

НБ БГТУ



00017868

620.17	651552
М 54	
Методы испытаний на трение и износ.	
2001	156 р.

22.3.07.	5799	03 ГРП
		Мф

3929 (03 ГРП)  
до 5.68

~~000991 до 19.10.8.~~

5121 04 ГРП  
до 12.6.09.

0.17  
MS4

Серия «Специалист-материаловед»

Л. И. КУКСЕНОВА, В. Г. ЛАПТЕВА,  
А. Г. КОЛМАКОВ, Л. М. РЫБАКОВА

# МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

Справочное издание

651550

**НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА**  
Брянского государственного  
технического университета



Москва  
«ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ»  
2001

400  
57  
57  
63  
69  
74  
77  
79  
81  
84  
86  
87  
88  
89  
91

УДК 669.539  
ББК 30.3  
М54

Специалист-материаловед

Л. И. КУКСЕНОВА, В. Г.

Серия «Специалист-материаловед» основана в 2000 году

Рецензент: докт. техн. наук, проф. В.Ф. Пичугин  
(РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина)

М54 Куксенова Л.И. и др.

Методы испытания на трение и износ: Справ. изд. / Л. И. Куксенова, В.Г. Лагтева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова — М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. — 152 с.: ил. — (Специалист-материаловед)  
ISBN 5-89594-059-5

Изложены основные положения науки о трении, износе и смазке машин. С позиций материаловедения рассмотрены процессы взаимодействия поверхностей, изменений структуры и свойств зоны пластической деформации при трении и разрушении.

Рассмотрены наиболее распространенные методы трибологических исследований, включающие определение площади фактического контакта, микрогеометрических характеристик поверхностей трения, а также структуры и свойств приповерхностных микрообъемов материалов пар трения. Даны примеры комбинирования методов трибологических исследований с методом мультифрактальной параметризации структур.

Приведены сведения о наиболее часто используемых стандартизованных методах испытаний на трение и износ, об основных схемах испытаний, критериях и способах оценки триботехнических характеристик, а также о часто используемых нестандартизованных методах испытаний, их возможностях и конкретных областях применения. Для инженерно-технических работников, занятых конструированием, испытанием и эксплуатацией машин, научных сотрудников, преподавателей вузов, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 669.539  
ББК 30.3

ISBN 5-89594-059-5

© Куксенова Л.И., Лагтева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М., «Интермет Инжиниринг», 2001

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Глава 1. Основы трибологии и триботехники .....	6
Глава 2. Методы трибологических исследований .....	21
2.1. Определение фактической площади контакта .....	22
2.2. Определение характеристик микрогеометрии поверхностей .....	24
2.3. Определение механических свойств поверхностных слоев .....	27
2.4. Исследование структуры поверхности трения .....	34
2.5. Комбинирование методов триботехнических исследований с методом мультифрактальной параметризации структур .....	37
Глава 3. Основные схемы испытаний, критерии и способы оценки триботехнических характеристик .....	57
3.1. Схемы основных лабораторных установок .....	57
3.2. Критерии оценки результатов испытаний .....	57
3.3. Методы оценки износа .....	63
3.4. Методы оценки коэффициента трения .....	69
3.5. Стандартное руководство для измерения и записи коэффициента трения (ASTM G 115—98) .....	74
Глава 4. Стандартизованные методы триботехнических испытаний конструкционных материалов .....	77
4.1. Метод испытаний материалов на износостойкость при ударно-абразивном изнашивании (ГОСТ 23.207—79) .....	77
4.2. Метод испытания материалов о нежестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208—79) .....	79
4.3. Метод испытания металлов на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367—71) .....	81
4.4. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ (ГОСТ 11012—69) .....	82
4.5. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой (РД 50—339—82) .....	84
4.6. Метод испытаний на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя (ГОСТ 23.201—78) .....	86
4.7. Метод испытаний на изнашивание при ударе в условиях низких температур (ГОСТ 23.212—82) .....	87
4.8. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии (ГОСТ 23.211—80) .....	89
4.9. Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами (ГОСТ 23.219—84) .....	91
4.10. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении (ГОСТ 23.204—78) .....	92
4.11. Метод оценки противозадирных свойств машиностроительных материалов (ГОСТ 23.213—83) .....	93
4.12. Метод оценки фрикционной теплоустойчивости материалов (РД 50-662—88) .....	96

2	4.13. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладоновыми смесями (ГОСТ 23.216—84) ....	98
8	4.14. Метод оценки истирающей способности поверхности восстановленных валов (ГОСТ 23.220—84) .....	101
15	4.15. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей (ГОСТ 23.224—86) .....	102
22	4.16. Метод определения триботехнических свойств конструкционных материалов при взаимодействии с волокнистой массой (ГОСТ 23.223—97) .....	107
25	4.17. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима (ГОСТ 23.205—79) .....	108
28	4.18. Материалы смазочные и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине (ГОСТ 9490—75) .....	108
31	4.19. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении (ГОСТ 23.221—84) .....	110
34	4.20. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок .....	112
37	4.21. Стандарты США по методам триботехнических испытаний ....	114
40	<b>Глава 5. Нестандартизованные методы триботехнических испытаний</b> .....	124
43	5.1. Методы испытаний материалов при трении о свободный абразив .....	124
46	5.2. Методы испытаний на гидроабразивную износостойкость материалов .....	127
49	5.3. Метод испытаний на кавитационное изнашивание (КТИП, Г. А. Прейс) .....	128
52	5.4. Методы триботехнических испытаний в вакууме .....	129
55	5.5. Метод триботехнических испытаний конструкционных материалов для пар трения технологического оборудования (НИИТСХМ, ИМАШ РАН) .....	131
58	5.6. Метод испытаний сопряжения торец поршневого кольца — канавка поршня .....	133
61	5.7. Метод триботехнических испытаний сопряжений вкладыш подшипник—шейка коленчатого вала (ИМАШ РАН) .....	134
64	<b>Глава 6. Информационно-поисковая система триботехнических характеристик сопряжений</b> .....	136
67	6.1. Базы данных по триботехническим характеристикам пар трения (БД) .....	136
70	6.2. Информационно-поисковая система (ИПС) .....	137
73	<b>Библиографический список</b> .....	148

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение качества и надежности машин — необходимое условие развития машиностроения. Надежность машин обеспечивается в первую очередь при достижении высокого качества материалов с требуемым уровнем механических свойств.

Чаще всего главная причина выхода машин из строя — износ подвижных сопряжений. Несмотря на это, при проектировании машин оценке материалов на износостойкость не уделяется достаточного внимания. Не всегда используются наиболее эффективные способы снижения трения и износа.

Триботехника (от греческого слова *tribos* — беречь) изучает прикладные аспекты исследований контактного взаимодействия. Потери на трение и износ выражаются в изменении размеров сопрягаемых деталей и снижении точности работы машин.

Проблеме разработки методов лабораторных испытаний конструкционных материалов посвящено множество работ. Известно много методов изучения работоспособности материала в условиях трения и износа. Однако при выборе метода исследователь испытывает большие затруднения из-за предельно малого количества специальной технической литературы, содержащей в совокупности классификацию методов, их сущность, требования к образцам и особенности проведения испытаний.

Поэтому авторы книги стремились:

- обобщить и систематизировать методы трибологических исследований, схемы лабораторных установок и критерии оценки результатов испытаний, на основе чего представить методологию лабораторных исследований разнообразных пар трения;
- описать комплекс отечественных и зарубежных стандартов, методических указаний и рекомендаций по методам испытаний на трение и износ наиболее распространенных пар трения, обратив особое внимание на описание сущности методов, классификацию по объектам испытаний, видам и условиям нагружения, назначению и целям испытаний;
- продемонстрировать и описать распространенные прогрессивные нестандартизованные методы испытаний на трение и износ конструкционных материалов, соответствующую контрольно-измерительную аппаратуру и возможности методов; привести некоторые результаты лабораторных испытаний, систематизированные в виде базы данных триботехническим характеристикам пар трения.

30

-1-

-51

300

## Глава 1. ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

**Трибология** (трибоника) — наука о трении, износе, смазке и взаимодействии контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении. Она имеет следующие научные разделы: трибometriю, трибомеханику, триботехнику, триботехническое материаловедение, трибофизику, трибохимию, химмотологию, трибоинформатику.

**Триботехника** — прикладной раздел трибологии, охватывающий конечную стадию процесса создания трибосопряжений (узлов, деталей и элементов пар трения). Принципы триботехники находят отражение в методах расчета и конструирования, изготовления, испытаний, смазки, эксплуатации, диагностирования и ремонта узлов трения.

**Триботехническое материаловедение** — раздел трибологии, изучающий изменение структуры в поверхностных слоях разнообразных конструкционных материалов под действием условий трения на основе закономерностей трения и изнашивания. Триботехническое материаловедение разрабатывает принципы создания материалов триботехнического назначения с высокой степенью надежности и долговечности в эксплуатации. Выделение этого раздела из общего материаловедения обусловлено специфической взаимосвязью между характеристиками трения и триботехническими свойствами материалов [1].

Трудно назвать другое столь распространенное явление, как трение. Оно сопровождает любые движения физических тел или их частей и накладывает отпечаток на характер этих движений. Известны два понятия: внутреннее и внешнее трение. Трение называется внутренним, если оно сопутствует и противодействует

относительному перемещению частей одного и того же тела (в первую очередь этот термин применяется к жидким и газообразным телам, движение которых отличается легкой подвижностью частей). Основной закон внутреннего трения

$$F = \eta SG,$$

где  $F$  — сила трения,  $G$  — градиент скорости жидкости или газа в выделенном объеме,  $S$  — площадь участка, на который действует сила,  $\eta$  — вязкость [2]. Трение, сопутствующее и противодействующее относительному перемещению двух тел, находящихся в соприкосновении, называется внешним, так как зависит от взаимодействия внешних поверхностей этих тел вблизи участков касания и не зависит от состояния внутренних частей тела.

Основные термины, понятия и определения внешнего трения регламентируются ГОСТ 27674—88 (Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения) [3].

### Общие понятия

**Внешнее трение** — явление сопротивления относительному перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

### Виды и характеристики внешнего трения:

**трение покоя** — трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению;

**трение скольжения** — трение движения, при котором скорости тел в точке касания отличаются по величине и направлению;

**трение качения** — трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению;

**сила трения** — сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами;

**коэффициент трения** — отношение силы трения двух тел к силе нормального давления одного тела на другое.

**изнашивание** — процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

### Виды изнашивания:

1) механическое (абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, гидроэрозионное, газоэрозионное, кавитационное, усталостное, при фреттинге, при заедании);

2) коррозионно-механическое (окислительное, при фреттинг-коррозии);

3) изнашивание при действии электрического тока (электроэрозионное) [3].

**Скорость изнашивания** — отношение величины износа к интервалу времени, в течение которого он произошел.

**Интенсивность изнашивания** — отношение величины износа к пути, на котором происходило изнашивание

**Износ** — результат изнашивания, определяемый в установленных единицах.

**Износостойкость** — свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.

**Смазка** — материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Исследования в области трения и износа имеют давнюю историю. Эволюция взглядов на природу внешнего трения включает несколько направлений [4, 5]:

I — (Паран 1704 г., Эйлер 1748 г.) — объяснение явления трения за счет подъема двух тел по микронеровностям. Формирование этого подхода соответствует эпохе развития механики абсолютно твердых тел;

II — (Гарди 1919 г., Томлинсон 1929 г., Дерягин 1934 г.) — рассмотрение природы трения за счет преодоления сил молекулярного взаимодействия между двумя твердыми телами;

III — (Гюмбель 1920 г., Боуден, Тейбор и др.) — рассмотрение трения как результат пластического оттеснения материала и преодоления мостиков сварки;

IV — комбинированные теории трения. Первая из них была предложена Кулоном (1779 г.) и рассматривала трение как результат преодоления сил сцепления между поверхностями и подъема по микронеровностям. Была предложена двухчленная формула для силы трения

$$F = \mu N + A,$$

где  $N$  — нагрузка,  $\mu$  — коэффициент трения,  $A$  — молекулярная составляющая силы трения.

В настоящее время наиболее широкое развитие получила молекулярно-механическая теория внешнего трения [4]. Она базируется на представлении о двойственной природе трения и дискретном характере контакта между реальными поверхностями твердых тел. Процесс трения и износа при этом рассматривается как состоящий из трех последовательных этапов: взаимодействия поверхностей, изменений материала поверхностных слоев в процессе трения, разрушения поверхностей.

### Факторы, влияющие на внешнее трение твердых тел [4].

- входные — природа трущихся тел, промежуточная среда (смазочный материал), нагрузка, скорость, температура;
- внутренние — изменение шероховатости, изменение свойств поверхностных пленок, тепловыделение, изменение структуры, изменение механических свойств;
- выходные — сила трения, интенсивность износа.

Под влиянием совокупности входных (внешних) факторов происходят глубокие деформационные и физико-химические процессы в материале зоны контактного взаимодействия; при этом выходные параметры (сила и коэффициент трения, износ) могут изменяться в широких пределах в зависимости от каких-либо входных и внутренних параметров.

Для изучения первого этапа процесса трения элементов подвижных сопряжений машин используется обобщенная модель контакта, схема которой приведена на рис. 1.1. Поверхность твердых тел характеризуется микрорельефом. Показатели микрорельефа — отклонение формы, волнистость и шероховатость. При проведении огибающей профиля четко выявляется различие между отклонением формы и шероховатостью. Волнистость характеризует отклонение огибающей профиля от его формы, а шероховатость представляет отклонение действительного профиля от огибающей. Микрорельеф

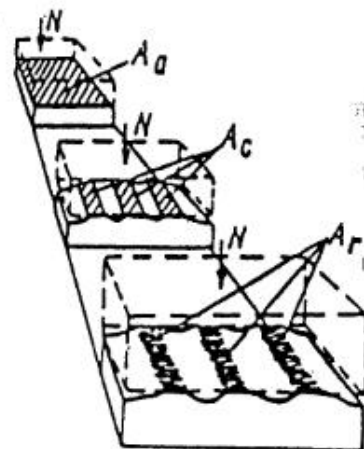


Рис. 1.1. Площади касания шероховатых тел [4]

определяет дискретность контакта. При контактировании поверхностей фактические пятна контакта возникают преимущественно на вершинах волн. Выделяют площади контакта номинальную  $A_n$ , фактическую  $A_f$  и контурную  $A_c$  (предельное значение фактической площади контакта). Площадь фактического контакта  $A_f$  складывается из суммы площадей отдельных пятен касания и зависит от внешней нагрузки  $N$ , механических свойств контактирующих поверхностей. В соответствии с этим различают три вида контактных давлений: номинальное  $P_n = F_N / A_n$ ; контурное  $P_c = F_N / A_c$ ; фактическое  $P_f = F_N / A_f$ .

Согласно молекулярно-механической теории, поверхностные связи при трении формируются вследствие упругопластической деформации поверхностных слоев и адгезионного взаимодействия поверхностей. Формула обобщенного закона трения имеет вид

$$\mu = \frac{\tau_0}{P_f} + \beta + k\sqrt{h/r},$$

где  $\tau_0$  — сдвиговая прочность фрикционной связи (т. е. прочность единичного пятна касания, образовавшегося при одновременном действии нормальных и тангенциальных нагрузок и исчезающей при снятии нормальной нагрузки);  $\beta$  — пьезокоэффициент молекулярной составляющей трения;  $k\sqrt{h/r}$  — механическая составляющая трения ( $h$  — глубина внедрения;  $r$  — радиус единичной неровности).

