтобы разрушить ПС, усилить интенсивность изнашивания, облегчить процесс диспергирования. При ИП процессы направлены на снижение контактных давлений, уменьшение разрушения ПС, компенсацию уноса частиц износа, создание условий полной безызносности. Физические механизмы водородного изнашивания и ИП сложны. В зоне фрикционного контакта на одних участках поверхности может протекать один процесс, а на других — другой. Кроме того, одно явление может подавлять другое. В целом в природе противоположности не противостоят, а дополняют друг друга.

Исходя из развитых представлений о водородном изнашивании, имеюще-

гося научно-исследовательского задела и потребностей производства, можно рекомендовать следующие направления работ:

разработка приборов и методов исследования водородного изнашивания деталей машин;

изучение процессов наводороживания металлов при трении с фрикционными пластмассами для оценки количественных характеристик перераспределения водорода в ПС, изучение свойств наводороженного металла при трении, влияние режимов трения на наводороживание с широким использованием новейших методов исследования;

исследования наводороживания наиболее изнашиваемых деталей машин и оборудования в процессе эксплуатации и оценка вклада в снижение их износостойкости как биографического, так и образуемого при трении водорода в целях разработки требований к качеству материалов, смазочным материалам и специальным жидкостям, применяемым в узлах трения;

исследования влияния электрического и магнитного полей на процессы наводороживания при трении для определения количественных характеристик процессов и разработки новых путей борьбы с водородным изнашиванием;

изучение физико-химических процессов, происходящих в различных парах трения при водородном изнашивании, и установление характеристик реакционной способности поверхностей при различных режимах работы;

изучение газовыделения при трении в вакууме различных пар трения и исследование влияния деформаций на диффузионные перемещения водорода при трении;

исследования в области подавления водородного изнашивания пары трения металл—дерево в целях повышения нагрузочной способности и расширения областей использования материалов на основе древесины в узлах трения машин и оборудования;

разработка научных основ и методов подавления водородного изнашивания в узлах трения, смазываемых водой,

при высоких давлениях и скоростях скольжения;

разработка методов подавления водородного изнашивания в парах трения сталь—титановые сплавы в целях повышения антифрикционных характеристик таких пар и расширения областей их применения в узлах трения;

разработка методов оценки наводороживаемости тормозных устройств в условиях стейдовых и эксплуатационных испытаний;

изучение газонасыщения титановых сплавов при различных условиях расклинивающегося действия образующихся гидридов титана, микроструктуры и свойств ПС при водородном изнашивании титановых сплавов;

реализация в промышленности (особенно в автомобильной промышленности и на железнодорожном транспорте) ранее разработанных рецептов фрикционных полимеров, не подвергающихся водородному изнашиванию и обладающих более высокой износостойкостью по сравнению с применяемыми;

изучение общих закономерностей водородного изнашивания и выявление областей его проявления, а также создание научных основ борьбы с ним;

разработка стандартных методов оценки наводороживаемости материалов при трении и методов испытаний на износостойкость при водородном изнашивании;

исследования наводороживания стальных деталей при технологических операциях (механическая, термическая и химикотермическая обработка) и оценка влияния технологического водорода на долговечность трущихся деталей; разработка методов борьбы с технологическим водородом;

изучение действия водорода при абразивном изнашивании в условиях коррозионно-активных сред и повышенной влажности, фреттинг-коррозии, контактной усталости, коррозионно-механического изнашивания, кавитации и эрозии;

разработка методов подавления водородного изнашивания деталей автомобилей, рабочих органов сельскохозяйственных машин, авиационной техники, нефтехимического оборудования, Грунтовых насосов, железнодорожного транспорта и других машин и оборудо-

вания, металлорежущего и деревообрабатывающего инструмента, инструмента по обработке меховых изделий и внедрение их на заводах промышленности.

В каждой отрасли промышленности работы следует выполнять поэтапно. Первый этап — определение ответственных трущихся деталей и рабочих органов машины и оборудования, подержежных водородному изнашиванию, составление альбома деталей и исследование физико-химических свойств их поверхностей. Второй этап включает изучение закономерностей водородного изнашивания деталей и рабочих органов машин и разработку методов защиты от него. Третий этап — определение эффективности разработанных методов защиты от водородного изнашивания в стейдовых и эксплуатационных условиях. Последний этап заключается во внедрении разработанных рекомендаций на предприятиях отрасли.

### Список литературы

6.1. Эбелинг В. Образование структур при неравновесных процессах. М.: Наука, 1969. 270 с.

6.2. Николис Е., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных процессах. М.: Мир, 1979. 512 с.

6.3. Хаккеи Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 440 с.

6.4. Избирательный перенос при трении. Библиографический указатель отечественной литературы за 1956—1980 гг. 2-е изд. М.: АН СССР. Библиотека технической литературы, 1980. 155 с.

6.5. Polzer G., Meissner F. Grundlagen zu Reibung und Verschleiss. Leipzig: VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1979. 323 S.

6.6. Свириденко А. И., Савкин В. Г. Структурная трибомеханика материалов на основе полимеров. Трение и износ, 1980, № 1. С. 150—167.

6.7. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 209 с.

6.8. Защита от водородного износа в узлах трения/Под ред. А. А. Полякова. М.: Машиностроение, 1980. 133 с.

6.9. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения/Под ред. Д. Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1982. 207 с.

6.10. Матюшенко В. Я. Износостойкость наводороженных металлов. В кн.: Исследование водородного износа. М.: Наука, 1977. С. 24—27.

6.11. Шпеньков Г. П. Физико-химия трения/Под ред. Д. Н. Гаркунова.

Минск: БГУ им. В. И. Ленина, 1978. 204 с.

6.12. Гаркунов Д. Н., Поляков А. А. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.

6.13. Scieszka S. F. Tribological phenomena in steel composite brake material friction pairs. *Wear*, 1981, vol. 64, N 2, p. 367—378.

6.14. Коррозия и износ в водоохлаждаемых реакторах/Пер. с англ. Л.: Издательство судостроительной промышленности, 1959. 415 с.

## 7.1. ТЕОРИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

### 7.1.1. Физическое моделирование

При разработке конструкции трибосопряжения и выборе материалов для него возникает необходимость изучения влияния переменных условий, определяющих поведение реального сложного объекта. Обычно при этом имеют неполную исходную информацию: недостаточно изучено физическое содержание процессов на фрикционном контакте, особенно для новых классов материалов, неизвестно математическое описание или метод его решения. Такого рода трибологические задачи успешно решаются посредством физического моделирования.

Физическим моделированием называют исследования физически подобных процессов на установках, сохраняющих физическую природу явлений, но воспроизводящих их в других размерах в смысле геометрическом или физическом [7.1].

Особенностью модели при физическом моделировании является ее одинаковая природа с натурным объектом (натурой), т. е. в обоих случаях применяются одни и те же пары трения и смазочные материалы.

Посредством физического моделирования решаются задачи выявления зависимости коэффициента трения, интенсивности изнашивания и температуры трения от обобщенной информации о функционировании и свойствах трибосопряжений (ТС). Закон моделирования определяется в виде расчетного масштабного фактора, который является совокупностью всех масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре для параметров

режима работы, материалов трибосопряжения и конструкции, включенных в критерии подобия. Для накопления информации в банках данных очень важно использовать при испытаниях серийные машины трения и типовые образцы, что позволит в дальнейшем сопоставлять без пересчетов результаты, полученные различными исследователями. Возможны реализации испытаний на малогабаритных моделях в измененном (обычно ускоренном) масштабе времени и оценка точности моделирования.

Связи между параметрами модели и натуре предварительно устанавливаются расчетным путем. Расчетам обычно предшествует трехэтапный анализ моделируемых ТС.

Во-первых, система расчленяется на подсистемы в виде графических моделей, для каждой из которых применимы такие фундаментальные физические модели, как механическая (рис. 7.1, а), теплофизическая (распределения тепловых потоков между элементами пары трения, рис. 7.1, б), макроконтрактивования (рис. 7.1, в,  $A_c$  и  $A_r$ , изменяются во времени по значению и взаимному расположению), микроконтрактивования (рис. 7.1, г, генерируется теплота, возможен сдвиг тонкого слоя, включающего окисные пленки или пленки смазочного материала). Показанная на рис. 7.1 модель развивающаяся, она может быть дополнена подмоделями электрических явлений, химических превращений и т. п. Для каждой подсистемы выявляются на основе априорной информации виды нарушения фрикционной связи по И. В. Крагельскому (рис. 7.2).

Во-вторых, на основе анализа графического изображения подсистем строится иерархическая модель, целью которой является выявление основных и побочных параметров. Опреде-

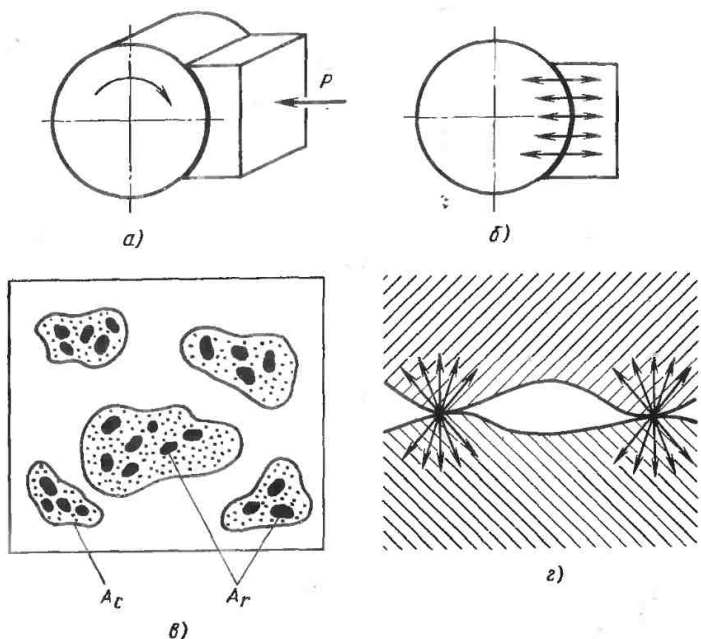


Рис. 7.1. Графическая модель процесса трения. Подмодели: а — механическая; б — теплофизическая; в, г — макроконтрактирования и микроконтрактирования элементов пары трения

ляющие параметры оказывают существенное влияние на все подсистемы, основные — только в пределах одной или нескольких подсистем, побочные — влияют несущественно (до 10—15 %) на трение или изнашивание.

В-третьих, устанавливается связь между функциональными зависимостями  $f_M = \psi(p_{M1}, p_{M2}, p_{M3}, \dots, p_{Mi})$  выходных характеристик (коэффициента трения, интенсивности изнашивания, температуры трения) от параметров от  $p_1$  до  $p_i$  исследуемого процесса для модели и аналогичными зависимостями для природы  $f_N = \psi(p_{N1}, p_{N2}, p_{N3}, \dots, p_{Ni})$ . Например,  $p_1$  — скорость,  $p_2$  — нагрузка,  $p_3$  — плотность и т. д.

Для установления такой связи применяются методы размерности, подобия, энергетический, энергоинформационный и их комбинации [7.1, 7.2]. Эти методы дают положительные резуль-

таты и в тех случаях, когда неизвестно математическое описание процессов, составляемое методами математической физики. В табл. 7.1 показаны основные операции, которые выполняются при использовании некоторых методов.

При реализации методов определения закона физического моделирования обязательно учитываются дополнительные положения, предложенные В. А. Вениковым и развитые его учениками. Так, случайный выбор масштабных коэффициентов при определении закона моделирования недопустим, так как произведение степенных функций масштабных коэффициентов подчинено строгой зависимости [7.2]. Сложные системы подобны, если подобны все составляющие их подсистемы. Сложные системы остаются подобными, если к ним присоединяется любое количество подобных подсистем, что особенно важно для так называемых

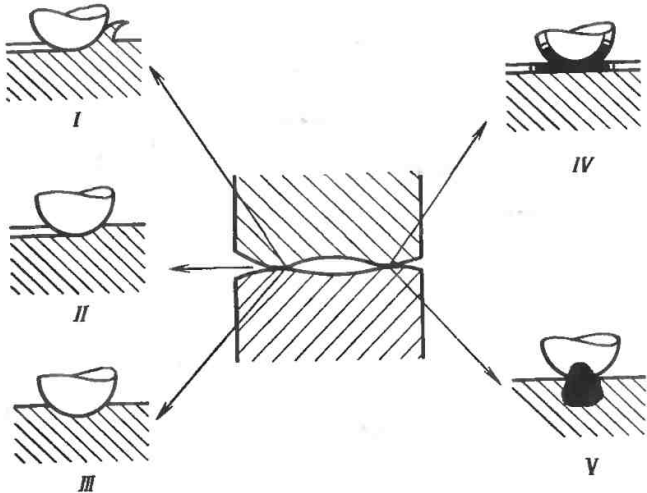


Рис. 7.2. Основные виды нарушения фрикционных связей (разрушения микроконтакта при изнашивании по И. В. Крагельскому):

*I* — абразивное ( $n=1$ ); *II* — пластическое оттеснение ( $1 < n < \infty$ ); *III* — усталостное ( $n \rightarrow \infty$ ); *IV* — адгезионное (разрушение схватывающихся пленок,  $n=1$ ); *V* — заедание,  $n$  — число циклов до разрушения

развивающихся систем, когда по мере получения дополнительной информации, например о явлениях на фрикционном контакте, связанных с появлением трибозлектричества, создается соответствующая новая подмодель. Подобные процессы, протекающие в геометрически неподобных системах, имеют пропорциональные сходственные характеристики в геометрических сходственных точках.

Вероятностные (стохастические) системы подобны, если выполняется условие пропорциональности математических ожиданий или дисперсий сходственных параметров модели и природы. При этом следует учитывать, что композиция достаточно большого числа практически произвольных законов распределения дает результирующее распределение, сколь угодно близкое к нормальному.

Физическое моделирование базируется на трех теоремах анализа подобия. Имеются различные варианты формулировок этих теорем, но остановимся на тех из них, которые наиболее полезны для физического моделирования

в трибологии. Доказательства теорем имеются во многих учебниках и руководствах [7.1].

*Первая теорема подобия.* У подобных явлений определенные сочетания параметров, критерии подобия численно равны. Примером таких сочетаний параметров являются обобщенные переменные (ОП); наиболее часто применяемые в задачах физического моделирования ОП приведены в табл. 7.1. Под критерием подобия подразумевается ОП — безразмерный комплекс физических величин, определяющий тот или иной физический процесс. Некоторые критерии при моделировании вырождаются в симплексы — отношения одноименных физических величин. Примером симплекса является широко применяемое в теории трения отношение высоты неровности к ее радиусу. Критерии можно умножать или делить друг на друга или на один из них, а также на постоянную величину, возводить в степень, получая новые критерии. Метод получения ОП рассмотрен ниже.

## 7.1. Наиболее часто применяемые обобщенные переменные (ОП)

ОП	Формула	Физический смысл ОП
Архимеда	$Ar \equiv \frac{g l^3 \Delta \rho}{v^2 \rho}$	Произведение двух комплексов, один из которых есть мера отношения инерционной силы к силе внутреннего трения, а другой — отношение подъемной силы к силе внутреннего трения
Био	$Bi \equiv l g \operatorname{grad} \vartheta / \Delta \vartheta$	Отношение перепада температуры по толщине пластины к температурному напору (разность температур пластины и среды). Устанавливает соответствие между интенсивностью теплообмена и распределением температуры в твердом теле (пластине)
Галилея	$Ga \equiv g l^3 / v^2$	Произведение двух комплексов, из которых один есть мера отношения инерционной силы к силе внутреннего трения, а другой — отношение силы тяжести к силе внутреннего трения при свободном движении жидкости (газа)
Грасгофа	$Gr \equiv g l^3 \beta \Delta \vartheta / v^2$	Термическая модификация $Ar$ (также при свободном движении), когда вместо относительной подъемной силы $\Delta \rho / \rho$ применена подъемная сила среды $g \beta$
Гука	$No \equiv \rho v^2 / E$	Удвоенная плотность энергии, т. е. энергия, приходящаяся на единицу объема, отнесенная к модулю упругости
Дюлонга	$Du \equiv \frac{v^2 \rho}{\Delta \vartheta c_p l \rho_n}$	Удвоенная кинетическая энергия, генерируемая на единице длины контакта, отнесенная к теплоте, поглощаемой телом
Кирпичева	$Ki \equiv \frac{q l}{\lambda (\vartheta_1 - \vartheta_0)}$	Безразмерная форма коэффициента теплопередачи
Киудсена	$Kn \equiv L_{cp} / l$	Отношение средней длины свободного пробега молекул $L_{cp}$ к характерному размеру $l$
Мейера	$Me \equiv \frac{\vartheta \lambda}{l f \rho v}$	Произведение температуры на теплопроводность, отнесенное к характерному размеру тела и мощности трения (обычно с учетом коэффициента распределения тепловых потоков)

ОП	Формула	Физический смысл ОП
Нуссельта	$Nu \equiv \alpha l / \lambda$	Безразмерная форма коэффициента теплоотдачи, применяемая в отличие от $Bi$ для жидкостей
Ньютона	$Ne \equiv \frac{\rho a}{\rho v^2}$	Отношение удельной нагрузки к удвоенной плотности энергии
Пекле	$Pe \equiv vl/a$	Мера отношения интенсивностей переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью при вынужденном движении
Померанцева	$Po \equiv \frac{\rho v^2 l^3}{\Delta \theta l \lambda}$	Произведение удвоенной плотности энергии (при нестационарном трении) на термическое сопротивление $l/\lambda$ , отнесенное к средней скорости изменения условий окружающей среды
Прандтля	$Pr \equiv \nu/a$	Отношение физических констант, т. е. постоянная, характеризующая среду, в которой протекает процесс
Рейнольдса	$Re \equiv ul/\nu$	Мера относительной величины потоков количества движения, обусловленных действием соответственно молярного и молекулярного механизмов
Релея Струхала	$Ra \equiv GrPr$ $Sh \equiv vl/l$	Произведение $Gr$ и $Pr$ Отношение продолжительности некоторого периода, определяющего среднюю скорость развития внешних воздействий, к средней скорости тех изменений, которые возникают в системе как следствие движения среды
Фруда	$Fr \equiv \frac{v^2}{gl}$	Относительная сила тяжести (существенная в тех случаях, когда гравитационные эффекты играют заметную роль)
Фурье	$Fo \equiv at/l^2$	Для нестационарных процессов выражает соответствие между средней скоростью изменения условий в окружающей среде (в частности, произвольно задаваемой температуры на поверхности тела) и средней скоростью перестройки температурного поля внутри тела



ОП	Формула	Физический смысл ОП
Эйлера	$Eu \equiv \frac{\Delta p}{\rho v^2}$	Безразмерная форма переменной — перепада давления $\Delta p$ , отнесенная к удвоенной плотности энергии при вынужденном движении жидкости (газа)
Примечание. Список основных использованных обозначений приведен в начале тома.		

**Вторая теорема подобия.** Первичную информацию, заданную в виде соотношения между  $m$  размерными параметрами, определяющими физический процесс, можно преобразовать во вторичную информацию в виде  $n$  безразмерных обобщенных переменных, где  $n = m - k$ . Здесь  $k$  — число основных единиц, размерность которых независима и которые не могут быть объединены в какую-либо обобщенную переменную.

**Третья теорема подобия.** Необходимым и достаточным условием подобия систем является пропорциональность всех сходственных характеристик, входящих в условия однозначности. Условия однозначности, или граничные краевые условия изучаемых явлений, включают следующие: гео-

метрические, характеризующие форму и размеры элементов пары трения, например комплекс геометрических размеров (см. п. 7.3.1); физические, характеризующие физические свойства среды и контактирующих тел, например их теплофизические и механические характеристики; граничные, характеризующие особенности протекания процесса на границах тел, что особенно связано с теплообразованием и окислением в зоне контакта, и, наконец, временные, характеризующие особенности протекания процесса во времени, т. е. его стационарность или нестационарность.

ОП могут быть получены одним из трех наиболее распространенных способов: методом подобия, методом размерности или из общих физических

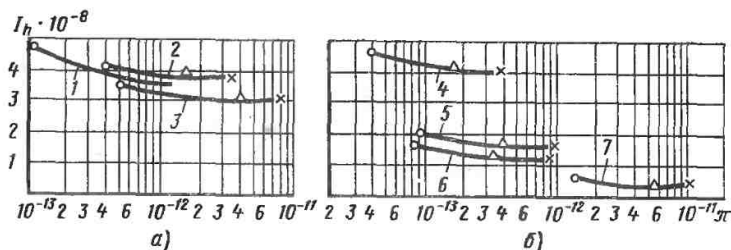


Рис. 7.3. Зависимость интенсивности линейного изнашивания  $I_h$  от ОП

$$\pi = m_1, 2a_1^{3/2}, 2D_1^3 / \text{НВ}_1, 2$$

на примере металлических (а) и порошковых спеченных (б) материалов контактных вставок из железного графита (по А. С. Пашталю и др.):

1 — А1-9; 2 — ZnAl; 3 — АСЧ-2; 4 — ЖГр-2; 5 — ЖГр-3; 6 — ЖГр-4; 7 — ЖГр-5

соображений. Обобщенные переменные используются для решения трех классов задач, которые относятся к области физического моделирования. Первый класс — это уменьшение объема исходной информации путем объединения параметров в ОП и выявление зависимостей выходных характеристик (коэффициента трения, интенсивности изнашивания) от той или иной обобщенной переменной и в дальнейшем прогнозирование на основании этих данных работоспособности триботехнической системы (рис. 7.3). Второй класс — это расчет масштабного фактора и с учетом последнего назначение для модели таких режимов испытания, которые обеспечивают получение на модели фрикционно-износных характеристик, близких к натурным, и, наконец, третий класс — факторное планирование триботехнического эксперимента, когда в качестве факторов используют ОП. Применяя ОП, удается сократить количество переменных, объем экспериментов и представлять информацию в сжатой форме в виде уравнения.

Например, для пары трения фрикционный полимерный материал ретинакс—чугун в уравнении, предназначенном для банка трибологических данных, использованы следующие четыре ОП:

$$\pi_1 = \pi_\lambda = \frac{\lambda_{1,2} \cdot 3^{0.3/2}}{P^3 v^3 K_{r1,2}^{1/2}};$$

$$\pi_2 = \pi_{HB} = \frac{HB_{1,2} K_{r1,2}^{2/3}}{P^2};$$

$$\pi_3 = \pi_W = \frac{W}{PK_{r1,2}^{1/6}};$$

$$\pi_4 = \pi_t = \frac{tv}{K_{r1,2}^{1/6}}.$$

В триботехнических задачах ОП могут выявляться различными методами. Рассмотрим получение ОП методами подобия и размерности. Расчет масштабного фактора показан в табл. 7.2

Метод подобия позволяет получить ОП в рамках математической модели, ранее составленной и апробированной. При этом учитывается правило размерности Фурье, согласно которому размерность в левой и правой частях уравнения должна быть одинаковой, и требование, чтобы ОП была безразмерной.

Таким образом, располагая уравнением (алгебраическим, дифференциальным, интегральным) вида  $AB + CD = E$ , необходимо и достаточно для получения ОП левую часть разделить на правую. В результате могут быть использованы две ОП:  $AB/E$  и  $CD/E$ .

Метод размерности не ограничен рамками какой-либо определенной модели, поэтому всегда существует опасность получения с его помощью ОП, некорректных с позиций физики. Для предотвращения таких ошибок необходимо и достаточно ОП, полученные методом размерности, сопоставлять с хорошо апробированными (стандартными) ОП, приведенными в табл. [7.1].

Получение ОП методом размерности состоит из трех последовательных этапов:

1) выбор базисных параметров, составление и решение базисного определителя;

2) связь с базисными параметрами остальных размерных величин;

3) на основе первых двух этапов запись формулы ОП и проверка безразмерности ОП.

*1-й этап.* В системе основных единиц *MLT* любой параметр *ТС* (скорость, нагрузка и т. п.) может быть обозначен  $p_{11} = [M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\gamma_1}]$ .

Если с целью получения замкнутого математического описания выбрать три базисных параметра, то базисный определитель (детерминант) будет иметь следующий вид [7.1, 7.2]:

$$D_0 = \begin{matrix} & M & L & T \\ \begin{matrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{13} \end{matrix} & \left| \begin{matrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{matrix} \right|, & \text{где } D_0 \neq 0. \end{matrix}$$

*2-й этап.* Для параметра  $p_{15} = [M^{\alpha_5} L^{\beta_5} T^{\gamma_5}]$ , заменив поочередно строки в базисном определителе стро-

7.2. Обязательные операции, применяемые при физическом моделировании

Операция	Результат	Математическое выражение	Область применения
<p>Разработка графической модели трибологического процесса (системы)</p> <p>Разработка структурной иерархической модели системы (см. рис. 7.8)</p>	<p>Учет параметров, определяющих систему в целом и каждую подсистему</p> <p>Выявление взаимодействия между системой и подсистемами</p>	<p><math>p_{111}, p_{112}</math> или <math>p_{211}, p_{212}</math>, например, <math>\lambda_{111}, \lambda_{112}</math></p> <p>—</p>	<p>Выбор исходных данных для получения ОП</p> <p>Выявление определяющих, основных и побочных параметров. Назначение базисных параметров</p>
<p>Получение ОП</p>	<p>Объединение определяющих и основных параметров в безразмерные комплексы</p>	$\pi_1 = \frac{p_{1g}}{p_{11}^{D_{11}/D_{01}} p_{12}^{D_{12}/D_{01}} p_{13}^{D_{13}/D_{01}}},$ $\pi_i = \frac{p_{ig}}{p_{i1}^{D_{i1}/D_{0i}} p_{i2}^{D_{i2}/D_{0i}} p_{i3}^{D_{i3}/D_{0i}}}$	<p>Прогнозирование выходных характеристик (<math>f, I</math>) трибосопряжения, систематизация результатов и планирование эксперимента</p>
<p>Расчет масштабного фактора при условии подобию модели и натуре</p>	<p>Получение масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре для каждого параметра материала, конструкции, процесса</p>	<p><math>p_{m11} = p_{n11} C_{r1,2}^{\alpha_1}, \dots, p_{m1l} = p_{n1l} C_{r1,2}^{\alpha_l}</math></p>	<p>Ускоренное получение на моделях выходных характеристик трибосопряжения</p>
<p>Планирование модельного эксперимента</p>	<p>Выбор стратегии, которая позволяет уменьшить объем экспериментов и представить информацию в сжатом виде</p>	<p>Например, <math>f = K_1 - K_2\pi_1 - K_3\pi_2 + K_4\pi_3 + \dots</math></p>	<p>Организация лабораторных модельных испытаний и формирование по их результатам банка трибологических данных</p>
<p>Оценка достоверности испытаний</p>	<p>Нормирование допустимой погрешности</p>	<p><math>e^2 = z_{\alpha}^2 \sigma^2/n</math></p>	<p>Выработка рекомендаций по проектированию и ремонту трибосопряжения</p>

кой с размерностью этого параметра, получим:

$$D_{\beta_{11}} = \begin{vmatrix} \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{vmatrix};$$

$$D_{\beta_{12}} = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{vmatrix};$$

$$D_{\beta_{13}} = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 \end{vmatrix}.$$

Строка с размерностью параметра  $p_{15}$  в начале занимает место строки с размерностью параметра  $p_{11}$  (верхний определитель), затем параметра  $p_{12}$  (средний определитель) и, наконец, параметра  $p_{13}$  (нижний определитель).

3-й этап. Обобщенная переменная для параметра  $p_{15}$  будет иметь вид

$$\pi_{p_{15}} = \frac{p_{15}}{p_{11}^{D_{011}/D_0} p_{12}^{D_{012}/D_0} p_{13}^{D_{013}/D_0}},$$

где  $D_0 \neq 0$ ,

**Пример 7.1.** Для получения ОП с базисными параметрами  $v, P, K_{\Gamma 1, 2}$  связать плотность обоих материалов  $\rho_{1,2}$  пары трения.

$$D_0 = P \begin{vmatrix} M & L & T \\ v & 0 & 1 & -1 \\ P & 1 & 1 & -2 \\ K_{\Gamma 1, 2} & 0 & 6 & 0 \end{vmatrix} = -6;$$

$$D_{011} = \begin{vmatrix} 2 & -6 & 0 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 6 & 0 \end{vmatrix} = 24;$$

$$D_{012} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 2 & -6 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \end{vmatrix} = -12;$$

$$D_{013} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 2 & -6 & 0 \end{vmatrix} = 4.$$

Обобщенная переменная (безразмерная)

$$\pi_{p_{1,2}} = \frac{\rho_{1,2}}{v^{24/-6} P^{-12/-6} K_{\Gamma 1, 2}^{4/-6}} = \frac{\rho_{1,2} v^4}{P^2} = \frac{1}{Ne_{1,2}},$$

где  $Ne$  — критерий Ньютона.

## 7.1.2. Математическое моделирование

Математическое моделирование основано на математическом подобии и на изоморфизме уравнений, т. е. способности их описывать различные по природе явления и выявлять различные функциональные связи, используя способность уравнений описывать отдельные стороны поведения системы.

Теория подобия является основой для создания алгоритма определенной последовательности вычислительных операций, связывающего методы эксперимента с вычислительной техникой.

При построении модели реальное явление неизбежно упрощается, схематизируется, и эта схема (графическая модель явления) описывается с помощью того или другого математического аппарата.

Модель создается с учетом целевой направленности задачи исследования, требуемой точности и предварительно известной информации. Так, если исходные данные, используемые в расчетах, известны неточно, имеют стохастическую природу и существенное рассеяние, то, очевидно, неоправданы разработка очень подробной модели и большие затраты времени на тонкую и точную оптимизацию решения.

При математическом моделировании применяются аналитические и статистические модели. Аналитические модели более грубы, учитывают меньшее число факторов, всегда требуют каких-то допущений и упрощений. Однако результаты расчета по ним легче обзорны, отчетливо отражают присущие явлению основные закономерности и, главное, больше приспособлены для поиска оптимальных решений.

Статистические модели по сравнению с аналитическими более точны и подробны, не требуют столь грубых допущений, позволяют учесть большое (теоретически — неограниченно большое) число факторов. Недостатки — громоздкость, плохая обозримость, большой расход машинного времени, а главное, крайняя трудность поиска оптимальных решений, которые приходится искать методом проб и догадок.

### 7.1.3. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование — методология экспериментально-теоретического решения технических задач управления сложной ТС.