При трении металлических тел преобладает адгезионное взаимодействие поверхностей. В этом случае коэффициент трения:

$$f \approx \tau/H \text{ или } f = \tau/(H - 2W/X),$$

где  $\tau$  — сопротивление сдвигу,  $H$  — твердость менее прочного металла,  $W$  — удельная энергия адгезии контактирующих металлов,  $X$  — глубина внедрения твердой неровности в поверхность менее прочного материала. Из последней формулы следует, что коэффициент трения зависит от  $\tau$ ,  $H$  — свойств прочности контактирующих поверхностей и от  $W$  — интенсивности адгезионного взаимодействия поверхностей. При этом под адгезией следует понимать все виды межмолекулярного взаимодействия между двумя сближенными твердыми телами, приводящими к образованию прочных связей. На интенсивность адгезионного взаимодействия

металлических поверхностей влияют чистота поверхности, окружающая среда, состав сплавов и кристаллическая структура, температура в зоне контакта и другие факторы. Коэффициент трения металлических материалов на воздухе не превышает 0,5—1,0, а в глубоком вакууме, когда адгезионное взаимодействие существенно больше, может достигать  $\geq 10,0$  [4].

Молекулярно-механическая теория трения включает представления о механизмах взаимодействия сопряженных поверхностей, которые учитывают не только механические, но и физико-химические процессы в «третьем теле», формирующемся в зоне контактного взаимодействия. Изнашивание представляет усталостный процесс; разрушение поверхностных слоев происходит в результате многократного взаимодействия микронеровностей. «Третье тело» является с точки зрения материаловедения главным объектом исследования, в задачи которого входит изучение механических, деформационных и физико-химических процессов в зоне контактного взаимодействия.

*Деформационные и физико-химические процессы в зоне контактного взаимодействия.* С материаловедческой точки зрения трение рассматривается как процесс накопления при контактном взаимодействии условий, приводящих к изменению состава, структуры и свойств материала приповерхностного микрообъема, а также последовательность переходов материала из одного состояния в другое [6]. Установлено, что изменения поверхностей сопровождаются совокупностью последовательных переходов материалов поверхностных слоев из одного структурного состояния в другое. Условия для такого перехода накапливаются при каждом отдельном акте контактирования. В одних условиях эти переходы определяются упруго-пластической деформацией, когда процесс зависит от механических свойств поверхности (пределов прочности, текучести и усталости, твердости и др.), в других — осуществляются более глубокие структурные и фазовые превращения, которые определяются физико-химическими константами материала приповерхностных микрообъемов, работающих на трение (коэффициентами диффузии, теплопроводности, константами растворимости, скоростью химических реакций и др.). Износостойкость определяется структурой материала зоны деформации при трении, в которой реализуются деформационные и физико-химические процессы; при этом под структурой следует понимать эле-

ментный и фазовый составы, тип кристаллической решетки, диффузию и массоперенос, микро- и макроструктуру, дефекты кристаллической решетки.

Напряженно-деформируемое состояние зоны контактного взаимодействия имеет характерные особенности [5]:

- пластическая деформация локализуется в тончайших поверхностных слоях, которые имеют мезоскопический размер по толщине и макроскопический — вдоль поверхности;
- вследствие высоких давлений в зоне контакта, знакопеременного характера приложения сдвигающих напряжений, многократности деформирования, эффекта прямого физико-химического воздействия среды (пластифицирования) наблюдается аномально малая пластичность поверхностных слоев;
- имеет место резко выраженная ориентация структуры поверхностного слоя в направлении относительного перемещения при трении, что приводит к анизотропии свойств деформированного материала;
- изменение свойств материала поверхностного слоя под влиянием внешней среды.

Деформационные и физико-химические процессы идут одновременно, оказывая взаимное влияние, что приводит к нетривиальным явлениям при деформации.

Деформация при трении уменьшается с глубиной поверхностных слоев. На рис. 1.2 приведена схема распределения ротационных структур по глубине зоны контактного взаимодействия. Слой 6, граничащий с основной массой материала, обладает повышенной плотностью

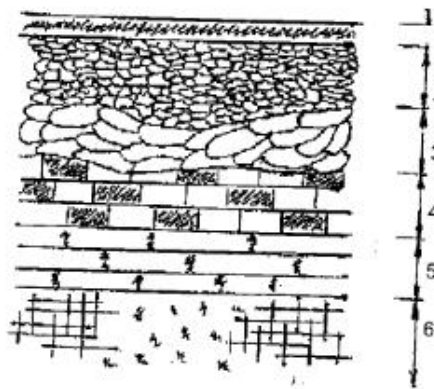


Рис. 1.2. Ротационные структуры в зоне контактного взаимодействия: 1 — слой переноса, 2 — мелкоячеистая фрагментированная, 3 — с неравноосными ячейками, 4 — шашечная, 5 — полосовая, 6 — клубковая и мультипольная структуры [7]

процессы, приводящие к созданию полосовых структур, затем шашечной структуры. В слое 3 наблюдается значительная дисперсия размера дислокационных ячеек и для них характерна неправильная форма. Мелкоячеистая фрагментированная структура 2 представляет собой слой стохастических разориентировок (неравновесный турбулентный хаос), на котором располагается слой перенесенного в процессе контактирования вещества из смазочной среды и сопряженного контробразца [7].

Структурные превращения при трении развиваются в условиях, когда переход механической энергии в тепловую, нагрев и охлаждение поверхности трения происходят со скоростью, намного превышающей скорость нагрева и охлаждения при обычных условиях термической обработки; при этом процессы нагрева и охлаждения идут в локальных микрообъемах материала.

Особенность процессов при трении — материал поверхностного слоя проходит через серию состояний: обратимых (залечивание дефектов), необратимых (приводящих к накоплению повреждений и разрушению), динамического равновесия. Вторичные закалка и отпуск практически всегда наблюдаются при трении. Фазовые превращения при вторичной закалке обусловлены тем, что, во-первых, на участках фактического контакта происходит нагрев до температур выше критических и охлаждение до комнатной температуры с большой скоростью; во-вторых, при наличии высокой степени деформации поверхностного слоя критические температуры могут существенно понижаться; в-третьих, гомогенизация аустенита, растворение и выделение карбидов облегчаются в условиях мелкодисперсной структуры.

Аустенит трения — структура, которая формируется в результате вторичной закалки в процессе трения, мартенсит трения образуется в результате превращения вторичного аустенита. Фазовому превращению  $\alpha \rightarrow \gamma$  способствует большая поверхность соприкосновения фаз. Образовавшийся аустенит при последующем быстром охлаждении превращается в аустенитно-мартенситную структуру с большим количеством аустенита. На свойства структуры трения влияет не только структура стали в исходном состоянии, но температурные и нагрузочно-скоростные условия трения. Аустенит трения характеризуется более высокой твердостью, чем исходный (остаточный аустенит); мартенсит трения резко отличается по тривимости от исходного мартенсита, он

характеризуется более развитой субструктурой и большой напряженностью. Характерная для трения повышенная устойчивость аустенита связана с рядом факторов, и прежде всего с тем, что при микродиффузионном превращении аустенит (образовавшийся из исходного мартенсита) обогащен углеродом и карбидами; мелкодисперсные карбиды, являющиеся центрами кристаллизации, растворены в  $\gamma$ -фазе; превращение аустенита в мартенсит тормозится в условиях свойственной для трения интенсивной пластической деформации.

Для структур вторичного отпуска характерно:

- $\alpha$ -фаза, образующаяся при распаде мартенсита, является более дисперсной и напряженной и обладает повышенной микротвердостью;
- тормозятся распад остаточного аустенита и коалесценция карбидных частиц.

Особое место в совокупности процессов при трении занимают диффузионные явления. Связано это с тем, что при трении тепловые и силовые поля характеризуются нестационарностью и значительными градиентами температур и давлений, что вызывает интенсивный диффузионный обмен, а под действием градиентов давления, температуры и концентрации сплава —  $\Delta P$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta C$  соответственно — возникают направленные диффузионные потоки. При трении давление и температура достигают максимальных значений у поверхности контактирующих тел, поэтому и результирующий диффузионный поток легирующих и примесных элементов будет направлен в зону непосредственного контакта.

В [6] высказаны представления о механизме микродиффузии при трении в результате существования высоких скоростей нагрева, охлаждения и температурного градиента. Приближенно можно оценить время микродиффузионного превращения величиной

$$t = L^2/D,$$

где  $L$  и  $D$  — протяженность пути и коэффициент диффузии.

Кроме обычных направленных диффузионных потоков в зоне поверхностной пластической деформации наблюдается перемещение отдельных атомов и целых комплексов со скоростями на несколько порядков большими, чем при обычных режимах деформации и термической обработки. Эти явления получили название аномального массопереноса при трении, осуществляемого по трем основным механизмам: 1 — кооперативным эффектом в системах

атомных дефектов (под действием локальных напряжений внеатомные атомы распространяются по кристаллу вдоль плотноупакованных направлений со скоростями  $>1$  м/с); 2 — ротационному переносу атомов, комплексов или частиц другой фазы за счет статического взаимодействия и последующего совместного вращения и перехода; 3 — динамической дислокационной диффузии переносу атомов по ядрам движущихся дислокаций) [7].

Таким образом, в совокупности при трении наблюдаются превращения двух основных взаимосвязанных типов: 1 — постепенное накопление повреждений; 2 — скачкообразные изменения (например, фазовые превращения типа  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ , растворение или выделение новых фаз и т.д.). Процесс изнашивания связан с развитием ведущих деформационных и физико-химических превращений и поверхностном слое. Приведем наблюдения [6] микроструктуры, микротвердости и разрушения поверхности цементованной стали 18Х2Н1ВА при трении в паре ролик—ролик со смазочным интервалом, показавшие следующее:

— формируется вторичный аустенит (в первую очередь на участках с первичным аустенитом), в котором наблюдается игольчатый мартенсит;

— в течение длительных испытаний наблюдаются периодические подъемы и снижения микротвердости. Падение твердости совпадает с моментом окончания распада исходного и остаточного мартенсита. С появлением новой структуры — аустенита трения микротвердость вновь возрастает;

— по достижении максимального значения микротвердости в материале поверхностного слоя исчерпывается способность воспринимать пластическую деформацию, начинается резкое разуплотнение и разрушение.

Важным фактором в структуре поверхностного слоя для процесса внешнего трения является различие между прочностью адгезионной связи и прочностью глубже лежащих слоев контактирующих тел. Это условие отражено в правиле положительного градиента механических свойств И. В. Крагельского:

$$d\sigma_x/dZ > 0,$$

где  $\sigma_x$  — напряжение разрушения в направлении плоскости касания,  $Z$  — координата, перпендикулярная плоскости касания. Важно создавать такие условия внешнего трения, при которых это



соотношение не нарушается. Принципиальная особенность внешнего трения — в тонком приповерхностном микрообъеме в результате деформации, диффузии, фазовых и структурных превращений материал имеет характеристики механических свойств, отличающиеся от объема материала. Именно этот слой обеспечивает внешнее трение и триботехнические характеристики, прежде всего — износостойкость. Задача повышения долговечности при трении состоит в том, чтобы создать определенную структуру материала поверхностного слоя контактирующих материалов, обеспечивающую совокупность характеристик механических свойств на макро-, микро- и субмикровывах, определенные соотношения структурных составляющих, приводящих к повышению износостойкости. В зависимости от масштабного уровня изменения структуры эти связи могут быть разными, как это показано на примере наиболее распространенного абразивного изнашивания (рис. 1.3). Видно, что в зависимости от характера структурного упрочнения

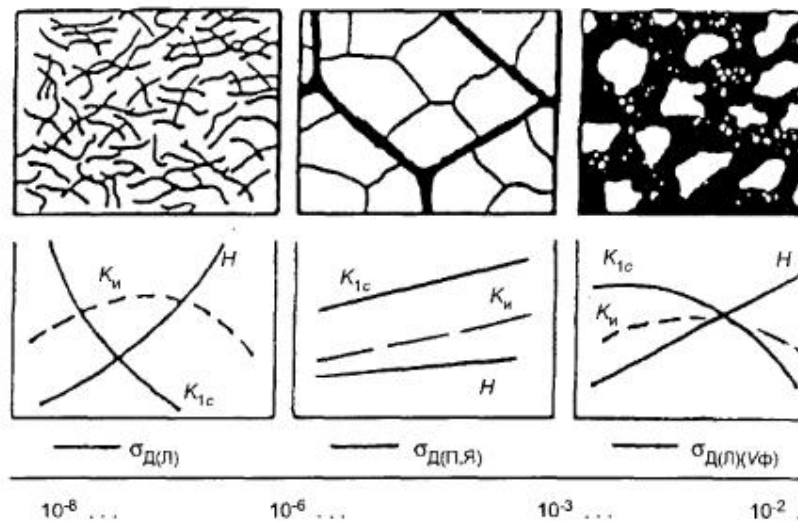


Рис. 1.3. Схема трех уровней структур сплавов и зависимости твердости ( $H$ ), трещино- ( $K_{1c}$ ) и износостойкости ( $K_w$ ) от структурных параметров упрочнения поверхностных слоев:  $\sigma_{d(l)}$  — беспорядочным переплетением отдельных дислокаций,  $\sigma_{d(p,y)}$  — дислокационными ансамблями,  $\sigma_{d(l)(V_f)}$  — дисперсными фазами ( $V_f$  — объемная доля этих фаз) [8]

можно получать разные зависимости коэффициента износа  $K_w$  от соответствующим образом соответствующих уровней изнашивания. В основе достижения требуемых триботехнических параметров лежит методология выбора оптимального сочетания механизмов упрочнения стали и сплавов, как правило, отличающихся для объема материала и его поверхностных слоев.

**Структура металлических материалов, обеспечивающая высокую износостойкость.** Трибосопряжения работают устойчиво, только если контактирующие материалы способны в процессе трения взаимно приспособляться. В этом случае решающее значение принадлежит свойству совместимости трущихся поверхностей [9]. Совместимость — свойство трибосопряжения, реализующееся при испытании в конкретных условиях и определенном смазочном материале, заключающееся в способности твердых тел и смазочного материала создавать в зоне контакта такое структурное и механическое состояние материала, которые обеспечивают заданную долговечность без повреждений узла трения. Процесс совместимости трущихся поверхностей определяется реакцией на ужесточение трения в результате изменяющихся условий работы узла.

Если условия совместимости материалов соблюдаются (а их нарушение проявляется уже на стадии приработки), то в зоне контакта работоспособного сопряжения наиболее износостойки:

во первых, гетерофазные структуры, как правило, твердые кристаллы в более пластичной матрице. Такие структуры стремятся создать при разработке сплавов, в частности для вкладышей подшипников скольжения. При трении на поверхности вкладыша создается характерный микрорельеф за счет твердых включений, который способствует удержанию смазочного материала в зоне трения (правило Шарпи). В антифрикционных алюминиевых сплавах используется обратная комбинация фаз — мягкие включения в твердой матрице. При трении на поверхность вытесняется мягкая структурная составляющая, обеспечивая низкое трение;

во вторых, износостойкие гетерогенные структуры, в которых при изменении внешних условий контактирования (давления, температуры, элементного состава материала), вызванных влиянием механических и тепловых импульсов, а также массопереноса в зоне взаимодействия, успевают пройти обратимые структурно-фазовые превращения, обеспечивающие совместимые структурно-фазовые состояния слоев в конкретных условиях трения. Для создания такой

Брянского государственного  
технического университета

65/552

структуры широко используются разнообразные методы химико-термической обработки. В условиях трения реализуются квазиобратимые процессы типа  $\gamma \leftrightarrow m$  (аустенит  $\leftrightarrow$  мартенсит);  $\gamma \leftrightarrow \gamma' + K$  ( $m \leftrightarrow m' + K$  или  $\alpha \leftrightarrow \alpha' + K$ , т. е. из аустенита, мартенсита или феррита выделяются или растворяются высокодисперсные системы). Эти процессы протекают в твердом состоянии в тончайших поверхностных слоях при скачкообразном изменении  $T, P, C$  [6]. Как правило, процессы типа  $\gamma \leftrightarrow m$  протекают по бездиффузионному механизму, перестройка решетки по временным параметрам соответствует изменениям  $\Delta T$  или  $\Delta P$ ; а процессы  $\gamma \leftrightarrow \gamma' + K, \alpha \leftrightarrow \alpha' + K, m \leftrightarrow m' + K$  протекают по микродиффузионному механизму, однако вследствие высокой дисперсности карбидов процессы также успевают протекать за изменением  $\Delta T, \Delta P$  и  $\Delta C$ . Образование в процессе трения структуры деформируемого поверхностного слоя, в которой реализуются квазиобратимые (с некоторым гистерезисом) процессы приводит пару трения в установившийся режим с минимальным уровнем изнашивания. Задача состоит в том, чтобы подобрать такие режимы технологического процесса, которые обеспечат формирование гетерогенной износостойкой структуры;

в-третьих, износостойкие структуры (практически безызносные), реализующие в сопряжении избирательный перенос. Их высокие триботехнические свойства обусловлены формированием определенного структурного состояния зоны деформации антифрикционного сплава при трении в поверхностно-активной смазочной среде [10]. На рис. 1.4 приведены структурные критерии явления избирательного переноса. Существенное повышение триботехнических характеристик в условиях избирательного переноса сопровождается совокупностью трех структурных превращений. Характеризующие их параметры  $\beta \rightarrow \min, \alpha \rightarrow \min, C_{эл} \rightarrow 0$  при  $h \rightarrow h_{Me}$  (толщина пленки металла) описываются законами, при помощи самоорганизации износостойкой структуры.

**Первое превращение:** формирование на поверхности трения пленки, в частности меди, с характерными законами изменения физического уширения рентгеновских линий ( $\beta$ ) и периода кристаллической решетки ( $\alpha$ ) по глубине зоны поверхностной пластической деформации. Под влиянием пластифицирующего действия поверхностно-активных веществ смазочной среды в поверхностном слое создаются благоприятные условия для выхода дислокаций на поверхность и понижения их плотности в зоне деформации, что повышает деформационную способность материала.

**Второе превращение:** формирование модифицированного подповерхностного слоя. В начальный период трения металлической пары в условиях избирательного переноса в зоне поверхностной пластической деформации идет одновременно формирование подповерхностного слоя (защитной вторичной структуры, представленной, например, пленкой меди) и подповерхностного слоя — границы раздела между поверхностным слоем меди и основным металлом. Как показали результаты эмиссионного микроспектрального и рентгеноструктурного анализов, при трении граница — чаще всего оксидный слой, а при трении в сложных смазочных композициях, содержащих P, Cl, S, — также и их соединения с атомами металла. Элементы, образующие с основой материала соединения, входящие в состав подложки, могут диффундировать как из окружающей среды, так и из объема металла.

**Третье превращение:** формирование эффективного макроскопического диффузионного потока легирующих и примесных атомов по глубине зоны деформации, сопровождающегося их анод-

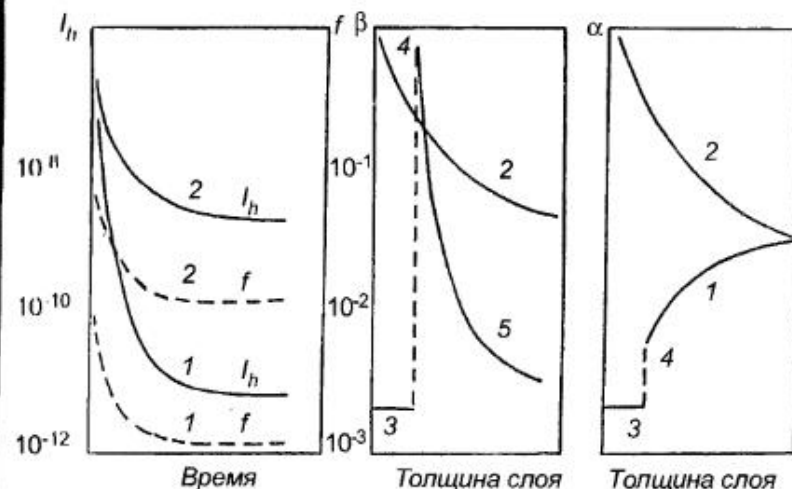


Рис. 1.4. Триботехнические и структурные характеристики поверхностных слоев при трении [10]: 1 — реализация избирательного переноса ( $I_h$  — интенсивность изнашивания,  $f$  — коэффициент трения), 2 — нарушение условий избирательного переноса, 3 — пленка меди, 4 — модифицированный слой, 5 — медный сплав

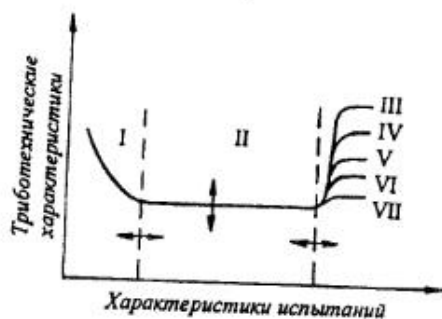


Рис. 1.5. Схема общей закономерности изменения триботехнических характеристик материалов: I — область неустойчивых процессов, II — нормальное механо-химическое изнашивание, III — механическая форма абразивной повреждаемости, IV и V — схватывание, VI — фреттинг-процесс, VII — механо-химическая форма абразивного износа [5]

ным растворением и созданием пленки чистого металла. Коэффициенты диффузии в поверхностных слоях достигают величин близких к термически активируемой диффузии, когда температура близка к температуре плавления исследуемого сплава.

4. На основе разработки физических моделей изнашивания представлений термодинамики необратимых процессов, результатов разнообразных исследований и опыта промышленности теоретически и экспериментально обоснована фундаментальная закономерность трения и изнашивания — явление структурной приспособляемости материалов, которая обеспечивает оптимальную износостойкость. Сущность явления состоит в том, что для всех материалов и смазочных сред существует диапазон нагрузок и скоростей относительного перемещения (рис. 1.5), в котором триботехнические характеристики стабильны и существенно ниже, чем вне этих диапазонов. Границы этих диапазонов обусловлены образованием и свойствами защитных вторичных структур, способных минимизировать разрушение поверхностного слоя и экранировать недопустимые процессы схватывания, усталости и коррозии и др. [5].

Создавая современными методами модифицирования поверхности изделий определенные структурные состояния материалов для узлов трения, можно регулировать вторичные структуры, а тем самым — износостойкость и работоспособность трибосоприжения.

## Глава 2. МЕТОДЫ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Различия в подходах к методам испытаний на трение и износ к известным методам испытаний с целью оценок характеристик триботехнических свойств при объемном нагружении (растяжении, изгибе, кручении, сложноподвижном состоянии, усталости, ползучести и др.) обусловлены разными особенностями процессов объемного и поверхностного разрушений. Согласно [5], процесс объемного разрушения состоит из следующих этапов: локального разрушения, концентрации структурных напряжений, неомогенной микропластической деформации, накопления в микрообъемах критической энергии разрушения, образования и развития трещины, макроразрушений, отрыва. Таким образом, при объемном разрушении протекают взаимосодействующие процессы концентрирования напряжений и резко неомогенно пластической деформации, охватывающей незначительную часть нагружаемого объема материала. Разрушение реализуется локальным упрочнением микрообъемов металлов до критического состояния и последующего разупрочнения микрообъемов зарождения и развития трещин.

Развитие процесса изнашивания реализуется по схеме [5]: макронагружение, поверхностное разрушение, деконцентрация поверхностного нагружения, гомогенизация структурных изменений в поверхностном слое, образование новой фазы (объекта разрушения), образование свободной поверхности на границе раздела новой фазы и исходного материала, микроразрушения, накопление микроразрушений (износ), отказ. Следовательно, при поверхностном разрушении в условиях трения происходят

деконцентрирование напряжений, гомогенизация деформированной структуры в результате повышения равномерности распределения и изменения типа дефектов и ее перехода к ориентированному ультрадисперсному состоянию в условиях стимулирующего действия адсорбции и диффузии активных компонентов среды. В результате возникают вторичные структуры — истинные объекты разрушения при последующем внешнем нагружении узла трения [5].

Материалы, используемые в узлах трения, оценивают в основном по геометрическим, физическим и механическим характеристикам; по собственным фрикционным характеристикам на твердых телах; по испытаниям узлов трения на стендах и в рабочих условиях. Взаимная связь результатов оценки по каждому из этих видов испытаний не всегда однозначна. Причиной этого являются специфические особенности природы трения: формирование в зоне контакта «третьего тела», природа и свойства которого зависят от природы контактирующих поверхностей, доступа окружающей среды в зону контакта, возникающей температуры в зоне контакта. Это значительно осложняет лабораторную оценку материалов триботехнического назначения. Рассмотрим основные лабораторные методы исследования поверхностей трения с целью оценки их геометрических параметров и свойств материала при поверхностного микрообъема.

## 2.1. Определение фактической площади контакта

*Оптические методы* разработаны для двух случаев: оба контактирующих тела прозрачны и прозрачно только одно тело [4]. Прозрачные образцы приводят в соприкосновение под действием нагрузки. Пучок света, пропущенный через образцы в направлении действия нагрузки, отклоняется от этого направления и частично рассеивается только в местах, где он переходит из более плотной среды в менее плотную, т. е. там, где неровности не взаимодействуют. Наблюдая образцы на просвет, определяют площадь контакта визуально или фотометрированием.

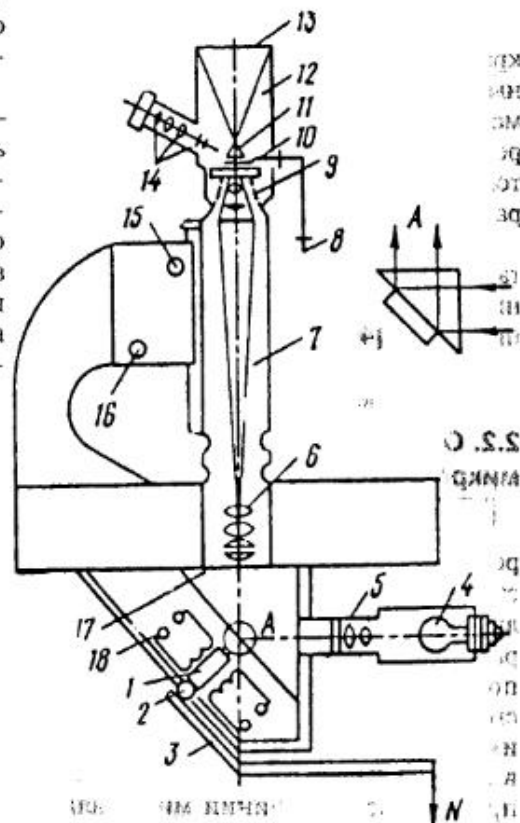
Для пары, в которой только один образец прозрачен, метод определения площади фактического контакта основан на явлении

нарушения полного внутреннего отражения света в местах контакта оптически прозрачного материала с непрозрачным (металлом Мехлау). Площадь контакта фотографируют на фотопленку. Этот метод нашел наиболее широкое распространение; его достоинством является достаточно высокая точность получаемых результатов. На рис. 2.1 приведена схема прибора (на базе светового микроскопа) для измерения фактической площади контакта [4]. Площадь контакта фиксируется на фотопластинке. Для исследования зависимости площади фактического контакта от температуры прибор снабжен специальной камерой нагрева.

Оптические методы широко применяют для решения ряда контактных задач. Их основной недостаток — необходимость оптически прозрачных образцов, что значительно ограничивает возможности применения.

*Электрический метод* дает возможность измерения площади фактического контакта по изменению переходного электросопротивления в результате увеличения площади пятен контакта при повышении нагруз-

Рис. 2.1. Схема прибора для измерения фактической площади контакта [4]: 1 — образец, 2 — шарик, 3 — разжимная система, 4 — лампа накаливания, 5 — микрофотонасадка, 6 — объектив, 7 — тубус, 8 — затвор, 9 — окуляр, 10 — рычаг, 11 — пружина, 12 — микрофотонасадка, 13 — фотопластинка, 14 — система линз, 15 и 16 — маховички для грубой и точной настройки, 17 — пружина, 18 — камера нагрева мощностью 100—150 Вт



ки. Точность метода недостаточно высока [4], но он может служить средством оценки относительного изменения площади фактического контакта при изменении внешних параметров трибологических испытаний.

*Акустический метод* основан на том свойстве, что контакт твердых тел в зависимости от соотношения фактической и номинальной площадей контакта является в большей или меньшей степени проницаемым для упругих волн (в частности, ультразвуковых). При рассмотрении зоны контакта как третьего тела полагают, что ультразвук проходит через трехслойный материал, состоящий из двух контактирующих тел и расположенного между ними слоя определенной толщины с экспериментально определяемыми свойствами.

*Методы информаторов*, в качестве которых используют пудры, краски, радиоактивные вещества, тонкие фольги и т.п., основаны на том, что при контактном взаимодействии изменяются форма, размеры, состояние поверхности информатора. Точность определения размеров фактической площади контакта определяется толщиной слоя информатора, которая должна быть в несколько раз меньше высоты неровностей поверхности.

*Расчетные методы* определения фактической площади контакта. Этому вопросу посвящено большое количество работ разных научных школ, систематизацию которых можно найти, например, в [4].

## 2.2. Определение характеристик микрогеометрии поверхностей

Характеристики микрогеометрии поверхностей трения определяют профилографами-профилометрами. Наиболее распространенными из отечественных являются «Калибр-201» и «Калибр-253». Параметры микрогеометрии оценивают на основе обработки профилограмм (рис. 2.2). Средняя линия профиля на профилограмме должна быть горизонтальной. Профилограммы снимают на трассе длиной, равной базовой  $L$ . Средняя линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии минимально, называется базовой ли-

нии. Чаще всего оценивают следующие параметры шероховатости [4]:

- опорную кривую профиля,
- радиус кривизны вершины неровности  $r$ ,
- расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины  $R_{\max}$ ,
- среднее арифметическое отклонение профиля

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx,$$

высоту неровностей профиля по десяти точкам

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 H_{\max i} + \sum_{i=1}^5 |H_{\min i}| \right),$$

отклонение одного из пяти наибольших максимумов от средней линии  $H_{\max i}$

отклонение одного из пяти наибольших минимумов профиля от средней линии  $H_{\min i}$

Для профилографирования, как правило, выбирают наиболее характерные участки, а профилограмму снимают не менее чем с пяти мест поверхности. Если на профилограмме заметна волнистость, то уменьшают длину каждого участка профилограммы (увеличивают их числа).

Наиболее важные характеристики микрогеометрии поверхности и способы их оценки.

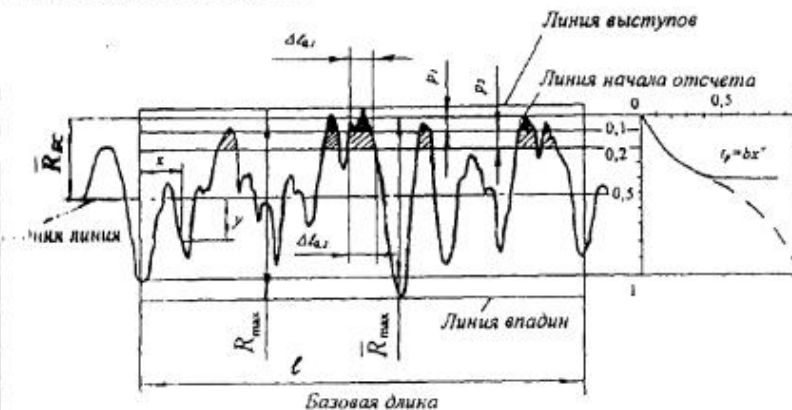


рис. 2.2. Учетка профилограммы [4]

**Опорная кривая профиля  $\eta p$ .** Для ее построения руководствуются ГОСТ 2789—73. Величина опорной длины профиля  $\eta p$  представляет сумму длин отрезков на базовой длине, отсекаемых уровнем  $p$  в материале профиля линией, эквидистантной средней линии. На практике в основном используется относительная опорная длина профиля  $t p = \eta p / \ell = b \cdot x^v$ .