Имитационное моделирование применяется к процессам, в ход которых может время от времени вмешиваться человек (или группа людей). Человек, руководящий операцией (испытатель), может в зависимости от сложившейся обстановки принимать те или другие решения. Затем приводится в действие математическая модель, которая показывает, какое ожидается изменение обстановки в ответ на это решение и к каким последствиям оно приведет спустя некоторое время. Следующее решение руководителя принимается уже с учетом новой обстановки и т. д. В результате многократного повторения такой процедуры руководитель принимает наиболее правильное решение, которое можно отнести к числу оптимальных.

Имитационная модель (ИМ) представляет собой совокупность взаимодействующих элементов: компонентов (подсистем), параметров, переменных, функциональных зависимостей, ограничений, целевых функций [7.1].

Компоненты являются подсистемами общей ТС. Иногда подсистема может быть вырождена до размеров отдельного элемента. Переменные — часть параметров системы (подсистемы), которые могут принимать значения, определяемые видом функциональной зависимости. В качестве ограничения испытателем устанавливаются границы

применения пары трения по скорости, нагрузке, температуре и т. п.

Перед построением ИМ анализируется априорная информация о работоспособности ТС, ее подсистем и элементов.

В отличие от методов аналогового и аналитического (математического) моделирования ИМ позволяет, во-первых, сократить время счета, во-вторых, заменить решение частей задачи (подсистемы), не имеющих корректного математического описания, экспериментальным получением эмпирических зависимостей, которые используются при решении задачи (системы) в целом.

Например, при исследовании С. М. Захаровым на ИМ процесса изнашивания подшипников двигателя внутреннего сгорания тепловоза учитывалось, что основным видом изнашивания являлось абразивное при нарушении режима жидкостного трения и при переходе к режимам граничного трения.

При этом на модели учитывались типовые режимы работы двигателя, температура, вибрации, нагрузка (транспортируемый груз, рельеф пути) и т. п. Каждый из режимов считался дискретной случайной величиной. Для ее моделирования на ЭВМ использовались методы статистических испытаний и рассчитывались для заданных сечений вала и вкладыша гидродинамический режим, температура, износ за время опыта.

Процедура расчета повторялась для всего цикла работы двигателя на различных режимах. Имитационная модель позволяет на каждом этапе определять значение износа, которое может быть получено при варьировании условий эксперимента.

### 7.1.4. Аналоговое моделирование

Этот вид моделирования базируется на одинаковом для модели и природы математическом описании и используется для имитации на основе аналогий физической системы по ее элементам. При этом каждому из физических элементов природы в модели соответствует определенный эквивалент.

В качестве моделей используются электрические цепи, составленные из пассивных элементов  $L$ ,  $C$ ,  $R$ , источников тока и напряжения и электронных операционных усилителей. Конструктивно они реализуются в виде систем, либо представляющих собой твердую или жидкую проводящую среду, соответственно подобранной формы, либо состоящих из пассивных элементов электрической цепи, или, наконец, содержащих, наряду с пассивными блоками, элементы с операционными усилителями [7.3]. Теплопроводность материалов моделируется электропроводностью, теплоемкость — электрической емкостью, тепловой поток — подводимым к модели электрическим током и т. п. С учетом предполагаемых пределов изменения переменных, устанавливают для операционных усилителей масштабы (константы подобия). Значения максимумов и минимумов назначают на основании анализа условий подобия.

В задачах триботехники модель функционального элемента должна воспроизводить нелинейную зависимость силы от скорости. Так, характерным нелинейным функциональным элементом является элемент сухого трения, имеющий разрывную характеристику. Однако исследования А. В. Чичинадзе и О. С. Темиша показали, что более точной является полученная для реальных материалов характеристика, учитывающая гистерезисные потери в материале.

В электрическом аналоговом моделировании тепловых и силовых полей в трибосопряжении применяют метод сплошных сред и метод электрических сеток. В первом случае моделью служит поле электрического тока в сплошной проводящей среде, например, в виде пластин из бумаги или пластмассы. Во втором — применяют электрические цепи с сосредоточенными параметрами. Модель в этом случае представляет электрическую сетку, в которой дискретно размещены схемы замещения. Область применения метода сплошных сред, отличающегося простотой и большей точностью соответствия между граничными условиями природы и модели, ограничена задачами математической физики, сво-

дующимися к уравнению Лапласа [7.3] Метод электрических сеток более универсален и используется, обычно для исследования неоднородных физических полей. В частности, при помощи электропроводной бумаги различных сортов были имитированы различные теплофизические свойства материалов пары трения серый чугун СЧ 18-36 (тормозной барабан) — фрикционная асбополимерная композиция 6КХ-4Б (тормозная накладка). Методом аналогового моделирования были оценены коэффициенты распределения тепловых потоков, влияние угла охвата, ширины дорожки трения и других конструктивных параметров на температуру поверхности трения, соотношение между максимальными значениями температуры передних и задних колес автомобиля и т. п.

## 7.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

Области эксплуатации ТС, в которых режимы трения (скорость, нагрузка, температура, подача смазочного материала и т. д.) не изменяются во времени, вследствие чего значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания описываются законами стационарных случайных функций, относятся к стационарным процессам.

### 7.2.1. Моделирование стационарных процессов трения без смазки

Трение двух твердых тел при отсутствии на контактирующих поверхностях введенного смазочного материала всех видов является трением без смазки.

Моделирование осуществляется на геометрически и физически подобных моделях или установках [7.2].

План моделирования процессов трения и изнашивания без смазки представлен в табл. 7.3.

Для пересчета исследуемых параметров оригинала на уменьшенную модель и обратно представлена

табл. 7.4 с пересчетными коэффициентами для двух вариантов: в I варианте  $C_T = 1$ , т. е. время испытаний для образца и модели одинаковое во II варианте  $C_T = C_L$ , т. е. время испытаний на модели сокращено,  $T_M = T_0/C_L$ . Второй вариант используется для случаев, когда испытываются узлы с высокой интенсивностью изнашивания (например, при абразивном изнашивании).

Для нахождения критерия Био необходимо увеличивать теплоотдачу с поверхности трения моделей. Это осуществляется путем обдувания узла воздухом. Скорость обдувания  $v_B$ , м/с, можно рассчитать по теоретически найденному коэффициенту теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), с теплоотдающей поверхности узла по формуле  $\alpha_{охл} = (1 + 1,75 \sqrt{v_B}) 6,7 \cdot 10^{-8}$ .

Оценивается влияние изменения масштабных коэффициентов факторов (см. табл. 7.4) на значение силы внешнего трения. Согласно гл. 3 коэффициент трения скольжения без смазки равен: для упругого контакта

$$f_y = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + 0,44\alpha_r p_r \theta, \quad (7.1)$$

для пластического контакта

$$f_{пл} = \frac{\tau_0}{C\sigma_T} + \beta + \frac{0,31}{r} \left( \frac{p}{C\sigma_T} \right)^{1/2}, \quad (7.2)$$

Учитывая, что  $C_\sigma = C_\tau = C_{pr} = C_\theta = C_\beta = C_{\alpha r} = C_c = 1$ , а  $C_r = C_L$ ,  $C_p = C_L^2$ , получаем:  $C_{fy} = 1$ , т. е. тождественность коэффициентов трения для модели и образца.

В процессе обработки результатов лабораторных, стендовых или эксплуатационных испытаний согласно второй и третьей теоремам подобия [7.1] находят функциональные зависимости в конкретной форме, описывающие процессы трения и изнашивания при трении без смазки.

## 7.2.2. Моделирование стационарных процессов при граничном трении

Нахождение границ видов трения условно определяется по значению коэффициента трения (сухое  $f \approx 0,8 \div 0,25$ ; полусухое  $f \approx 0,25 \div 0,05$ ; полужидкостное  $f \approx 0,05 \div 0,01$ ).

Коэффициент граничного трения

$$f_{гр} = f_{ТВ} - k \frac{\eta_{см} v}{P_A}, \quad (7.3)$$

где  $f_{ТВ}$  — коэффициент трения несмазанных поверхностей;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $\eta_{см}$  — кинематическая вязкость смазочного материала;  $v$  — скорость скольжения;  $P_A$  — удельная нагрузка.

При соблюдении пропорциональности моделируемых параметров (см. табл. 7.4), первый член (7.3) для образца и модели одинаков, что показано в (п. 7.2.1). Подставив во второй член (7.3)  $C_k = C\eta_{см} = C_v = C_p = 1$ , убеждаемся в тождественности и второго члена. Процессы полусухого трения можно моделировать как трение без смазки, используя данные табл. 7.4 при условии введения  $\bar{\omega}_{см0} = \bar{\omega}_{см.м} C_L$ , где  $\bar{\omega}_{см0}$  — удельный объемный расход смазочного материала, мм<sup>3</sup>/(см<sup>2</sup>·км). Методика моделирования полужидкостного трения представлена в табл. 7.5.

Методика определения критериев  $Eu$  и  $Re$ . Экспериментально доказано [7.2], что течение смазочного материала на поверхностях при граничном трении характеризуется ламинарным режимом. Это указывает на автоматичность процесса, и закон движения описывается критериальным уравнением:

$$La = Eu \cdot Re^m = \text{const}, \quad (7.4)$$

где  $La$  — критерий Лагранжа;  $Eu$  — критерий Эйлера (см. табл. 7.1);  $Re$  — критерий Рейнольдса (см. табл. 7.1).

Механизм процесса течения становится таковым, что все процессы данного типа автоматически подобны.

Отсюда следует, что при граничной смазке, характеризующейся автоматич-

7.3. План моделирования процессов трения и изнашивания без смазки

Условия однозначности изучаемого процесса	Условия физического подобия процессов трения и изнашивания	Определяемые критерии	Принимаемые ограничения при испытаниях	Условия проверки	Ожидаемая погрешность моделирования, %
<p>1. Геометрические:</p> $C_l = \frac{L_o}{L_m} = \frac{x_o}{x_m} = \frac{y_o}{y_m} = \frac{z_o}{z_m} = K_l$ <p>для подшипников скольжения:</p> $(F_{\Pi}/F_B)_o = (F_{\Pi}/F_B)_m;$ $(B_{\Pi}/d_{\Pi})_o = (B_{\Pi}/d_{\Pi})_m;$ $\psi_{\Pi, o} = \psi_{\Pi, m}$ <p>для зубчатых передач:</p> $(F_{\Pi}/F_K)_o = (F_{\Pi}/F_K)_m;$ $(b_{\Pi, \kappa}/a_{\Pi, \kappa})_o = (b_{\Pi, \kappa}/a_{\Pi, \kappa})_m;$ $(m/D_{\Pi, \kappa})_o = (m/D_{\Pi, \kappa})_m;$ $(r_A/L)_o = (r_A/L)_m$ <p>2. Физические: <math>E_{1,2}; \mu_{1,2};</math></p>	<p>1. Подобие между генерацией теплоты на поверхности трения, физическими, геометрическими параметрами и градиентом температуры (критерий) Мейера</p> $\left( \frac{\lambda \Delta \vartheta L}{\beta \rho v f} \right)_o = \left( \frac{\lambda \Delta \vartheta L}{\beta \rho v f} \right)_m$ <p>2. Подобие температурных полей и условия теплоотдачи на поверхностях (критерий Био)</p> $\left( \frac{\alpha L}{\lambda} \right)_o = \left( \frac{\alpha L}{\lambda} \right)_m$ <p>3. Подобие деформаций</p>	<p>1. Для коэффициента трения</p> $f = \frac{F_{\text{ТР}}}{P} = \text{idem};$ $\frac{\lambda \Delta \vartheta}{\beta \rho v f} = \text{idem}$ <p>2. Для удельной объемной интенсивности изнашивания <math>i_h = \text{idem}</math></p> <p>3. Для удельной линейной интенсивности изнашивания</p> $i_n = \frac{I_n}{S_{\text{ТР}}} = \text{idem}$ <p>4. Для удельной</p>	<p>1. <math>K_l = \frac{1}{5}, \dots, 1, 0, \dots, 1, 5</math></p> <p>2. <math>C_{E1,2}; C_{\mu1,2}; C_{\rho1,2}; C_{\eta B1,2}; C_{\lambda1,2}; C_{C1,2}; C_{\eta B A} = 1 = \text{const}</math></p> <p>3. <math>C_p = C_v = C_{\vartheta} = 1 = \text{const}</math></p> <p>4. <math>C_T = \text{const}</math></p>	<p><math>f_o = f_m</math></p> <p><math>i_{V_o} = i_{V_m}</math></p> <p><math>\vartheta_o = \vartheta_m</math></p> <p><math>\bar{R}_{z_o} = \bar{R}_{z_m} C_l</math></p> <p><math>\text{grad } \vartheta_o = \text{grad } \vartheta_m / C_l</math></p>	<p>0—20</p> <p>2—24</p> <p>0—25</p> <p>0—15</p> <p>3—25</p>



$\rho_{1,2}$ ;  $\text{HV}_{1,2}$ ;  $\lambda_{1,2}$ ;  
 $c_{1,2}$ ;  $\text{HV}_A$   
 3. Граничные:  $p$ ;  $v$ ;  $\vartheta_T$ ;  $\vartheta_H$

4. Временные:  $T$

и напряжений на контакте:

$$\frac{A_{HO}}{A_{KM}} = C_l^2$$

Для подшипников скольжения:

$$\left( \frac{p}{VE_{\text{пр}}\epsilon} \right)_o = \left( \frac{p}{VE_{\text{пр}}\epsilon} \right)_m$$

Для зубчатых передач:

$$\left( \frac{\sigma_{\text{кпр}}}{F_{\text{пр}}m} \right)_o = \left( \frac{\sigma_{\text{кпр}}}{E_{\text{пр}}m} \right)_m$$

4. Подобие шероховатостей (симплексы) Крагельского

$$\left[ \frac{(R_z)_{1,2}}{r_{1,2}} \right]_o = \left[ \frac{(R_z)_{1,2}}{r_{1,2}} \right]_m$$

5. Подобие удельного объемного расхода абразива

$$\omega_{Ao} = \omega_{Am} C_l$$

интенсивности изнашивания по массе

$$\frac{i_q S_{\text{тр}} A_H}{G_g} = \text{idem}$$

Примечания: 1. Условия однозначности или краевые условия включают: 1 — геометрические, характеризующие форму и размер тела, в которых протекает изучаемый процесс; 2 — физические, характеризующие физические свойства среды и контактирующих тел; 3 — граничные, характеризующие особенности протекания процесса на границах тел; 4 — временные, характеризующие особенности протекания процессов во времени.

2. Критерий Мейера (см. табл. 7.1) включает неизвестные  $f$  и  $\Delta\vartheta$  и может быть определен в частных случаях, когда выполнены условия, указанные в табл. 7.4 и 7.5.

7.4. Формулы и коэффициенты для пересчета параметров с оригинала на уменьшенную модель

Расчетный параметр	I вариант		II вариант	
	Расчетная формула	Коэффициент пересчета	Расчетная формула	Коэффициент пересчета
Масштабный коэффициент	$C_l = l_0/l_M$	$l_M = l_0/C_l$	$C_l = l_0/l_M$	$l_M = l_0/C_l$
Давление	$C_p = 1$	$p_M = p_0$	$C_p = 1$	$p_M = p_0$
Напряжение:				
нормальное	$C_\sigma = 1$	$\sigma_M = \sigma_0$	$C_\sigma = 1$	$\sigma_M = \sigma_0$
касательное	$C_\tau = 1$	$\tau_M = \tau_0$	$C_\tau = 1$	$\tau_M = \tau_0$
Полная нагрузка	$C_P = C_l^2$	$P_M = P_0/C_l^2$	$C_P = C_l^2$	$P_M = P_0/C_l^2$
Скорость скольжения	$C_v = 1$	$v_M = v_0$	$C_v = 1$	$v_M = v_0$
Время трения (время опыта)	$C_T = 1$	$T_M = T_0$	$C_T = C_l$	$T_M = T_0/C_l$
Путь трения	$C_{Стр} = 1$	$S_{Стр.М} = S_{Стр.0}$	$C_{Стр} = C_l$	$S_{Стр.М} = S_{Стр.0}C_l$
Коэффициент теплоотдачи с поверхности	$C_\alpha = 1/C_l$	$\alpha_M = \alpha_0 C_l$	$C_\alpha = 1/C_l$	$\alpha_M = \alpha_0 C_l$
Шероховатость поверхностей трения	$C_h = C_l$	$(Rz)_M = (Rz)_0/C_l$	$C_h = C_l$	$(Rz)_M = (Rz)_0/C_l$
Геометрическая характеристика шероховатости	$C_{h/r} = 1$	$[(Rz/r)_{1,2}]_M = [(Rz/r)_{1,2}]_0$	$C_{h/r} = 1$	$[(Rz/r)_{1,2}]_M = [(Rz/r)_{1,2}]_0$
Удельный объемный расход абразива	$C_{\omega A} = 1$	$\omega_{AM} = \omega_{A0}$	$C_{\omega A} = 1$	$\omega_{AM} = \omega_{A0}$
Средний диаметр частиц абразива	$C_{dA} = C_l$	$d_{AM} = d_{A0}/C_l$	$C_{dA} = C_l$	$d_{AM} = d_{A0}/C_l$
Температура трения	$C_\vartheta = 1$	$\vartheta_M = \vartheta_0$	$C_\vartheta = 1$	$\vartheta_M = \vartheta_0$
Термическое сопротивление узла	$C_R = 1$	$R_M = R_0$	$C_R = 1$	$R_M = R_0$
Удельная массовая интенсивность изнашивания	$C_{iq} = 1$	$i_{qM} = i_{q0}$	$C_{iq} = 1$	$i_{qM} = i_{q0}$
Удельная объемная интенсивность изнашивания	$C_{iV} = 1$	$i_{VM} = i_{V0}$	$C_{iV} = 1$	$i_{VM} = i_{V0}$
Полный износ (по массе)	$C_{Иq} = C_l^2$	$I_{qM} = I_{q0}/C_l^2$	$C_{Иq} = C_l^2$	$I_{qM} = I_{q0}/C_l^2$
Коэффициент трения	$C_f = 1$	$f_M = f_0$	$C_f = 1$	$f_M = f_0$

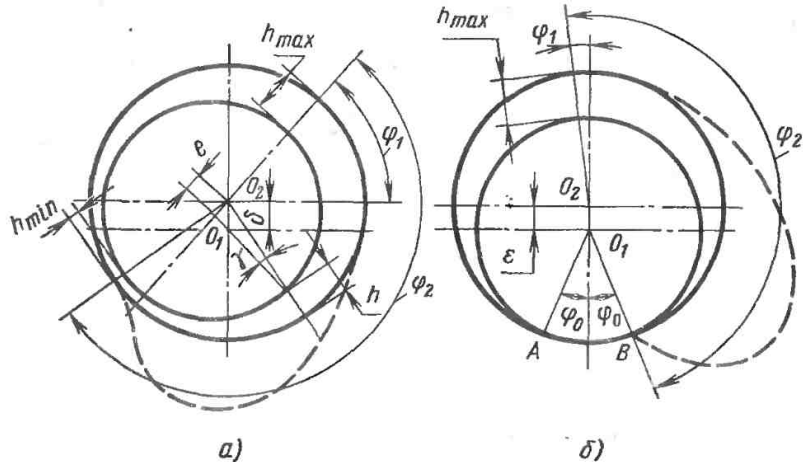


Рис. 7.4. Распределение давления в произвольном сечении смазочного слоя подшипника при трении:

а — гидродинамическом; б — граничном (полужидкостном), когда вал опирается на подшипник

ным ламинарным режимом ее течения, процесс будет зависеть только от геометрических форм, шероховатости поверхностей, количества и качества расходуемого смазочного материала.

Значения коэффициентов  $m$  и значения  $\text{const}$  для каждого узла трения находятся экспериментально:

$$Eu = \Delta p_{\text{см}} / (\rho_{\text{см}} v_{\text{см}}^2), \quad (7.5)$$

где  $\Delta p_{\text{см}}$  — перепад давления в смазочном слое;  $v_{\text{см}}$  — скорость течения смазочного материала;

$$Re = v_{\text{см}} L / \nu. \quad (7.6)$$

Для вязкопластичного смазочного материала

$$Re_{\text{в. пл}} = \frac{v_{\text{см}} L}{\nu_{\text{см. пл}}}. \quad (7.7)$$

В качестве определяющего размера  $L$  для подшипников скольжения принимается двойной гидравлический радиус диаметрального зазора подшипника, а для зубчатых передач отношение площади сечения смазочного слоя к приведенному радиусу кривизны  $\rho_{\text{пр}}$  контактирующих тел:

$$L = \frac{B h_{\text{см}}}{\rho_{\text{пр}}}, \quad (7.8)$$

где  $h_{\text{см}}$  — средняя толщина смазочного слоя.

Используя уравнение подобия, находят функциональные зависимости для конкретных узлов трения. Полученные формулы применяются для определения режима, скорости истечения и расхода смазочного материала.

Образование смазочного слоя при полужидкостном трении представлено на рис. 7.4 и 7.5. Смазочный материал будет заполнять зазор между валом и подшипником, а на поверхности контакта, определяемого углом  $2\varphi_0$ , будет образовываться система масляных макроклиньев (см. рис. 7.4). Истечение смазочного материала будет осуществляться через торцы подшипника.

Учитывая автомодельность режима, скорость истечения смазочного материала из зазоров подшипников можно найти по формулам:

для жидкого смазочного материала

$$Eu Re = \frac{\Delta p L}{\eta_{\text{см}} v_{\text{см}}}, \quad (7.9)$$

7.5. План моделирования процессов трения и изнашивания при граничном трении

Условия однозначности изучаемого процесса	Условия физического подобия процессов трения и изнашивания	Определяемые критерии и симплексы	Принимаемые ограничения при испытаниях	Условия проверки	Ожидаемая погрешность моделирования, %
<p>1. Геометрические:</p> $C_l = \frac{L_o}{L_m} = \frac{x_o}{x_m} = \frac{y_o}{z_m} = \frac{z_o}{z_m} = K_l$ <p>Для подшипников скольжения:</p> $(F_{\Pi}/F_{В})_o = (F_{\Pi}/F_{В})_m;$ $(B_{\Pi}/d_{В})_o = (B_{\Pi}/d_{В})_m;$ $\psi_{\Pi, o} = \psi_{\Pi, m}$ <p>для зубчатых передач:</p> $(F_{\Pi}/F_{К})_o = (F_{\Pi}/F_{К})_m;$ $(b_{\Pi, К}/a_{\Pi, К})_o = (b_{\Pi, К}/a_{\Pi, К})_m$ $(m/D_{\Pi, К})_o = (m/D_{\Pi, К})_m;$ $(r_A/L)_o = (r_A/L)_m$ <p>2. Физические: <math>E_{1,2}; \mu_{1,2};</math>  <math>HВ_{1,2}; \rho_{1,2}, \text{ см}; \lambda_{1,2}, \text{ см};</math>  <math>C_{1,2}, \text{ см}; \eta_{\text{см}}; HВ_A</math></p>	<p>1. Подобие полей давлений в смазочном слое (критерий Эйлера):</p> $Eu = \Delta p_c / (\rho_c v_c^2)$ <p>2. Подобие гидродинамических режимов в смазочном слое (критерий Рейнольдса):</p> <p>для вязкой среды:</p> $Re = v_c L / \nu_c;$ <p>для вязкопластической среды</p> $Re = v_c L / \nu_{\text{ст. пл}};$ $\nu_{\text{ст. пл}} = (\zeta_{\text{см}} \bar{D} + \eta_{\text{пл}}) / \rho_c;$ $\bar{D} = dv_c / dr$ <p>3. Подобие между генерацией теплоты на поверхности трения, физическими, геометрическими параметрами и градиентом температуры (Критерий Мейера):</p> $\left( \frac{\lambda \Delta \theta L}{\beta \rho v f} \right)_o = \left( \frac{\lambda \Delta \theta L}{\beta \rho v f} \right)_m$ <p>4. Подобие температур-</p>	<p>1. Для коэффициента трения</p> $f = \frac{F}{P} = \text{idem}$ $\frac{\lambda \Delta \theta L}{\beta \rho v f} = \text{idem}$ <p>2. Для удельной объемной интенсивности изнашивания</p> $i_v = \text{idem}$ <p>3. Для удельной линейной интенсивности изнашивания</p> $i_n = \frac{I_n}{S_{\text{тр}}} = \text{idem}$ <p>4. Для удельной интенсивности изнашивания по массе</p>	<p>1. <math>K_l = \frac{1}{2}, \dots, 1, 0, \dots, 10</math></p> <p>2. <math>C_{E1,2}; C_{\mu 1,2}; C_{HВ1,2}; C_{\rho 1,2 \text{ см}}; C_{\lambda 1,2}, \text{ см}; C_{C1,2}, \text{ см } C_{\eta_{\text{см}}}; C_{HВ_A} = 1 = \text{const}</math></p> <p>3. <math>C_p = C_v = C_{\theta} = 1 = \text{const}</math></p> <p>4. <math>C_T = \text{const}</math></p>	<p><math>f_o = f_m</math></p> <p><math>i_{vo} = i_{vm}</math></p> <p><math>\theta_o = \theta_m</math></p> <p><math>Rz_o = z_m C_l</math></p> <p><math>\text{grad } \theta_o = \text{grad } \theta_m</math></p>	<p>0—20</p> <p>0—24</p> <p>0—25</p> <p>0—15</p> <p>3—25</p>

3. Граничные:  $p$ ;  $v$ ;  $\vartheta_T$ ;

$\vartheta_H$ ;  $\bar{v}_{см}$

4. Временные:  $T$

ных полей и условия теплоотдачи на поверхностях (критерий Био):

$$\left(\frac{\alpha L}{\lambda}\right)_o = \left(\frac{\alpha L}{\lambda}\right)_m$$

5. Подобие деформаций и напряжений на контакте:

$$\frac{A_{н.о}}{A_{н.м}} = C_l^2$$

Для подшипников скольжения:

$$\begin{aligned} [P/(BE_{пр\epsilon})]_o &= \\ &= [P/(BE_{пр\epsilon})]_m \end{aligned}$$

Для зубчатых передач:

$$\begin{aligned} [\sigma_{н\text{пр}}/(E_{пр}m)]_o &= \\ &= [\sigma_{н\text{пр}}/(E_{пр}m)]_m \end{aligned}$$

6. Подобие шероховатостей поверхностей (симплексы Крагельской)

$$\begin{aligned} \left[\frac{(Rz)_{1,2}}{r}\right]_o &= \left[\frac{(Rz)_{1,2}}{r}\right]_m; \\ [(Rz)_1/(Rz)_2]_o &= \\ &= [(Rz)_1/(Rz)_2]_m \end{aligned}$$

7. Подобие удельного объемного расхода смазки

$$\omega_{с.о} = \omega_{с.м} C_l$$

8. Подобие удельного объемного расхода абразива

$$\bar{\omega}_{Ao} = \bar{\omega}_{Am} C_l$$

$$\frac{i_q S_{тр} A_H}{G g} = \text{idem}$$

Примечание. Критерий Мейера включает неизвестные  $f$  и  $\Delta\vartheta$  и может быть определен в частных случаях, когда выполнены условия, указанные в табл. 7.4 и 7.5.

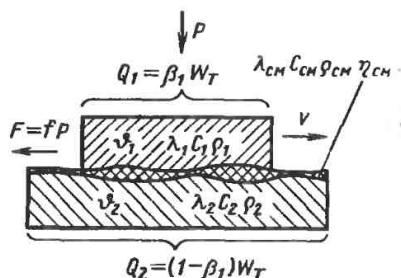


Рис. 7.5. Схема образования режима смазки и тепловых потоков при граничном (полужидкостном) трении

для пластичного смазочного материала

$$EuRe^{1/2} = \frac{\Delta PL}{\eta_{см. пл} \bar{v}_{см}} = \frac{\Delta PL^{1/2}}{\rho_{пл} \bar{v}_{см}^{3/2} \eta_{см. пл}^{1/2}} \quad (7.10)$$

Для течения смазочного материала в зубчатых передачах используется критериальное выражение  $Eu Re^m = La = const$ . Числовые значения  $m$  и  $La$  представлены в табл. 7.6.

Нормальные контактные напряжения находят по формуле Герца — Беляева

$$\sigma_k = 0,418 \sqrt{gE_{пр} R}. \quad (7.11)$$

Расход смазочного материала, кг,

$$\bar{\theta}_{см} = \bar{v}_{см} \gamma_{см} B T_{оп} h_{см}. \quad (7.12)$$

где  $\bar{\theta}_{см}$  — средний по массе расход смазочного материала за опыт, кг;  $\gamma_{см}$  — плотность смазочного мате-

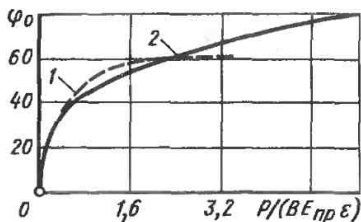


Рис. 7.6. Зависимость  $\phi_0$  от нагрузочной характеристики для подшипников: 1 — сталь—бронза;  $\mu_{II} = \mu_I = 0,3$ ; 2 — сталь—пластмасса;  $\mu_{II} = 0,4$ ;  $\mu_I = 0,3$

риала,  $кг/м^3$ ;  $B$  — длина зубьев передачи (или роликов), м;  $T_{оп}$  — продолжительность опыта, с;  $h_{см}$  — средняя толщина смазочного слоя, м.

Зависимость  $\phi_0 = \Phi\left(\frac{P}{BE_{пр}\epsilon}\right)$  для подшипников представлена на рис. 7.6.