Для определения параметров  $b$  и  $v$  на профилограмме определяют нулевой уровень, проводя линию, параллельную средней, на расстоянии  $R_{BC}$ . От этого уровня проводят параллельные прямые на расстояниях  $0,1R_{\max}$ ,  $0,2R_{\max}$ ,  $0,3R_{\max}$ , которые определяют уровни при относительных сближениях  $x_1 = 0,1$ ,  $x_2 = 0,2$ ,  $x_3 = 0,3$ . Для каждого уровня определяют суммарную длину сечений выступов

$$\ell_{0,1} = \sum \Delta \ell_{0,1}; \ell_{0,2} = \sum \Delta \ell_{0,2}; \ell_{0,3} = \sum \Delta \ell_{0,3}$$

и относительные площади  $t_{0,1} = \frac{\ell_{0,1}}{k\ell}$ ;  $t_{0,2} = \frac{\ell_{0,2}}{k\ell}$ ;  $t_{0,3} = \frac{\ell_{0,3}}{k\ell}$ ,

где  $k$  — число рассматриваемых профилограмм базовой длиной  $\ell$ . Далее решают систему двух уравнений для уровней 1 и 2, 1 и 3 и 2 и 3 вида  $t p = b \cdot x^v$  и получают значение  $b$  и  $v$ :

$$v_{1,2} = \frac{\lg(t_{0,1}/t_{0,2})}{\lg(x_1/x_2)}; b_{1,2} = \lg t_{0,1} - v \lg x_2;$$

$$v_{1,3} = \frac{\lg(t_{0,1}/t_{0,3})}{\lg(x_1/x_3)}; b_{1,3} = \lg t_{0,1} - v \lg x_3;$$

$$v_{2,3} = \frac{\lg(t_{0,2}/t_{0,3})}{\lg(x_2/x_3)}; b_{2,3} = \lg t_{0,2} - v \lg x_3.$$

Для конечной оценки  $b$  и  $v$  принимают их средние значения

$$v = (v_{1,2} + v_{1,3} + v_{2,3})/3; b = (b_{1,2} + b_{1,3} + b_{2,3})/3.$$

**Радиус закругления вершины неровности  $r$ .** Для определения  $r$  снимают профилограммы в продольном и поперечном направлениях.

Среднее значение  $r$  для данного направления оценивают по формуле

$$r = \left( \gamma_n \sum \frac{d_i^2}{8h_i} \right) / \gamma_n^2 n$$

где  $\gamma_n$  — вертикальное и горизонтальное увеличение соответственно,  $n$  — число анализируемых неровностей;  $d$  — длина сечения профиля на расстоянии от вершины неровности  $0,3R_a$  и  $0,05R_{\max}$  от базового уровня;  $h$  — высота неровности, лежащая выше уровня  $x = 0,3$ , рис. 2.2).

Среднее значение  $r$  определяют как среднее из значений продольного и поперечного радиусов закругления вершин неровностей.

При нерегулярном характере шероховатостей среднее значение  $r$  определяют по формуле

$$r = \frac{1}{n} \sum (2\pi^2 R_a m_n),$$

где  $m_n$  — число максимумов на всех участках;  $n_n = (\sum n_i) / \ell$  (число сечений оценивают по пересечению профиля со средней линией на всех участках и делят на суммарную длину этих участков; максимумы принимают неровности, высота которых от ближайшей впадины  $\geq 0,05R_{\max}$ ).

Угол наклона боковых сторон профиля к средней линии  $\theta$  определяют по формуле

$$\theta = 0,4 R_a n_n.$$

**Параметры волнистости.** Практика экспериментальных исследований показала, что распределение материала волн подобно распределению материала шероховатости, поэтому оно аппроксимируется также степенной функцией:

$$C_w = C_w x_w^{\alpha_w},$$

где  $C_w$  и  $\alpha_w$  — параметры опорной кривой волнистости. Для различных методов обработки поверхностей  $C_w = 2$ ,  $1,75 < \alpha_w < 2,8$ .

## 1. Определение механических свойств шероховатых слоев

Современное состояние теории и науки о трении и износе позволяет прогнозировать триботехнические свойства материала различным путем по характеристикам механических свойств. Укажем основные из них.

**Твердость** — определяет величину взаимного внедрения микронеровностей трущихся поверхностей и, следовательно, харак-

теризует механическую составляющую силы трения. От величины твердости зависят фактическая площадь контакта и объем материала, вовлеченного в деформацию. Так как при трении взаимодействуют поверхностные слои, то важно определять не общую, а микротвердость.

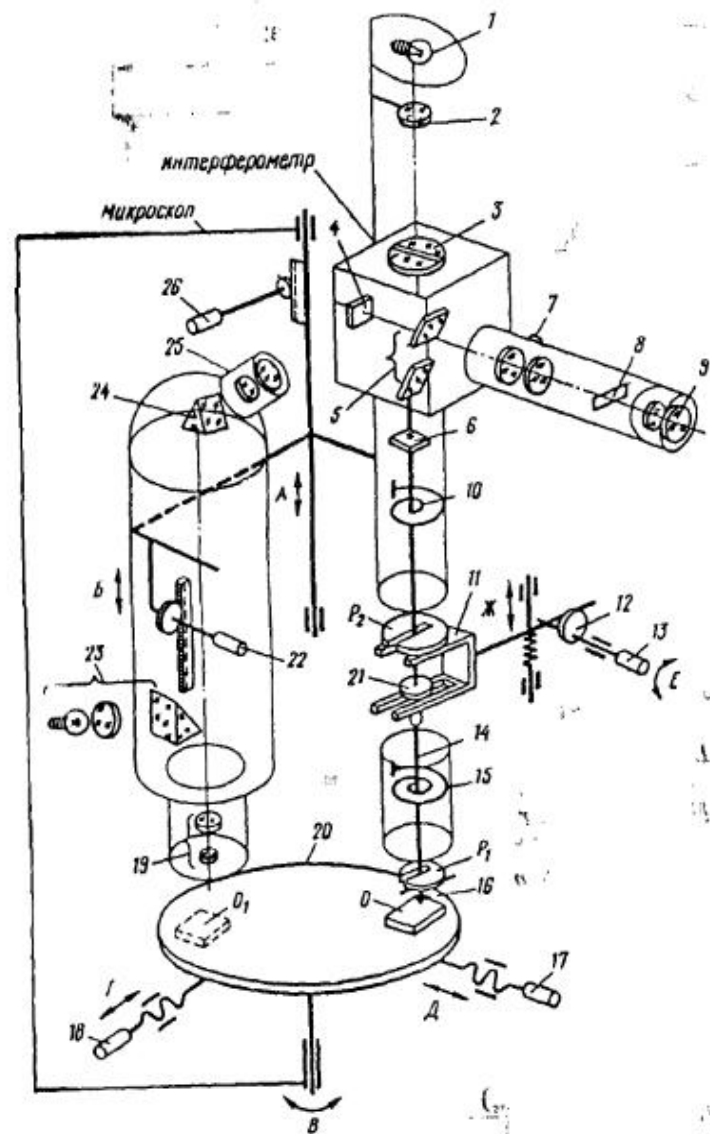
Для оценки микротвердости в триботехнических исследованиях широко применяется специальный интерференционный микротвердомер (рис. 2.3), разработанный Е. С. Берковичем [1]. Свет от источника 1 через коллектор 2 и щель 3 попадает на разделительные пластины 5 интерферометра; затем лучи, отражаясь от зеркал 4 и 6 (неподвижного и подвижного соответственно), вновь проходят через пластины 5 в визирную трубу с объективом 7, шкалой 8 и окуляром 9. Микроскоп состоит из окуляра 25, призмы 24, объектива 19 и осветительной системы 23. Перемещение в вертикальной плоскости механизма нагружения с интерферометром и микроскопом происходит при вращении винта 26. Винт 22 предназначен для самостоятельного вертикального перемещения (в направлении *Б*) микроскопа в случае юстировки прибора. Поворотный столик 20 вращается на 180° вокруг оси *В* и может независимо перемещаться в горизонтальной плоскости (в направлениях *Г* и *Д*) при вращении микрометрических винтов 17 и 18.

Измерение проводят следующим образом. После выбора образца под микроскопом  $O_1$  столик поворачивают в положение  $O$  и нагружают предварительной нагрузкой  $P_1$  и основной нагрузкой  $P_2$ . Отсчет глубины внедрения ведут по шкале 8. При выдержке под нагрузкой наблюдают ползучесть материала. Если снять основную груз  $P_2$ , то полосы интерференции пойдут по шкале в обратном направлении, и можно оценивать упругое восстановление. Далее арретиром 13 возвращают шток 14 в исходное положение, поворачивают столик 20 в исходное положение и посредством микроскопа оценивают длину диагонали. Схема перемещений при вдавливании индентора 16 представлена на рис. 2.4. Этот метод позволяет оценить следующие характеристики:

— твердость по невосстановленному отпечатку,  $\text{Па} \approx \text{Н/м}^2$

$$H_h = P/S = 3784P/h^2,$$

где  $P$  — нагрузка, Н;  $S$  — условная площадь боковой поверхности отпечатка,  $\text{м}^2$ ;  $h$  — глубина отпечатка, м;



1.3. Схема интерференционного твердомера (модель 270): пружинные опоры, 11 — специальное приспособление, 12 — эксцентрик, 13 — арретир, 14 — груз, 15 — грузоприемная площадка, остальные обозначения — в тексте

— характеристику упругих свойств:

$$Upr. = \frac{h_{y.v.}}{h_{общ}} \cdot 100\%;$$

— характеристику пластических свойств:

$$Пласт = \frac{h_p}{h_{общ}} \cdot 100\%;$$

— характеристику ползучести:

$$Полз. = \frac{h_{полз}}{h_{общ}} \cdot 100\%.$$

**Модуль упругости.** Контактный модуль упругости для мягких металлов и сплавов, пластмасс определяют на приборе КУМ, схема которого и фотография зоны контакта приведены на рис. 2.5. Плоско-выпуклая линза с помощью нагружающего устройства прижимается к образцу, укрепленному на подвижном столике, и по величине диаметра пятна контакта, наблюдаемого с помощью светового микроскопа, оценивают контактный модуль упругости

$$E = 0,6 \frac{Nr}{d^3},$$

где  $N$  — нагрузка,  $r$  — радиус индентора,  $d$  — диаметр пятна контакта.

**Динамическую твердость** определяют на приборе МИТ по принципу соударения вращающегося шара с исследуемым объектом (рис. 2.6). Отношение работы, затраченной на пластическую деформацию поверхностного слоя образца, к объему восстановленного отпечатка является величиной динамической (ударной) твердости материала:

$$H_{уд} = \frac{6mg(h_{под} - h_{отс})}{\pi(3r^2 + t^2)},$$

где  $m$  — масса шара,  $g$  — ускорение свободного падения,  $r$  и  $t$  — соответственно радиус и глубина восстановленного отпечатка.

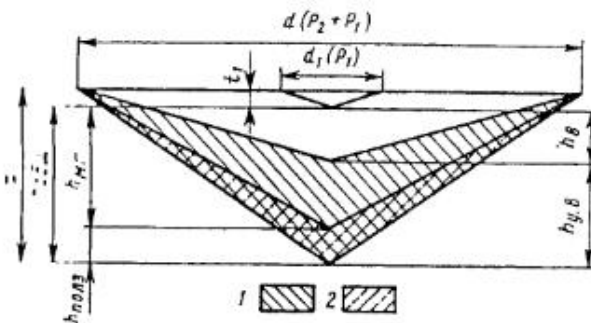
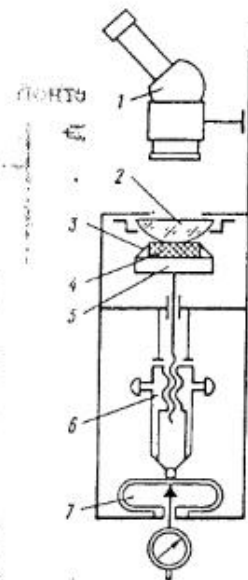


Рис. 2.4. Схема перемещений при вдавливании индентора: 1 — ползучесть, 2 — упругое восстановление;  $d(P_2 + P_1)$  — диагональ отпечатка под действием основной  $P_2$  и предварительной  $P_1$  нагрузок;  $d_1(P_1)$  — диагональ отпечатка от предварительной нагрузки  $P_1$ ;  $t$  — глубина отпечатка под действием  $P_2 + P_1$ ;  $h_{общ}$  — глубина отпечатка под действием  $P_1$ ;  $h_{MT}$  — глубина отпечатка от действия  $P_1$ ;  $h_{полз}$  — дополнительная глубина отпечатка в результате ползучести;  $h_{у.в.}$  — суммарная глубина отпечатка  $h_{MT} + h_{полз}$ ;  $h_{у.в.}$  — упругое восстановление отпечатка;  $h_p$  — остаточная глубина отпечатка от пластической деформации

Рис. 2.5. Принципиальная схема прибора КУМ [4]:

- 1 — стереоскопический микроскоп,
- 2 — линза,
- 3 — держатель,
- 4 — образец,
- 5 — подвижный предметный столик,
- 6 — устройство нагружения,
- 7 — динамометр





По формуле Герца рассчитывают динамический модуль упругости. Для одноименных материалов образцов и шара

$$E = 0,6 \frac{(1-\mu)^2 r^3 H_{гц}^2}{\pi g h_{гц}}$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Оценка характеристик пластичности основана на том, что эластичность пластической деформации вокруг отпечатка индентора при одинаковой глубине внедрения  $h$  тем больше, чем выше пластичность материала. На рис. 2.7 приведена схема сечения отпечатка при оценке пластичности поверхностных слоев. Пластичность характеризуется отношением  $h/d$ . Наилучшее пластичное поведение характеризуется отношением  $h/d$ . Наилучшее пластичное поведение характеризуется отношением  $h/d$ . Наилучшее пластичное поведение характеризуется отношением  $h/d$ .

Оценка характеристик фрикционной усталости проводится прибором циклометр (рис. 2.8). Плоский образец 2 в виде диска диаметром 10 мм устанавливается на вращающемся предметном столике 1 и к нему прижимают сменный неподвижный индентор соединенный с измерительной балочкой 4. Нормальная нагрузка на индентор создается грузами 6. Двигатель 13 обеспечивает частоту вращения предметного столика от 20 до 200 об/мин, а двигатель 14 — частоту вращения индентора.

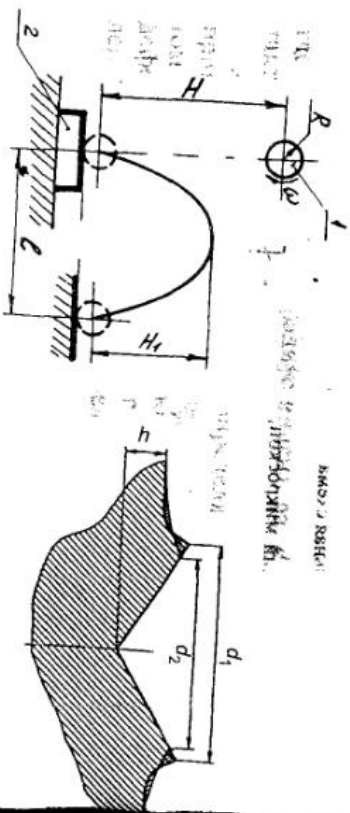


Рис. 2.6. Схема испытаний при определении динамической твердости и динамического модуля упругости на приборе МИТ-1 [4]

Рис. 2.7. Сечение отпечатка при оценке пластичности материала

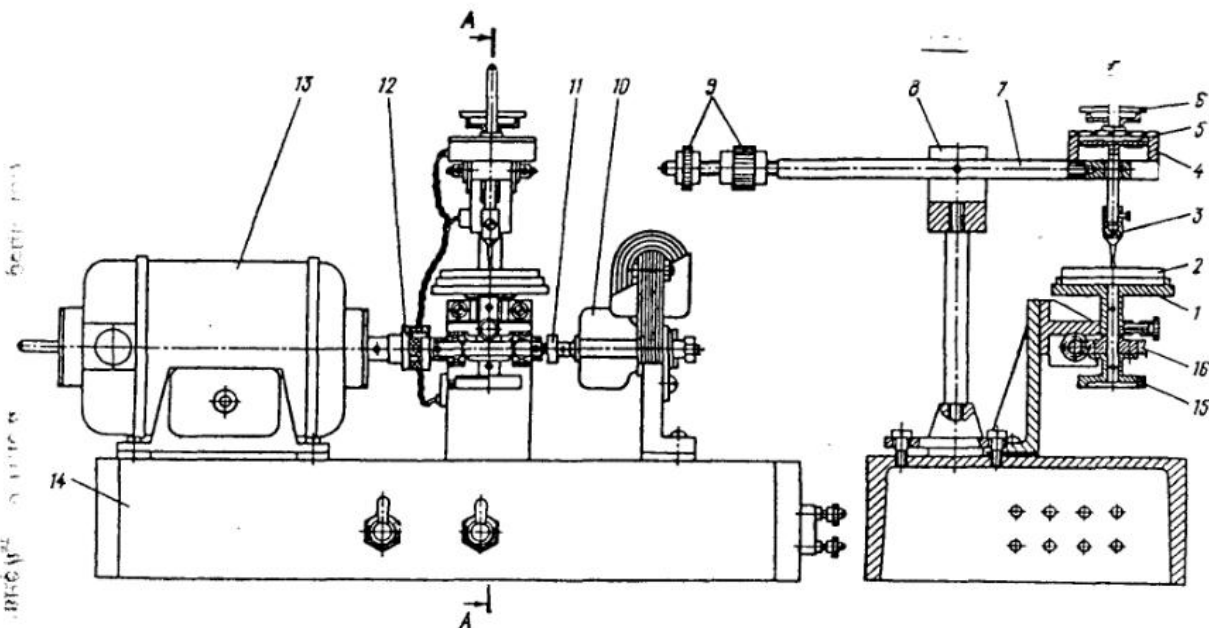


Рис. 2.8. Схема прибора циклометр [4]: 7 — рычаг, 8 — стойка, 9 — балансирные грузы, 11 и 12 — муфты сцепления, 14 — основание, 15 — контактное устройство, 16 — червячный редуктор, остальные обозначения в тексте

тель  $10$  — от 1 до 30 об/мин. Испытания проводят при нормальной нагрузке на индентор, исключая режущее. Качество поверхности контролируют с помощью профилограмм поверхности трения образца и поверхности контакта индентора. После некоторого числа взаимодействий  $n_f$ , зависящего от величины внедрения, наступает интенсивное разрушение. Развитие разрушения поверхности контакта прекращается после определенного числа циклов  $n_f^*$ . По результатам испытаний строят зависимость величины деформирующего напряжения от числа циклов. Коэффициент усталости определяют по углу наклона кривой, величину  $\sigma_0$  определяют экстраполяцией экспериментальных значений  $\sigma_i$  при  $n_f = 1$ . Таким образом, в методе оценки фрикционной усталости определяется число циклов до разрушения по числу его фрикционных взаимодействий к моменту появления частицы износа.

#### 2.4. Исследование структуры поверхности трения

Применение того или иного метода исследования поверхности трения обусловлено характерными масштабными уровнями, на которых реализуются процессы пластичности и разрушения. Кроме того, эти процессы реализуются в условиях локальных температур и давлений, а тончайшие поверхностные слои обладают повышенной физической и химической активностью. Поэтому значительные ограничения имеют методы, в которых для полной оценки структурных изменений используют химическое травление или электролитическое полирование, которое в условиях градиента свойств по глубине зоны контактного взаимодействия приводят не только к перераспределению несовершенств структуры и напряжений, но и к возникновению дополнительных напряжений значительного уровня.

Методом структурных исследований посвящено много специальной литературы, отметим лишь некоторые методы исследования поверхностей трения в соответствии с характерными масштабными уровнями.

1. *Микроскопический масштаб.* Исследования проводятся на атомном уровне  $h_d \approx a$  (где  $a$  — период решетки) и на дислокаци-

онном уровне  $h_d = 1/\sqrt{\rho}$ , где  $\rho$  — плотность дислокаций. При плотности дислокаций  $\rho = 10^{14} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$  величина  $h_d \approx 10^{-8} - 10^{-7} \text{ м}$ , что соответствует нескольким десяткам до нескольких сотен периодов кристаллической решетки. Исследования на этом уровне проводят по традиционным методикам структурных исследований. Это методы электронной микроскопии с ее обширными возможностями в отношении «просматриваемых» методов, высоковольтной, растровой, сканирующей, автоионной и др. Взаимодействие электронного пучка с облучаемым объемом вызывает ряд эффектов, на регистрации которых основан ряд методик исследования элементного состава: спектро스코пии Оже-электронная, рентгеновская фотоэлектронная, потеря энергетических электронов, ультрафиолетовая фотоэлектронная.

2. *Межоскопический масштабный уровень* имеет размер от долей до нескольких микрометров. Этот уровень наиболее важен для исследования процессов при трении и изнашивании. Наиболее информативен для выявления связи структуры и триботехнических свойств, а также механизма разрушения зоны контактного взаимодействия метод рентгеноструктурного анализа.

Одной из разновидностей РСА является метод скользящего пучка рентгеновских лучей, специально разработанный для изучения поверхностей трения [10], получивший широкое распространение для анализа покрытий, состояния материала после различных методов направленного изменения свойств поверхности и целей. Рассмотрим его некоторые особенности.

На рис. 2.9 приведены схема съемки по методу скользящего пучка рентгеновских лучей и путь луча в материале при съемке. Пучок лучей с анода трубки с линейчатым фокусом, пройдя систему специально сконструированного коллимационного устройства под строго фиксированным углом, падает на поверхность исследуемого объекта. Отраженные лучи в зависимости от метрологического обеспечения регистрируются ионизационным или фотографическим методом. Основная особенность метода — использование узкого ( $\sim 10 \text{ мкм}$ ) практически параллельного пучка лучей, что создает возможность проведения съемки при углах наклона  $\alpha$  к исследуемой поверхности  $\leq 1$  град (в зависимости от шероховатости) и получать информацию о слоях до  $10^{-8} - 10^{-7} \text{ м}$  в зависимости от природы металла и излучения.

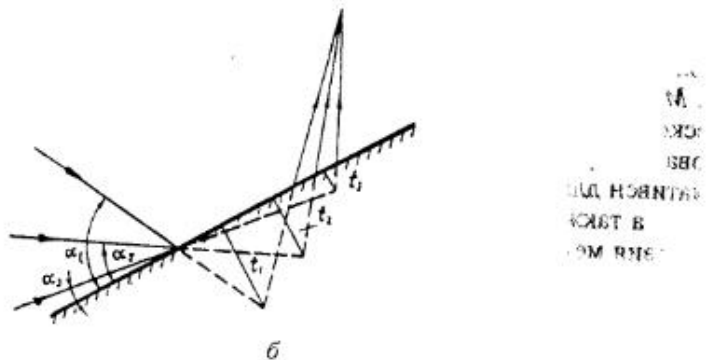
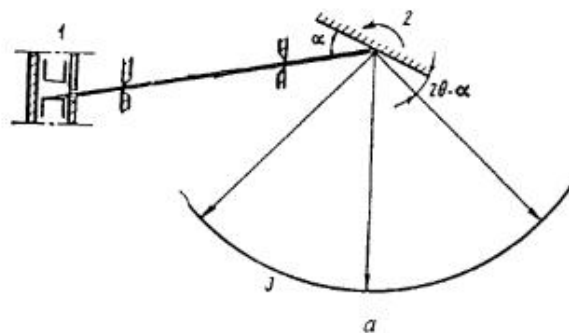


Рис. 2.9. Схема рентгено съемки (а) и путь луча в материале (б) при исследовании методом скользящего пучка [10]: 1 — рентгеновская трубка, 2 — образец, 3 — пленка (счетчик)

Поверхностные слои при трении имеют мезоскопический масштаб по нормали к поверхности трения и макроскопический масштаб в перпендикулярном направлении (вдоль поверхности). Эта особенность вызывает гетерогенность свойств поверхности со смешанными характерными масштабами, что проявляется и по толщине слоев, которые могут отличаться по структуре, химическому и фазовому составу, т.е. поверхностная деформированная и модифицированная при трении зона представляет специфический композиционный материал. Поэтому применение методик неразрушающего послойного анализа зоны трения является непременным условием адекватной оценки процессов пластичности и разрушения при трении.

2) **Макроскопический масштаб** — слои, в которых возможно изменение свойств по основным неоднородностям и поведение которых рассматривается, как правило, с использованием методов анализа упругопластической среды. Характерный размер  $h_m \cdot 10^6$  м. Эти слои чаще всего исследуются стандартными дифракционными методами (рентгено-, нейтронографическими), как наиболее информативными о связи между характеристиками механических свойств материала и структурой.

## 2.5. Комбинирование методов триботехнических исследований с методом мультифрактальной параметризации структур

### Количественное описание вложенных структур и концепция фракталов

При решении задач триботехники важно установить взаимосвязь структуры материалов (как исходной, так и формирующей) и процесса трения с триботехническими характеристиками [10, 12–17]. Среди наиболее часто изучаемых при этом можно назвать структуру поверхностных слоев, геометрическую структуру рельефа поверхности трения (топографическую), структуру образующихся в процессе трения налетов и пленок и др. Для сравнения и дифференцирования сходных структур и сопоставления их с триботехническими характеристиками материалов необходимо количественное описание изучаемых структур (параметризация).

Традиционное описание структур в материаловедении основано на их приближенном представлении геометрическими объектами с целыми размерностями (точки, линии, поверхности и их совокупности, в частности трехмерные фигуры). Но при обычных подходах к количественному описанию структуры материала (в частности, в металлографических исследованиях) используются параметры, характеризующие не структуру в целом, а отдельные ее элементы. Примерами таких параметров могут быть размеры зерен, агломератов, блоков или частиц, степень их вытянутости, локальные характеристики шероховатости поверхности и т.п. Современные компьютерные технологии обработки изображений структур по-

звонят использовать эти параметры с дополнительной статистической обработкой. В частности, можно получать такие характеристики, как средний размер зерен или частиц, их распределение по размерам, плотность границ зерен и дислокаций, усредненные значения шероховатости, соотношения структурных составляющих, протяженность границ фаз, пористость и т.д. Оправданные в ряде случаев, такие подходы недостаточны при описании материалов систем со сложной и неоднородной структурой.

Современные представления о структуре материала базируются на рассмотрении его как открытой нелинейной системы. При этом свойства материала в условиях внешних воздействий определяются процессами структурообразования при обмене системой энергией, веществом и информацией с окружающей средой [18—23]. Указанные процессы в большинстве случаев носят необратимый и неравновесный характер, связаны с нарушением симметрии в системе и приводят к образованию в системах пространственных (и/или временных) структур. При направленном характере взаимодействия между системой и внешней средой формируются устойчивые регулярные стохастически самоподобные структуры на разных масштабных уровнях, в том числе возникает упорядоченность на крупномасштабном уровне. Для обозначения этого явления был предложен термин «самоорганизация» [24—27]. Макромасштабный характер упорядочения приводит при описании системы к необходимости выделения ее отдельных частей (подсистем) [25]. Трибологические процессы при трении и износе материалов зависят от многих параметров, поэтому более адекватное их описание связано с использованием системного подхода [28]. Подход к проблемам трибологии с позиций общей теории систем был предпринят в [29—32]. Работы по систематизации трибологических проблем включены в программу работы «International Research Group on Wear of Engineering Materials» [28]. Эта группа определила трибологическую систему как открытую и динамическую, действующую с целью преобразования движения, энергии, информации или массы. Дальнейшее развитие системного подхода в трибологии было связано с формированием двух новых взаимодополняющих направлений — синергетики [16, 17, 26, 33] и мезомеханики [34].

Традиционные методы параметризации структур материалов не позволяют описывать сложное строение материала количественно и плохо подходят для использования в указанных научных направ-

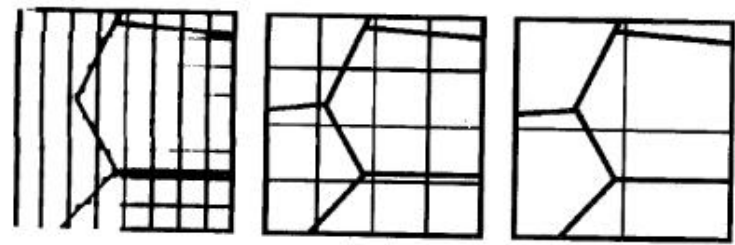
лениях. В частности, они не учитывают одно из важнейших качеств — *целостность*, выражающуюся в неопределимости свойств целого из суммы свойств составляющих ее элементов и наоборот [35]. Одним из перспективных направлений в решении задачи количественного описания структур материалов является их параметризация, основанная на использовании теории фракталов. Открытая Б. Б. Мандельбротом [35] общая закономерность геометрических свойств физического мира, проявляющаяся в самоподобии и фрактальности, нашла многочисленные приложения в материаловедении и дала новые возможности для описания внешне неупорядоченных микроструктур материалов и поверхностей разрушения с использованием строгих количественных терминов [26, 36]. В целом применение фракталов с реальными природными объектами не вызывает затруднений. Согласно Мандельброту, *фракталом* условно принято считать структуру, состоящую из частей, которые в каком-то смысле подобны целому [35, 37]. Например, береговые линии, изломанные границы зерен, профили поверхностей разрушения и т.п. при различных увеличениях выглядят сходным образом, а их длина  $L$  в некотором ограниченном диапазоне масштабов зависит от длины отрезка  $l$  приблизительно степенным образом:  $L \sim 1/l^D$ . Такие зависимости в логарифмических координатах выглядят линейными и называются графиками Ричардсона. Свойство самоподобия можно выразить алгебраически при введении понятия фрактальной размерности: если структуру можно разбить на  $N$  подобных одна другой частей и самой структуре частей в  $1/r$  раз ( $r < 1$ ) меньшего размера, то ее размерность определяется формулой:  $D = \lg(N)/\lg(1/r)$ , где  $D$  — *фрактальная размерность*. В материаловедении примерами фрактальных структур могут служить совокупность пор, границы зерен, трещины, поверхности разрушения и т.п. К настоящему времени разработан и опробован ряд экспериментальных методов определения фрактальной размерности структур, в частности и для применения в мезомеханике [26, 36]. Эти методы основаны на модельном подходе к природным фракталам как регулярным и, возможно, самоподобным. Для наглядности предназначены в основном для определения фрактальной размерности кривых на плоскости (профили поверхностей, сетчатые структуры и т.п.) или объемных структур (например, поверхности разрушения) при их сечении плоскостью. Однако модельные регулярные фрактальные структуры, которые можно построить с помощью рекуррентных (повтор-

ных) процедур разбиения или сложения и описать с помощью величины  $D$ , мало пригодны для моделирования природных объектов, так как, обладая дискретным набором размерностей, не могут охватить всего разнообразия. Реальные структуры металлических материалов являются стохастическими фракталами, т.е. самоподобными только в среднем. Поэтому на сегодняшний день твердо установлен непреложный факт: самоподобные диссипативные структуры не поддаются простому анализу на основе исследования только геометрического самоподобия с использованием величин фрактальной размерности [26,36—39].