### 7.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

#### 7.3.1. Моделирование нестационарных процессов при трении без смазки

Отличительной особенностью расчетов моделей задач нестационарного трения является их сложность и неоднородность. Они объединяют различные модели математической физики, отображающие совокупность процессов различной природы, которые имеют место на фрикционном контакте (тепловые, деформационные, кинематические и т. п.). На рис. 7.7

7.6. Значение критерия  $La$  при различных контактных напряжениях

Номинальное контактное напряжение, МПа	Значение $La = EuRe^m$ для масел		
	АС-8	МС-20	Нигрол Л
500	$EuRe^{1,08} = 0,9226$	$EuRe^{0,97} = 1,473$	$EuRe^{1,588} = 4,634 \cdot 10^{-6}$
600	$EuRe^{1,237} = 0,2679$	$EuRe^{1,418} = 7,11 \cdot 10^{-2}$	$EuRe^{1,649} = 3,214 \cdot 10^{-6}$
700	$EuRe^{1,058} = 0,383$	$EuRe^{0,985} = 5,88 \cdot 10^{-2}$	$EuRe^{1,23} = 2,748 \cdot 10^{-5}$

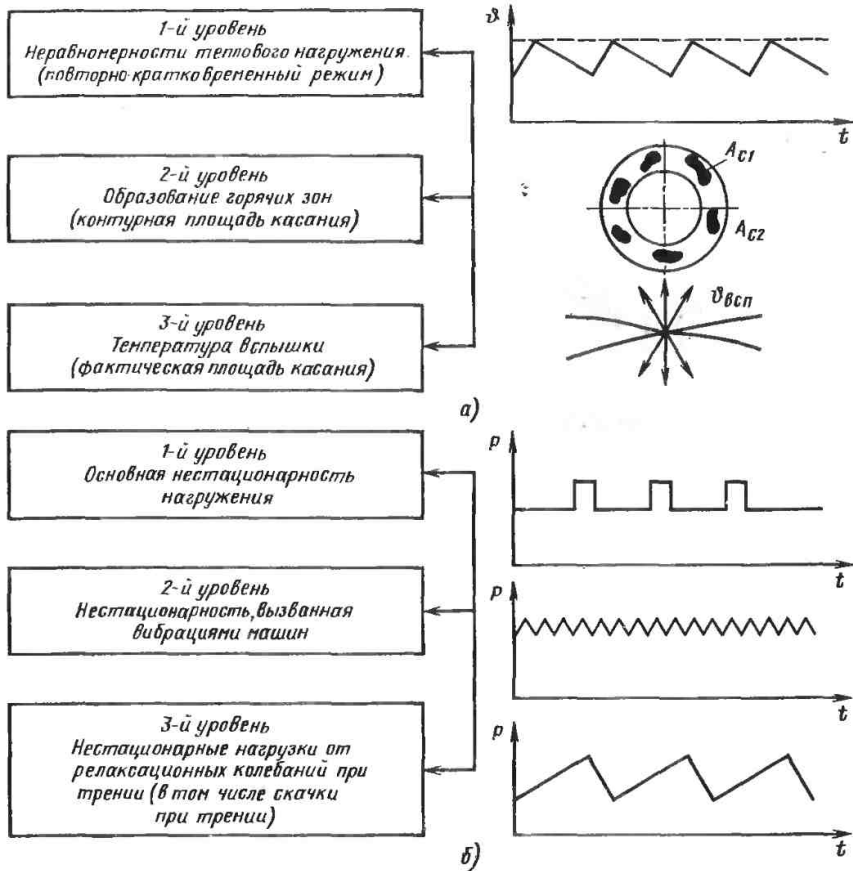


Рис. 7.7. Ранжирование нестационарностей при трении и изнашивании:  
а — тепловых; б — силовых

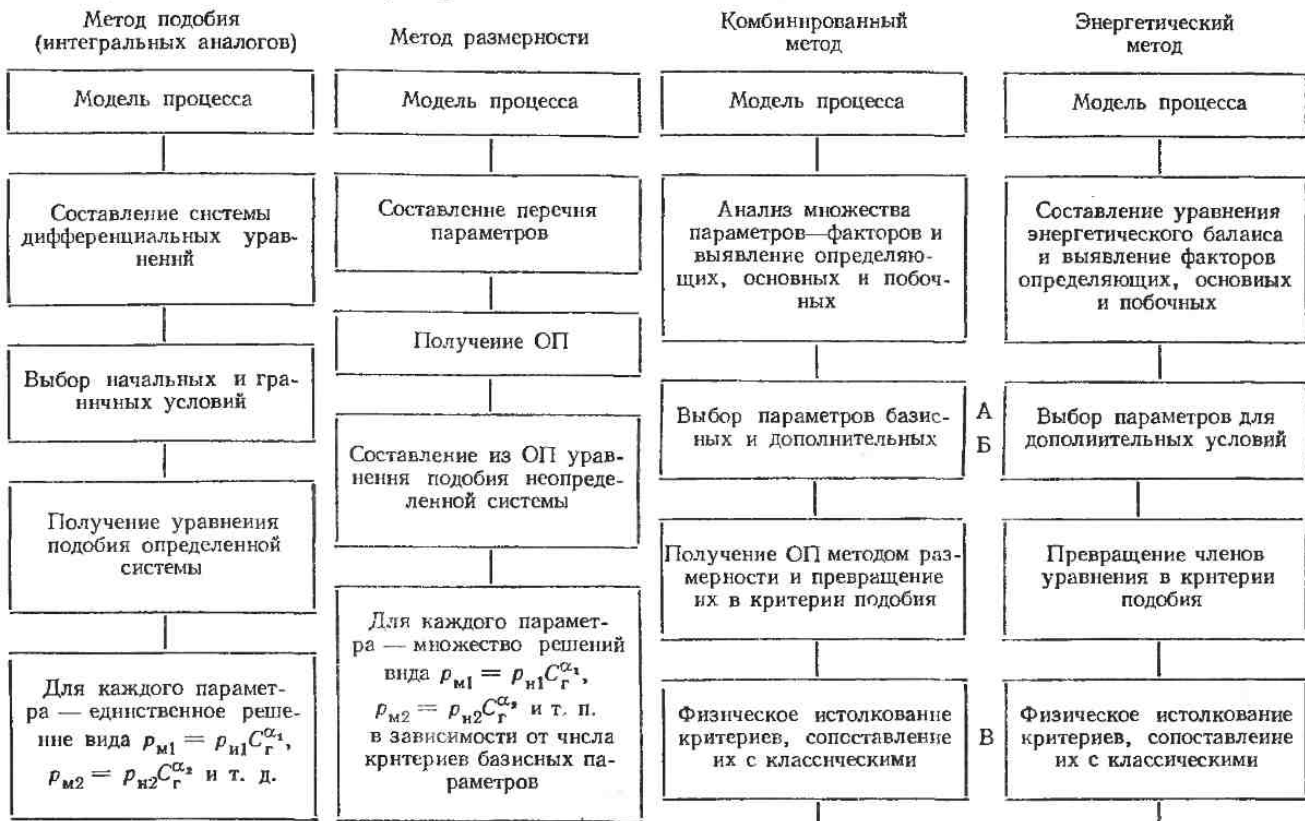
показаны различные силовые и тепловые нестационарности, которые приходится учитывать при моделировании трения и изнашивания.

Для получения на физической модели практически таких же выходных фрикционно-износных характеристик, что и у натурального объекта, необходимо и достаточно учесть масштабный фактор. Расчету его предшествует составление математического описания этой модели. Для расчета применяют обычно метод подобия или метод размерностей или их сочетание. Особен-

ности реализации каждого из этих методов показаны в табл. 7.7.

Полученное таким образом математическое описание (математическая модель) имеет свои границы работоспособности. При этом приходится учитывать необходимость воспроизведения на модели тех ведущих процессов, которые затем определяют износ. Например, окислительное изнашивание будет ведущим при высоких температурах, а усталостное — в остальной период работы фрикционного узла. Для выявления границ применения той

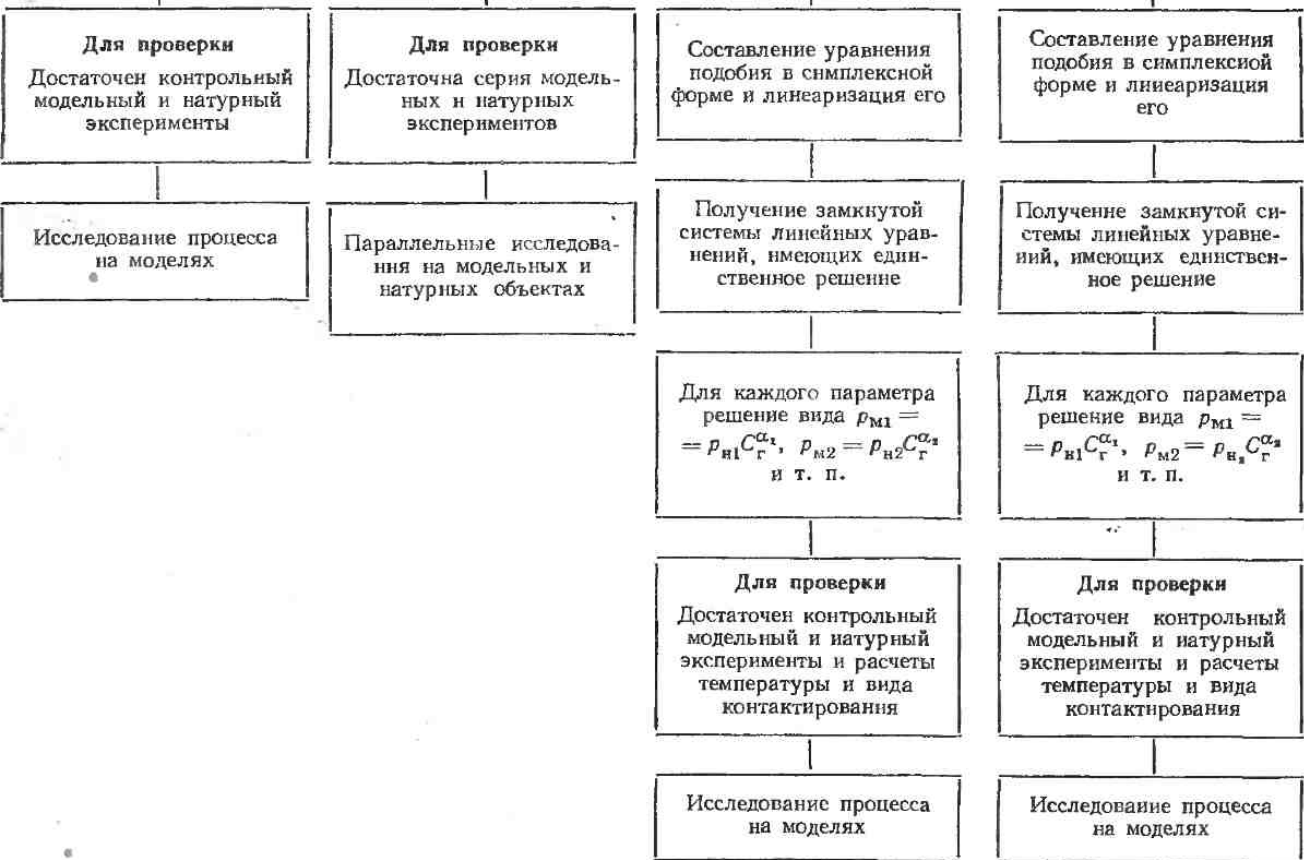
### 7.7. Методы расчета масштабного фактора



А  
Б

В





Для проверки  
Достаточен контрольный  
модельный и натуральный  
эксперименты

Для проверки  
Достаточна серия модель-  
ных и натуральных  
экспериментов

Составление уравнения  
подобия в симплексной  
форме и линейаризация его

Составление уравнения  
подобия в симплексной  
форме и линейаризация  
его

Исследование процесса  
на моделях

Параллельные исследова-  
ния на модельных и  
натуральных объектах

Получение замкнутой  
системы линейных урав-  
нений, имеющих един-  
ственное решение

Получение замкнутой си-  
стемы линейных уравне-  
ний, имеющих единствен-  
ное решение

Для каждого параметра  
решение вида  $p_{m1} =$   
 $= p_{n1} C_r^{\alpha_1}$ ,  $p_{m2} = p_{n2} C_r^{\alpha_2}$   
и т. п.

Для каждого параметра  
решение вида  $p_{m1} =$   
 $= p_{n1} C_r^{\alpha_1}$ ,  $p_{m2} = p_{n2} C_r^{\alpha_2}$   
и т. п.

Для проверки  
Достаточен контрольный  
модельный и натуральный  
эксперименты и расчеты  
температуры и вида  
контактирования

Для проверки  
Достаточен контрольный  
модельный и натуральный  
эксперименты и расчеты  
температуры и вида  
контактирования

Исследование процесса  
на моделях

Исследование процесса  
на моделях

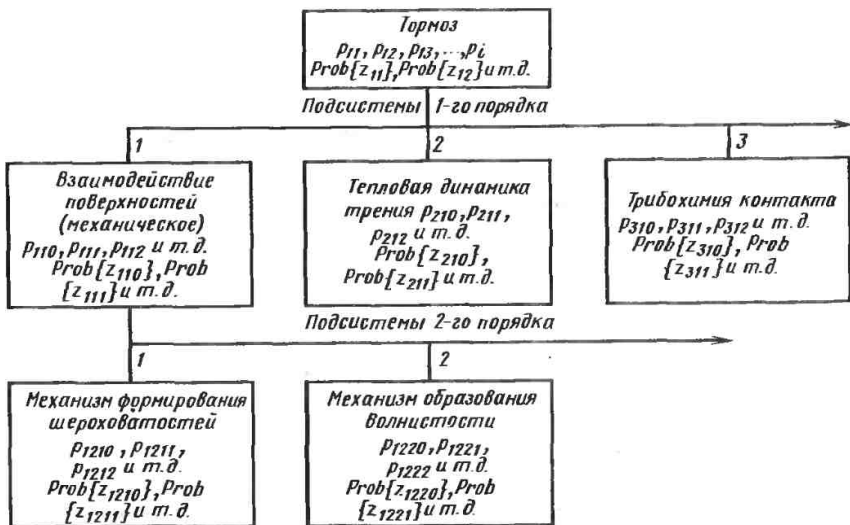


Рис. 7.8. Структурная иерархическая модель системы на примере тормоза

или иной модели предварительно выполняются испытания по определяющему параметру на одном из начальных этапов рационального цикла испытаний, т. е. такой последовательности модельных и натуральных экспериментов, которая позволяет в кратчайший срок выдать оптимальное сочетание материалов (см. табл. 7.21). Эти границы определяются критическими точками перехода одного вида изнашивания в другой.

На базе модели строится иерархическая схема, при помощи которой разрабатывается алгоритм расчета режима моделирования. Такая модель служит основанием для выявления возможной области влияния каждого параметра на фрикционно-износные характеристики и температурный режим трибосопряжения. Схема протекания процессов в сложной неоднородной модели — тормозе — представлена на рис. 7.8. На схеме параметры расположенных выше подсистем оказывают влияние на остальные подсистемы. Необходимо учитывать вероятность влияния параметров ( $Prob A$ ) на выходные характеристики ТС. При расчете

и оценке его результатов соблюдается обязательное требование, чтобы в пределах одной физической задачи масштабы при моделировании основных единиц системы (длины, времени и др.) оставались неизменными на всех этапах расчета и последующего моделирования. Для реализации алгоритма решения, отвечающего этому требованию, необходимо и достаточно использовать следующую систему ограничений.

Уравнение подобия составляется на основании графической и структурной моделей трибологического процесса. Исследователь представляет границы работоспособности каждой ОП. В этих границах ОП не должна быть автономной по отношению к выходным для системы фрикционно-износным характеристикам (коэффициенту трения и интенсивности изнашивания).

Членами уравнения подобия могут быть только критерии, полученные в одной системе единиц, при постоянных для данного уравнения базисных параметрах. В качестве базисных могут быть выбраны любые параметры ТС, за исключением тех, которые по

7.8. Рекомендуемые формулы для расчета масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре (МКП) при моделировании фрикционно-износных характеристик

Объект моделирования	МКП для параметров режима испытаний				Погрешность моделирования трения не более 5 %, износа не более 20 % по данным:
	$C_p$	$C_v$	$C_f$	$C_W$	
Колодочный тормоз с контактом по верхней или внутренней образующей	$C_{r1,2}^{1/6}$	$C_{r1,2}^{1/6}$	1	$C_{r1,2}^{1/3}$	Э. Д. Брауна и др.
Дисковый тормоз <sup>1</sup>	$C_{r1,2}^{1/4}$	$C_{r1,2}^{1/12}$	$C_{r1,2}^{1/12}$	$C_{r1,2}^{5/12}$	Б. А. Шляева и др.
Колодочный тормоз <sup>2</sup>	$C_{r1,2}^{1/6}$	1	$C_{r1,2}^{1/6}$	$C_{r1,2}^{1/3}$	В. Н. Федосеева и др.
Крановое колесо <sup>3</sup> , контактирующее с рельсом	$C_{r1,2}^{1/3}$	1	$C_{r1,2}^{1/6}$	$C_{r1,2}^{1/2}$	Ф. Л. Анискиевой и др.
Опора скольжения <sup>3</sup> рабочего органа часуборочной машины	$C_{r1,2}^{1/3}$	1	$C_{r1,2}^{1/6}$	$C_{r1,2}^{1/2}$	Л. М. Чикваидзе и др.

<sup>1</sup> Выполняется условие  $C_{grad} \vartheta = 1$ .

<sup>2</sup> При определении абсолютного износа учитывается его масштаб:

$$\Delta_m = \Delta_n C_{r1,2}^{1/6}$$

<sup>3</sup> Свойства материалов модели и натуре тождественны, кроме  $\lambda$ .

условию задачи должны иметь одинаковые значения для модели и натуре.

Уравнение подобия включает только критерии нормального вида. Запись вместо критериев отдельных параметров или их симплексов не рекомендуется, так как приводит к несовместимости системы уравнений.

Недопустимо исключать из уравнения подобия критерии для параметров с одинаковой размерностью. Следует иметь в виду, что влияние этих параметров на выходные характеристики будет различным, несмотря на одинаковую размерность, как например, у твердости и удельной нагрузки.

В дополнительные условия для получения замкнутой системы уравнений — критериев при описании трибо-

логических процессов включают только определяющие этот процесс параметры. Дополнительные условия определяют значения показателей степени в формулах для расчета масштабного фактора.

При выявлении границ работоспособности рекомендуется ОП, полученную методом размерности, сопоставить со стандартными ОП [7.1, 7.2, 7.4].

Обязательна проверка контрольных параметров расчетными методами теории трения и специальными экспериментальными методами, например материаловедческого анализа (в частности, расчет вида изнашивания на модели и натуре, расчет температуры и контактирующих поверхностях, определение глубины структурных пре-

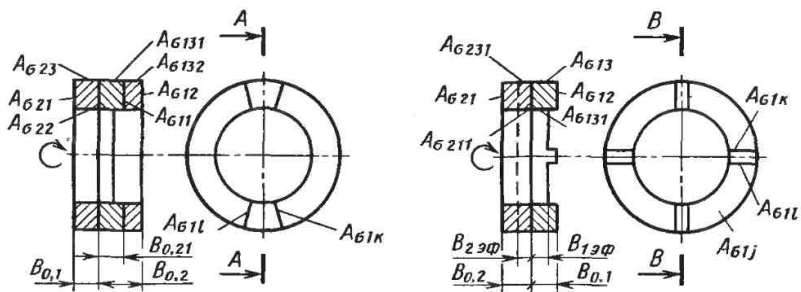


Рис. 7.9. Схема расчета макрогеометрических характеристик образцов

вращений с учетом масштабного фактора, воспроизведение на модели распределения участков поверхности с заданной микротвердостью и т. п.). В табл. 7.8 даны рекомендуемые формулы для расчета МКП в различных задачах моделирования нестационарного трения. При расчете масштабного фактора в качестве меры изменения масштаба для всех параметров принимается безразмерное отношение каких-либо одноименных параметров, значения которых известны по условию задачи и для модели и для натуры. Так, иногда используются отношения произведений масс для элементов трибосопряжения и смазочных материалов, т. е.  $\frac{m_{M1}m_{M2}m_{M3}}{m_{H1}m_{H2}m_{H3}}$ . Однако очевидно,

что при нестационарных процессах за короткие промежутки времени не вся масса элемента трибосопряжения успевает принять непосредственное участие в контактном взаимодействии. Имеются в виду деформация и распространение теплоты в объеме материала элемента пары трения, которое изменяет физико-механические свойства последнего. Кроме того, масса элементов не учитывает особенности конструктивного оформления элементов пары трения. Академик С. И. Губкин показал, что процессы пластического деформирования материала зависят от его конструктивного оформления, характеризующегося параметром  $S = A_C/V$ , т. е. отношением общей поверхности тела к его объему. Отношение в виде комплекса  $A_C/S$  дает возможность учесть пространственное (но-

минальная площадь трения  $A_a$  и объем  $V$ ) развитие конструктивного элемента. Таким образом, симплекс геометрических размеров принимается в качестве меры для масштабного фактора при моделировании нестационарного трения

$$C_{Г1,2} = \frac{A_{aM1}A_{aM2}S_{H1}S_{H2}}{A_{aH1}A_{aH2}S_{M1}S_{M2}}.$$

Для учета влияния нестационарного характера режима трения на контактное взаимодействие при заметном тепловыделении в расчетах  $C_{Г1,2}$  используется только эффективная часть элементов трибосопряжения, т. е. лишь та часть элементов, которая успела прогреться за время контактирования. Если контактируют два элемента пары трения при очень малом коэффициенте взаимного перекрытия (например, суппорт станка и направляющая), то приходится учитывать, что на поверхности трения одного элемента (суппорта) в течение всего опыта генерируется теплота, а у другого — только в момент прохождения по нему первого элемента пары трения. В результате эффективная толщина второго элемента  $B_{эф}$  будет существенно меньше, чем у первого. При расчете  $A_C$  следует учесть площади боковых поверхностей и основания нового объема, полученного при проникновении теплоты на глубину  $B_{эф}$ . На рис. 7.9 показан пример расчета  $A_C$  для типовых модельных образцов. При расчете значений  $S$  и  $K_{Г}$  возможны два варианта: 1 — фрикционный элемент

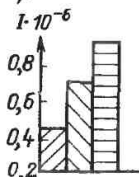
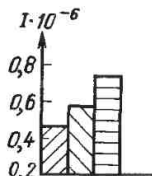
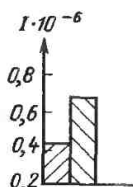
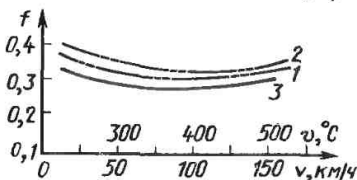
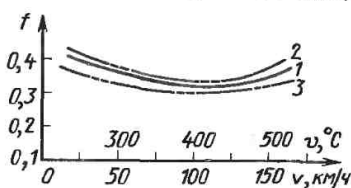
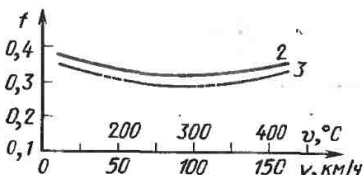
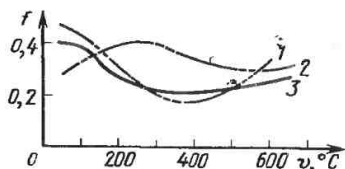


Рис. 7.10. Рациональный цикл последовательных испытаний для тормоза скоростного поезда «Русская тройка» для фрикционных материалов, работающих в паре с чугуном СЧ 21-40:

1 — 5-6-60; 2 — Б-42 (140-42-70); 3 — А-100 (140-100-70)

прогревается на полную глубину за время трения; II — фрикционный элемент прогревается не на всю глубину.

Сначала рассчитывается номинальная площадь трения  $A_a$ , затем свободная поверхность  $A_\sigma$  (вся поверхность за вычетом номинальной площади трения). Если фрикционный элемент имеет ребра для улучшения теплоотдачи, то в  $A_\sigma$  включается площадь этих ребер. Для схем контактирова-

ния I и II  $A_a$  и  $A_\sigma$  определяются следующим образом:

$$IB_{13\phi} > B_{01}; \quad B_{23\phi} > B_{02};$$

$$A_{\sigma 1} = \sum A_{\sigma 1n} =$$

$$= i (A_{\sigma 132} + A_{\sigma 1l} + A_{\sigma 1k} + A_{\sigma 11});$$

$$A_{\sigma 2} = \sum (A_{\sigma 2n} = A_{\sigma 21} + A_{\sigma 22} + A_{\sigma 23});$$

$$A_{a1} = \sum A_a; \quad A_{a2} = A_{\sigma 21};$$

7.9. Пример моделирования нестационарного трения при наличии смазки (по И. А. Буяновскому, С. Г. Яшвили и др.)

Характеристика	Модель	Натура
Фрикционное устройство Пара трения	Четырехшариковая машина ИМАШ Углеродистая сталь по стали «Индустриальное 20»	Диски электромагнитной муфты
Размеры фрикционных элементов	$A_{aM1} = 5,02 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ $A_{aM2} = 9,42 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ $A_{cM1} = 5,06 \text{ см}^2$ $A_{cM2} = 15,19 \text{ см}^2$ $V_{M1} = 1,07 \text{ см}^3$ $V_{M2} = 3,21 \text{ см}^3$ $S_M = 4,72 \text{ см}^{-1}$ $K_{rM1} = 1,63 \cdot 10^{-2}$ $K_{rM2} = 1,99 \cdot 10^{-4}$ $D_{max} = 1,27 \text{ см}$ $K_{r, M1,2} = 2,12 \cdot 10^{-6}$	$A_{aH1} = 54,3 \text{ см}^2$ ; $A_{aH2} = 76 \text{ см}^2$ ; $A_{cH1} = 29,3 \text{ см}^2$ ; $A_{cH2} = 12,1 \text{ см}^2$ ; $V_{H1} = 5,43 \text{ см}^3$ ; $V_{H2} = 7,6 \text{ см}^3$ ; $S_{H1} = 5,4 \text{ см}^{-1}$ ; $S_{H2} = 1,7 \text{ см}^{-1}$ ; $K_{r, H1} = 10$ ; $K_{r, H2} = 46,8$ $K_{r, H1,2} = 468$
Нагрузка	$P_M = P_H C_r^{1/6} = P_H 4,06 \cdot 10^{-2}$	2700 Н
Скорость	$C_v = 4,06 \cdot 10^{-2}$ $v = 0,25$ и $0,1 \text{ м/с}$	2,1; 4,1; 6,0 м/с
Коэффициент трения	0,11	0,11

$$II \quad B_{1\partial\phi} < B_{01}; \quad B_{2\partial\phi} < B_{02};$$

$$A_{a1} = A_{c12};$$

$$A_{a2} = A_{c21}; \quad A_{c1} = \sum A_{c1n} = A_{c13} + A_{c131} + A_{c12} + i(A_{c1K} + A_{c1l} + A_{c1j});$$

$$A_{c2} = \sum A_{c2n} = A_{c231} + A_{c211} + A_{c21}.$$

Иногда при моделировании применяют составные образцы, у которых пластмассовые вставки закреплены на массивном металлическом основании. В этом случае учитываются сумма номинальных площадей трения вставок и сумма их свободных поверхностей. Если в конструкции фрикционных элементов предусмотрены отверстия, пазы и т. п., то объем их будет соответственно меньше.

Если теплота от источника, расположенного на поверхности трения, проникает по нормали к этой поверхности

на глубину  $B_{\partial\phi} = 1,73 \sqrt{a t_T}$ , где  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $t_T$  — продолжительность трения (вариант II), то проводить все расчеты только для части образца, ограниченной глубиной проникновения теплоты  $B_{\partial\phi}$ .

В качестве примера моделирования нестационарного трения без смазочного материала приведены результаты 2-го и 3-го этапов рационального цикла испытаний (РЦИ) применительно к тормозам скоростного пассажирского поезда «Русская тройка». Дополнительные сведения даны на рис. 7.10.

### 7.3.2. Моделирование нестационарных процессов при граничном трении

При решении методами моделирования инженерных задач граничного трения применяют тот же подход, что и для задач трения без смазки.

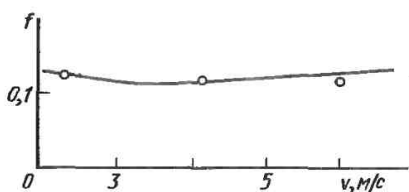


Рис. 7.11. Зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости  $v$  для натурного испытания муфты ЭТМ

При моделировании режима граничного трения с учетом масштабного фактора необходимо иметь в виду, что при сухом трении или наличии тонких пленок смазки второй член уравнения Гюмбеля может не рассматриваться  $f_{гр} = f_{ТВ} - k_f \eta v / N$ . Этот второй член характеризует гидродинамику на фрикционном контакте. Гидродинамическая подъемная сила масляных клиньев пропорциональна масштабу шероховатости при сохранении геометрического подобия шероховатости. Если моделируются поверхности с высокой чистотой (выше 7-го класса), то согласно исследованиям Ю. А. Евдокимова первоначальная шероховатость уже мало влияет на режим трения и износа.

Она является причиной и следствием режима. Наличие абразива в смазочном материале в 2—6 раз увеличивает потери на трение. При моделировании узлов трения, имеющих большие габаритные размеры или высокую чистоту поверхности, предпочтительней оставлять для модели и натуре шероховатости одинаковых размеров. В этом случае будут создаваться масляные пленки одинаковой толщины у модельного и натурального трибосопряжений.

В табл. 7.9 и на рис. 7.11 приведены результаты моделирования трения применительно к диску электромагнитной муфты, работающей в условиях граничного трения в среде масла «Индустриальное-20». Значения коэффициентов трения у модели и натуре практически совпадают.

#### 7.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СМАЗКЕ

Гидродинамическое трение определяется условиями, при которых жидкая смазка полностью разделяет поверхности трения вследствие наличия давления, возникающего в слое жидкости при относительном движении этих поверхностей (см. рис. 7.4). Толщина смазочного слоя определяет коэффициент трения, износ температуру, условия заедания поверхностей и контактную прочность деталей.

Гидродинамические и эластогидродинамические процессы трения и изнашивания могут протекать при условии

$$h_{см} \geq R_{z1, 2}, \quad (7.13)$$

где  $h_{см}$  — средняя толщина смазочного слоя;  $R_z$  — среднее арифметическое значение высот шероховатостей тел 1, 2.

Если  $h_{см} < R_{z1, 2}$ , то трение переходит в граничное.

Подробнее об эластогидродинамике см. в гл. 2 и 4. Основы подхода, применяемого при моделировании задач контактно-гидродинамического трения методами подобия и размерности, изложены в [7.5].

Примерный план моделирования процессов трения и изнашивания при гидродинамическом стационарном режиме ( $\lambda$ ;  $c$ ;  $g$ ;  $\vartheta = \text{const}$ ) и высокой жесткости узла трения представлен в табл. 7.10. Формулы и коэффициенты для пересчета параметров с оригинала на уменьшенную модель приведены в табл. 7.11.

В процессе обработки результатов лабораторных, стендовых или экспериментальных испытаний согласно второй и третьей теоремам подобия [7.1] можно найти функциональные зависимости, описывающие процессы гидродинамического трения в конкрет-

## 7.10. План моделирования процессов трения и изнашивания при гидродинамическом режиме

Условия однозначности изучаемого процесса	Условия физического подобия процессов трения и изнашивания	Определяемые критерии и симплексы	Принимаемые ограничения при испытаниях	Условия проверки	Ожидаемая погрешность моделирования, %
<p>1. Геометрические:</p> $C_l = \frac{L_o}{L_M} = \frac{x_o}{x_M} = \frac{y_o}{y_M} = \frac{z_o}{z_M} = K_l$ <p>Для подшипников скольжения:</p> $(F_{\Pi}/F_{\text{в}})_o = (F_{\Pi}/F_{\text{в}})_M;$ $(B_{\Pi}/d_{\Pi})_o = (B_{\Pi}/d_{\Pi})_M;$ $\psi_{\Pi, o} = \psi_{\Pi, M}$ <p>2. Физические: <math>E_{1,2}; \mu_{1,2}; \text{НВ}_{1,2}; \rho_{1,2\text{см}}; \lambda_{1,2\text{см}}; C_{1,2\text{см}}; \eta_{\text{см}}</math></p> <p>3. Гравитационные: <math>P_H; v; \vartheta_{\text{от}}; \vartheta_H; v_{\text{см}}</math></p> <p>4. Временные: <math>T</math></p>	<p>1. Подобие полей давлений в смазочном слое (критерий Эйлера):</p> $Eu = \Delta p_{\text{д}} / (\rho_{\text{см}} v_{\text{см}}^2)$ <p>2. Подобие гидродинамических режимов в смазочном слое (критерий Рейнольдса):</p> $Re = v_{\text{см}} L / \nu_{\text{см}}$ <p>3. Подобие полей напряжений (критерий Гука):</p> $Ho = \sigma_{\text{сж}}(p) / E_{\text{сж}}(p)$ <p>для сдвига</p> $H_w = \tau / G$ <p>4. Подобие между генерацией теплоты на по-</p>	<p>1. Для коэффициента трения:</p> $f = \frac{F}{P} = \frac{\eta_{\text{см}} F_{\text{см}} v}{h P} = \text{idem}$ <p>2. Для удельной объемной интенсивности изнашивания</p> $i_v = \text{idem}$ <p>3. Для удельной линейной интенсивности изнашивания</p> $i_h = I_h / S_{\text{тр}} = \text{idem}$ <p>4. Для удельной интенсивности</p>	$K_l = \frac{1}{2}, \dots, 1,0, \dots, 10$ $C_{E_{1,2}}; C_{\mu_{1,2}}; C_{\text{НВ}_{1,2}}; C_{\rho_{1,2\text{см}}}; C_{\lambda_{1,2\text{см}}}; C_{C_{1,2\text{см}}}; C_{\eta_{\text{см}}} = 1 = \text{const}$ <p>1) <math>C_P = C_v = 1/C_i;</math> <math>C_{\vartheta} = 1;</math></p> <p>2) <math>C_P = 1/C_i;</math> <math>C_v = 1;</math> <math>C_T = \text{const};</math></p> <p>1) <math>C_T = 1;</math> 2) <math>C_T = C_l</math></p>	$f_o = f_M$ $i_{v_o} = i_{v_M}$ $\vartheta_o = \vartheta_M$ $Rz_o = Rz_M$ $\text{grad } \vartheta_o = \text{grad } \vartheta_M$	<p>0—10</p> <p>0—20</p> <p>0—15</p> <p>0—15</p> <p>3—20</p>



верхности трения, физическими, геометрическими параметрами и градиентом температуры (критерий Мейера):

$$Me = \frac{\lambda \Delta \delta L}{\beta P v f}$$

5. Подобие температурных полей и условия теплоотдачи на поверхностях (критерий Био):

$$Bi = \alpha L / \lambda$$

6. Подобие шероховатостей поверхностей (симплексы Крагельского):

$$\left[ \frac{(Rz)_{1,2}}{r_{1,2}} \right]_o = \left[ \frac{(Rz)_{1,2}}{r_{1,2}} \right]_m;$$

$$\left( \frac{Rz_1}{Rz_2} \right)_o = \left( \frac{Rz_1}{Rz_2} \right)_m$$

7. Подобие удельного объемного расхода смазочного материала

$$\bar{\omega}_{c.o} = \bar{\omega}_{c.m}$$

изнашивания: по  
массе

$$i_g S_{\text{тр}} A_H = \text{idem}$$

7.11. Формулы и коэффициенты для пересчета параметров с оригинала на уменьшенную модель

Расчетный параметр	I вариант, $C_T = 1$		II вариант, $C_T = C_l$	
	Расчетная формула	Коэффициент пересчета	Расчетная формула	Коэффициент пересчета
Масштабный коэффициент	$C_l = L_o / L_M$	$L_M = L_o / C_l$	$C_l = L_o / L_M$	$L_M = L_o / C_l$
Удельная нагрузка	$C_p = 1 / C_l$	$p_M = p_o C_l$	$C_p = 1 / C_l$	$p_M = p_o C_l$
Напряжение:				
нормальное	$C_\sigma = 1 / C_l$	$\sigma_M = \sigma_o C_l$	$C_\sigma = 1 / C_l$	$\sigma_M = \sigma_o C_l$
касательное	$C_\tau = 1 / C_l$	$\tau_M = \tau_o C_l$	$C_\tau = 1 / C_l$	$\tau_M = \tau_o C_l$
Полная нагрузка	$C_P = C_l^2$	$P_M = P_o / C_l^2$	$C_P = C_l^2$	$P_M = P_o / C_l^2$
Скорость скольжения	$C_v = 1 / C_l$	$v_M = v_o C_l$	$C_v = 1$	$v_M = v_o$
Время трения (время опыта)	$C_T = 1$	$T_M = T_o$	$C_T = C_l$	$T_M = T_o / C_l$
Путь трения	$C_{Стр} = 1 / C_l$	$S_{Стр. M} = S_{Стр. o} C_l$	$C_{Стр} = C_l$	$S_{Стр. M} = S_{Стр. o} / C_l$
Коэффициент теплоотдачи с поверхностями	$C_\alpha = 1 / C_l$	$\alpha_M = \alpha_o C_l$	$C_\alpha = 1 / C_l$	$\alpha_M = \alpha_o C_l$
Шероховатость поверхностей трения	$C_h = C_l$	$R_{z_M} = R_{z_o} / C_l$	$C_h = C_l$	$R_{z_M} = R_{z_o} / C_l$
Геометрическая характеристика шероховатости	$C_{h/r} = 1$	$[(Rz/r)_{1,2}]_M = [(Rz/r)_{1,2}]_o$	$C_{h/r} = 1$	$[(Rz/r)_{1,2}]_M = [(Rz/r)_{1,2}]_o$
Удельный объемный расход смазочного материала	$C_{\omega_{см}} = 1$	$\bar{\omega}_{см. M} = \bar{\omega}_{см. o}$	$C_{\omega_{см}} = 1$	$\bar{\omega}_{см. M} = \bar{\omega}_{см. o}$
Температура трения	$C_\vartheta = 1$	$\vartheta_M = \vartheta_o$	$C_\vartheta = 1$	$\vartheta_M = \vartheta_o$
Термическое сопротивление	$C_R = C_l$	$R_M = R_o / C_l$	$C_R = C_l^2$	$R_M = R_o / C_l^2$
Удельная массовая интенсивность изнашивания	$C_{ig} = 1$	$i_{go} = i_{gM}$	$C_{ig} = 1$	$i_{gM} = i_{go}$
Полный износ (по массе)	$C_{Иг} = 1$	$I_{gM} = I_{go}$	$C_{Иг} = C_l$	$I_{gM} = I_{go} / C_l$
Коэффициент трения	$C_f = 1$	$f_M = f_o$	$C_f = 1$	$f_M = f_o$
Модуль упругости материала	$C_E = 1 / C_l$	$E_M = E_o C_l$	$C_E = C_l$	$E_M = E_o / C_l$
Коэффициент разделения тепловых потоков	$C_\beta = 1$	$\beta_M = \beta_o$	$C_\beta = 1$	$\beta_M = \beta_o$

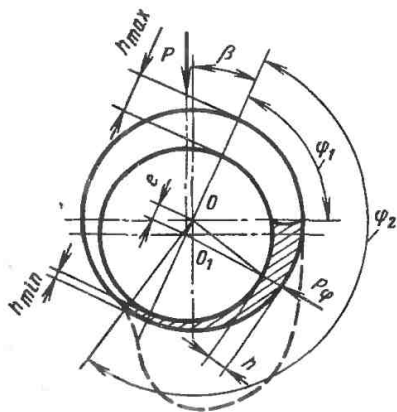


Рис. 7.12. Расположение смазочного слоя между поверхностями шипа и подшипника и распределение в нем давления при гидродинамическом трении

ной форме. Например, для подшипников скольжения:

$$f = \Phi_1 \left[ \frac{\rho_{\text{см}} v_{\text{см}} D_{\text{п}}}{\eta_{\text{см}}}; \frac{\alpha_{\text{п}} D_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}}; \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\lambda_{\text{п}}}; \frac{\tau}{G}; \Phi_1; \Phi_2; \frac{v l}{S_{\text{тр}}}; \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{в}}}; \frac{B_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}; \kappa; \Psi_{\text{п}}; \frac{\vartheta_{\text{т}} - \vartheta_{\text{н}}}{\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_{\text{н}}}; \frac{H B_{\text{п}}}{H B_{\text{в}}}; \frac{R z_{\text{п}}}{R z_{\text{в}}}; \frac{(R z / r)_{\text{п}}}{(R z / r)_{\text{в}}}; \frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{в}}}; \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{в}}}; \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}; \omega_{\text{см}} \dots \right]; \quad (7.14)$$

$$i_h = \frac{I_h}{S_{\text{тр}}} = \Phi_2 \left[ \frac{\rho_{\text{см}} v_{\text{см}} D_{\text{п}}}{\eta_{\text{см}}}; f;$$

$$\frac{\alpha_{\text{п}} D_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}}; \frac{\sigma_{\text{сж}}}{E_{\text{сж}}}; \frac{\tau}{G}; \Phi_1; \Phi_2;$$

$$\frac{v l}{S_{\text{тр}}}; \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{в}}}; \kappa; \Psi_{\text{п}}; \frac{\vartheta_{\text{т}} - \vartheta_{\text{н}}}{\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_{\text{н}}};$$

$$\frac{H B_{\text{п}}}{H B_{\text{в}}}; \frac{R z_{\text{п}}}{R z_{\text{в}}}; \frac{(R z / r)_{\text{п}}}{(R z / r)_{\text{в}}}; \frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{в}}}; \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{в}}};$$

$$\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}; \omega_{\text{см}} \dots \right]. \quad (7.15)$$

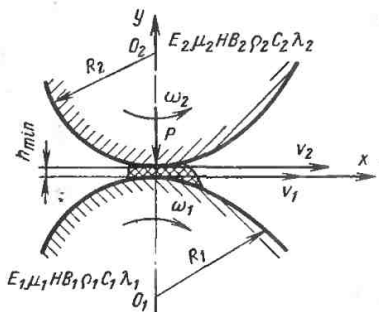


Рис. 7.13. Схема распределения скоростей при контактно-гидродинамическом трении

Если решается задача по определению трения и износа сопряженной пары в период ее пуска и остановки, то вместо  $v l / S_{\text{тр}}$  вводится симплекс

$\frac{v \Sigma I_{\text{п}}(o)}{\Sigma S_{\text{тр. п}}(o)}$ , где  $\Sigma T_{\text{п}}(o)$  — суммарное время пуска и остановок,  $\Sigma S_{\text{тр. п}}(o)$  — суммарный путь пуска и остановок. (Рассматривается режим полужидкостного трения.) Обозначения, дополнительные к табл. 7.1:  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\eta_{\text{см}}$  — вязкость смазочного материала;  $v_{\text{см}}$  — скорость движения смазочного материала;  $F_{\text{см}}$  — площадь покрытия слоем смазочного материала;  $\Phi_1; \Phi_2$  — углы начала и места обрыва смазочного слоя;  $\beta$  — угол трения (рис. 7.12 и 7.13).

Эластогидродинамическое трение наблюдается в опорах качения и скольжения при высоких удельных нагрузках, в элементах механических передач, при обработке металлов давлением, в биомеханике. Различными авторами такое моделирование выполняется с использованием систем уравнений методом интегральных аналогов с учетом условий однозначности (см. гл. 4). Широко используются также методы математической обработки результатов экспериментов в критериальной форме.

## 7.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Моделирование абразивного изнашивания применяется для решения следующих триботехнических задач: при

7.12. Виды контакта деталей машин при работе в абразивной среде

Деталь	Материал	Условия работы	Вид контакта	Значения $t_h$
Шарнир гусеничной цепи	Среднеуглеродистая сталь 45	На супеси	Переходный от пластического к упругому	$10^{-6}$
Цепь стандартная хромированная	Электролитический хром	Запыленность абразивом	То же	$(0,7 \div 1,4) 10^{-5}$
Ножи землеройной машины	Наплавка	Разработка грунта	»	$9 \cdot 10^{-5}$
	Сталь углеродистая У-8, отожженная	Песчано-глинистая смесь	Пластическое отеснение	$4 \cdot 10^{-4}$
Опорные катки трактора	Сталь Гадфильда	Песчаные почвы	Упругое отеснение	$9 \cdot 10^{-7}$
Ножи дорожной фрезы	Наплавка	Супесь, щебень	Пластический	$(1 \div 9) 10^{-4}$
Нож бульдозера	То же	То же	То же	$(1 \div 9) 10^{-4}$
Подшипник балансирной каретки трактора ДТ-75	Чугуны АМЧС-3, АМЧС-5, сталь 45	Песок с содержанием кварца до 40 %	Переход от пластического отеснения к упругому	$1,2 \cdot 10^{-5}$ $3,2 \cdot 10^{-5}$
			Пластическое отеснение	$10^{-4}$
Рабочие колеса шламовых насосов	СЧ 28-48	Шлам	Усталостный	$10^{-5} - 10^{-7}$
Направляющие аппараты шламовых насосов	Сталь 40X28H2	То же	То же	$10^{-6} - 10^{-7}$

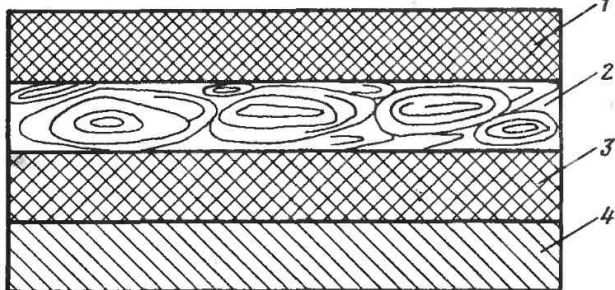


Рис. 7.14. Упругоабразивная поверхность:

1 — абразивный слой; 2 — первый упругий слой (например, фанера); 3 — второй упругий слой (например, губчатая резина); 4 — жесткое основание (например, сталь)

оценке износостойкости трибосопряжения в конкретных условиях эксплуатации, при изучении физических основ прогнозирования долговечности трибосопряжения, при построении рядов износостойкости различных материалов, которые предполагается эксплуатировать на типовом режиме, для исследования механизма абразивного изнашивания применительно к различным классам машиностроительных материалов [7.2, 7.6, 7.7].

Обычно имеет место сочетание усталостного изнашивания (большой частью малоцикловой усталости) и абразивного изнашивания (АИ). В

табл. 7.12 приведены результаты анализа вида изнашивания по основному уравнению износа молекулярно-механической теории трения (см. гл. 5).

Разрабатываемые для последующего расчета модели должны учитывать вид контактирования (по И. В. Крагельскому), податливость абразивной массы, крупность абразивных частиц (АЧ), закон их распределения, влажность абразивной массы, угол, под которым АЧ встречаются с преградой, механические и теплофизические свойства материалов.

Модель должна отражать протекающие в материалах трибосопряжения

### 7.13. Виды упругоабразивных поверхностей (УАП), применявшихся при построении рядов износостойкости

Упругий элемент	Давление, МПа	Абразивный элемент	Материал основания	Исследователи, разработавшие УАП
Губчатая резина	0,1—0,5	Электрокорунд	Сталь	Г. С. Гура, А. В. Чичинадзе, А. П. Шахпендерян, Т. И. Заболева, Э. Д. Браун
»	0,1—0,5	То же	Дерево	Э. Д. Браун
Поролон	0,01—0,2	»	Сталь	Э. Д. Браун
Губчатая резина	0,1—0,5	Речной песок на полотне	То же	В. Д. Лимончиков, А. М. Ряховский
Фанера на слое губчатой резины	0,5—3,0	Речной песок, наклеенный на фанеру	»	Э. Д. Браун, Б. Н. Котельников

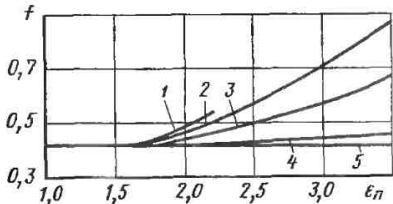


Рис. 7.15. Зависимость коэффициента трения от деформативной характеристики модели грунта  $\epsilon_{II}$ :

(для стали  $\epsilon_{II} = 1$ ; для дерева  $\epsilon_{II} = 1,5$ ; для плотной резины  $\epsilon_{II} = 2$ ; для поролона  $\epsilon_{II} = 3,5$ ) при давлении  $p_a$ , равном: 1 — 0,22 МПа; 2 — 0,17 МПа; 3 — 0,1 МПа; 4 — 0,05 МПа; 5 — 0,025 МПа

процессов микрорезания и усталостных. В предельных случаях один из них вырождается. На практике обе группы процессов могут протекать одновременно или чередоваться. Обе эти задачи можно рассматривать как частные случаи более общей задачи — моделирования нестационарного трения — и использовать рассмотренный выше алгоритм расчета масштабного фактора.

Физическая модель процесса изнашивания при воздействии абразива на испытуемый материал реализуется при помощи так называемой упругоабразивной поверхности, представляющей собой многослойную конструкцию (рис. 7.14) из упругих материалов, которые обеспечивают такое же перемещение модельной АЧ (с учетом масштабного фактора), какое имеет место в натуральных условиях (табл. 7.13).

Частицы в задачах моделирования скольжения твердого тела по грунту приклеиваются к деформируемому основанию (полотну, фанере и т. д.). При моделировании изнашивания материала под воздействием потока ча-

## 7.14. Составление деформативных характеристик упругих элементов УАП

Материал деформируемого элемента	Относительная деформативная характеристика
Сталь	1,00
Дерево	1,47
Резина:	
вакуумная	1,64
губчатая	2,12
Поролон	3,45

стиц АЧ не закрепляются, а под расчетным углом ударяются о поверхность. В качестве абразивного элемента используются абразивы, которые в натуральных условиях контактируют с исследуемым трибосопряжением, или эквивалентные материалы. В качестве последних применяют зерна электрокорунда заданной по расчету фракции.

Границы работоспособности модели определяются расчетноэкспериментальным путем, по равенству у модели и природы значений критерия Крагельского  $i_h$  (износа на пятне контакта) в уравнении абразивного изнашивания  $I_h = i_h p_a / HВ$ . Соответственно из эксперимента используют значения интенсивности изнашивания  $I_h$ , удельную нагрузку на фрикционном контакте  $p_a$ , твердость материала известна по условию задачи.

На результаты моделирования абразивного изнашивания определяющее влияние оказывает податливость деформируемого элемента упругоабразивной поверхности. В табл. 7.14 приведена относительная деформативная характеристика для различных классов материалов деформируемого

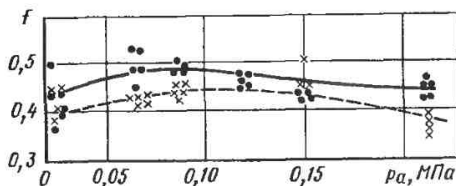


Рис. 7.16. Зависимость трения металлической (сплав ВТ-14) опоры от давления  $p_a$  по моделям грунта с абразивными частицами, диаметр которых различался в 4 раза:

● — крупные частицы; X — мелкие частицы; упругий элемент — дерево

Типы грунтов					
Щебенистые, граде и гравелистые	Песчаные и супесчаные	Суглинистые и глинистые	Лессовые	Торфяные и заболоченные	Засоленные

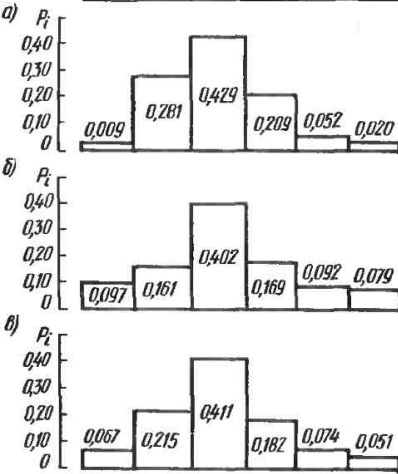


Рис. 7.17. Гистограмма вероятности появления грунтов различного типа по европейской части (а) по азиатской части (б) и по территории СССР в целом (в) (по В. И. Баловневу)

7.15. Гранулометрический состав основных типов грунтов (по В. И. Баловневу)

Размер частиц, мм	Возможное содержание частиц во фракциях грунта, %			
	песчаного	супесчаного	суглинистого, и песчаного пылеватого	тяжелого, су- и глинистого глинистого
1	4	3	2-0	—
1-0,25	48	38	20-4	2-0,5
0,25-0,05	39	36	30-14	18-10
0,05-0,01	6	10	18-45	35-30
0,01-0,005	2	8	10-9	8-12
0,005-0,001	3	4	8-10	12-15
0,001 и менее	9	20	46-54	70-93

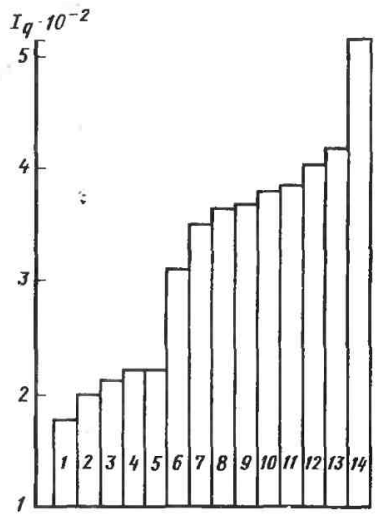


Рис. 7.18. Ряды износостойкости сталей для режущего контура ковша строительного экскаватора для грунтов категории не выше третьей (по интенсивности весового износа):  
 1 — 90X14Ф1,5; 2 — 23ХЗДЛ; 3 — 110Г13Л; 4 — 40Х; 5 — Э; 6 — 110Г13Л; 7 — Э04121А; 8 — 35Х3С; 9, 10 — 50Х6Г; 11 — 40Х; 12 — 35Х3С; 13 — 38ХМА; 14 — 30ХГСФЛ (термообработанная)

элемента. Эта характеристика оказывает на трение большее влияние, чем например, крупность частиц грунта (ср. рис. 7.15 и 7.16). На износостойкость материалов существенное влияние оказывает природа АЧ.

При формировании упругоабразивной поверхности следует учитывать состав основных типов грунтов (табл. 7.15) и вероятность их появления на территории нашей страны (рис. 7.17).

Формулы, рекомендуемые для расчета масштабного фактора при моделировании абразивного изнашивания, приведены в табл. 7.16.

Если в качестве абразива применяют пыль, то обязательно учитывают ее дисперсионный состав, а также угол атаки, скорость удара, твердость и форму частиц.

Информация о результатах испытаний на абразивную износостойкость представляется обычно в виде рядов износостойкости. На рис. 7.18 пока-

7.16. Рекомендуемые формулы для расчета МКП при моделировании абразивного изнашивания

Объект моделирования	МКП для параметров режима испытаний				Погрешность моделирования не более 20 % по данным исследователя
	$C_p$	$C_v$	$C_t$	$C_w$	
Удар абразива о полимер (ПЭНД)	$C_r^{1/4}$	$C_r^{1/12}$	$C_r^{1/12}$	$C_r^{5/12}$	Е. Е. Стыллера
Рабочие органы дорожно-строительных машин	$C_r^{1/3}$	1	$C_r^{1/6}$	—	Т. И. Заболевой
	$C_r^{1/3}$	$C_r^{1/6}$	1	—	Т. И. Заболевой
Скоростные опоры скольжения, режущий контур ковша экскаватора	$C_r^{1/3}$	$C_r^{1/12}$	$C_r^{1/12}$	$C_r^{1/2}$	В. Д. Лимончикова, Б. Н. Котельникова
Виброуплотняющие плиты	$C_r^{1/3}$	$C_r^{1/12}$	$C_r^{1/12}$	—	А. И. Чернявского, Э. Д. Брауна

Примечания. 1. При  $C_p = C_{r1,2}^{1/3}$  удельные нагрузки равны, т. е.  $C_{pa} = 1$ .

2. При расчете МКП для АИ в качестве известного параметра принимают массу изнашиваемой конструкции, или макрогеометрические характеристики — отношение комплексов геометрических размеров модели и натуре (см. п. 7.3). Если моделируются фрикционно-износные характеристики детали, контактирующей с грунтом и перемещающейся по свежему следу, т. е. «по бесконечной полосе грунта», то с моделью сопоставляют такую полосу, с которой натуральный образец контактировал в течение определенного интервала времени (например, 1 ч). Толщина полосы устанавливается по глубине проникновения теплоты за время контакта.

заны ряды износостойкости материалов режущего контура ковша экскаватора.

## 7.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ, СОПУТСТВУЮЩИХ ТРЕНИЮ И ИЗНОСУ

Целью настоящего раздела является получение ОП, в которые входят параметры, характеризующие явления или процессы, сопутствующие трению и износу. В качестве примера будут рассмотрены получения ОП, в которые включены энергетический показатель (температура), экономический показатель, конструктивная характеристика (зазор).

Расчетные модели в соответствии с теорией моделирования физических процессов могут быть двух видов. В-первых, это ОП, область работоспособности которой выявляется экспериментально, во-вторых, это запись равенства ОП модели и натуре на основе анализа подобия по следующим расчетам масштабного фактора при сохранении этого условия, т. е.  $\pi_m = \pi_n$ .

Физическая модель реализуется в виде малогабаритных образцов, при трении которых, благодаря учету масштабного фактора, сохраняются такие же условия, которые имеют место в натурном трибосопрежении. Тенденции, связанные с экономикой, выявляются при рассмотрении группы



## 7.17. Способы решения задач при моделировании явлений, сопутствующих трению и изнашиванию

Явление	Тип модели	Способ решения	Исследователи
Тепловыделение при фрикционной наплавке	Дифференцированная (стадии нагрева, плавления стружки, диффузии, остывания), развивающаяся, детерминированная	Математическое описание при четырех основных единицах [MLT $\theta$ ]. Решение при дополнительном условии $\theta_m = \theta_n$	В. Я. Кершенбаум и др.
Массоперенос под воздействием электрического тока внешнего источника	Развивающаяся, детерминированная	Математическое описание при четырех основных единицах [MLTI]. Далее расчет масштабного фактора	Ю. Н. Щерба и др.
Изменение экономических затрат для получения повышенной износостойкости	Детерминированная	Получение ОП при четырех основных единицах [MLTD]	Т. И. Заболева и др.
Изменение микротвердости в зоне контакта	Стохастическая	Расчет масштабного фактора и получение ОП со стохастическими параметрами	..
Изменение вязкости или плотности материала во времени	Детерминированная	Расчет масштабного фактора с определением требуемого масштаба вязкости или плотности	

Примечание. При использовании стохастических моделей обязательно учитывается влияние каждого вероятностного параметра на фрикционно-износные характеристики, даже если эти параметры имеют одинаковую размерность (например, твердость и давление).

7.18. Пример моделирования тепловыделения при фрикционной наплавке

Исследуемый процесс	ОП, характеризующие процесс	Определяющие параметры и значения масштабного фактора
Тепловыделение при фрикционном нагреве	$C_{m1,2} C_N / C_{r1,2}^{5/6};$ $C_{h1,2} / C_{r1,2}^{1/3}; C_{r1,2} C_{r1,2}^{1/3};$ $C_{\sigma} C_{r1,2}^{1/12} / C_N^{1/2};$ $C_{\rho1,2} C_N^{3/2} C_{r1,2}^{1/4};$ $C_t C_{r1,2}^{1/4} / C_N^{1/2}; \frac{C_P}{C_N^{1/2} C_{r1,2}^{1/12}};$ $C_{\theta1,2} C_{r1,2}^{1/3} / C_N^2;$ $C_{a1,2} / C_N C_{r1,2}^{1/6};$ $C_{\tau1,2} C_{r1,2}^{1/4} / C_N^{1/2};$ $C_{HB1,2} C_{r1,2}^{1/4} / C_N^{1/2}$	$N, \nu, \rho, h_{1,2}, r_{1,2},$ $a_{1,2}, HB_{1,2}, \tau_{1,2}, \rho_{1,2}, \sigma$ $C_P = C_{r1,2}^{1/3}; C_{\sigma} = 1;$ $C_t = 1$
Тепловыделение, приводящее к плавлению стружки	<p>Дополнительно:</p> $\frac{C_{\nu}}{C_N C_{r1,2}^{1/6}}; C_{\nu} C_{r1,2}^{1/6} / C_N;$ $C_{\sigma}^* C_N^6 / C_{r1,2}^{2/3}$	<p>Дополнительно: <math>\nu</math> металла, <math>\sigma_{охл}</math>, теплота фазовых превращений <math>g\phi</math>,</p> $C_P = C_{r1,2}^{1/3}; C_{\sigma} = 1;$ $C_t = 1$
Теплопоглощение при диффузионных процессах в ходе контактного взаимодействия	$C_{m1,2} C_N / C_{r1,2}^{5/6};$ $C_t C_{r1,2}^{1/4} C_N^{1/2}; \frac{C_{\sigma} C_{r1,2}^{1/12}}{C_N^{1/2}};$ $C_{\rho1,2,3} C_N^{3/2} C_{r1,2}^{1/4};$ $\frac{C_P}{C_N^{1/2} C_{r1,2}^{1/12}}; \frac{C_{\theta1,2} C_{r1,2}^{1/3}}{C_N^2};$ $C_{\sigma} C_{r1,2}^{1/3}; \frac{C_{\sigma}^* C_N^6}{C_{r1,2}^{2/3}}; \frac{C_{g\phi}}{C_N C_{r1,2}^{1/6}}$	<p>Исключаются <math>HB_{1,2}, \tau_{1,2}, h_{1,2}, r_{1,2}; C_P = = C_{r1,2}^{1/3}; C_{\sigma} = 1;</math></p> $C_t = 1$
Теплоотдача при остывании под нагрузкой	<p>Дополнительно:</p> $\frac{C_{a1,2} C_N^2}{C_{r1,2}^{1/3}};$ $\frac{C_{grad \theta1,2} C_{r1,2}^{2/3}}{C_N^2}$	<p>Дополнительно:</p> $C_P = C_{r1,2}^{1/3}, C_t = 1;$ $C_{\sigma} = 1$

физических моделей, на которых определяется работоспособность натуральных трибосопряжений.