### Мультифрактальная параметризация структур

Одним из перспективных путей решения задачи количественного описания структур в физике конденсированных сред является использование подходов теории информации [19—22]. Этот путь предполагает единое обоснование математического описания материальных и знаковых систем в естественных науках и основано на использовании обобщенной меры информации преобразования, которая в конкретных частных случаях сводится к известным, количественным мерам информации. При этом классические количественные меры информации выступают в качестве мерила нарушения симметрии в исследуемых системах. Частным случаем информации преобразования является мультифрактальная информация, на основе которой строится информационная интерпретация мультифрактального формализма. Эта интерпретация позволила создать методологию цифровой мультифрактальной параметризации структур реальных материалов [38—40]. На настоящий момент можно сказать, что в природе нет абсолютно фрактальных или нефрактальных структур. Все структуры рассматриваются как потенциально мультифрактальные с той или иной степенью адекватности применения мультифрактального описания. В рамках данной методологии можно наиболее адекватно (по сравнению с другими существующими в настоящее время способами) количественно описывать самоподобие диссипативных структур (а также структур с неоднородным распределением элементов) и давать оценку конфигурации исследуемой структуры в целом, в том числе определять количественные меры однородности и упорядоченности изучаемых структур. При этом количественно

параметры выводятся из плоских изображений исследуемых структур с помощью компьютерного алгоритма [39,40]. В рамках наиболее простого варианта методологии мультифрактальной параметризации можно свести к следующему. Первоначально обработка структур заключается в их аппроксимации цифровыми компьютерными изображениями. Цифровые изображения изучаемых структур представляют собой совокупности точек-пикселей, с соответственной цветовой характеристикой, которая фактически выражается целым числом. В противном случае элементарным ячейкам-пикселям, входящим в состав элементов структуры, присваиваются значения «1», а областям, занятой элементами изучаемой структуры, — «0». Исходные изображения структур должны быть высокого качества: высококонтрастными, с четко различимыми элементами исследуемой структуры, так как важно, чтобы ячейки со значением «1» (или «0») соответствовали именно элементам структуры, а не шуму или артефактам. Далее используется метод генерации мер огрубления разбиений (MГМОР) [40], согласно которому число ячеек  $N_k$  или сумма всех чисел на изображении структуры и полу-  
рассчитывается для каждого пиксела. На основе этой меры генерируются огрубленные разбиения изображения на большие ячейки  $2 \times 2$  и т.д. пикселей, простым сложением мер отдельных  $2 \times 2$  и укрупненных ячеек. Таких разбиений можно сделать очень много, если удачно выбрать размер изображения в пикселях. На рис. 2,10 приведена схема построения огрубленных разбиений. Таким образом, получают несколько (много) равнозначных разбиений с размерами ячеек из заданного набора  $\{l_k\}$  и



10. Различные разбиения плоскости изображения на ячейки различных размеров (на рисунке изображена верхняя структура)

мерами  $\{\mu_{ik}\}$ ,  $i = 1, \dots, N_k$ , определенными по заданным мерам элементарных ячеек. Таким образом, для каждого разбиения на более крупные ячейки размером  $l_k \times l_k$  строится характеристическая функция в виде равноячеечного распределения единиц ( $\mu_i = M_i / \Sigma M_i$ , где  $M_i$  — количество единиц в  $i$ -й крупной ячейке,  $\Sigma M_i$  — общее количество единиц в матрице крупных ячеек,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ). Далее по набору величин  $q$  из определенного интервала (не более  $[-200, 200]$ ) производится вычисление как традиционных мультифрактальных характеристик:  $f(\alpha)$ - и  $D_q$ -спектров размерностей Ре [27, 28], так и мультифрактальных характеристик из так называемых псевдоспектров [21, 22, 40] (рис. 2.11). Корректность спектров проверяется по ряду критериев, например  $f(q_1) \leq f(q_2)$  и  $\alpha(q_1) \leq \alpha(q_2)$  для  $0 \leq q_2 \leq q_1$ . Конечные выходные мультифрактальные характеристики вычисляются как средние величины по нескольким корректным спектрам. Компьютерные расчеты проводятся с использованием специальной компьютерной программы MFRD, разработанной Г. В. Встовским [19, 20].

Согласно теоретическим [19–21] и экспериментальным [22, 36, 38–40] исследованиям в целях количественной параметризации целесообразно использовать такие мультифрактальные характеристики, как обобщенные энтропии (размерности) Ре  $D_q$  (при положительных  $q = \max$ , в нашем случае  $q_{\max} \leq 200$ ) и эффективные количественные характеристики однородности и упорядоченности  $\Delta_q$  при положительных  $q = \max$ . При этом используются «нисходящие» ветви канонических мультифрактальных спектров и «восходящие» ветви псевдомультифрактальных спектров. Характеристики  $D_q$  несут некоторую количественную

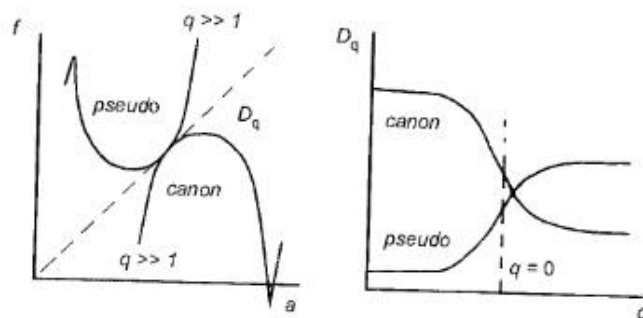


Рис. 2.11. Типичный вид канонических и псевдомультифрактальных спектров

информацию о термодинамических условиях формирования изучаемых структур [19, 21, 22]. В некоторых случаях можно сказать, что большие значения  $D_q$  (при  $q \gg 1$ ) соответствуют большим значениям энтропии [19, 21, 22, 40]. В связи с этим величина  $D_q$  может использоваться в качестве эффективного средства при распознавании изучаемых структур материалов, неразличимых или слабо различимых при использовании традиционных количественных методов. Иначе говоря, существует возможность, с одной стороны, анализировать структуры, полученные в одних и тех же условиях, а с другой — устанавливать взаимосвязь с условиями формирования структур. Показатель  $\Delta_q$  отражает степень упорядоченности и нарушения симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом. Увеличение (по модулю)  $\Delta_q$  для исследуемых структур показывает, что в структуре становится более упорядоченной составляющей, система накапливается информация (нет энтропии) и в ней возрастает степень нарушенной симметрии. Величины  $\Delta_q$ , полученные из канонических и псевдоспектров, отражают несколько разную упорядоченность. Показатель  $\Delta_q$ , полученный из канонических спектров, отражает степень упорядоченности и нарушения симметрии для макроконфигурации исследуемой структуры, а для псевдомультифрактального спектра — микроконфигурации. Величина  $\Delta_q$  отражает усредненную степень нарушения локальной симметрии меры изучаемой структуры по отношению к мультифрактальному преобразованию.

#### Примеры применения мультифрактальной размерности к объектам триботехники

Анализ пористой структуры износостойких оксидных покрытий. Процесс оксидирования оксидных покрытий толщиной 50–400 мкм методом анодного оксидирования в водном электролите (МДО-покрытие) является одним из перспективных методов улучшения износостойкости и других эксплуатационных характеристик сплавов типа дуралюминов. Рабочий слой покрытия состоит из частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , преимущественно в виде клубков нитевидных монокристаллов [41–45]. В [41] МДО-покрытия формировали под воздействием микропузырьковых разрядов в слабощелочном водном электролите, содержащем гидроксид калия (KOH) с концентрацией 2–4 г/л и жидкое стекло (ЖС)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0–6 г/л) при плотности тока 15 и 30 А/дм<sup>2</sup> до максимально возможной толщи-

ны (в течение  $\leq 5$  ч), после чего шлифовали. Распределение пор по объему материала покрытия было изотропно (на  $1 \text{ мм}^2$  изучаемой поверхности шлифов приходилось 2300–2800 пор), а средний размер пор составлял 7–12 мкм [42–45]. Структура пор в покрытии и его максимальная толщина непосредственно связаны с формированием покрытий при горении микродуговых разрядов, на границе покрытия с подложкой (катодные разряды) и на внешней, контактирующей с электролитом поверхности формирующегося покрытия (анодные разряды). При изменении режима формирования покрытия, полученного на одном и том же сплаве, состав покрытия остается практически постоянным, в то же время сильно изменяется структура пор в покрытии (рис. 2.12), которая и оказывает определяющее влияние на его характеристики.

Испытания на трение и износ проводили на установках [15,46] по схеме «диск-палец» при трении образца с МДО-покрытием по закрепленным абразивным частицам (абразивный круг из карбида кремния зеленого КЗ [47]) зернистостью  $< 0,070 \text{ мм}$  и  $HV = 32 \text{ ГПа}$  с движением образца все время по свежей абразивной поверхности (т.е. путь трения представлял спираль Архимеда). Использованные установки для испытаний на износ аналогичны известной машине трения М. М. Хрущева–М. А. Бабичева (Х4-Б) [48] и соответствуют испытаниям на абразивное изнашивание по ГОСТ 17367–71 и стандарту DIN. Скорость скольжения колебалась в диапазоне  $0,6–1,0 \text{ м/с}$ . Испытания проводили при удельных нагрузках —  $0,25–1,25 \text{ МПа}$  (рабочее значение  $0,5 \text{ МПа}$ ). Результаты испытаний оценивались по линейному износу покрытий  $l_n$ , мм, и интенсивность изнашива-

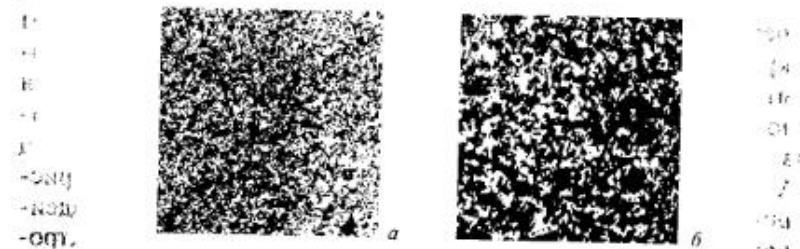


Рис. 2.12. Аппроксимированные изображения шлифов МДО-покрытий на сплаве Д16. Режимы нанесения: КОН (4 г/л) + ЖС (2 г/л), а —  $15 \text{ А/дм}^2$ , водный электролит; б —  $15 \text{ А/дм}^2$  [41]

ния  $I_n = l_n/l_t$  подсчитывалась как интегральная характеристика износостойкости, где  $l_t$  — путь трения, мм.

Была проведена мультифрактальная параметризация структуры пор в МДО-покрытиях на сплаве Д16Т с целью оптимизации режимов их получения и свойств [41]. Для мультифрактального анализа использовались черно-белые компьютерные изображения в формате РСХ  $480 \times 480$  пикселей, полученные сканированием микрофотографий шлифов основного рабочего слоя покрытия ( $\times 100$ ). Каждый пиксел черного цвета (значимая ячейка) соответствовал области поверхности, приходящейся на поры (рис. 2.12). Расчеты проводились методом МГМОР. Применяемая в то время компьютерная программа получала для каждой микрофотографии только один набор  $f(\alpha)$ - и  $D_q$ -спектров для  $q \in [-40;40]$ . Использовался интервал масштабов  $k = 1, \dots, 6$ ,  $l_k = 2^{(k+1)} = 4, 8, 16, 32, 64, 128$ . [41].

Обнаружены корреляции мультифрактальных характеристик структур пор в покрытиях с их эксплуатационными свойствами (рис. 2.13, 2.14), тогда как пористость покрытий ( $P$ ) не коррелировала ни с одним из эксплуатационных свойств. Применение мультифрактальной параметризации позволило выявить два оптимальных режима формирования МДО-покрытий на сплаве Д16Т (см. рис. 2.14). Для покрытий с требуемой рабочей толщиной  $300–400 \text{ мкм}$  оптимальными значениями технологических параметров являются: плотность тока  $< 30 \text{ А/дм}^2$ , соотношение количеств жидкого стекла (ЖС) и КОН в электролите —  $\text{ЖС/КОН} = 0,75$ , а для покрытий с требуемой рабочей толщиной меньше  $200 \text{ мкм}$ :  $15 \text{ А/дм}^2$  и  $\text{ЖС/КОН} = 0,5$ .

*Описание топографических структур (геометрических структур рельефа) поверхности материалов.* Триботехнические свойства материалов в значительной степени зависят от микрогеометрии их поверхности [12,13,15]. При описании микрогеометрии поверхности (иначе — топографической структуры, структуры поверхностных

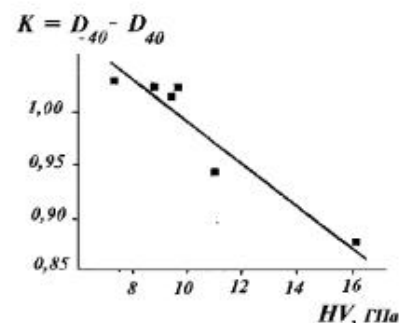


Рис. 2.13. Корреляция между значениями микротвердости покрытий  $HV$  и значениями показателя скрытой упорядоченности  $K$  структуры пор покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $K_{\text{кор}} = 0,97$  [41]

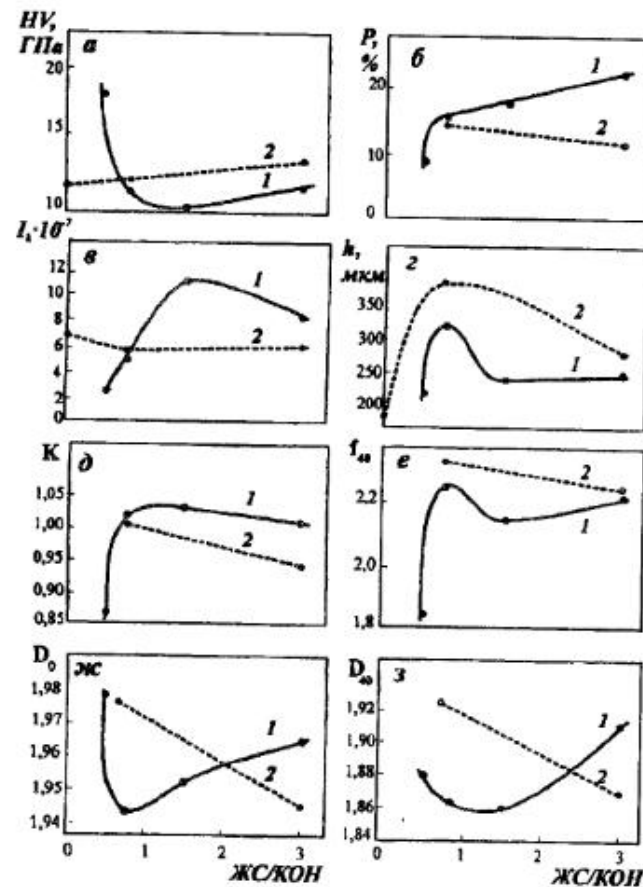


Рис. 2.14. Зависимости свойств покрытий — микротвердости (а), пористости (б), интенсивности изнашивания (в), максимальной толщины покрытий (г) и мультифрактальных показателей, характеризующих степень скрытой периодичности структуры пор (д) и степень ее однородности (е), а также обобщенных размерностей Реньи  $D_0$  (ж) и  $D_{40}$  (з) от величины ЖС/КОН. Цифрами 1 и 2 соответственно отмечены зависимости для 15 и 30 А/дм<sup>2</sup> [41]

дефектов или микроотклонений поверхности от номинальной формы) иногда выделяют такие составляющие, как волнистость (периодические отклонения от номинальной формы, представляющие примерно равные по размерам возвышенности и впадины), шероховатость поверхности (нерегулярные отклонения от номи-

нальной формы волнистой поверхности) и субмикрошероховатость поверхности (более мелкие отклонения на поверхностях микронеровностей) [13]. Такое разделение имеет условный характер из-за неоднозначности и наложения масштабных интервалов этих составляющих.

Традиционно количественные характеристики для описания рельефа поверхности материала получают на основе изучения профиля ее поверхности (сечения перпендикулярной к ней плоскостью). Такими характеристиками могут быть: шаг  $S_B$  и высота  $H_B$  волны, кривизна выступов вершин волн  $R_B = S_B^2/8H_B$ , средний радиус кривизны волн вдоль и поперек направления обработки материала  $R_B = (R_B^{\parallel} \cdot R_B^{\perp})^{1/2}$ , высота микронеровностей профиля  $R_{\sigma}$ , среднее значение отклонения профиля  $R_{\sigma}$ , средний шаг микронеровностей  $S_{\sigma}$ , максимальная высота микронеровностей  $R_{\max}$  (см. п. 2.2) [13]. Подобные количественные характеристики представляют собой статистически обработанные параметры локальных элементов топографической структуры, причем даже не поверхности, а ее одного или нескольких профилей. Как отмечалось, более адекватное количественное описание топографической структуры поверхности можно получить с использованием концепции фракталов [26,27,35—37].