Границы работоспособности моделей в этом случае устанавливаются обычно при рассмотрении критических точек. Моделирование поведения трибосопряжения в области критических точек является самостоятельной задачей, которая будет рассмотрена в т. 3.

В табл. 7.17, приведены алгоритмы расчета ОП и масштабного фактора явлений, сопутствующих трению и изнашиванию.

С использованием метода ОП получают критерии для технико-экономических исследований. При этом экономическая модель должна характеризоваться размерными величинами, объединяющими технические и экономические показатели. Тогда удобно применить метод размерности, но с обязательной проверкой области работоспособности ОП.

Физическое моделирование тепловыделения при фрикционной наплавке выполнялось на втулках наружным диаметром 32 мм. В качестве натурной детали, на которую проводилась наплавка, были выбраны валы диаметрами 40, 50 и 56 мм. Нагрузки на натурные втулки составляли 27,0, 22,8 и 17,0 кН, на модельные — только 12,9 кН. Угловые скорости и продолжительность процесса наплавки составляли соответственно  $303,5 \text{ с}^{-1}$  и 50 с (для модели и натур). Температура в зоне трения также была практически одинаковой:  $(1100 \pm 10)^\circ\text{C}$ .

Пример моделирования тепловыделения при фрикционной наплавке приведен в табл. 7.18.

## 7.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТИПИЧНЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ, КАЧЕНИЯ, РЕВЕРСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ

При моделировании процессов трения и изнашивания в подшипниках скольжения используются приборы и стенды, которые подробно описаны в [7.8, 7.9].

В качестве примера рассмотрим испытание геометрически подобных под-

шипников скольжения: из бронзы ОЦС 5—5—5, чугуна СЧ 18-32, стали 35, пластмассы (капрона Б) в паре со стальными валами из стали 45. По размерам они выполнялись: I группа — образец,  $d_B = 110 \text{ мм}$ ;  $B_n = 67 \text{ мм}$ ; II группа — модель,  $C_l = 2,32$ ; III группа — модель,  $C_l = 2,78$ . Шероховатость поверхностей трения для образцов составляла: I группа  $Rz = 20 \text{ мкм}$ ; II группа —  $Rz = 8 \div 10 \text{ мкм}$ ; III группы — 6—7 мкм. Испытания проводились на установке, представленной на рис. 7.19, с трением без смазочного материала, с абразивом и без него, со смазочным материалом (масло «Индустриальное-20»). Для образца расход смазочного материала составлял  $20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{ч}$ , расход абразива (кварцевого песка крупностью 0,1 мм) —  $10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{ч}$ . При испытании моделей расходы смазочных материалов и абразива регулировались по формуле  $C_{\omega \text{ см}} = C_{\omega \text{ а}} = C_l^2$ . Удельная нагрузка на проекцию цапфы составляла  $p_a = 2 \text{ МПа}$ , скорость скольжения  $v = 0,046; 0,053; 0,382; 0,630; 0,9 \text{ м/с}$ . Определялись износ по массе  $i_g$ , коэффициент трения  $f$ , объемные температуры в зоне трения  $\vartheta_{\text{VT}}$ , шероховатость поверхностей  $Rz$ , микротвердость по глубине  $H$ , характер износа поверхностей, микроструктура по глубине.

Процессы осуществлялись при соблюдении условий физического подобия процессов сухого и граничного трения (см. табл. 7.3—7.5) при  $\vartheta_{\text{VT0}} = \vartheta_{\text{VTM}}$ ;  $f_0 = f_M$ ;  $i_{g0} = i_{gM}$ , а также принятых ограничений: по материалам  $C_{E1,2}$ ;  $C_{M1,2}$ ;  $C_{HВ1,2}$ ;  $C_{\rho1,2 \text{ см}}$ ;  $C_{\lambda1,2 \text{ см}}$ ;  $C_{C1,2 \text{ см}}$ ;  $C_{\eta \text{ см}}$ ;  $C_{HВa}$ ; по режимам трения  $v_0 = v_M$ ;  $= p_{a0} = p_{aM}$ .

При выполнении краевого подобия, определяемого критерием Био, теплоотдача с поверхностей подшипников и валов моделей увеличивается путем обдувания их воздухом, для чего можно использовать формулу  $\alpha_B = (1 + 1,75 \sqrt{v_B}) 6,7 \cdot 10^{-3}$ , где  $\alpha_B$  — коэффициент теплоотдачи с поверхностей узла трения, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $v_B$  — скорость движения воздуха, м/с. Сопоставление данных испытаний для образца и моделей приведено на рис. 7.20.

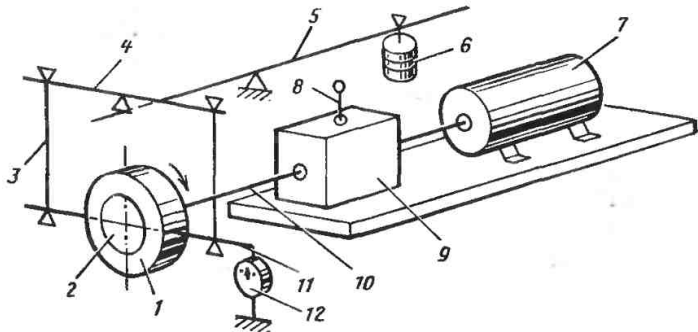


Рис. 7.19. Схема установки для испытания подшипников скольжения: 1 — корпус подшипника; 2 — испытуемый подшипник; 3 — серьги; 4 — коромысло; 5 — рычаг; 6 — грузы; 7 — электродвигатель; 8 — рукоятка для переключения скоростей; 9 — коробка перемен передач; 10 — вал; 11 — рычаг; 12 — динамометр с циферблатом для определения силы трения

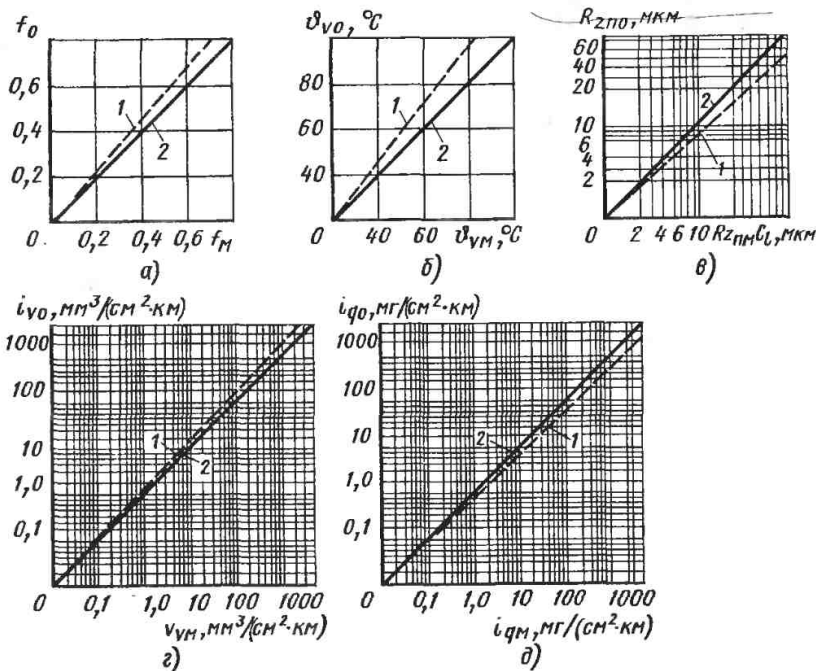


Рис. 7.20. Сопоставление результатов испытаний: а — по коэффициенту трения; б — температуре; в — шероховатости поверхностей; г — интенсивности изнашивания подшипников; д — интенсивности изнашивания валов; 1, 2 — действительная и теоретическая зависимости

Погрешности измерений: температуры 8—10 %; коэффициента трения 3—5 %; расхода смазочных материалов и абразива 10—15 %; погрешности косвенных измерений критериев и комплексов 10—14 %.

Корреляционные соотношения по шероховатостям поверхностей трения имеют вид  $(Rz)_o = (Rz)_M C_I$ , а погрешность  $\Delta h, \% = 100 (Rz)_o - (Rz)_M C_I / \times (Rz)_o$ .

Расхождение средних значений параметров оригинала и модели по износу 2—24 %; коэффициенту трения 0—20 %; температуре 0—25 %; шероховатости 2—18 %.

По рассмотренной методике могут испытываться все шарнирные узлы с цилиндрическими поверхностями и линейным контактом, работающие при граничной смазке и без смазки, в присутствии абразива и без него.

В табл. 7.19 представлены данные испытаний подшипников из бронзы и пластмассы (капрона Б) при трении со смазкой без абразива.

Испытания на моделях зубчатых передач производятся на стендах [7.9, 7.10], а при использовании роликовой аналогии — на серийных машинах трения (МИ-1м; СМЦ-2; СМТ и др. — см. т. 3, гл. 6).

Испытания на трение и износ могут осуществляться при обычных режимах (без форсирования скорости, повышения нагрузки, наружной температуры и т. д.), а также при ускоренных режимах.

Методика моделирования при обычных испытаниях дана ранее (см. табл. 7.3—7.5). Рассмотрим испытание на трение и износ косозубых зубчатых передач, используемых в редукторах, передающих вращающий момент от двигателя на колесные пары путевых дрезин АГМу и ДГКУ. Испытания проводятся на стенде (рис. 7.21), работающем по принципу циркуляции мощности в замкнутом силовом контуре. Геометрический масштаб моделирования принимается  $C_I = 3,0 \div \div 4,0$ .

Для определения потерь мощности на трение используется зависимость

$$M_{\Pi} = M_{\Pi}' \frac{M_{\Pi\text{с}}}{M_{\Pi\text{с}}'}, \quad (7.16)$$

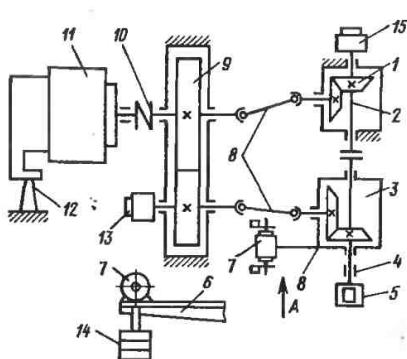


Рис. 7.21. Кинематическая схема стенда для испытания зубчатых передач:

1 — контрольный редуктор; 2 — ведомый вал; 3 — испытуемый редуктор; 4 — подвижная опора; 5 — счетчик оборотов; 6 — рычаг; 7 — пульсатор; 8 — карданный вал; 9 — замыкающий редуктор; 10 — муфта; 11 — балансирный электродвигатель; 12 — тензодинамометр; 13 — токосъемник; 14 — грузы; 15 — тахогенератор

для определения КПД редуктора

$$\eta = 1 - M_{\Pi} / M_T, \quad (7.17)$$

где  $M_{\Pi}$  и  $M_{\Pi}'$  — моменты потерь в редукторе соответственно под нагрузкой и при холостом ходе;  $M_{\Pi\text{с}}$  и  $M_{\Pi\text{с}}'$  — моменты потерь во всей системе стенда соответственно под нагрузкой и при холостом ходе;  $M_T$  — нагружающий момент замкнутого контура.

Величина  $M_T$  определяется тензометрированием карданного вала, а  $M_{\Pi\text{с}}$ ,  $M_{\Pi\text{с}}'$ ,  $M_{\Pi}$  и  $M_{\Pi}'$  — по реактивному моменту статора балансирного двигателя при различных вариантах компоновки стенда и фиксированной (для данного режима испытаний) частоте вращения. Износ определяется путем взвешивания, методом микрометрирования, методом слепков [7.8]. Проскальзывание контактирующих пар при  $C_{\Phi} = 1$ , где  $\Phi$  — угловое перемещение, оценивается коэффициентом  $K_{\text{пр}} = S_{\text{ск}} / S_{\text{тр}}$ , где  $S_{\text{ск}}$  — путь скольжения, а  $S_{\text{тр}}$  — путь трения.

На рис. 7.22 даны результаты измерения износа по высоте зубьев для путевых дрезин и электровозов при основном режиме работы машин.

7.19. Данные испытаний подшипников из бронзы и капрона Б

Давление $p_a$ , МПа	Скорость скольжения $v$ , м/с	Установившееся движение						Разница измерений оригинала и модели, %				
		Время опыта, ч	Коэф. трения $f$	Износ подшипника $l_{Vп}$ , мм <sup>3</sup> /(см <sup>2</sup> ·км)	Износ вала $l_{гв}$ , мм <sup>3</sup> /(см <sup>2</sup> ·км)	Объемная температура $\phi_{VT}$ , °C	Шероховатость $Rz$ , мкм	$\bar{f}$	$l_{Vп}$	$l_{гв}$	$\phi_{VT}$	$Rz$
I. Подшипник из бронзы ОЦС 5-6-5, оригинал												
0,288	0,9	8	0,03	2,4	0,43	45	15	—	—	—	—	—
0,535	0,277	8	0,042	7,0	0,95	35	12	—	—	—	—	—
1,48	0,138	7	0,05	9,0	1,35	40	13	—	—	—	—	—
Модель, $C_I = 2,78$												
0,288	0,9	8	0,03	3,0	0,32	49	6	14,7	20,0	15,6	5,4	11,2
0,535	0,277	8	0,042	6,0	0,85	37	4	16,7	14,3	5,65	5,0	7,5
1,48	0,138	7	0,035	7,0	1,1	38	5	16,0	22,2	18,5	8,2	6,94
II. Подшипник из пластмассы (капрон Б), оригинал												
0,288	0,9	8	0,042	0,35	0,20	70	12	—	—	—	—	—
0,835	0,54	7	0,047	0,65	0,59	61	14	—	—	—	—	—
1,08	0,36	8	0,051	0,7	0,57	62	14	—	—	—	—	—
Модель $C_I = 2,78$												
0,288	0,9	8	0,035	0,32	0,30	61	4,7	16,6	8,57	33,5	12,8	8,4
0,835	0,54	7	0,05	0,75	0,45	67	5,25	6,0	13,3	23,7	9,0	4,3
1,08	0,36	8	0,058	0,65	0,7	68	5,0	12,0	7,15	14,0	8,8	0,72

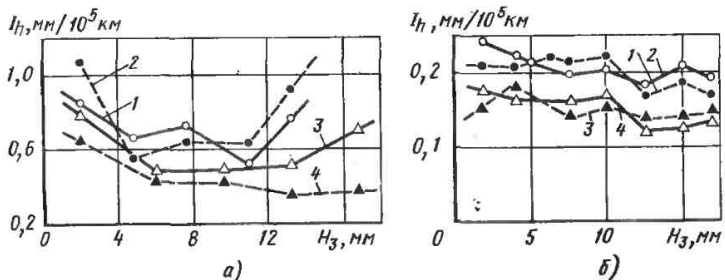


Рис. 7.22. Изменение интенсивности линейного изнашивания  $I_h$  по высоте зубьев  $H_3$  зубчатой пары (а — редуктора дрезины АГМу, б — тяговой передачи электровоза ВЛ-80) 1 — по данным лабораторных испытаний колеса; 2 — по данным эксплуатационных испытаний колеса; 3 — по данным лабораторных испытаний шестерни; 4 — по данным эксплуатационных испытаний шестерни

Проведенные исследования имеют целью выбор материалов для шестерен, их геометрии зацепления, технологии обработки, наиболее эффективных смазочных материалов, а также методов их подачи в редуктор с учетом влияния конструктивных факторов изучаемого узла трения.

При граничной смазке на процессы трения и изнашивания существенно влияет толщина масляного слоя на поверхностях. Экспериментально доказано при испытании подшипников скольжения и зубчатых передач, что при рассматриваемых условиях процесс течения масла в зазорах происходит при ламинарных режимах и в автомоделных областях. Процесс определяется критериальным уравнением  $Eu Re_m = La$ . Значения  $m$  и критерий Лагранжа находят экспериментально по известным методикам [7.2]. В данном случае процесс определяются подобием геометрических форм контактирующих тел и их шероховатости, а также давлениями; принято  $\Delta p_{\text{ш}} = \Delta p_{\text{м}}$ . Уравнение подобия для изнашивания зубчатых передач при граничной смазке имеет следующий вид:

$$i_{\text{в ш. к}} = \Phi [p_{\text{а}}/E_{\text{пр}}; v_{\text{ск}} T/S_{\text{тр}}; v_{\Sigma}/v_{\text{ск}}; f_{\Sigma}; (\vartheta_{\text{VT}} - \vartheta_{\text{H}}); \alpha; \varphi; zt/d_{\text{ш. к}}; (B/D_{\text{H}})_{\text{ш. к}}; F_{\text{ш}}/F_{\text{к}}; (Rz/r)_{\text{ш. к}}; Rz_{\text{ш. к}}/Rz_{\text{к}}; \sigma_{\text{ш}}/\sigma_{\text{ск}}; \lambda_{\text{ш}}/\lambda_{\text{к}};$$

$$c_{\text{ш}}/c_{\text{к}}; \rho_{\text{ш}}/\rho_{\text{к}}; \bar{\omega}_{\text{см}}; \bar{\omega}_{\text{А}}; d_{\text{А}}/r; H_{\text{ВА}}/H_{\text{Вш. к}}; \dots] \quad (7.18)$$

При дополнительных условиях  $C_{\text{ф}} = 1$  и  $C_f = 1$  находят масштабы параметров режима испытаний  $C_p = C_t^2$ ;  $C_{\text{в ка}} = C_t^{-1}$ ;  $C_{\text{в}} = C_t^{-1}$ ;  $C_t = 1$ ;  $C_h = C_t$  при условии, что масла и материалы пар трения природы и модели одинаковы. Модельные испытания на образцах с использованием роликовой аналогии и серийных машин трения (СМТ-1, СМЦ-2 и др.) используются для выбора материалов пар трения качения, качения со скольжением при конкретных режимах нагрузки и скорости, подбора смазочных материалов и присадок к ним для конкретных условий работы пары; оценки эффективности использования механической обработки и термообработки материалов, выбора предельных режимов работы сопряжения при рассмотренных выше условиях. Рекомендуется использовать линейные масштабы  $C_t = 1,5 \div 4,5$ . Режимы: скорость качения от 0.2 до 3,5 м/с, проскальзывание от 0 до 50 %, контактные напряжения 50—100 кПа.

В ходе эксперимента подлежат регистрации весовой и линейный износы, коэффициент трения, объемная и поверхностная температуры роликов, температура масляной ванны, число циклов нагружения, характер и режим нагружения. Вероятная погрешность измерения: температур 8—10 %

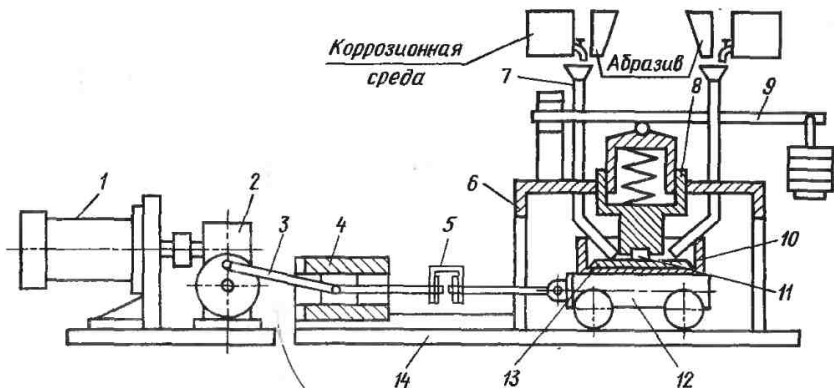


Рис. 7.23. Схема установки для испытания образцов в коррозионно-абразивных средах: 1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — кривошипно-шатунный механизм; 4 — ползун; 5 — тензометрическая скоба; 6 — корпус; 7 — трубопровод; 8 — держатель; 9 — нагружающее устройство; 10 — ванночка; 11 — контроробразец; 12 — тележка; 13 — образец; 14 — плита

коэффициента трения 3—5 %. Износ роликов определяется по потере массы на аналитических весах с точностью  $2 \cdot 10^{-4}$  г.

Описанные методики используются для отработки новых конструкций редукторов, оценки усталостной контактной прочности материалов передач, например тяговых передач путевых дрезины и электровозов, выбора геометрии зацепления, подбора смазочных материалов, подбора материалов рельса и колеса мостового крана грузоподъемной силой 300/50 кН и других контактных задачах износа. Как показывает опыт, продолжительность испытаний на износостойкость при использовании физического моделирования сокращается в 15—50 раз по сравнению с испытаниями машин в полевых условиях при одинаковой погрешности полученных результатов [7.2, 7.11].

Моделирование узлов трения, совершающих возвратно-поступательное движение колец и втулок насосов по перекачке коррозионно-абразивных сред (стиральный порошок), компрессоров холодильных машин, работающих в среде аммиака и хладона-22, осуществляется на установке, типовая схема которой представлена на рис. 7.23.

Геометрическое подобие выполняется в масштабах  $C_l = 1,35 \div 73,5$ ; давление принимается  $p_a = 0,15 \div 2,5$  МПа, средняя скорость скольжения  $v = 0,25 \div 1,6$  м/с.

Моделирование осуществляется при соблюдении условий физического подобия процессов граничного трения (см. табл. 7.3—7.5), при  $\vartheta_{v\text{то}} = \vartheta_{v\text{тм}}$ ;  $f_0 = f_M$ ;  $i_{g0} = i_{gM}$ , а также принятых ограничениях:  $C_p = C_v = C_{\omega A} = C_{\omega \text{ см}} = C_{\beta v} = 1$ . Физические характеристики материалов пар трения, абразива и транспортируемой (перекачиваемой) среды для натур и модели принимаются одинаковыми.

Функциональные зависимости трения и износа колец и втулок (по массе) представляются в следующем виде:

$$f = \Phi_1(p_a; v; S_T; T; \beta_g;$$

$$\bar{Q}_{\text{ср}}; \bar{Q}_A;$$

$$K_{\text{ср}}; d_B/D_B; F_R/F_B;$$

$$HB_A/HB_B; h_A/r_A;$$

$$\lambda_R/\lambda_B; C_R/C_B; \rho_R/\rho_B; E_R/E_B, \dots);$$

$$(7.19)$$

$$i_g = \Phi_2(p_a; v; S_T; T; \beta_g;$$

$$\bar{Q}_{\text{ср}}; \bar{Q}_A; K_{\text{ср}};$$

$$d_B/D_B; F_R/F_B; HB_A/HB_B;$$



7.20. МКП для моделирования экипажной части подвижного состава железнодорожного транспорта

Расчетный параметр	Масштабный коэффициент	Формула пересчета параметров
Линейный размер	$C_l = 5 \div 10$	$l_o = l_M (5 \div 10)$
Скорость движения	$C_v = C_l$	$v_o = v_M C_l$
Ускорение	$C_a = C_l$	$a_o = a_M C_l$
Угловое перемещение	$C_\varphi = 1$	$\varphi_o = \varphi_M$
Угловая скорость	$C_\omega = 1$	$\omega_o = \omega_M$
Время	$C_T = 1$	$T_o = T_M$
Масса	$C_G = C_l^3$	$G_o = G_M C_l^3$
Сила	$C_P = C_l^3$	$P_o = P_M C_l^3$
КПД передачи	$C_\eta = 1$	$\eta_o = \eta_M$
Мощность двигателя	$C_N = C_l^4$	$N_o = N_M C_l^4$
Вращающий момент	$C_M = C_P C_l$	$M_o = M_M C_l^4$
Перемещение буксовых узлов относительно рамы	$C_z = C_l^{5/2} C_{ж}^{-1/2}$	$z_o = z_M C_l^{5/2} C_{ж}^{-1/2}$
Жесткость рессорного подвешивания	$C_{ж} = 65$	$Ж_o = Ж_M 65$
Модуль упругости	$C_E = 1$	$E_o = E_M$
Момент инерции сечения	$C_{J_o} = C_l^5$	$J_{o0} = J_{oM} C_l^5$
Угловое ускорение	$C_{\varepsilon\varphi} = 1$	$\varepsilon\varphi_o = \varepsilon\varphi_M$
Площадь	$C_F = C_l^2$	$F_o = F_M C_l^2$
Интенсивность распределенной нагрузки	$C_q = C_l$	$q_o = q_M C_l$
Прогиб рельса	$C_\delta = C_l^2$	$\delta_o = \delta_M C_l^2$
Жесткость упругого основания	$C_c = C_l^2$	$C_o = C_M C_l^2$
Коэффициент податливости упругой опоры	$C_A = C_l^{-1}$	$A_o = A_M C_l^{-1}$
Коэффициент податливости упругой опоры на стыке	$C_{Ac} = C_l^{-3}$	$A_{c.o} = A_{c.M} C_l^{-3}$
Вертикальные и горизонтальные неровности на поверхностях катания	$C_{hk} = C_h C_l$	$(h_k)_o = (h_k)_M C_l$

$$h_A/r_A; \lambda_K/\lambda_B; C_K/C_B; \rho_K/\rho_B; E_K/E_B; f, \dots), (7.20)$$

где  $i_g$  — удельный приведенный массовый износ материала, мг/(см<sup>2</sup>·км);  $\beta\phi$  — коэффициент распределения тепловых потоков между трущимися телами;  $\beta\phi = (\partial_{vt}\partial_K)/(\partial_{vk}\partial_H)$ ;  $\partial_{vt}$ ;  $\partial_{vk}$ ;  $\partial_H$  — объемные температуры трения, корпуса цилиндра, окружающей среды;  $\bar{Q}_{ср}$  — средний расход транспортируемой среды, м<sup>3</sup>/ч;  $\bar{Q}_A$  — средняя концентрация абразивных частиц в

транспортируемой среде, мг/м<sup>3</sup>;  $K_{ср}$  — коэффициент, учитывающий свойства среды;  $d_B, D_B$  — диаметр и длина втулки цилиндра;  $F_K, F_B$  — поверхности теплоотдачи колец и втулки;  $H_{вA}, H_{вB}$  — твердости абразивных частиц и втулки;  $h_A, r_A$  — глубина внедрения и радиус абразивных частиц;  $\bar{\omega}_A, r_A$  — удельный объемный расход абразива и жидкости, см<sup>3</sup>/(см<sup>2</sup> × км).

При работе трибосопряжения в коррозивно-абразивной среде удельную интенсивность изнашивания втулок по

С соблюдением масштабных коэффициентов (табл. 7.20) выполняется испытательный стенд, позволяющий моделировать коэффициент сцепления при контакте одиночного рельса с колесом. Принципиальная схема стенда дана на рис. 7.24.

Для комплексных испытаний моделей подвижного состава железных дорог (масштаб  $C_l = 5 \div 10$ ) применяются катковые стенды (рис. 7.25). Масштабные коэффициенты находятся по табл. 7.3—7.5, 7.19.

Сопоставление результатов эксплуатационных испытаний путей железных дорог АГМУ, ДГКУ и магистральных электровозов серии ВЛ дает расхождение с модельными: по коэффициенту сцепления 5—15 %, удельному сопротивлению движению 3—10 %, амплитудам колебаний 10—16 %, частотам 2—10 %, ускорениям неподвижных масс 10—15 %.

## 7.8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСКОРЕННЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ускоренные триботехнические испытания дают возможность еще на стадии проектирования трибосопряжения оценить правильность предлагаемых решений, что значительно сокращает

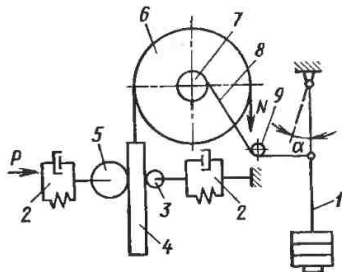


Рис. 7.24. Схема стенда для моделирования коэффициента сцепления при контакте одиночного колеса с рельсом:

1 — маятник с грузом; 2 — имитаторы вязко-упругих характеристик верхнего строения пути и рессорного подвешивания; 3 — поддерживающие ролики; 4 — модель рельса; 5 — ролик (имитатор колеса); 6 — уравновешивающее устройство; 7 — блок; 8 — гибкий канат; 9 — ролик

массе,  $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{км})$ , находят из выражения:

$$i_g = 2000 \frac{p_a}{S_{\text{тр}}} \left( \frac{\bar{Q}_{\text{ср}} \bar{Q}_A}{98n^2 L_{\text{в}} T p_a} \right)^{0,149}, \quad (7.21)$$

где  $p_a$  — давление, кПа,  $S_{\text{тр}}$  — путь трения, км;  $n$  — число двойных ходов в минуту;  $L_{\text{в}}$  — длина втулки цилиндра, м.

Материал втулок: чугун СЧ 21-40, борированная сталь 45; хромированная сталь 45; материал колец: фторопласт 40 и текстолит ПТ.

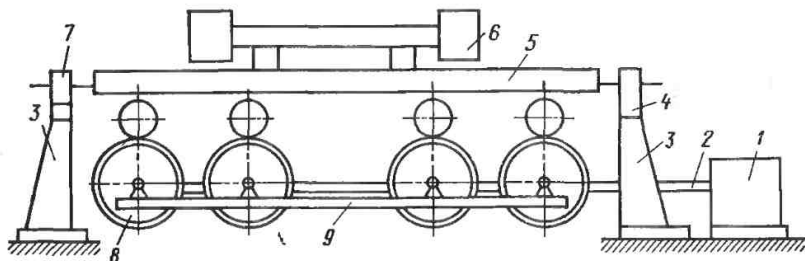


Рис. 7.25. Схема каткового стенда для моделирования коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами и динамика экипажей части:

1 — электродвигатель; 2 — карданный привод, приводящий в движение опорные катки; 3 — упоры; 4 — регулировочный винт для установки модели на катках; 5 — модель электровоза; 6 — имитаторы масс; 7 — динамометр для замера силы тяги; 8 — катки; 9 — рама стенда

времени (в 5—50 раз), силы и среднства при исследованиях. Однако при изменении масштабов (геометрических размеров и форм деталей, режимов трения, граничных условий и физических характеристик испытуемых объектов), за счет искажения которых достигаются ускорение процессов трения и изнашивания и несоблюдение законов физического подобия протекающих процессов, исследователь может получить ошибочные (искаженные) результаты.

Сложность этой задачи состоит в том, что интенсификация режимов трения (повышение нагрузок, скоростей) приводит к существенному изменению полей напряжений, деформаций и температур материалов как в зонах контакта, так и в объемах, что изменяет картину разрушения и старения материалов и в конечном итоге может привести к переходу одного вида изнашивания в другой со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Однако непременным условием проведения ускоренных испытаний на износостойкость является однозначность протекающих процессов, определяемых равенством видов трения, интенсивности изнашивания, температур, шероховатостей поверхностей трения, физических процессов, протекающих на поверхностях и в глубине контактирующих тел.