Сопоставления мультифрактальных характеристик топографических структур поверхности материалов с их триботехническими свойствами еще не проводилось, однако применение мультифрактального анализа позволило количественно подразделять структуры, которые при использовании традиционных характеристик не различаются.

Опубликованных работ по использованию мультифрактальной параметризации реальных трехмерных рельефов поверхности пока нет. В связи с этим рассмотрим примеры использования мультифрактальной параметризации для двумерных моделей трехмерных топографических структур (наиболее известной двумерной моделью трехмерной топографической структуры является топографическая карта, на которой трехмерность рельефа отображается линиями равной высоты — изогелиями). На практике можно предложить следующую классификацию топографических структур: 1) с резко различающимися и имеющими достаточно четкие границы элементами рельефа или состоящие из участков с разным типом рельефа, 2) с плавными переходами между элементами рельефа, 3) с большим количеством трудноразличимых эле-



ментов и участков рельефа. Для первого типа структур аппроксимация в двумерные матрицы может проводиться прямым выделением интересующих элементов или участков структур с последующим исследованием распределения выделенных элементов или участков на плоскости продольной проекции. Для второго и третьего случаев нужно использовать более сложные подходы.

*Пример параметризации топографической структуры с резко различающимися и имеющими достаточно четкие границы элементами рельефа.* В процессе эксплуатации или технологической обработки поверхности материалы могут испытывать абразивное воздействие. В связи с тем, что механические свойства материалов в значительной мере зависят от состояния их поверхности, более полное описание эволюции топографической структуры поверхности (структуры поверхностных микродефектов) при абразивном механическом воздействии представляет интерес как для оценки остаточной работоспособности материала, так и для оптимизации технологических режимов обработки. Абразивное воздействие на поверхность моделировалось на примере молибденовых проволок  $d = 1$  мм, последовательно обрабатываемых наждачными бумагами разной зернистости в продольном направлении [49, 50]. Общий вид поверхностей проволок после волочения показан на рис. 2.15. Примерные значения абсолютной максимальной глубины поверхностных микродефектов  $R$  (равной ширине [51, 52]) и относительной максимальной глубины  $R/d$  ( $d$  — диаметр образца) указаны в табл. 2.1. Зависимость механических свойств от шероховатости поверхности была немонотонной (рис. 2.16). До определенного критического значения величины  $R/d < 0,02$  увеличение размеров дефектов поверхности не вызывает заметного снижения механических свойств. При  $R/d > 0,02$  наблюдается ухудшение механических свойств с ростом

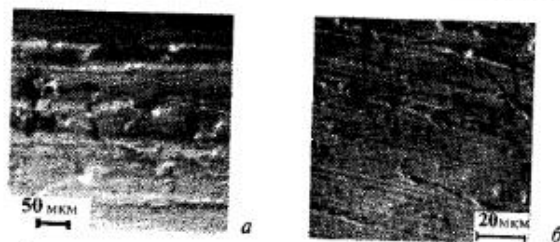


Рис. 2.15. Общий вид поверхности молибденовых проволок (REM) после волочения с  $R/d = 0,044$  (а) и  $0,010$  (б)

Таблица 2.1  
Основные мультифрактальные характеристики топографических структур поверхности Мо-проволок  $d = 1$  мм после обработок различными наждачными бумагами, а также механические свойства соответствующих образцов

Максимальный размер поверхностных микродефектов						
$R$ , мкм	44	38	25	20	15	10
$R/d$	0,044	0,038	0,025	0,020	0,015	0,010
Некоторые мультифрактальные характеристики						
$D_0 = f_0$	1,9162	1,9755	1,9792	1,9792	1,9767	1,9493
$D_1 = f_1 = a_1$	1,8079	1,9380	1,9413	1,9576	1,9400	1,8964
$D_2$	1,7532	1,9081	1,9086	1,9385	1,9128	1,8564
$D_{40}$	1,6857	1,7486	1,6888	1,7405	1,7249	1,5799
$f_{40}$	1,8502	1,1173	0,2768	0,2112	0,1509	0,0585
$\Delta_{40} = D_1 - D_{40}$	0,1222	0,1894	0,2525	0,2171	0,2151	0,3165

величины поверхностных дефектов. Критическое значение величины  $R/d = 0,02$  отвечает эффективной глубине поверхностного дефекта с наиболее интенсивными процессами пластической деформации и разрушения. В то же время, количественной корреляции между показателями механических свойств и величиной  $R$  или  $R/d$  не наблюдается.

В связи с этим для исследования эволюции топографической структуры поверхности использовалась мультифрактальная параметризация. Дискретная аппроксимация участков поверхности размером  $64 \times 64$  мкм осуществлялась разбиением изображения сеткой из  $64 \times 64$  ячеек и присвоением ячейкам, приходящимся на область микродефекта, значений «1», а на область, где  $R < 1$  мкм — значений «0» (рис. 2.17). Расчеты мультифрактальных характеристик (табл. 2.1) проводились по методу МГМОР с набором масштабов  $l_k = 4, 6, 8, 10, 12, 16, 21, 32$  при  $k = 1, \dots, 8$ . Обнаружено немонотонное увеличение индекса упорядоченности  $\Delta$  с уменьшением относительного размера дефекта  $R/d$  (рис. 2.18, б). Этот эффект связан с тем, что на один тип топографической структуры (имеющийся в начальном состоянии после волочения) при обработке наждачными бумагами накладывается другой, более ровный и регулярный

тип структуры, образуемый меньшими по размеру и типу поверхностными дефектами [49, 50]. Каждая последовательная обработка все более тонкими наждачными бумагами дает новую популяцию дефектов, но не уничтожает полностью следы первоначальных крупнейших дефектов. Как только достигается размер дефектов порядка  $R/d = 0,02$ , следы начальных крупнейших дефектов, а следовательно, и остатки топографической структуры уничтожаются, уничтожается и периодическая составляющая (упорядоченность), оставшаяся после волочения. Таким образом, уменьшение  $\Delta_{40}$  при  $0,025 > R/d > 0,015$  (рис. 2.18, б) может быть интерпретировано как своеобразный аналог динамического фазового перехода, когда в ходе эволюции структуры под действием внешнего воздействия один ее тип в результате постепенного накопления количественных изменений в определенный момент полностью сменяется другим. Изменение индекса однородности  $f_{40}$  с уменьшением относительного размера дефектов  $R/d$  подтверждает проявление указанного эффекта в «критической точке»  $R/d = 0,025$ .

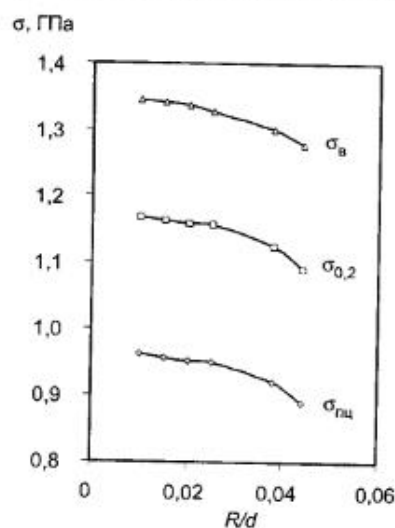


Рис. 2.16. Зависимость механических свойств проволоочных образцов (предела пропорциональности  $\sigma_{тц}$ , условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и предела прочности  $\sigma_b$ ) от относительного размера поверхностных микродефектов  $R/d$  [49, 50]

ет проявление указанного эффекта в «критической точке»  $R/d = 0,025$ . Корреляции  $f_{40}$  с механическими свойствами показаны на рис. 2.19. Аналогичной корреляции для  $\Delta$  не наблюдается. Однако если отбросить точки, в которых «локально» снижается  $\Delta$ , то можно обнаружить линейную корреляцию  $\Delta - \sigma$  с коэффициентами корреляции 0,99. Это позволяет предполагать, что для случая, когда эволюция структуры металлической поверхности идет в рамках одного типа (на поверхности присутствует набор микродефектов примерно одинакового типа), по-видимому, будет также и количественная корреляция механических свойств и  $\Delta$ . Данный пример показывает, что использование мультифрак-

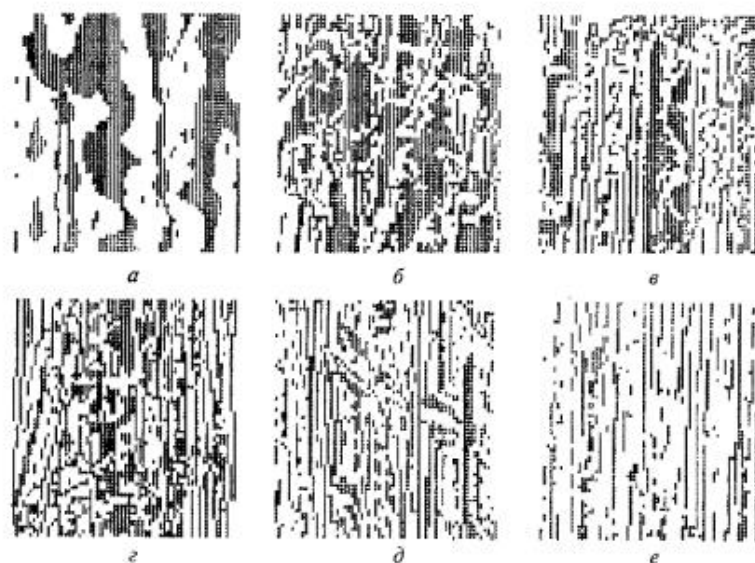


Рис. 2.17. Аппроксимированные изображения состояний топографической структуры поверхности Мо-проволок после волочения: а —  $R/d = 0,044$ , б —  $R/d = 0,038$ , в —  $R/d = 0,025$ ; г —  $R/d = 0,020$ ; д —  $R/d = 0,015$ ; е —  $R/d = 0,010$  после обработки наждачными бумагами (размер  $64 \times 64$  мкм). Черные квадратик на изображениях соответствуют значениям «1»

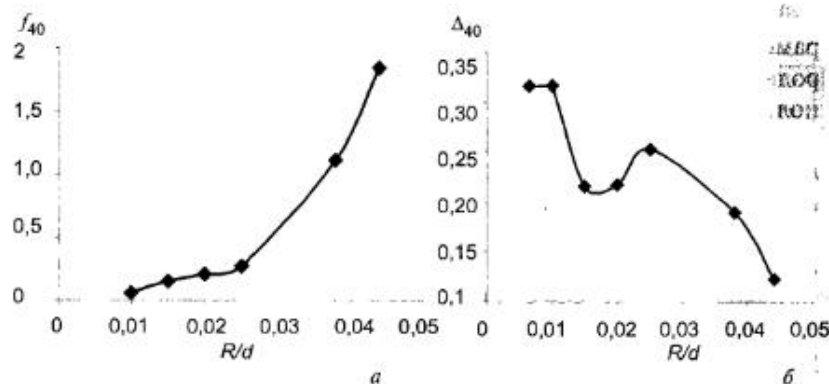


Рис. 2.18. Характер изменения показателей неоднородности (а) и скрытой упорядоченности  $\Delta_{40} = D_1 - D_{40}$  (б) топографических структур Мо-проволок с разными размерами поверхностных дефектов  $R/d$

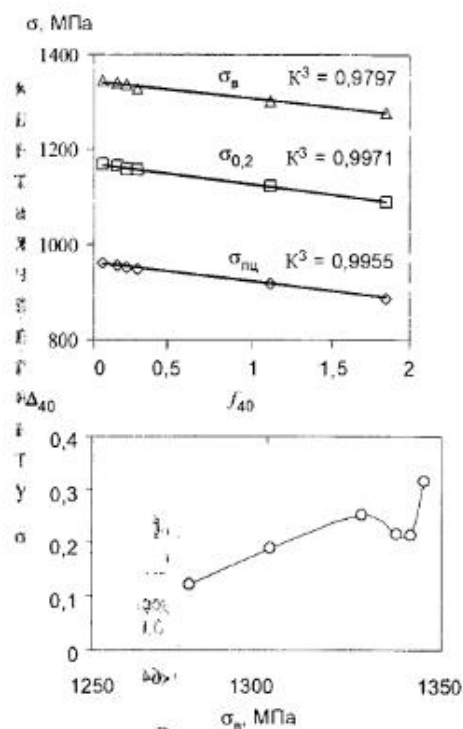


Рис. 2.19. Корреляция показателя однородности  $f_{40}$  с механическими характеристиками и взаимосвязь показателя скрытой упорядоченности  $\Delta_{40}$  с пределом прочности [49,50]

тальных представлений позволяет количественно описывать эволюцию структур материалов при внешних воздействиях. При этом, оценивая изменения однородности структуры и соотношения в ней порядка и хаоса, можно выявлять изменения в типе составляющих компонентов структуры (в данном случае поверхностных микродефектов), а также устанавливать взаимосвязь эволюционных изменений с механическими свойствами материалов. Параметр  $R/d$  и мультифрактальные характеристики степени однородности и скрытой периодичности структуры существенно дополняют традиционные показатели шероховатости.

Пример параметризации топографической структуры с плавными переходами между элементами рельефа. Исследование формирования и свойств тонких золотых покрытий на кремнии представляет значительный теоретический и практический интерес [53,54]. В данном случае изучали золотые покрытия толщиной ~ 0,1 мкм, нанесенные на кремниевую подложку двумя различными методами: 1) методом термического напыления (МТН) посредством электронно-лучевого испарения в вакууме, 2) методом ионно-атомного осаждения (МИАО), при котором формирующееся покрытие дополнительно облучали ионами аргона с энергией 5 кэВ [53–56]. Перед нанесением покрытий проводилась предварительная ионная очистка поверхности подложки. Покрытия, полученные МИАО,

по сравнению с покрытиями, сформированными МТН, обладали значительно лучшей адгезией, отличались в среднем несколько меньшей величиной размаха между впадинами и выступами поверхностных микронеровностей  $R$  (табл. 2.2), а сами микронеровности были более сглажены и ближе по размерам. В случае МТН поверхность имеет вид, характерный для скопления столбчатых кристаллов, а при МИАО — для набора атомно-гладких сфероидальных сегментов. Причем это отличие заметно только для изображений участков 360×360 нм. Указанные различия обусловлены особенностями процессов самоорганизации покрытий в процессе их формирования при этом методе. Так, возможное превалирование осаждения над распылением приводит к удалению случайно образующихся микровыступов. С другой стороны, динамический перенос массы в каскадах атомных смещений вдоль поверхности покрытия препятствует зарождению островковой структуры на начальной стадии формирования покрытия и росту столбчатых кристаллов на последующих стадиях, а также обеспечивает надежную адгезию и отсутствие открытых и закрытых микропор.

Мультифрактальная параметризация использовалась для изучения особенности самоорганизации топографических структур

Таблица 2.2

Характеристики участков топографической структуры поверхности покрытий, сформированных методами ионно-атомного осаждения (МИАО) и термического напыления (МТН) [55,56]

Параметр	МИАО		МТН			
	Максимальный размах микронеровностей					
$R$ , нм	77,6	39,3	61,3	100	99	94,9
Канонические мультифрактальные характеристики						
$D_0$	1,97	1,98	1,97	1,56	1,97	1,97
$D_1$	1,95	1,96	1,94	1,90	1,93	1,93
$D_2$	1,94	1,95	1,92	1,86	1,90	1,90
$D_{50}$	1,82	1,83	1,77	1,66	1,72	1,74
$\Delta_{50}$	0,13	0,12	0,17	0,24	0,21	0,20
$\alpha_{50}$	1,99	1,80	1,74	1,63	1,69	1,71
Псевдомультифрактальные характеристики						
$\Delta_{50}$	-0,33	-0,33	-0,41	-0,41	-0,41	-0,41

поверхности покрытий. С использованием метода сканирующей туннельной микроскопии получали трехмерные изображения участков поверхности образцов с покрытиями (рис. 2.20, *a—z*) размером  $120 \times 120$  нм и  $360 \times 360$  нм, записанные в виде файлов цифрового формата. С помощью компьютерной программы из этих файлов получали черно-белые графические файлы размером  $128 \times 128$  пикселей, содержащие специальные плоские топографические изображения, представляющие собой сетку белых линий на черном фоне (рис. 2.20, *d, e*). Белые линии включают точки с максимальной локальной высотой микронеровностей (т.е. точки, в ближайших окрестностях которых высота микрорельефа только уменьшается, но не увеличивается). Использование таких двумерных изображений позволяет существенно упростить процесс цифровой параметризации по сравнению с трехмерными, в то же время достаточно хорошо отражая особенности топографической структуры, являясь своего рода упрощенным аналогом топографических карт. Канонические и псевдомультифрактальные характеристики полученных двумерных топографических изображений получали с использованием программы MFRDrom99 при расчете по белым («1») пикселям. Расчеты проводили по методу МГМОР при 95%-ной минимальной доле охвата площади изображения для  $q \in [-50, +50]$ . При этом использовался набор шкал  $\{l_k = 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 16, 18, 21, 32, 42, 64; k = 1, \dots, 14\}$ .