Например, при исследовании узлов трения их работоспособность представляется диаграммами  $p_d v$  [МПа × м/с]. На рис. 7.26 дана характеристика нагрузочной способности геометрически подобных пластмассовых (капрон Б) подшипников при одинаковых температурах в зоне трения ( $\vartheta_v = 60^\circ\text{C}$ ).

С уменьшением масштаба в 2,32 раза нагрузочная способность при прочих равных условиях повысилась примерно в 2 раза [7.2]. Поэтому для оценки результатов исследований на уменьшенных моделях и сравнения с натурой (чаще всего с узлом трения эксплуатируемой машины) необходимо учитывать в первую очередь масштабный фактор. Это объясняется тем, что при одинаковой тепловой напряженности на единицу площади контактирующих тел и поверхностей теплоотдачи, при

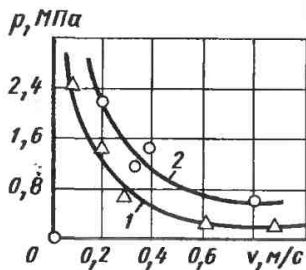


Рис. 7.26. Нагрузочная способность  $p_d v$  [МПа · м/с] геометрически подобных подшипников (капрон Б) при  $\vartheta_v = 60^\circ\text{C}$ :

1 — образец; 2 — модель;  $C_l = 2,32$

изменении размеров узла в  $C_l$  раз, теплопроводящие объемы изменяются в  $C_l^3$  раз, а площадь — в  $C_l^2$  раз. Сокращение длительности испытаний может быть достигнуто следующими способами.

1. За счет уплотнения испытаний во времени (рис. 7.27, а). Осуществляется такое уплотнение без интенсификации процессов трения и изнашивания за счет сокращения холостых ходов или простоев (машины, стенда, прибора, установки для испытаний), а также одновременного испытания возможно большего количества образцов (или машин) при различных режимах, аналогичных эксплуатационным.

2. Форсирование режимов испытаний достигается за счет применения более высоких нагрузок (рис. 7.27, б) или скоростей (рис. 7.27, в) по сравнению с эксплуатационными. Форсирование режимов допустимо в пределах применения заранее изученного закона трения и износа в конкретном объекте.

В лабораторных испытаниях эти методы используются широко, так как имеется большая возможность расширения диапазонов режимов нагрузок и скоростей. Такие виды испытаний производятся в основном как сравнительные. При эксплуатационных испытаниях форсирование режимов работы рекомендуется использовать в ограниченных пределах их изменений.

3. Ужесточение фактора внешней среды (рис. 7.27, г) производится за

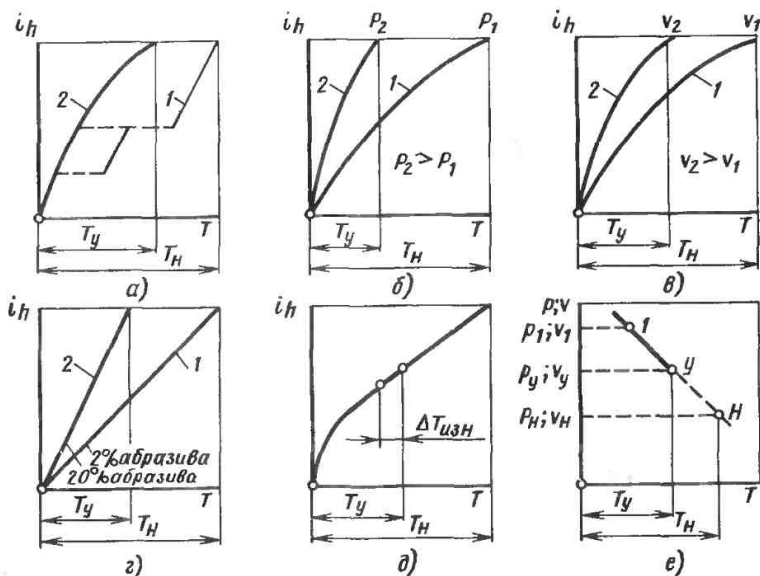


Рис. 7.27. Методы ускоренных испытаний на износ:

а — за счет сокращения времени  $T$ ; б — за счет форсирования нагрузки  $P$ ; в — за счет форсирования скорости  $v$ ; г — за счет ужесточения фактора внешней среды; д — за счет повышения точности измерения износа; е — за счет экстраполяции функции износа;  $T_H$  и  $T_y$  — время нормальных и ускоренных испытаний;  $i_h$  — удельная линейная интенсивность изнашивания; кривая 1 — испытания на нормальном режиме (н); кривая 2 — ускоренные испытания по соответствующему параметру (у)

счет повышения или понижения наружной температуры, концентрации абразива, влаги, химических реагентов. В основном такие виды испытаний осуществляются в лабораторных условиях как сравнительные и при наработке на отказ.

4. Повышение точности измерения параметров (рис. 7.27, д) достигается использованием более чувствительных методов измерений процессов трения и изнашивания, например метода радиоактивных изотопов, лазерной техники, высокочувствительных датчиков, метода искусственных баз и т. д. Характер изменения износа при переходе от периода приработки к стационарному процессу (рис. 7.27, е) является за более короткий промежуток времени и более точно. На основании полученных данных для  $i_h$  строятся зависимости  $I_h = \Phi(T)$ . Метод

широко используется при прогнозировании работоспособности двигателей внутреннего сгорания, металлообрабатывающих станков, подвижного состава железных дорог и других объектов.

5. Метод экстраполяции применяется, когда известна функциональная (обычно линейная) зависимость между нагрузкой  $P_i$  или скоростью  $v_i$  и временем работы до отказа  $T_{отк}$  (допустимого износа детали, узла). Тогда проводят испытания при повышенных нагрузках  $P_{i\max} - P_{i\max}$  или скоростях  $v_{i\max} - v_{i\max}$  (см. рис. 7.27, е), постепенно понижая значения нагрузок (скоростей) до пересечения с абсциссой, соответствующей нормальной (эксплуатационной) нагрузке  $P_H$  (скорости  $v_H$ ). Считают, что значение  $T_H$  соответствует наработке на отказ при эксплуатационных режимах. Этот метод получил распространение для про-

7.21. Последовательность этапов рационального цикла испытаний для ускоренной оценки работоспособности трибосопряжения и прогнозирования его ресурса

Содержание операций, включенных в этап	Зависимости, формулы, примечания
П1. Предварительное изучение информации по результатам эксплуатации пар трения, анализ результатов с использованием расчетных методов	—
П2. Выявление критических точек (для фрикционных и смазочных материалов)	$f_{кр} = \Phi_1(\vartheta_V, p_a);$ $I_{кр} = \Phi_2(\vartheta_V, p_a)$
П3. Оценка зависимости характеристик трибосопряжения от динамики нагружения (вибрационных воздействий, колебаний значений нагрузки, пульсаций и т. п.)	$f = \Phi_1(p_a + \text{var } \Delta p_a);$ $I = \Phi_2(p_a + \text{var } \Delta p_a)$
К1. Выявление влияния температурно-силовых характеристик на границы работоспособности пары трения	$\sup f = \Phi_1(\vartheta, p_a);$ $\inf f = \Phi_2(\vartheta, p_a);$ $\sup I = \Phi_3(\vartheta, p_a);$ $\inf I = \Phi_4(\vartheta, p_a)$
К2. Получение фрикционно-износных характеристик трибосопряжения на малогабаритных моделях с учетом масштабного фактора	$f_M = f_H; \quad I_M = I_H$
К3. Оценка влияния конструкции узла и машины на фрикционно-износные характеристики	$f_H = \Phi_1(\text{var } \Delta p_a);$ $I_H = \Phi_2(\text{var } \Delta p_a)$
К4. Оценка влияния эксплуатационных факторов на фрикционно-износные характеристики	$f_{\vartheta} = \Phi_1(\text{var } \Delta p_a, \vartheta)$ $I_{\vartheta} = \Phi_2(\text{var } \Delta p_a, \vartheta)$

ведения эксплуатационных и стендовых испытаний.

Опыт показывает, что линейный закон изменения износа в зависимости от пути и времени возможен при наличии окислительного изнашивания или при упругом оттеснении материала (первый вид нарушения фрикционной связи по И. В. Крагельскому), а также при абразивном изнашивании. При патологических видах изнашивания: заедании, фреттинге, осповидном, смятии, коррозионно-механическом, как правило, эти зависимости не являются линейными.

Для анализа явлений на фрикционном контакте процессов и результатов испытаний следует использовать

системный подход. На рис. 7.25 в качестве примера представлены группы факторов, определяющие интенсивность изнашивания в узлах трения цементного оборудования, даны элементы триботехнической цепочки, а в табл. 7.21 указана последовательность этапов рационального цикла испытаний.

В табл. 7.22 приведены возможные причины и значения погрешностей, а точнее расхождения результатов натурных и модельных экспериментов, если не учитываются особенности протекания процессов и законы их воспроизведения. Для учета этих особенностей следует применять критерии объективности модельных испытаний.

**7.22. Оценка погрешностей натуральных и модельных экспериментов**

Причина погрешности	Возможная доля влияния на фрикционно-износные характеристики, %	Формула
Недостаточный объем эксперимента	До 100 и более	$n = \frac{2\sigma\sigma^2}{\varepsilon^2}$
Не учтен вид распределения и нестационарности процесса	До 70 и более	—
Повышенное трение в опорах нагружающего устройства (НУ)	До 50	$M_T = \frac{1}{2} [Pd_V]$
Нагрев опор НУ или силоизмерителя	До 30	$\vartheta_{Vоп} \gg \vartheta_{окр}$
Нестабильность свойств материалов от партии к партии	До 100 и более	—
Произвольный выбор интервалов между циклами нагружения	До 50	$T_{окл.н} \neq T_{окл.м} C_T^\alpha$
Помехи в каналах связи	До 5	—
Высокая динамичность нагружения	До 50	—
Погрешность приборов	До 5	—

**7.23. Триботехнические критерии объективности модельных испытаний**

Контролируемые характеристики	Основной контрольный параметр	Диапазоны изменения контрольных параметров
<p>Основные характеристики фрикционной связи (по И. В. Крагельскому):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>упругое оттеснение</li> <li>пластическое оттеснение (передформирование)</li> <li>микрорезание</li> </ul> <p>Температура в зоне контакта</p> <p>Зависимость коэффициента трения от температуры в зоне контакта</p> <p>Структура материала</p> <p>Микротвердость по нормали и поверхности трения</p> <p>Шероховатость поверхностей трения</p>	<p>Удельный линейный износ на контакте <math>i_h</math></p> <p><math>\vartheta_V^*</math></p> <p><math>f</math></p> <p>Совпадение видов изнашивания, микроструктур</p> <p>Линейный размер</p> <p>Класс частоты</p>	<p><math>i_h \leq 10^{-3}</math></p> <p><math>10^{-4} &lt; i_h &lt; 10^{-3}</math></p> <p><math>10^{-2} &lt; i_h &lt; 10^{-1}</math></p> <p><math>\vartheta_{так} = \vartheta_V^* + \vartheta_{всп}</math></p> <p><math>f = \Phi(\vartheta)</math></p> <p>Равны на модели и натуре с учетом масштабного фактора</p> <p>То же</p> <p>Тождественны при учете масштабного фактора</p>

7.24. Пример последовательности этапов получения ОП в системе с тремя основными единицами

Содержание расчетной операции	Расчетные формулы
1. Выбор базисных параметров	$\begin{aligned} \tilde{p}_{11} &= [L^{\alpha_1} M^{\beta_1} T^{\gamma_1}], \\ p_{12} &= [L^{\alpha_2} M^{\beta_2} T^{\gamma_2}], \\ p_{13} &= [L^{\alpha_3} M^{\beta_3} T^{\gamma_3}] \end{aligned}$
2. Составление определителя из размерностей базисных параметров (главного определителя системы)	$D_0 = \begin{vmatrix} L & M & T \\ p_{11} & \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ p_{12} & \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \\ p_{13} & \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{vmatrix}, \text{ где } D_0 \neq 0$
3. Выбор параметра, который связывают с базисными	$p_{15} = [L^{\alpha_5} M^{\beta_5} T^{\gamma_5}]$
4. Выявление связи между параметрами $p_{15}$ и $p_{11}$	$D_{511} = \begin{vmatrix} L & M & T \\ p_{15} & \alpha_5 \beta_5 \gamma_5 \\ p_{12} & \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \\ p_{13} & \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{vmatrix}, \quad p_{11}^{D_{511}/D_0}$
5. Выявление связи между параметрами $p_{15}$ и $p_{12}$	$D_{512} = \begin{vmatrix} L & M & T \\ p_{11} & \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ p_{15} & \alpha_5 \beta_5 \gamma_5 \\ p_{13} & \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{vmatrix}, \quad p_{12}^{D_{512}/D_0}$
6. Выявление связи между параметрами $p_{15}$ и $p_{13}$	$D_{513} = \begin{vmatrix} L & M & T \\ p_{11} & \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ p_{12} & \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \\ p_{15} & \alpha_5 \beta_5 \gamma_5 \end{vmatrix}, \quad p_{13}^{D_{513}/D_0}$

При разработке методов ускоренных испытаний используют три подхода. Первый предусматривает выбор безразмерного отношения, полученного на основании общих логических соображений или статистической обработки экспериментального материала. Второй позволяет в первом приближении при минимальном объеме эксперимента прогнозировать тенденции изменения фрикционно-износных характеристик в зависимости от ОП. В отличие от первого подхода, получение ОП формализовано (табл. 7.23 и 7.24). Однако при первом и втором подходах предварительно требуется больший экспериментальный материал для выявления границ физически обоснован-

ной области использования безразмерных отношений и ОП.

Третий подход, рассмотренный выше, основан на расчете подобия натурной и модельной триботехнических систем и обеспечения в зоне контакта элементов одинаковой интенсивности процессов для обеих систем, что достигается учетом масштабного фактора. Последний подход в сочетании с рациональным циклом испытаний обеспечивает наименьшие расхождения между результатами модельных и натуральных экспериментов (до 10 % по коэффициенту трения и не более 20 % по интенсивности изнашивания).

Для ускоренных испытаний нестационарных процессов могут быть ис-

использованы также системы уравнений тепловой динамики трения и изнашивания (ТДТИ), разработанные А. В. Чичинадзе с сотрудниками [7.2, 7.4, 7.8]. Примеры использования систем ТДТИ приведены в томе 3.

### 7.9. РАСЧЕТ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИНЫ НА БАЗЕ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ПАР ТРЕНИЯ

В гл. 5 изложены теоретические основы износа твердых тел и даны методы расчета на износ узлов трения и деталей машин на базе энергетической и усталостной теорий износа. Для выполнения таких расчетов инженер использует исходные физико-механические свойства материалов пар трения, которые определяются на специальных образцах стандартными методами.

Выше в гл. 7 даны теоретические положения моделирования трения и износа, которые служат основой различных лабораторных методик модельных (в том числе и ускоренных) испытаний (конкретные примеры таких методик приведены в томе 3 справочника).

Таким образом при моделировании с учетом масштабных коэффициентов перехода могут быть получены как закономерности изнашивания в функции нагрузки, скорости скольжения и температуры, так и непосредственные величины линейных, массовых или объемных износов элементов пар трения.

Использование результатов таких испытаний позволяет на стадии проектирования и конструирования рассчитать сопряжения на износ с выявлением распределения давлений и линейного износа на поверхности трения, определением изменения взаимного положения сопряженных деталей, которое произойдет в результате их изнашивания.

На распределение износа по поверхности трения и на характер взаимодействия изношенных поверхностей существенное влияние оказывает конструктивная схема сопряжения.

Изложенная ниже инженерная методика расчета износа деталей машин на базе модельных испытаний образцов пар трения составлена на основе таких работ как [7.2; 7.4—7.8; 7.12—7.23].

Как известно скорость изнашивания материалов в условиях сухого и граничного трения в общем случае выражается зависимостью  $\gamma = K\rho_a^m v^n$ . Коэффициент  $K$  и степени  $m$  и  $n$  определяются при модельном эксперименте или берутся из результатов эксплуатации аналога. Для многих расчетных случаев можно принять линейную зависимость между величиной износа  $U$  и временем изнашивания  $t$ ; тогда  $\gamma = \frac{U}{t} = \text{const}$ . Основной характеристикой изнашивания детали является линейный износ, измеренный по нормали к поверхности трения. В общем случае износ детали по рабочей поверхности неравномерен.

В зависимости от характера возможного сближения деталей при износе их поверхностей все сопряжения могут быть разделены на два типа:

I тип — сопряжения с неизнашивающимися или малоизнашивающимися поверхностями трения, обеспечивающими сближение деталей при износе только в заданном направлении и

II тип — сопряжения с возможностью самоустановки изношенных деталей, в которых взаимное положение деталей зависит от формы изношенной поверхности.

На рис. 7.28 показан пример I типа сопряжений — шаровая пята. В данном случае износ сопряжения характеризуется одним параметром  $U_{1-2}$  — величиной относительного сближения изношенных деталей 1 и 2 в направлении  $x-x$ . Так как сближение деталей возможно только в направлении  $x-x$ , сумма их износов, измеренная в направлении возможного сближения, должна быть постоянной и равняться износу всего сопряжения  $U_{x1} + U_{x2} = U_{1-2} = \text{const}$ .

Это соотношение называют условием касания тел, так как оно характеризует важную особенность протекания износа сопряжения: при любой форме изношенной поверхности деталей на-



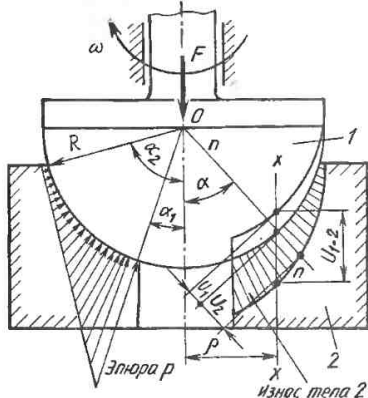


Рис. 7.28. Характерный пример износа I типа сопряжений: износ шаровой пяты.

блюдается полный контакт сопряженных поверхностей.

В силу условия касания для любой точки поверхности будет соблюдаться равенство

$$U_{1-2} = \frac{U_1 + U_2}{\cos \alpha} \quad \text{или} \quad \gamma_{1-2} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha}. \quad (7.22)$$

Здесь  $U_1$  и  $U_2$  — износ сопряженных деталей в данной точке, измеренный в направлении нормали  $n$  —  $n$  к поверхности трения;  $\alpha$  — угол между нормалью к поверхности трения и направлением возможного сближения деталей;  $\gamma_{1-2}$  — скорость изнашивания сопряжения;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — то же деталей в данной точке.

На рис. 7.29 показан типичный пример II типа сопряжений — сопряжение цапфы вала и подшипника скольжения. Здесь направление взаимного сближения не задано и их относительное положение определяется характером действующих сил и формой изношенной поверхности. В данном случае по мере износа деталей вал изменяет свое положение в подшипнике, опускается и поворачиваясь в плоскости чертежа. Новое положение вала, характеризующее износ сопряжения, может быть определено двумя параметрами: перемещением какой-либо точки оси вала и углом поворота оси или

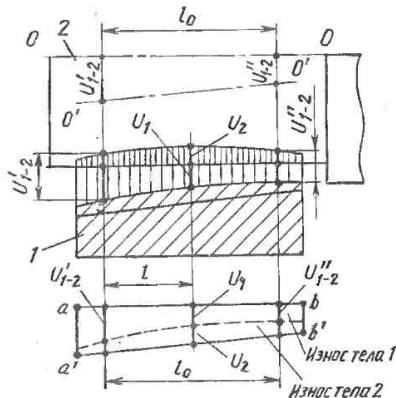


Рис. 7.29. Характерный пример износа II типа сопряжений: износ цапфы вала и подшипника скольжения.

двумя линейными параметрами  $U'_{1-2}$  и  $U''_{1-2}$ , определяющими износ данного сопряжения. Последние измеряются в направлении, перпендикулярном начальному положению оси вращения. Углом перекоса оси при изнашивании можно пренебречь. При износе одна деталь как бы выедрется в другую, поэтому суммарную эпюру можно назвать областью взаимного выедрания. Эта область разделена на две части кривой, определяющей первоначальную форму поверхностей трения.

Показанную виизу на рис. 7.29 область взаимного выедрания можно рассматривать в виде трапеции  $abb'a'$ , т. к. ограничивающий участок представляет собой общую образующую вала и подшипника.

Из геометрических соотношений находим

$$U_1 + U_2 = U'_{1-2} \left( 1 - \frac{l}{l_0} \right) + U''_{1-2} \frac{l}{l_0}. \quad (7.23)$$

При решении задач, связанных с износом сопряжений, используют соотношения (7.22) и (7.23).

При известных законах изнашивания, определенных при испытаниях, расчет износа сопряжения состоит из трех этапов:

Первый этап — определение эпюры давлений  $p_a$  на поверхности контакта сопряженных деталей. Эта эпюра позволяет наметить пути повышения износостойкости за счет уменьшения удельных нагрузок, действующих в сопряжении.

Второй этап — определение износа сопряжения  $U_{1-2}$ , который является основной характеристикой работоспособности механизма и который необходим при расчете предельно допустимых износа и срока службы сопряженных деталей.

Третий этап — определение формы изношенных поверхностей. Последняя определяет работоспособность механизма, методы компенсации износа и технологию ремонта деталей. Аналитическое определение формы изношенной поверхности позволяет выявить факторы, влияющие на неравномерный износ, и указать пути устранения этой неравномерности.

### 7.9.2. Классификация сопряжений по условиям изнашивания

При расчетах деталей на износ необходимо иметь классификацию сопряжений, в которой отражены условия, связывающие конструктивную схему данного сопряжения с его износом.

Помимо ранее указанного деления

трибосопряжений на два типа они подразделяются на пять групп в зависимости от постоянства условий трения и износа поверхностей в расположенных на одной траектории точках сопряженных поверхностей, с учетом коэффициента взаимного перекрытия  $K_{вз}$  и реального пути трения [7.2, 7.4, 7.12].

На рис. 7.30 приведена классификация сопряжений по условиям изнашивания.

У сопряжений первой группы точки, расположенные на одной траектории, имеют одинаковые условия изнашивания для каждого из двух тел (например, износ поверхностей вращения при центральной нагрузке).

Ко второй группе отнесены сопряжения, у которых условия изнашивания сохраняются только для точек одного тела, лежащих на данной траектории (сюда относятся, например, подшипники скольжения, колодочные тормоза).

К третьей группе отнесены сопряжения с низшими парами (кулисные механизмы, направляющие).

К четвертой группе — сопряжения с высшими парами (кулачковые механизмы, подшипники качения).

У сопряжений третьей и четвертой групп условия изнашивания не постоянны для всех точек обоих тел, поэтому имеются большие возможности для неравномерного износа поверхностей.

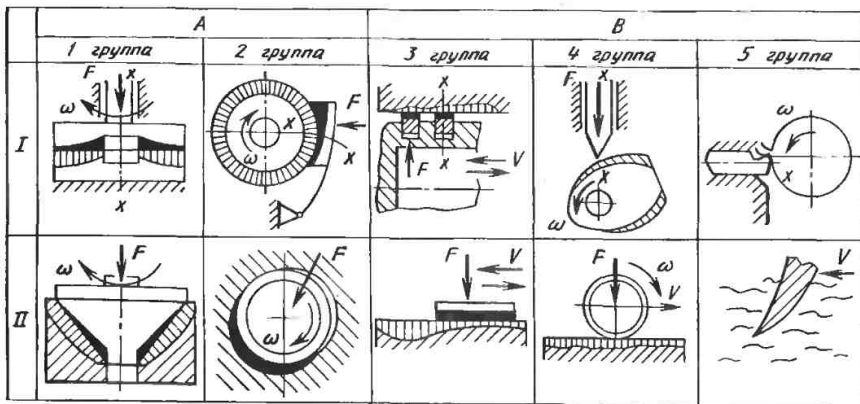


Рис. 7.30. Классификация сопряжений по условиям изнашивания

К сопряжениям пятой группы относятся детали, контактирующие с твердой средой — обрабатываемой деталью, породой, почвой. В этом случае рассматривается износ лишь одной поверхности, которую обтекает абразивная или иная среда, от характера взаимодействия с которой (эпоры нагрузок и скоростей) будет зависеть форма изношенной поверхности. Примеры пятой группы: режущий инструмент — обрабатываемая деталь; зубья ковша экскаватора — порода; лемех плуга — почва.

Все сопряжения, кроме того, можно распределить на две категории:

А — на износ которых накладывается условие касания поверхностей и

В — у которых при износе условия касания переменны.

Принадлежность сопряжения к тому или иному типу и группе определяет методику его расчета на износ и позволяет связать разрабатываемую конструкцию с характеристикой его вероятного износа.

### 7.9.3. Расчет сопряжений на износ с использованием условия касания

Исходные данные для расчета: 1) конструктивная схема и размеры сопряжения, нагрузки и скорости скольжения на поверхности трения; 2) закономерности процесса изнашивания.

Методику расчетов рассмотрим на ряде типичных примеров.

### 7.9.4. Расчет на износ конических поверхностей (рис. 7.31)

(Сопряжение I группы)

Примем линейный закон изнашивания  $\gamma = K\rho_a v$ . Начало координат поместим в вершину конуса, а ось направим по образующей. Скорость скольжения в данной точке поверхности трения будет  $v = 2\pi r\omega = 2\pi r u \cos \alpha$ . Скорости изнашивания сопряженных поверхностей выразятся

$$\gamma_1 = K_1 \rho_a 2\pi r u \cos \alpha;$$

$$\gamma_2 = K_2 \rho_a 2\pi r u \cos \alpha.$$

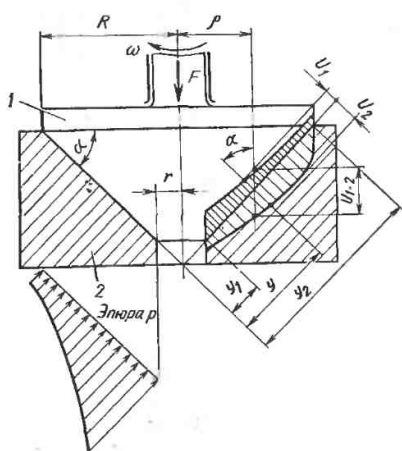


Рис. 7.31. Схема расчета износа конических поверхностей деталей машины.

Применяя формулу (7.22), получаем

$$\begin{aligned} \gamma_{1-2} &= \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha} = \\ &= (K_1 + K_2) 2\pi r \rho_a u, \end{aligned}$$

откуда

$$\rho_a = \frac{\gamma_{1-2}}{2\pi r (K_1 + K_2) u} \cdot \frac{1}{y}. \quad (7.24)$$

Из этого равенства следует, что эпора давлений имеет гиперболический характер, так как для заданных режимов работы  $\gamma_{1-2} = \text{const}$ .

Для определения значений  $\gamma_{1-2}$  найдем зависимость между силой  $F$  и давлением  $\rho_a$ , распределенным по поверхности трения

$$\begin{aligned} F &= \int_A \rho_a \cos \alpha dA = \\ &= 2\pi \int_{y_1}^{y_2} \rho_a \cos \alpha r dy = \\ &= 2\pi \cos^2 \alpha \int_{y_1}^{y_2} \rho_a y dy, \end{aligned}$$

где  $p = y \cos \alpha$ ;  $y_1 = \frac{r}{\cos \alpha}$ ;  $y_2 = \frac{R}{\cos \alpha}$ .

Подставляя выражение  $p_a$  и решая уравнение относительно  $\gamma_{1-2}$ , получаем

$$\gamma_{1-2} = \frac{Fn(K_1 + K_2)}{(R - r) \cos \alpha}. \quad (7.25)$$

По этой формуле можно подсчитать скорость изнашивания сопряжения или величину износа сопряжения  $U_{1-2} = \gamma_{1-2} t$  в зависимости от режимов его работы ( $F$  и  $n$ ), его размеров и формы ( $R$ ,  $r$ ,  $\alpha$ ) и характеристик износа материалов сопряженных деталей ( $K_1$  и  $K_2$ ).

Эпюра давлений может быть построена по значениям, подсчитанным по формуле, полученной из равенств (7.24) и (7.25)

$$p_a = \frac{F}{2\pi(R - r) \cos \alpha} \cdot \frac{1}{y}. \quad (7.26)$$

Форму изношенной поверхности получаем из выражений  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  после подстановки в них значения  $p_a$

$$U_1 = \gamma_1 \cdot t = K_1 \frac{Fn}{R - r} t;$$

$$U_2 = \gamma_2 \cdot t = K_2 \frac{Fn}{R - r} t. \quad (7.27)$$

### 7.9.5. Расчет износа дисков (рис. 7.32)

Для оценки износа дисковых поверхностей можно использовать полученные формулы (7.25), (7.26), (7.27), полагая в них  $\alpha = 0$  и  $y = \rho$ .

При принятом линейном законе изнашивания износ дисков будет равномерным, как показано на рис. 7.32, а, зависящем от износостойкости материалов ( $K_1$  и  $K_2$ ), режимов работы ( $F$  и  $n$ ), размеров сопряжения ( $R$  и  $r$ ) и времени работы ( $t$ ). При этом из размеров сопряжения на износ оказывает влияние ширина кольцевой рабочей поверхности  $R - r$  независимо от того радиуса, на котором располагается эта поверхность.

При более сложном законе изнашивания сопряженных дисков  $\gamma_1 = K_1 p_a^{m_1} v^{n_1}$  и  $\gamma_2 = K_2 p_a^{m_2} v^{n_2}$  износ ди-

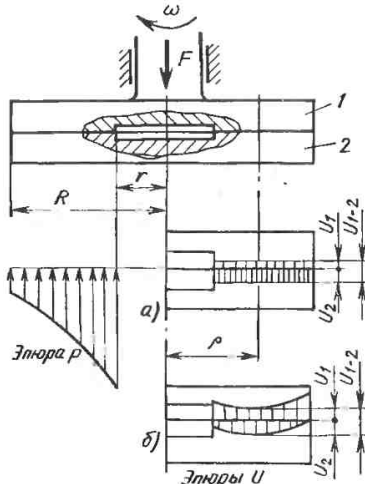


Рис. 7.32. Схема расчета износа плоских поверхностей трения.

сков будет неравномерным, как показано на рис. 7.32, б, при  $n_1 > n_2$ .

### 7.9.6. Расчет износа шаровых поверхностей (см. рис. 7.28)

При определении параметров сопряжения применим полярную систему координат с ее началом в центре «0» шара. Положение каждой точки поверхности определяется углом  $\alpha$  между нормалью к поверхности и направлением  $x$ — $x$  возможного сближения при износе.

Скорость относительного скольжения

$$U = \omega r = \omega R \sin \alpha.$$

При линейном законе изнашивания

$$\begin{aligned} \gamma_{1-2} &= \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha} = (K_1 + K_2) \frac{p_a v}{\cos \alpha} = \\ &= \omega p_a (K_1 + K_2) R \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned}$$

откуда

$$p_a = \frac{\gamma_{1-2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{\omega (K_1 + K_2) R}. \quad (7.28)$$

В данном случае эпюра удельных нагрузок подчиняется закону котангенса. Точки, расположенные в верхней части полусферы, практически не

участвуют в изнашивании. Поэтому угол  $\alpha_2$  обычно выбирают меньше  $90^\circ$  и сопряженные поверхности выполняют так, чтобы не происходило касания в зоне малых окружных скоростей.

Связь между удельным давлением  $p_a$  и внешней нагрузкой  $F$  выражается

$$F = \int_A p_a \cos \alpha dA.$$

Здесь  $dA = 2\pi r R d\alpha = 2\pi R^2 \sin \alpha d\alpha$ .

Подставляя в выражение  $F$  значения  $p_a$  и  $dA$ , получаем

$$\begin{aligned} F &= 2\pi R^2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} p_a \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \\ &= \frac{2\pi R \gamma_{1-2}}{\omega (K_1 + K_2)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^2 \alpha d\alpha = \\ &= \frac{2\pi R \gamma_{1-2}}{\omega (K_1 + K_2)} \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \\ &= \frac{2\pi R \gamma_{1-2}}{\omega (K_1 + K_2)} \left[ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \right], \end{aligned}$$

откуда

$$\gamma_{1-2} = \frac{2F\omega (K_1 + K_2)}{\pi R (\sin 2\alpha_2 + 2\alpha_2 - 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1)}. \quad (7.29)$$

Форма изношенной шаровой поверхности будет определяться зависимостями

$$U_1 = \gamma_{1-2} \cos \alpha \frac{K_1}{K_1 + K_2} t;$$

$$U_2 = \gamma_{1-2} \cos \alpha \frac{K_2}{K_1 + K_2} t. \quad (7.30)$$

Поскольку для шаровых поверхностей  $\alpha \neq \text{const}$ , их износ будет неравномерным.

Расчет износа сопряжений при других закономерностях изнашивания (в которых показатели степени  $m$  при  $p_a$  и  $n$  при  $v$  отличны от единицы), а также расчет на износ сопряжений второй группы по классификации рассмотрены в работах [7.14, 7.19].

В таких сопряжениях основную роль в распределении износа по поверхности трения играет изменение внешних факторов (сил, скоростей, условий контакта, в частности коэффициента взаимного перекрытия  $K_{вз}$ ) по отношению к каждому участку поверхности.

Неравномерное распределение износа типично для сопряжений с высшими парами, например, для пары кулачок—толкатель, для зубчатой передачи.

### Расчет износа зубчатого зацепления

В работающем зацеплении создаются переменные условия взаимодействия зубьев в пределах профиля зуба. Скорость относительного скольжения профилей изменяется от нуля в полюсе зацепления до максимального значения при контакте ножки и головки сопряженных зубьев. Начальное касание зубьев происходит по линии, площадь контакта определяется условиями деформации (по Герцу). Поскольку радиус кривизны эвольвенты в пределах профиля переменен, то и контактные напряжения изменяются в пределах профиля.

Такое изнашивание характерно для открытых передач вследствие попадания в зацепление абразивов.

Рассмотрим методику оценки износа профилей зубьев таких передач.

В соответствии с законом абразивного изнашивания [7.2, 7.6, 7.7, 7.20] линейный износ профиля зуба  $U_0$  за один цикл зацепления выражается

$$U_0 = K' p_{ср} L', \quad (7.31)$$

где  $L'$  — путь трения, проходимый точками контакта зубьев за один оборот зубчатого колеса.

На рис. 7.33 показаны взаимодействия и износ профилей зубьев.

Среднее давление на контактной площадке  $p_{ср}$  определяется как отношение нормальной силы  $F_n$ , передаваемой зубом к площади контактной полоски

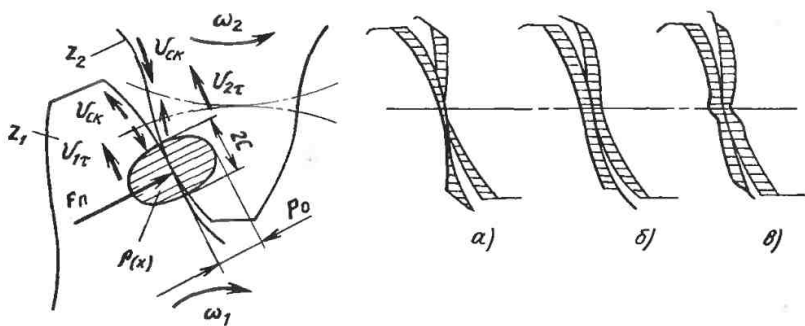


Рис. 7.33. Схема расчета износа контактных поверхностей зубчатых зацеплений: а — расчетная форма износа зубьев при отсутствии относительного скольжения в полюсе зацепления; б — износ зубьев при проскальзывании в полюсе и наличии пластических деформаций; в — износ зубьев при недостаточной твердости поверхностей зубьев.

2bc, а сила  $F_n$  — как интеграл функции давления по ширине площадки

$$p_{\text{ср}} = \frac{F_n}{2bc} = \frac{1}{2bc} \int_{-c}^{+c} p(x) b dx \quad (7.32)$$

здесь  $b$  — длина зуба.

Распределение давления  $p(x)$  по площадке шириной  $2c$  представляет собой ординаты поверхности эллиптического полуцилиндра

$$p(x) = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2} \cdot p_0, \quad (7.33)$$

где  $p_0$  — максимальное давление, определяемое по формуле Герца

$$p_0 = 0,418 \sqrt{\frac{F_n}{b} \cdot \frac{E_{\text{цр}}}{\rho_{\text{цр}}}} \quad (7.34)$$

Из формул (7.32) и (7.33) следует

$$\bar{p}_{\text{ср}} = \frac{\pi}{4} p_0. \quad (7.35)$$

Путь трения  $L'$  точек профиля зубьев, находящихся в контакте, рассчитывается как произведение скорости относительного скольжения  $v_{\text{ск}}$  сопряженных точек профилей на время трения  $t_{\text{ц}}$  точек за один цикл зацепления

$$L' = v_{\text{ск}} t_{\text{ц}} \quad (7.36)$$

Время  $t_{\text{ц}}$  определяется отношением ширины контакта  $2c$  к тангенциальной составляющей  $v_t$  скорости перемещения точек

$$t_{\text{ц}} = \frac{2c}{v_t}. \quad (7.37)$$

Ширина контактной площадки  $2c$  определяется по формуле

$$2c = 2 \cdot 1,52 \sqrt{\frac{F_n}{b} \cdot \frac{\rho_{\text{цр}}}{E_{\text{цр}}}} \quad (7.38)$$

Подставляем в формулу износа (7.31) соответствующие значения из (7.34) ... (7.38)

$$U_0 = K' \frac{\pi}{4} 0,418 \sqrt{\frac{F_n}{b} \cdot \frac{E_{\text{цр}}}{\rho_{\text{цр}}}} \times \\ \times v_{\text{ск}} = \frac{2 \cdot 1,52}{v_t} \sqrt{\frac{F_n}{b} \cdot \frac{\rho_{\text{цр}}}{E_{\text{цр}}}}.$$

Обозначая  $\frac{v_{\text{ск}}}{v_t} = \eta$ , получаем

$$U_0 = K \frac{F_n}{b} \eta, \quad (7.39)$$

т. е. величина износа пропорциональна нормальной погонной нагрузке и коэффициенту относительного скольжения  $\eta$ .

Величина износа зубьев колеса 1 за  $N_1$  циклов работы будет

$$U_1 = U_{01}N_1 = K_1 \frac{F_n}{b} \eta_1 N_1. \quad (7.40)$$

Износ зубьев сопряженного колеса 2

за  $N_2 = \frac{N_1}{u}$  циклов будет

$$U_2 = U_{02}N_2 = K_2 \frac{F_n}{b} \eta_2 N_2, \quad (7.41)$$

где  $u$  — передаточное число зубчатой пары.

Выражая коэффициент относительного скольжения в функции радиусов кривизны  $\rho_1$  и  $\rho_2$  сопряженных профилей зубьев колес 1 и 2, получаем величину износа зубьев колес

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 \frac{F_n}{b} \left| \left( 1 - \frac{\rho_{1n}}{\rho_1} \right) \left| \frac{u+1}{u} N_1 \right. \right| \\ U_2 &= K_2 \frac{F_n}{b} \left| \left( 1 - \frac{\rho_{2n}}{\rho_2} \right) \left| (u+1) N_2 \right. \right| \end{aligned} \right\} \quad (7.42)$$

Здесь  $\rho_{1n}$  и  $\rho_{2n}$  — радиусы кривизны сопряженных зубьев в полюсе зацепления. Выражения  $\left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \right)$  взяты по модулю, т. к. в полюсе зацепления скорость скольжения изменяет направление, и данные выражения изменяют знак при  $\rho < \rho_n$ .

На рис. 7.33, а показана расчетная форма изношенной поверхности зубьев. Поскольку в полюсе отсутствует относительное скольжение профилей, то и износа здесь нет. Однако вследствие искажения при износе эвольвент и возникающего в полюсе проскальзывания, а также пластических деформаций, имеет место износ и в зоне полюса, как это показано на рис. 7.33, б.

При недостаточной твердости поверхностей зубьев может возникать в полюсной зоне гребешок на зубьях ведомого и канавка на зубьях ведущего колеса (рис. 7.33, в). Это объясняется направлением сил трения: от полюсной линии к периферии на зубьях ведущего колеса и от периферии к полюсной линии на зубьях ведомого.

Осложняющей особенностью рассмотренных расчетов сопряжений на износ является наличие в расчетных зависимостях коэффициента износостойко-

сти  $K$  ( $\gamma = K\rho_a^m u^n$ ), значения которого могут устанавливаться только экспериментально при модельных и стендовых испытаниях применительно к рассматриваемым материалам, конструкции пары трения, условиям ее работы.

Поэтому в ряде практических случаев прибегают к приближенной оценке износа узлов трения по упрощенным зависимостям с ориентировкой на эксплуатационные данные аналогичных узлов.

Рассмотрим несколько таких примеров.

### Резьбовые механизмы

В резьбовых механизмах, например, домкратах для достижения приемлемой износостойкости ограничивают удельное давление  $p_a$  в зоне контакта витков резьбы гайки и винта из условий невыдавливания из этой зоны смазки

$$p_a = \frac{F \cdot P}{\frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2) H} \leq [p_a]. \quad (7.43)$$

Здесь  $F$  — осевая нагрузка на винт;  $P$  — шаг резьбы;  $d$  и  $d_1$  — наружный и внутренний диаметр резьбы;  $H$  — высота гайки;  $[p_a]$  — параметр износа, т. е. допустимое удельное давление, исключающее выдавливание смазки.

Параметр  $[p_a]$  выбирают исходя из условий работы и материалов винта и гайки, составляющих износостойкую антифрикционную пару.

Так для пары закаленная сталь — бронза принимают  $[p_a] = 12$  МПа, а при малых скоростях скольжения значение  $[p_a]$  может достигать 20 МПа.

### Шлицевые соединения

В ГОСТ 21425—75 приводится следующая расчетная зависимость

$$\sigma = \frac{T \cdot K_{\text{изн}}}{Z \cdot l} \leq [\sigma]_{\text{изн}}, \quad (7.44)$$

учитывающая износостойкость шлицевого соединения.

Здесь  $T$  — наибольший длительно действующий крутящий момент;  $z$  —

удельный суммарный статический момент площади рабочих поверхностей соединения относительно оси вала;  $l$  — рабочая длина соединения;  $K_{изн}$  — общий коэффициент концентрации нагрузок.

Допускаемое напряжение по износу выражается

$$[\sigma]_{изн} = \frac{[\sigma]_{усл}}{K_{долг} \cdot K_{раб}} \quad (7.45)$$

Здесь  $[\sigma]_{усл}$  — условное допускаемое напряжение при базовом числе циклов и постоянном режиме работы. Его рекомендуемые значения даются в зависимости от вида термической обработки и средней твердости поверхностей;  $K_{долг}$  — коэффициент долговечности;  $K_{раб}$  — коэффициент условий работы.

### Червячные глобоидные передачи

Износостойкость зубьев червячного венца глобоидной передачи из оловянистой бронзы может быть оценена следующей допустимой скоростью изнашивания

$$[\gamma] = \frac{[U]}{60tn} \leq 5 \cdot 10^{-10} a_w \frac{\text{мм}}{\text{об}} \quad (7.46)$$

Здесь  $[U]$  — предельно допустимый износ, мм;  $t$  — заданный срок службы передачи, ч;  $n$  — частота вращения колеса, об/мин;  $a_w$  — межосевое расстояние, мм.

Если скорость изнашивания оказывается  $\gamma > 5 \cdot 10^{-10} a_w$ , то допустимый крутящий момент  $[T]$  на валу колеса из условия допустимого износа определяется

$$[T] = T \sqrt[4]{\frac{\gamma}{5 \cdot 10^{-10} a_w}} \quad (7.47)$$

где  $T = T_{2\max} \cdot K_{раб}$ ;  $T_{2\max}$  — наибольший длительно действующий крутящий момент на колесе, Н·м;  $K_{раб}$  — коэффициент режима работы,  $K_{раб} = 0,7 \dots 1,35$ ; меньшее значение — при повторно-кратковременной работе, большее — при напряженной кругло-сutoчной работе.

Приведенные расчеты деталей машин на износ следует рассматривать как

приблизженные и в значительной мере условные. Они не учитывают изменение параметров режима работы контакта в зависимости от непрерывно изменяющейся геометрии изнашивающихся деталей, а также изменяющейся взаимосвязи этих параметров между собой.

Разработка уточненных расчетных методов прогнозирования ресурса и износа узлов трения связана со значительными трудностями, обусловленными наличием различных по своей природе процессов, одновременно протекающих на поверхностях трения, и влиянием на эти процессы большого числа взаимно связанных факторов. При этом сами факторы могут изменяться во времени эксплуатации и по поверхности контакта деталей. По своей физической сущности изнашивание — эволюционный, нестационарный процесс.

Для решения задач функционирования сложных систем, а к таковым относятся узлы трения, применяются методы математического моделирования, конкретные примеры которых приведены в томе 3 справочника.

### Список литературы

1. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. школа, 1984. 439 с.
2. Браун Э. Д., Евдокимов Ю. А., Чичинадзе А. В. Трение и изнашивание в машинах. М.: Машиностроение, 1982. 190 с.
3. Тетельбаум И. М., Тетельбаум Я. И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 384 с.
4. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Гинзбург А. Г., Игнатьева З. В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. М.: Наука, 1979. 268 с.
5. Мишарни Ю. А. Применение методов подобия и размерностей в экспериментальном исследовании контактно-гидродинамического трения. Машиностроение, 1965, № 5. С. 89—100.
6. Евдокимов Ю. А., Алферов А. К., Бураков А. А., Шапова-



лов В. В. Повышение надежности и сроков службы деталей путевых машин. М.: Транспорт, 1985. 88 с.

7.7. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.

7.8. Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М., Браун Э. Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986. 248 с.

7.9. Машины и стенды для испытаний деталей/Под ред. Д. Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1979. 343 с.

7.10. Испытательная техника./Под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1982. 528 с.

7.11. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.

7.12. Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. 232 с.

7.13. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

7.14. Проников А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

7.15. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.

7.16. Фляйшер Г. К вопросу о количественном определении трения износа — В кн.: Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. М.: Наука, 1982, с. 285—296.

7.17. Fleicher G., Gröger H., Thum H. Verschleiß und Zuverlässigkeit. — VEB Verlag Technik, Berlin, 1980, 244s.

7.18. Коровчинский М. В. Термоупругий локальный контакт высоконагруженных деталей машин с учетом изнашивания и тепловыделения от трения. М.: ИМАШ, 1983, 53 с.

7.19. Проников А. С. Расчет и конструирование металлорежущих станков. М.: Высшая школа, 1967. 430 с.

7.20. Крагельский И. В., Ямпольский Г. Я. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. М.: Наука, 1973. 163 с.

7.21. Икрамов У. А. Расчетные методы оценки абразивного износа. М.: Машиностроение, 1987. 228 с.

7.22. Ханн М. В. Механическое изнашивание материалов. М.: Издательство стандартов, 1984. 152 с.

7.23. Икрамов У. А., Левитин М. А. Основы триботоники. Ташкент: Укитувчи, 1984. 184 с.

# КРАТКИЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ПОНЯТИЙ НА РУССКОМ, ПОЛЬСКОМ, АНГЛИЙСКОМ, ФРАНЦУЗСКОМ, НЕМЕЦКОМ И ИСПАНСКОМ ЯЗЫКАХ (KRÓTKI SŁOWNIK TRYBOLOGICZNY)

Для некоторых терминов-словосочетаний приведены их краткие формы, которые рекомендуются для случаев, исключающих другое толкование; самоопределяющиеся термины даны без определений. Словарь составлен на базе работ [8.1—8.4].

**Трение и изнашивание/Tarcie i zużywanie**

## 1. Основные термины/Pojęcia ogólne

Внешнее трение/tarcie zewnętrzne/external friction/frottement externe/äußere Reibung/fricción exterior, rozamięto externe — явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения их поверхностей по касательным к ним.

Внутреннее трение/tarcie wewnętrzne/internal friction/frottement interne/innere Reibung/fricción interno — явление сопротивления относительно перемещению частиц одного и того же тела.

Изнашивание/zużywanie/wear process/processus d'usure/Verschleißprozess/desgaste, deterioro por uso — процесс отделения материала с поверхности твердого тела при трении и (или) увеличения его остаточной деформации, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ/zużycie/wear/usure/Verschleißtag/desgaste — результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (значение износа может выражаться в единицах длины, массы и др.).

**2. Виды и характеристики внешнего трения, классификация/Rodzaje i charakterystyki tarcia zewnętrznego, klasyfikacja**

По наличию относительного движения

Трение покоя/tarcie spoczynkowe (statyczne)/static friction/frottement statique/Ruhreibung (statische Reibung)/fricción estática — трение двух тел при микросмещении без макросмещения.

Трение движения/tarcie w ruchu (dynamiczne)/dynamic friction/frottement dynamique/Bewegungsreibung (dynamische Reibung)/fricción cinética — трение двух тел, находящихся в относительном движении.

По характеру относительного движения

Трение скольжения/tarcie ślizgowe/sliding friction/frottement par glissement/Gleitreibung/fricción de patinaje — трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел в точках касания различны по значению и (или) направлению.

Трение качения/tarcie toczne/rolling friction/frottement par roulement/Rollreibung/fricción de rodamiento — трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и направлению, по крайней мере в одной точке зоны контакта.

Трение качения с проскальзыванием/tarcie toczne z poślizgiem/combined rolling and sliding friction/frottement par glissement et roulement combiné/Wälzreibung/fricción de rodamiento con patinaje — трение движения двух соприкасающихся тел при одновременном трении качения и скольжения в зоне контакта.

По наличию смазочного материала

Трение без смазочного материала/tarcie bez smarowania/unlubricated friction/frottement sans lubrifiant/Reibung ohne Schmierstoff/fricción seca — трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала всех видов.

Трение со смазочным материалом/  
tarcie ze smarowaniem/lubricated fric-  
tion/frottement avec lubrifiant/Reibung  
mit Schmierstoff/fricción con lubri-  
cación — трение двух тел при нали-  
чии на поверхностях трения введен-  
ного смазочного материала всех ви-  
дов.

Сила трения/sila tarcia/friction force/  
force de frottement/Reibungskraft/fuerca  
de fricción — сила сопротивления при  
относительном перемещении одного те-  
ла по поверхности другого под дей-  
ствием внешней силы, тангенциально  
направленная к общей границе между  
двумя телами.

Наибольшая сила трения покоя/  
maksymalna siła tarcia statycznego/  
maximum static friction force/force  
maximale de frottement statique/maxi-  
male statische Reibungskraft/fuerca de  
fricción estática máxima — сила тре-  
ния покоя, превышение которой ведет  
к началу макросмещения.

Коэффициент трения/współczynnik  
tarcia/coefficient of friction/coefficient  
de frottement/Reibungszahl/coeficiente  
de fricción — отношение силы трения  
между двумя телами к нормальной  
силе, прижимающей эти тела друг  
к другу.

Скорость скольжения/prędkość śliz-  
gania/sliding velocity/vitesse de glis-  
sement/Gleitgeschwindigkeit/velo-  
cidad de patinaje — разность танген-  
циальных скоростей тел в точках их  
касания при скольжении.

Поверхность трения/powierzchnia  
tarcia/sàiding surface/surface de  
glissement/Gleitfläche/superficie de fric-  
ción — поверхность тела, участвую-  
щая в трении.

3. *Виды и характеристики изнаши-  
вания, классификация/Rodzaje i charak-  
terystryki zużycwania, klasyfikacja.*

Механическое изнашивание/zuzycie  
mechaniczne/mechanical wear/usure mé-  
canique/mechanischer Verschleiß/des-  
gaste mecánico — изнашивание в ре-  
зультате механических воздействий.

Абразивное изнашивание/zuzycie  
ścierne/abrasive wear/usure par abra-  
sion/Abrasiver Verschleiß/desgaste abra-  
sivo, abrasión — механическое изна-  
шивание материала в результате ре-

жущего или царапающего действия  
твердых тел или твердых частиц.

Гидроабразивное (газоабразивное)  
изнашивание/zuzycie hydrościerne  
(gazościerne)/hydroabrasive (gasabra-  
sive) wear/usure par hydroabrasion (ga-  
zoabrasion)/hydroabrasiver (gasabrası-  
ver) Verschleiß/desgaste hidroabrasivo  
(gasoabrasivo) — изнашивание в ре-  
зультате воздействия твердых тел или  
твердых частиц, увлекаемых потоком  
жидкости (газа).

Гидроэрозионное (газоэрозионное)  
изнашивание/zuzycie hydroerozyjne  
(gazoerozyjne)/fluid erosion par fluide/  
Flüssigkeitserosion/desgaste hidroero-  
sivo (gasoerosivo) — изнашивание по-  
верхности в результате воздействия  
потока жидкости или газа.

Усталостное изнашивание/zuzycie  
zmęczeniowe/fatigue wear/usure par  
fatigue/ErmüdungsverSchleiß (Oberflä-  
chenzerrüttung)/desgaste por fatiga —  
механическое изнашивание в резуль-  
тате усталостного разрушения при  
повторном деформировании микро-  
объемов материала поверхности тре-  
ния (усталостное изнашивание может  
происходить как при качении, так  
и при скольжении.)

Кавитационное изнашивание/zuzycie  
kawitacyjne/cavitation wear/usure par  
cavitation/Kavitationsverschleiß/des-  
gaste por cavitación — механическое  
изнашивание при движении твердого  
тела относительно жидкости, при ко-  
тором пузырьки газа захлопываются  
вблизи поверхности, что создает мест-  
ное высокое ударное давление или вы-  
сокую температуру.

Изнашивание при фреттинге; фрет-  
тинг/zuzycie przy frettingu (fretting)/  
fretting wear/usure de contact (par grip-  
page)/SchwingungsverSchleiß/desgaste  
de contacto por vibracion (fretting) —  
механическое изнашивание соприкасаю-  
щихся тел при колебательном относи-  
тельном микросмещении.

Изнашивание при заедании/zuzycie  
adhezyjne/adhesive wear/usure d'adhé-  
rence/adhäsiver Verschleiß/desgaste ad-  
hesivo — изнашивание в результате  
схватывания, глубинного вырывания  
материала, переноса его с одной по-

ности трения на другую и воздей- ствия возникших неровностей на со- пряженную поверхность.

Коррозионно-механическое изнаши- вание/zuzycie mechaniczno-korozyjne/ mechano-chemical wear/usure mécano-chemique/mechanisch-chemischer Verschleiß (tribochemischer Verschleiß)/des- gaste mecanico-corrosivo — изнаши- вание в результате механического воз- действия, сопровождаемого химиче- ским и (или) электрохимическим вза- имодействием материала со средой.

Окислительное изнашивание/zuzycie przez utlenianie/oxidative wear/usure par oxydation/Oxidationsverschleiß/(Tri- booxidation)/desgaste oxidante — кор- розионно-механическое изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей средой.

Изнашивание при фреттинг-корро- зии; фреттинг-коррозия/zuzycie przy fretting—korozji (fretting—horozja)/ fretting corrosion/corrosion de contact (Reibkorrosion)/corrosion de contacto por vibración—коррозионно-механиче- ское изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относи- тельных перемещениях.

Электроэрозионное изнашивание/ zuzycie elektroerozyjne/electroerosive wear/usure par électroérosion/elektro- erosiver Verschleiß/picadura por efecto electrico, electroerosion — изнаши- вание поверхности в результате воздей- ствия разрядов при прохождении элек- трического тока.

Скорость изнашивания/szybkóć zu- zuwania/wear rate/taux d'usure/Versch- leißrate/velocidad del desgaste — отношение значения износа к интер- валу времени, в течение которого он возник. (Различают мгновенную — в определенный момент времени — и среднюю — за определенный ин- тервал времени — скорость изнашива- ния)

Интенсивность изнашивания/inten- sywność zuzywania/wear intensity/inten- sityté (degré) d'usure/Verschleißinten- sityté (degré) del desgaste — отно- шение значения износа к обусловлен- ному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполнен-

ной работы. Единицы объема выпол- ненной работы выбираются в каждом конкретном случае. (Различают мгно- венную и среднюю интенсивность изна- шивания.)

4. Явления и процессы при трении и изнашивании/Zjawiska i procesy przy zuzywaniu

Скачкообразное движение при тре- нии/tarcie skokowe — szarpane (stick—slip)/stick—slip motion/brou- tage/Stick—slip—Bewegung/oscilacion de fricción stick—slip — явление чере- дования относительного скольжения и относительного покоя или чередова- ние увеличения и уменьшения отно- сительной скорости скольжения, воз- никающее самопроизвольно при тре- нии движения (например, движение, возникающее вследствие автоколеба- ний при пониженном коэффициенте трения с увеличенным скоростью сколь- жения).

Схватывание при трении; схватыва- ние/szczepianie adhezyjne przy tarcii/ adhesion in friction; adhesion/adhèrence au frottement/Adhäsion/agarramiento, gripado profundo — явление местного соединения двух твердых тел, происхо- дящего при трении вследствие дей- ствия молекулярных сил.

Перенос материала/przenoszenie ma- terialu/transfer of material/transfert de matière/Materialübertragung/trans- ferencio del material — явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго.

Заедание/zacieranie/seizure/grippage/ Fressen/agarramiento — процесс воз- никновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схва- тывания и переноса материала (зае- дание может завершаться прекраще- нием относительного движения).

Задиры/ryśowanie/scoring/érrillage/ Riefenbildung/gravar — повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении сколь- жения.

Царапание/bruzdowanie/scratching/ grattage/Kratzerbildung/estriado, for- mación de surcos, desgaste en surcos — образование углублений на поверх- ности в направлении скольжения при

воздействию выступов тела или твердых частиц.

Отслаивание/*łuszczenie* (spalling)/*spalling/écaillage/Ausbröckeln/escamado, desconfchado*—отделение с поверхности трения частиц материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

Выкрашивание/*wykruszanie/pitting/piqure/Grübchenbildung*—образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.

Приработка (процесс) /*docieranie/gunning—in/rodage/Einlaufen/rodaje*—процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

Смазка и смазочные материалы/*Smarowanie i materialy smarowe*

1. Основные термины/*Podstawowe pojęcia*

Смазка/*smarowanie/lubrication* (type of)/*lubrification/Schmierung/lubricación, lubrificaci6n*—действие смазочного материала, в результате которого уменьшаются износ, повреждение поверхности и (или) сила трения.

Смазывание /*spos6b smarowania/lubrication* (method of)/*mode de lubrification/Methoden der Schmierstoffversorgung/metodos de lubricaci6n*—подведение смазочного материала к поверхности трения.

Смазочный материал/*material smarowy—smar/lubricant/lubrifiant/Schmierstoff/lubricante*—материал, вводимый на поверхность трения для уменьшения износа, повреждений поверхностей и (или) силы трения.

2. Виды смазки, классификация/*Rodzaje smarowanie, klasyfikacja*

Смазка при различном физическом состоянии и смазочного материала

Газовая смазка/*smarowanie gazowe/gas—film lubrication/lubrification par gaz/Gasschmierung/lubricaci6n por gas*—смазка, при которой разделение

поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется газовым смазочным материалом.

Жидкостная смазка/*smarowanie plynne/liquid—film lubrication/lubrication par film liquide/Flüssigkeitsschmierung/lubricaci6n por pelicula gruesa*—смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей находящихся в относительном движении, осуществляется жидким смазочным материалом.

Твердая смазка/*smarowanie smarem statym/solid—film lubrication/lubrication par film solide/Feststoffschmierung/lubricaci6n lubricante solido*—смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей находящихся в относительном движении, осуществляется твердым смазочным материалом.

Гидродинамическая смазка/*smarowanie hydrodynamiczne/hydrodynamic lubrication/lubrication hydrodynamique/hydrodynamische Schmierung/lubricaci6n hidrodinamico*—жидкостная смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости при относительном движении поверхностей.

Гидростатическая смазка/*smarowanie hydrostatyczne/hydrostatic lubrication/lubrication hydrostatique/hydrostatische Schmierung/lubricaci6n hydrostatico*—жидкостная смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении или покое, осуществляется жидкостью, поступающей в зазор между поверхностями под внешним давлением.

Газодинамическая смазка/*smarowanie gazodynamiczne/aerodynamic lubrication/lubrication aerodynamique/gasdynamische Schmierung/lubricaci6n gasodinamico*—газовая смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое газа при относительном движении поверхностей.

Газостатическая смазка/*smarowanie gazo (aero) statyczne/aerostatic lub-*

rication/lubrificación aérostatique/  
gasstatische Schmierung/lubrificación  
gaso (aero) statico.

Эластогидродинамическая смазка/  
smarowanie elastohydrodynamiczne/  
elasto—hydrodynamic lubrication/lubri-  
fication élasto—hydrodynamique/  
elastohydrodynamische Schmierung/  
lubricación elastohidro—dinamico  
(LEH) — смазка, при которой трение  
и толщина пленки жидкого смазочного  
материала между двумя поверхно-  
стями, находящимися в относительном  
движении, определяются упругими  
свойствами материалов, а также реоло-  
гическими свойствами смазочного ма-  
териала.

Граничная смазка/smarowanie gran-  
iczne/boundary lubrication/lubri-  
fication limite/Grenzschnierung/lubri-  
cación limite — смазка, при которой  
трение и износ между поверхностями,  
находящимися в относительном дви-  
жении, определяются свойствами по-  
верхностей и свойствами смазочного  
материала, отличными от объемной  
вязкости.

Полужидкостная (смешанная) смазка/  
smarowanie mieszane/mixedfilm lubri-  
cation/lubrification mixte/Schnie-  
rung in Mischreibungsgebiet/lubrica-  
ción mixta — смазка, при которой осу-  
ществляется частично гидродинамиче-  
ская, частично граничная смазка.

3. Смазывание, классификация/*Sma-  
rowanie, klasyfikacja*

По периодичности сма-  
зывания

Непрерывное смазывание/smarowa-  
nie ciarłe/continuous lubrication/lubri-  
fication continue/kontinuierliche  
Schmierung/lubrificación continua.

Периодическое смазывание/smaro-  
wanie periodyczne/periodical lubrica-  
tion/lubrification périodique/Inter-  
vallschnierung/lubrificación periodica.

По повторяемости ис-  
пользования смазочного  
материала

Циркуляционное смазывание/sma-  
rowanie obiegowe/recirculating lubri-  
cation/lubrification par recirculati-  
on/Umlaufschmierung/lubrificación en  
circulo, lubricación en circuito —  
смазывание, при котором смазочный  
материал после прохождения по по-

верхности трения вновь подается к ней  
механическим способом.

Ресурсное смазывание/smarowanie  
na cały okres «zycia» skojarzenie/  
life—time prelubrication/lubrica-  
tion permanente/Lebensdauer-schnie-  
rung/lubrificación en todo periodo de  
uso — одноразовое смазывание на  
ресурс узла перед началом работы.

Одноразовое проточное смазывание,  
smarowanie jednorazowe/once—through  
lubrication/lubrification à lubrifiant  
perdu/Verlustschmierung/lubrificación  
une vez — смазывание, при котором  
смазочный материал периодически или  
непрерывно подводится к поверхности  
трения и не возвращается в смазочную  
систему.

По способу подачи сма-  
зочного материала к  
поверхности трения

Смазывание под давлением/smarowa-  
nie pod ciśnieniem/forcefeed lubrica-  
tion/lubrification forcée (sous pres-  
sion/Druckschnierung/lubrificación for-  
zado — смазывание, при котором сма-  
зочный материал подается к поверхно-  
сти трения под давлением.

Смазывание погружением/smarowa-  
nie kapielowe/dip—feed (oil—bath)  
lubrication/lubrification par barbottage/  
Tauchschmierung/lubrificación por im-  
mersion, lubricación por baño — сма-  
зывание, при котором поверхность  
трения частично постоянно или перио-  
дически погружена в ванну с жидким  
смазочным материалом.

Смазывание кольцом/smarowanie  
pierscieniem/ring lubrication/lubri-  
fication par bague/Ringschnierung/  
lubrificación con anillo — смазывание,  
при котором смазочный материал по-  
дается к поверхностям трения коль-  
цом, увлекаемым во вращение валом.  
(Смазывание может осуществляться  
свободным или закрепленным на валу  
кольцом.)

Капельное смазывание/smarowanie  
kroplowe/drop-feed (drip-feed) lubri-  
cation/lubrification goutte à goutte/  
Tropfschnierung/ — смазывание, при  
котором к поверхностям трения пода-  
ется жидкий смазочный материал в  
виде капель через равные промежутки  
времени.

смазывание масляным туманом/ smarowanie mgła olejowa/oil fog lubrication; oil mist lubrication/lubrification par brouillard d'huile/ Ölnebelschmierung/lubrificación con (por) niebla de aceite — смазывание, при котором смазочный материал подается к поверхности трения в виде легкого или густого тумана, образуемого путем введения смазочного материала в струю воздуха или газа.

Смазывание набивкой/smarowanie tamponowe/pad lubrication/lubrification au tampon/Schmierkissen—Schmierung/lubrificación por almohadilla — смазывание, при котором жидкий смазочный материал подается на большом участке поверхности трения с помощью соприкасающегося с ней смазываемого материала, обладающего капиллярными свойствами.

Фитильное смазывание/smarowanie knotowe/wick lubrication/lubrification par mèche/Dochtschmierung/lubrificación por mecha — смазывание, при котором жидкий смазочный материал подается к поверхности трения с помощью фитиля.

Ротарпентное смазывание/smarowanie rotaprintowe /rotaprint lubrication/lubrification par contact solide/Rotaprint-Schmierung/lubrificación de «rotaprint»—смазывание, при котором на поверхность детали наносится твердый смазочный материал, отделяющийся от специального смазывающего твердого тела, прижимаемого к поверхности.

Смазывание твердым покрытием/smarowanie warstwą smaru stałego/solid—film coating/dépôt d'un film solide/Festfilm — Überzug/lubrificación con solidos fundidos — смазывание, при котором на поверхность трения до работы детали наносится смазочный материал в виде твердого покрытия.

4. Смазочные материалы и их составляющие, виды смазочных материалов/Materialy smarowe i ich składniki По физическому состоянию

Газообразный смазочный материал/smar gazowy/gaseous lubricant/lubrifiant gazeux/gasförmiger Schmierstoff/gas lubricante.

Жидкий смазочный материал/smar ciekiy/liquid lubricant/lubrifiant liquide/flüssiger Schmierstoff/liquido lubricante.

Смазочное масло/olej smarowy/lubricating oil/huile lubrifiante/Schmieröl/aceite lubricante — очищенное масло, предназначенное для уменьшения трения между движущимися поверхностями.

Пластичный смазочный материал/smar plactyczny/grease/graisse/Schmierfett/grasa (plastica) — полутвердый или твердый продукт, состоящий из смеси минерального или синтетического масла, стабилизированного мылами или другими загустителями. Возможно содержание других компонентов.

Твердый смазочный материал/smar stały/solid lubricant/lubrifiant solide/Festschmierstoff/Lubricante solido.

По наличию присадок Смазочный материал с присадкой/smar z dodatkiem/lubricant with additive/lubrifiant complexe /Schmierstoff mit Zusätzen/lubricante con aditivo.

Базовое масло/olej bazowy/base oil/huile de base/Grundöl/aceite mineral refinado puro — масло, к которому добавляются одна или несколько присадок с целью получения готового продукта.

По происхождению Минеральный смазочный материал/olej mineralny/mineral oil/huile minérale/Mineralöl/aceite mineral — смазочный материал минерального происхождения, полученный смешением углеводородов в естественном состоянии или полученный в результате обработки минеральных продуктов.

Нефтяной смазочный материал/smar otrzymany z ropy naftowej/petroleum oil/lubrifiant pétrolier/mineralisches Öl/lubricante obtenido de petrolio — очищенное масло, полученное из нефтяного сырья.

Растительный смазочный материал/smar roślinny/vegetable oil/lubrifiant végétal/Pflanzenöl/aceite vegetal.

Животный смазочный материал/smar zwierzecy/animal oil/lubrifiant animal/tierisches Öl/lubricante de animals.

Синтетический смазочный материал/  
smar syntetyczny/synthetic lubricant/  
lubrifiant synthétique/synthetischer  
Schmierstoff/lubricante sintetico.

Присадка /dodatek/additive/additif/  
Additiv/aditivo — вещество, добавляе-  
мое к смазочному материалу для при-  
дания ему новых свойств или усиления  
существующих.

Связующее твердого смазочного ма-  
териала; связующее/lepiszcze rozdrob-  
nionego smaru statoego/solid lubricant  
binder, binder/liant de lubrifiant so-  
lide; Liant/Festschmierstoffbinder;  
Bindemittel — вещество, способст-  
вующее сцеплению частиц твердого сма-  
зочного материала между собой и  
с поверхностью трения.

Антикоррозионная присадка/dodatek  
przeciwkorozyjny/anticorrosion addi-  
tive/additif anti—corrosion; inhibiteur  
de corrosion/Antikorrosions—Additiv/  
aditivo anticorrosivo — присадка, пре-  
пятствующая, ограничивающая или  
задерживающая время развития кор-  
розии смазываемых металлических  
поверхностей.

Антиокислительная присадка/do-  
datek przeciwutleniający/antioxidant  
additive/additif anti-oxydant; inhi-  
biteur d'oxidation/Antioxidations—  
Additiv/aditivo antioxidante — при-  
садка, препятствующая, ограничиваю-  
щая или задерживающая время окис-  
ления смазочного материала.

Противоржавейная присадка/dodatek  
przeciwrdzewny/rust preventive addi-  
tive/additif anti-rouille/Antirost—  
Additiv — присадка, препятствующая,  
ограничивающая или задерживающая  
время образования ржавчины на по-  
верхностях деталей из сплавов на ос-  
нове железа

Противоизносная присадка/dodatek  
przeciwzuzyciowy/anti-wear additive/  
additif anti-usure/Antiverschleiß-  
Additiv/aditivo antidesgaste — при-  
садка, препятствующая или уменьшаю-  
щая скорость или интенсивность изна-  
шивания трущихся поверхностей.

Противозадирная присадка/dodatek  
przeciwzatarciowy/antiscoring additive/  
additif anti-grippage/Antiscoring —  
Additiv/aditivo antiagarrotamiento —  
присадка, препятствующая, ограничи-  
вающая или задерживающая заедание

трущихся поверхностей. (Иногда эту  
присадку называют присадкой для  
сверхвысоких давлений.)

Депрессорная присадка /depressor/  
pour-point depressant/améliorant de  
point d'écoulement/Stockpunktver-  
besserer/depressor — присадка, по-  
нижающая температуру застывания  
жидкого смазочного материала.

Индекс вязкости/wskaznik lepkości/  
viscosity index/indice de viscosité/  
Viskositätsindex (V. I.)/indici de vi-  
scosidad (V. I.) — безразмерная вели-  
чина, определяемая по установленной  
шкале и характеризующая изменение  
вязкости масла в зависимости от тем-  
пературы. (Высокий индекс вязкости  
указывает на сравнительно незначи-  
тельное изменение вязкости в зависи-  
мости от температуры, и наоборот.)

Присадка, улучшающая индекс вяз-  
кости/wiskozator/viscosity index impro-  
ver/améliorant d'indice de viscosité/  
Vickositätsindex—Verbesserer/aditivo  
aumento viscosidad — присадка, обы-  
чно полимер, уменьшающая зависи-  
мость вязкости от температуры и уве-  
личивающая в связи с этим индекс  
вязкости масла.

Противопенная присадка/dodatek  
przeciwpienny/anti-foam additive/ad-  
ditif anti-mousse/Antischäum—Addi-  
tiv/aditivo antiespiemante — присадка,  
уменьшающая или препятствующая  
образованию стойкой пены в жидком  
смазочном материале.

Моющая присадка/dodatek myjący/  
detergent additive/additif détergent/  
Detergier—Additiv/aditivo détergente—  
поверхностно-активное вещество, по-  
могающее удерживать твердые частицы  
в масле во взвешенном состоянии.

Диспергирующая присадка/dodatek  
dyspergujący/dispersant additive/ad-  
ditif dispersant/Dispergier—Additiv/  
aditivo de dispersion — присадка  
к жидкому смазочному материалу,  
повышающая дисперсность нераствори-  
мых загрязнений и стабильность су-  
спензий преимущественно при низ-  
ких температурах.

Многофункциональная присадка/do-  
datek wielofunkcyjny/multifunction-  
nal additive/additif multi—fonction-  
nel/Mehrfachfunktions—Additiv/adi-  
tivo que cucuple varias tareas — при-



смазка, улучшающая одновременно несколько свойств смазочного материала.

Композиция присадок/pakiet dodatków/additive package/préformulation d'additifs/Additivpaket/paquete de aditivos — смесь нескольких присадок, готовых к добавлению в смазочный материал.

5. Основные характеристики смазочных материалов/Podstawowe charakterystyki smarów

Вязкость/lepkość/viscosity/viscosité/Viskosität/viscosidad — объемное свойство жидкого, полужидкого или полутвердого вещества оказывать сопротивление при течении. Вязкость уменьшается при повышении температуры.

Смазочная способность/smarność/lubracyjność/pouvoir lubrifiant/Schmierfähigkeit/untuosidad, lubricidad — свойство смазочного материала снижать износ и силу трения, не зависящее от его вязкости.

Совместимость смазочных материалов; совместимость/kompatybilność (zgodność) smarów/lubricant compatibility; compatibility/compatibilité des lubrifiants/Verträglichkeit zwischen Schmierstoffen; Verträglichkeit/compatibilidad de lubricantes — способность двух или нескольких смазочных материалов смешиваться между собой без ухудшения их эксплуатационных свойств и стабильности при хранении.

Консистенция/konsystencja/consistency/consistance/Konsistenz — свойство пластичных смазочных материалов оказывать сопротивление деформации при внешнем воздействии.

Конструкция триботехнических узлов/Konstrukcja węzłów trybotechnicznych

1. Основные термины/Podstawowe pojęcia

Подшипник/łożysko/bearing/palier/Lager/cojnete, soporte, rodamiento — опора или направляющая, которая определяет положение движущейся части по отношению к другим частям механизма.

Подшипник скольжения/łożysko ślizgowe/plain bearing/palier lisse/Gleitlager/cojnete liso — опора или направляющая, в которой имеет место трение скольжения.

Узел подшипников скольжения/łożyskowy węzeł ślizgowy/plain bearing unit/ensemble à palier lisse/Gleitlagerung (Gleitlagereinheit) — вид трибологической системы, включающей подшипник скольжения.

2. Виды подшипников скольжения/Rodzaje łożysk ślizgowych

По направлению воспринимаемых нагрузок

Радиальный подшипник скольжения; радиальный подшипник/poprzeczne łożysko ślizgowe/plain journal bearing; journal bearing/palier (lisse) radial/Radial-Gleitlager; Radiallager/cojnete liso radial — подшипник скольжения, воспринимающий нагрузку, направленную радиально относительно оси вращения.

Осевой подшипник скольжения; осевой подшипник/wzdłużne łożysko ślizgowe/pain thrust bearing; thrust bearing/palier (lisse) de butée; butée (lisse)/Axial-Gleitlager; Axiallager/cojnete liso axial — подшипник скольжения, воспринимающий нагрузку, направленную вдоль или параллельно оси вращения.

Радиально-осевой (упорный) подшипник скольжения/poprzeczno-wzdłużne łożysko ślizgowe/thrust-journal plain bearing/palier (lisse) combiné/Axial-Radial-Gleitlager/cojnete de contact angular — подшипник скольжения, в котором нагрузка действует как в осевом, так и в радиальном направлениях.

По виду смазки  
Газодинамический подшипник/łożysko gazodynamiczne/aerodynamic bearing/palier aérodynamique/gasdynamisches Lager/cojnete gasodinamico — подшипник скольжения, предназначенный для работы в режиме газодинамической смазки.

Газостатический подшипник/łożysko gazostaticzne/aerostatic bearing/palier aérostatique/gasstatisches Lager/cojnete gasostatico — подшипник скольжения, предназначенный для работы в режиме газостатической смазки.

Гидродинамический подшипник/łożysko hydrodynamiczne/hydrodynamic bearing/palier hydrodynamique/

hydrodynamisches Lager/cojinetе hidrodinamico — подшипник скольжения, предназначенный для работы в режиме гидродинамической смазки.

Гидростатический подшипник/łożysko hydrostatyczne/hydrostatic bearing/palier hydrostatique/hydrostatisches Lager/cojinetе hidrostatico, cojinetе fluido — подшипник скольжения, предназначенный для работы в режиме гидростатической смазки.

Подшипник с твердой смазкой/łożysko smarowane smarem stałym/bearing with solid lubricant/palier à lubrifiant solide/Lager mit Festschmierstoff/cojinetе lubricado por lubricante solido — подшипник скольжения, предназначенный для работы с твердым смазочным материалом.

Подшипник без смазки/łożysko bezsmarowe/unlubricated bearing/palier non lubrifié (sans lubrifiant)/ungeschmierertes Lager/cojinetе sin lubricante — подшипник скольжения, в котором части, находящиеся в относительном движении, скользят без предварительного введения смазочного материала.

#### По конструкции

Самоустанавливающийся подшипник скольжения/łożysko samonastawne/plain self-aligning bearing/palier lisse auto-alignant/selbststeinstellendes Lager/cojinetе de autocontrol (autolipación) — подшипник скольжения, в конструкции которого предусмотрена самоустановка вкладыша относительно сопряженной поверхности.

Сегментный радиальный подшипник/segmentowe łożysko poprzeczne/pad journal bearing/palier à segments/Radialsegmentlager/cojinetе radial de segmento — радиальный подшипник скольжения, несущая поверхность которого состоит из нескольких сегментов.

Сегментный осевой (упорный) подшипник/segmentowe łożysko wzdluzne/pad thrust bearing/butée à segments/Axialsegmentlager/cojinetе axial de segmento — осевой подшипник скольжения, несущая поверхность которого состоит из нескольких сегментов.

Самоустанавливающийся сегментный радиальный подшипник/samo-

nastawne poprzeczne łożysko ślizgowe/tilting — pad journal bearing/palier à oscillants/Kippsegment-Radiallager/cojinetе radial de autocontrol — радиальный подшипник скольжения, несущая поверхность которого состоит из нескольких сегментов, свободно устанавливающихся относительно сопряженной рабочей поверхности под действием гидродинамического (газодинамического) давления или нагрузки.

Самоустанавливающийся сегментный осевой подшипник/samonastawne wzdluzne łożysko ślizgowe/tilting—pad thrust bearing/butée à patins oscillants/Kippsegment—Axiallager/cojinetе axial de autocontrol — осевой подшипник скольжения, несущая поверхность которого состоит из нескольких сегментов, свободно устанавливающихся относительно сопряженной рабочей поверхности под действием гидродинамического (газодинамического) давления или нагрузки.

Многоклиновый радиальный подшипник скольжения; многоклиновый подшипник/łożysko Releigha z poprzecznymi występami/lobed plain bearing; lobed bearing/palier lisse à lobes/Mehrflächen—Gleitlager; Mehrflächenlager/cojinetе de Releigh — радиальный подшипник скольжения, в процессе работы которого образуется по окружности несколько гидродинамических клиньев, что достигается приданием поверхности трения специальной формы.

Самосмазывающийся подшипник/łożysko samosmarujace/self-lubricating bearing/palier autolubrifiant/selbstschmierendes Lager/cojinetе autolubricante — подшипник скольжения, в котором смазывание обеспечивается материалом подшипника или входящими в него компонентами, в том числе твердым, жидким или пластичным смазочными материалами.

Пористый подшипник/łożysko porowate/porous bearing/palier poreux/poröses Lager/cojinetе poroso — подшипник скольжения (втулка подшипника) из спеченного подшипникового материала, поры которого могут заполняться смазочным материалом.

самосмазывающийся пористый подшипник/samosmarujące łożysko porowate/porous self-lubricating bearing/palier poreux autolubrifiant/poröses selbstschmierendes Lager/cojinete autolubricante poroso — пористый подшипник, в котором объем пор, доступных с поверхности, заполнен смазочным материалом.

3. Конструктивные элементы подшипников скольжения/Konstrukcyjne elementy łożysk ślizgowych

Шейка/czop/journal/tourillon/Zapfen/pivote, муфта, espiga — участок вала (оси), опирающийся на радиальный подшипник скольжения.

Пята/występ oporowy czopa/thrust collar/collet de butée/Spurscheibe — деталь, соединяемая с валом, или часть вала, опирающаяся на осевой подшипник скольжения, и передающая усилия, направленные вдоль оси вала.

Корпус подшипника скольжения; корпус подшипника/obudowa łożyska ślizgowego/plain bearing housing; bearing housing/logement; corps de palier lisse/Gleitlagergehäuse; Lagergehäuse/alojamiento del cojinete — корпус, в котором устанавливается вкладыш (втулка) подшипника скольжения.

Вкладыш подшипника скольжения; вкладыш подшипника; вкладыш/wkładka łożyska/plain bearing liner; bearing liner; liner; insert liner/coussinet de palier/Gleitlagerschale; Lagerschale; Schale/revestimiento de caquillo de cojinete — сменная деталь подшипника скольжения, внутренняя поверхность которой является поверхностью трения.

Втулка подшипника скольжения; втулка подшипника; втулка/tulejka łożyska/plain bearing bush; bearing bush/bague/Gleitlagerbuchse; Lagerbuchse; Buchse — трубчатый элемент цельного радиального подшипника скольжения, внутренняя поверхность которого является рабочей поверхностью подшипника.

Свертная втулка подшипника; свертная втулка/panewka dwuwarstwowa/wrapped bearing bush; wrapped bush/bague roulée /gerollte Lager-

buchse; gerollte Buchse — тонкостенная втулка, изготавливаемая свертыванием ленты из подшипникового материала и из стали с нанесенным на нее слоем подшипникового материала.

Буртовый вкладыш (втулка) подшипника; буртовый вкладыш (втулка)/panewka kołnierzowa/flanged bearing liner (bush); flanged liner (bush)/coussinet (bague) à collerette/Gleitlagerschale mit Bund (Buchse); Lagerschale mit Bund (Buchse) — вкладыш (втулка) подшипника скольжения, снабженный (ая) буртом с одной или с двух сторон.

Упорное кольцо/pierscień oporowy/thrust washer/rondelle de butée/Gleitlagerscheibe; Lagerscheibe; (Anaufscheibe) — плоское кольцо, обычно устанавливаемое с радиальным подшипником скольжения для восприятия осевых усилий.

Упорное полукольцо/półpierscień oporowy/thrust half-washer/demi-flasque de butée/Gleitlager-Halbscheibe; (Anlauf-Halbscheibe) — часть кольца, которая при сочетании с другой такой же частью образует упорное кольцо.

Полувкладыш подшипника скольжения; полувкладыш подшипника; полувкладыш/półpanewka łożyska ślizgowego/plain bearing half-liner; bearing half-liner; half-liner/demi-coussinet/Gleitlagerschale; Lagerschale; Schale — часть вкладыша подшипника скольжения, охватывающая 180° вала, которая в сочетании с другой такой же частью образует полный подшипник скольжения.

Сплошной вкладыш (втулка)/pełna panewka—tuleja/solid liner (bush)/coussinet (bague) massif (massive)/Massivschale (Buchse) — вкладыш (втулка) подшипника скольжения, состоящая из одного материала.

Многослойный вкладыш подшипника; многослойный вкладыш/wielowarstwowa panewka łożyska/multilayer bearing liner; multilayer liner/coussinet multicouche/Mehrschichtlagerschale; Mehrschichtschale — вкладыш подшипника скольжения, состоящий из слоев различных материалов.

Основа вкладыша/основа подшипника; основа вкладыша/osnowa panewki łożyska/bearing liner backing; liner backing; backing/support; couche—support de coussinet/Lagerstrüttschale; Stüttschale — слой многослойного вкладыша подшипника, на который наносится подшипниковый сплав и который обеспечивает ему необходимую прочность и (или) жесткость.

Антифрикционный слой подшипника; антифрикционный слой/przeciwcierna warstwa łożyska/bearing anti-friction layer; anti-friction layer/couche antifricion/Lagermetallschicht — слой подшипникового материала в многослойном вкладыше подшипника.

Приработочный слой подшипника; приработочный слой/warstwa ułatwiająca dotarcie/bearing running — in layer; running — in layer/couche de rodage/Lagereinlaufschicht; Einlaufschicht — слой материала, наносимый на антифрикционный слой подшипника для улучшения приработки.

4. *Размерные характеристики подшипников скольжения /Wymiarowe charakterystyki łożysk ślizgowych*

Внутренний диаметр радиального подшипника скольжения; внутренний диаметр радиального подшипника/wewnętrzna średnica łożyska ślizgowego/plain journal bearing inside diameter; journal bearing inside diameter; diameter/diamètre intérieur d'un palier lisse radial/Radialgleitlager—Innendurchmesser; Radiallager—Innendurchmesser; Durchmesser/diametro interno del cojinete — диаметр поверхности скольжения радиального подшипника скольжения.

Ширина вкладыша (втулки) подшипника; ширина вкладыша (втулки)/szerokość panewki/bearing liner (bush) width; liner (bush) width/largeur de coussinet (de bague)/Lagerschalen — (Buchsen—) Breite; Schalen — (Buchsen)—Breite — внешний размер вкладыша (втулки) подшипника в направлении оси.

Диаметральный зазор радиального подшипника скольжения; зазор радиального подшипника; зазор/średnicowy luz poprzeczny: łożyska ślizgowego/

diametral plain journal bearing clearance; journal bearing clearance; clearance/jeu diamétral d'un palier lisse radial/Lagerspiel; Spiel/juego radial del cojinete — разность между внутренним диаметром радиального подшипника скольжения и диаметром шейки вала. (Различают «расчетный» и «фактический» диаметральный зазоры радиального подшипника скольжения.)

5. *Специальные материалы для подшипников скольжения и их свойства /Specjalne materiały dla łożysk ślizgowych i ich własności*

Антифрикционный материал; подшипниковый материал/material o niskim współczynniku tarcia—materiał łożyskowy/anti-friction material; bearing material/matériau anti-friction/Lagermaterial/material del cojinete — материал, обладающий комплексом специальных свойств, обеспечивающих возможность его применения для подшипников скольжения.

Спеченный подшипниковый материал; спеченный материал/proszek spiekany/sintered bearing material/matériau fritté/gesinteres Lagermaterial — материал, полученный из спрессованных или спеченных порошков для подшипников скольжения.

Совместимость при трении; совместимость/kompatybilność materiału/frictional compatibility; compatibility/compatibilité/Verträglichkeit/compatibilidad de materiale — свойство подшипникового материала предотвращать схватывание с материалом вала при трении.

Прилегаемость при трении; прилегаемость/dopasowanie przy tarcu/frictional conformability; conformability/conformabilité/Anpassungsfähigkeit — свойство подшипникового материала компенсировать неудовлетворительное начальное прилегание к сопряженной поверхности упругим и пластическим деформированием в слое.

Способность к поглощению твердых частиц/zdolność do inkludowania cząstek stałych/embeddability/pouvoir d'inclusion/Einbettfähigkeit/incrustabilidad — свойство подшипникового материала способствовать поглоще

нию твердых частиц, чтобы уменьшить их царапающее или абразивное действие.

Прирабатываемость/*zdolność do docierania/running — in ability/aptitude au rodage/Einlauffeigenschaften/rodajebilidad*—свойство подшипникового материала уменьшить силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе приработки.

Износостойкость/*odporność na zużycie/wear resistance/résistance à l'usure/Verschleiß widerstand/resistencia al desgaste* — свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Относительная износостойкость/*względna odporność na zużywanie/relative wear resistance/Résistance relative à l'usure/relativer Verschleißwi-*

*derstand/resistencia al desgaste relativa* — отношение износостойкости одного подшипникового материала к износостойкости другого при их изнашивании в одинаковых условиях.

## Список литературы

8.1. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин/Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.

8.2. Международный стандарт ISO 4378/1, 2, 3.

8.3. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 320 с.

8.4. Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М., Браун Э. Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986. 246 с.

Издания, выпускаемые редакцией переводной литературы

1988

- |  |   |  |
|--|---|--|
| Под ред.<br>Дж. Любина                     | Справочник по композиционным США, 1982<br>материалам. В 2-х книгах            |  |
| Вильжер Й.,<br>Николя Ж. П.                | Технология ремонта кузовов Франция, 1985<br>легковых автомобилей              |  |
| Под ред.<br>У. Хегинботама                 | Гибкие сборочные си- Великобритания,<br>стемы 1984                            |  |
| Грэй П.                                    | Логика, алгебра и базы Великобритания,<br>данных 1984                         |  |
| Лори П.                                    | Базы данных для микро- Великобритания,<br>ЭВМ 1985                            |  |
| Пройкшат А.                                | Шасси автомобиля: Типы ФРГ, 1985<br>приводов                                  |  |
| Под ред.<br>Г. Кебнера                     | Промышленное примене- Великобритания,<br>ние лазеров 1984                     |  |
| Рот К.                                     | Алгоритмизация конструи- ФРГ, 1982<br>рования с помощью каталогов             |  |
| Под ред.<br>Г. Гердена                     | Сварочные роботы ГДР, 1985  |  |
| Под ред.<br>Д. Хиллиарда,<br>Дж. Спрингера | Топливная экономичность США, 1984<br>автомобилей с бензиновыми<br>двигателями |  |
| Фроман Б.,<br>Лезаж Ж.                     | ГПС в механической Франция, 1984<br>обработке                                 |  |
| Шпур Г.,<br>Краузе Ф.-Л.                   | Автоматизированное ФРГ, 1984<br>проектирование в машиностроении               |  |
| Кусл Ф.,<br>Крамернус Ф.                   | Домашняя мастерская ЧССР, 1981  |  |

1989

- |                  |   |  |
|------------------|---|--|
| Под ред. Ш. Нофа | Справочник по промышлен- США, 1985<br>ной робототехнике. В 2-х книгах |  |
|------------------|---|--|

Под ред. М.Хебды, А. В. Чичинадзе	Справочник по триботехнике В 3-х томах. Том I	СССР-ПНР, 1989
Под ред. В. Иллингуорта	Толковый словарь по вычислительной технике	Великобритания, 1986
Под ред. М. Джамшиди, Ч. Хергета	Автоматизированное проектирование систем управления	Нидерланды, 1985
Аллегри Т.	Транспортно-складские работы	США, 1984
Асфаль Р.	Роботы и автоматизация производства	США, 1985
Карберри П.	Персональные компьютеры в автоматизированном проектировании	США, 1985
Боянов К. Л. и др.	Персональные компьютеры	НРБ, 1986
Раймпель Й.	Шасси автомобиля: Конструк- ции подвесок	ФРГ, 1986
Ульман Дж.	Базы данных на ПАСКАЛЕ	Великобритания, 1985
Фор А.	Восприятие и распознава- ние образов	Франция, 1985
Парр Э.	Знакомство с микро- ЭВМ	Великобритания, 1984

### Уважаемый читатель!

Для выбора книг просим Вас пользоваться аннотированным планом нашего издательства, который Вы получите в книжном магазине.

Прием Ваших заказов производится ежегодно в марте — июне всеми книжными магазинами на книги выпуска следующего года. Для этого Вам следует направить почтой или оставить в магазине заполненную открытку или гарантийное письмо, если заказчиком является Ваше предприятие.

Чтобы приобрести вышедшие или выходящие в текущем году книги советуем Вам письменно обратиться в республиканский или областной книготорг. Адреса этих организаций Вам сообщат в любом книжном магазине.

Издательство не располагает книгами для продажи, поэтому просим не высылать нам Ваши заявки.