Использование мультифрактальной параметризации для участков  $360 \times 360$  нм (см. табл. 2.2) позволило выявить четкие различия между топографической структурой покрытий, полученных разными методами. Для одного режима формирования покрытия значения мультифрактальных характеристик при каноническом ( $D_q, \alpha_q, \Delta_{50}$ ) и псевдомультифрактальном ( $\Delta_{50}$ ) вариантах расчетов при  $q > 0$  практически одинаковы как для разных участков на одном и том же образце, так и для участков на разных образцах. Такое точное «распознавание» изучаемых структур не случайно. Покрытие в процессе своего формирования представляет открытую термодинамическую систему, активно обменивающуюся с внешней средой (подложка, вакуум, осаждаемые вещества, потоки ионов и др.) энергией, веществом и информацией. Процессы самоорганизации такой системы при рассматриваемых разных методах нанесения протекают в совершенно разных термодинамических условиях. При этом топографическая структура поверхности получаемого покры-

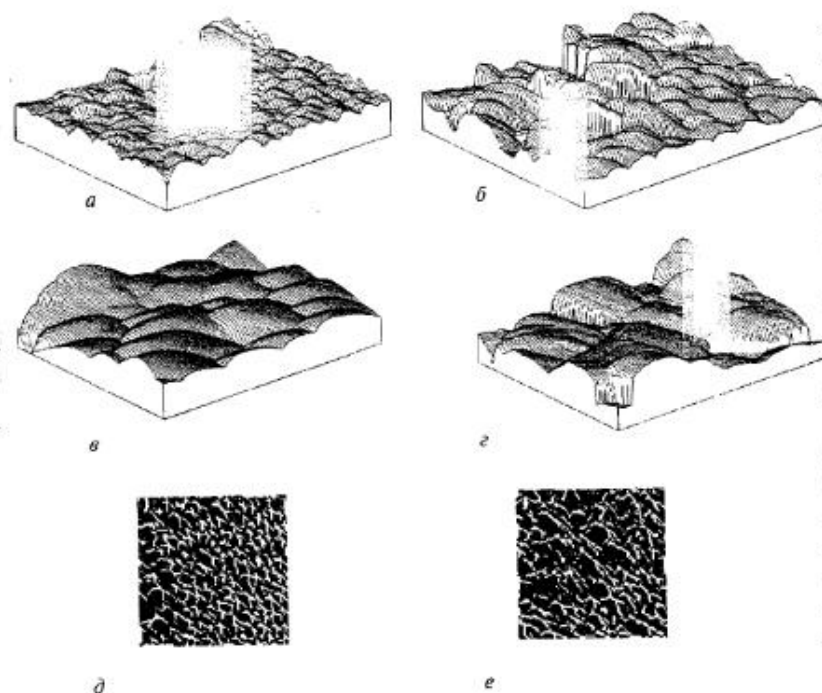


Рис. 2.20. Типичный вид трехмерных изображений участков поверхности Au-покрытий на Si-подложке: (*a, б*) —  $360 \times 360$  нм, (*в, г*) —  $120 \times 120$  нм. Нанесение методом: (*a, в*) — ионно-атомного осаждения (МИАО), (*б, г*) — термического напыления (МТН); (*д, е*) — двумерные изображения участков, соответствующие *a* и *б* [55,56]

тия является результатом процессов самоорганизации и несет «следы» условий формирования. Как указывалось, характеристики  $D_q$  (при  $q = 50$ ) несут некоторую количественную информацию о термодинамических условиях формирования структур. В данном конкретном случае можно сказать, что большие значения  $D_q$  соответствуют большим значениям энтропии. Большие значения  $D_q$  для топографической структуры поверхности покрытий, сформированных МИАО, по-видимому, связаны с дополнительным фактором неравновесности, вносимым ионным облучением. В пользу этого говорят и меньшие значения индекса упорядоченности  $\Delta_{50}$  ТСП

покрытий для МИАО по сравнению с топографической структурой для МТН. В процессе формирования покрытия МТН на начальной стадии образуется своеобразная островковая структура с последующим ростом столбчатых кристаллов на последующих стадиях и образованием микровыступов. Такие особенности самоорганизации покрытия приводят к повышению упорядоченности топографической структуры. При формировании покрытия МИАО эти особенности подавляются, и степень упорядоченности структуры по сравнению с покрытиями, сформированными МТН, уменьшается. Показатель  $\Delta_{50}$  отражает степень нарушения локальной симметрии меры изучаемой структуры по отношению к мультифрактальному преобразованию. Меньшие значения абсолютной величины показателя  $\Delta_{50}$  (для псевдомультифрактального варианта расчета) у покрытий, полученных МИАО, означают, что ионное облучение снижает степень нарушенной симметрии ТСП и уровень информации (негэнтропии). Это связано с распылением микровыступов и сглаживанием рельефа. Таким образом, процессы самоорганизации покрытия в процессе формирования МИАО по сравнению с МТН приводят к образованию топографической структуры, отличающейся меньшими степенями упорядоченности и информационным содержанием. Примечательно, что размах микронеровностей  $R$  на поверхности покрытий практически не коррелирует с режимом формирования. Большой разброс значений  $\Delta_{50}$  для одного метода формирования покрытия по сравнению с другими мультифрактальными характеристиками и отсутствие взаимосвязи между методом формирования покрытия и значениями  $f_{50}$  при каноническом варианте расчетов связаны с эффектом наложения. Эти показатели имеют интегральный характер и отражают упорядоченность и неоднородность топографических структур поверхности, как уже имевшейся на подложке до нанесения покрытия, так и сформированной на подложке тонкого покрытия.

Анализ мультифрактальных характеристик, полученных для участков поверхности  $120 \times 120$  нм показал отсутствие четкой взаимосвязи между методом нанесения покрытия и их значениями. В связи с этим можно заключить, что размер  $120 \times 120$  нм недостаточен и располагается за нижней границей интервала масштабов для изучаемой топографической структурой поверхности. Размер  $360 \times 360$  нм, по-видимому, вполне корректен и попадает в нужный масштабный интервал.

## Глава 3. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ, КРИТЕРИИ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 3.1. Схемы основных лабораторных установок

Основное техническое оборудование описано в [4,6,7]. По кинематическому признаку все установки для триботехнических испытаний материалов делят на два класса: однонаправленного и знакопеременного относительного перемещения. Внутри каждого класса установки разделяют на две большие группы: на машины торцового трения и машины трения с контактом по образующей. Внутри каждой группы выделяют еще две подгруппы по коэффициенту взаимного перекрытия  $K_{вз}$ :  $K_{вз} \rightarrow 1$  и  $K_{вз} \rightarrow 0$ . Таким образом, в лабораторной практике используются машины восьми типов, схемы которых представлены на рис. 3.1. Введены следующие обозначения: для  $0,5 < K_{вз} < 1$  —  $a$  — однонаправленное торцовое трение,  $b$  — однонаправленное трение по образующей,  $v$  — знакопеременное торцовое трение,  $z$  — знакопеременное трение по образующей; для  $0 \leq K_{вз} < 0,5$  —  $d$  — однонаправленное торцовое трение,  $e$  — однонаправленное трение по образующей,  $ж$  — знакопеременное торцовое трение,  $з$  — знакопеременное трение по образующей. В табл. 3.1 приведены сведения о серийно выпускаемых машинах трения и их назначении.

### 3.2. Критерии оценки результатов испытаний

Основными критериями оценки триботехнических характеристик являются интенсивность изнашивания (критерий износостойкости) и коэффициент трения (критерий механических потерь при трении — отношение силы трения к величине нормаль-

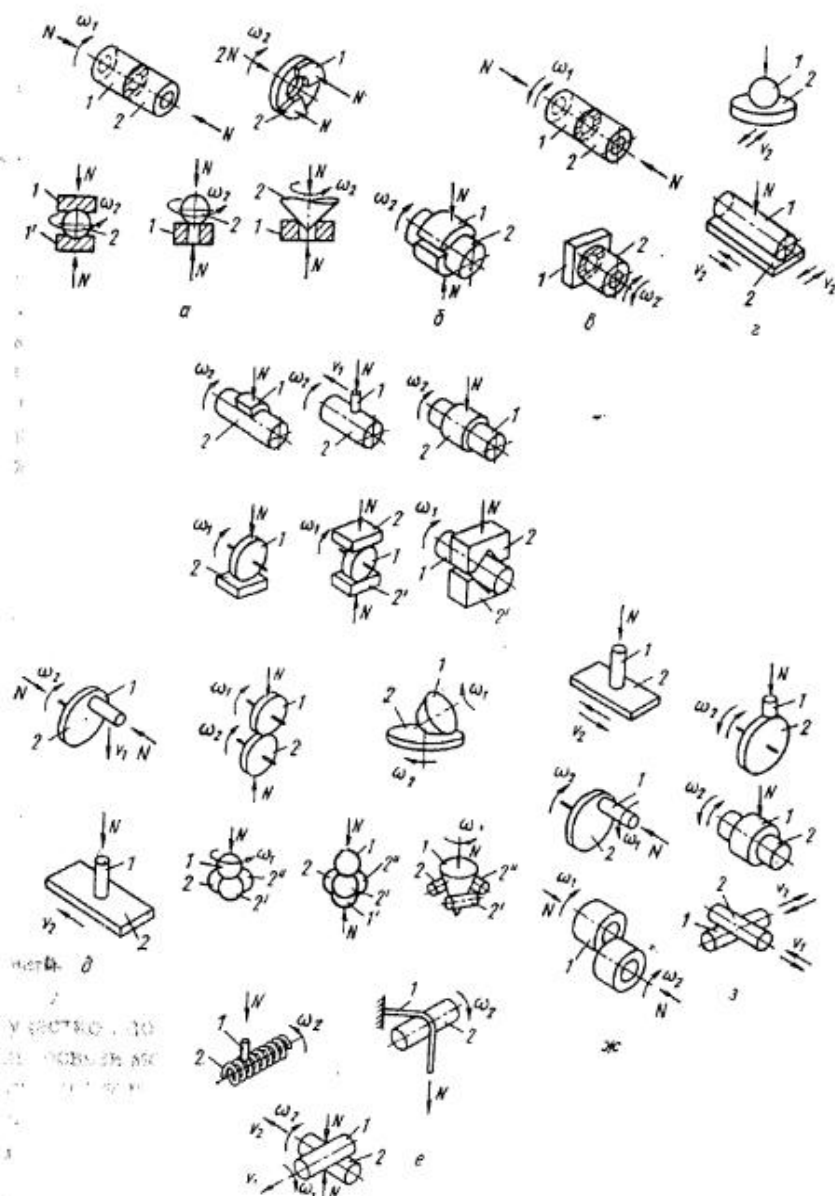


Рис. 3.1. Схемы основных типов машин трения

Типовые машины трения

Таблица 3.1

Тип	Схема узла	Назначение
МИ-1М (схема а, б) СМЦ-2 (схема а, б, в) УМТ-1 (схема в)		Моделирование фрикционных сопряжений с высшими кинематическими парами (зубчатые колеса, колесо-рельс, подшипники качения и др.)
МПИ-1 МПИ-2		Испытание пластмасс на износ по свежему следу при наличии абразива
МДП-1 (схема а) УМТ-1 (схема а, б)		Исследование трения и износа материалов при $K_{из} \rightarrow 0$ применительно к тяжелонагруженным сопряжениям
МФТ-1 (схема б)		Определение фрикционной теплостойкости материалов
МАСТ-1 (схема в, з) ЧШМ-3 (схема в)		Испытание масел по ГОСТ 9490-75 при нормальной и повышенной температуре, определение температурной стойкости граничных смазочных слоев для оценки износа материалов
МПТ-1		Исследование трения металлов при возвратно-поступательном скольжении в условиях нормальных и повышенных температур
Х4-Б		Исследование стойкости материалов в режиме микрорезания

ной силы). По ГОСТ 27674—88 [3] интенсивность изнашивания — отношение толщины изношенного слоя к пути, на котором происходило изнашивание. Т. е. интенсивность изнашивания

$$I = h/L \quad (a)$$

где  $h$  — величина изношенного слоя, мм, за путь трения  $L$ , мм, при конкретных оговариваемых условиях испытаний (масло, абразив, температура образцов, нагрузка и т.д.).

В действующих ГОСТах и РД для оценки износостойкости материалов определяют интенсивности изнашивания каждого образца пары трения или одного из них. Если при испытаниях определяют потерю массы каждого из испытуемых образцов, то интенсивность изнашивания  $I$  для элементов пар трения вычисляют по формулам, приведенным ниже.

Для образцов с меньшей поверхностью возвратно-поступательных пар трения (образец 1, например поршень, кольцо) за период испытаний с числом циклов  $n$

$$I_1 = \frac{h}{2nH} = \frac{\Delta q}{2\rho_1 n H \ell_k} = \frac{\Delta q_1}{2\rho_1 n H A_0} \quad (б)$$

где  $h_1$  — изношенный слой образца 1 за  $n$  циклов,  $\Delta q_1$  — потеря массы образца 1 за  $n$  циклов,  $H$  — ход подвижного образца,  $2H$  — путь трения для всех точек поверхности трения образца 1 за цикл,  $\ell_k$  — размер образца 1 в направлении относительного перемещения;  $b$  — размер образца в направлении, перпендикулярном относительному перемещению; определяющий номинальную площадь контакта пары,  $A_0 = \ell_k b$  — номинальная площадь контакта пары (рабочая площадь образца 1);  $\rho_1$  — плотность образца 1.

Для образцов 2 (с большей поверхностью трения, например гильзы) за период испытаний с числом циклов  $n$  интенсивность изнашивания

$$I_2 = \frac{h_2}{2n\ell_k} = \frac{\Delta q_2}{2\rho_2 n \ell_k b H} = \frac{\Delta q_2}{2\rho_2 n H A_0} \quad (в)$$

где  $2\ell_k$  — наибольший путь трения поверхности образца 2 за один цикл;  $h_2$  — среднее значение изношенного слоя образца 2 за  $n$  циклов;  $\Delta q_2$  — потеря массы образца 2 за  $n$  циклов;  $\rho_2$  — плотность образца 2.

Для пар трения вращательного движения по схеме «колодка—ролик» при определении потери массы каждого из испытуемых образцов интенсивность изнашивания определяют по следующим формулам.

Для колодок за период испытаний с числом оборотов  $n$

$$I_1 = \frac{h_1}{L_1} = \frac{\Delta q_1}{2\pi R n F \gamma_1} \quad (г)$$

где  $h_1$  — изношенный слой образца-колодки за  $n$  оборотов (принимаем равномерным по поверхности трения образца-колодки),  $\Delta q_1$  — потеря массы образца за  $n$  оборотов,  $L_1 = 2\pi R n$  — путь трения образца за  $n$  оборотов,  $R$  — радиус образца ролика,  $F = lb$  — номинальная площадь контакта пары (площадь образца-колодки),  $l$  — размер образца-колодки в направлении относительного перемещения,  $b$  — размер образца-колодки в направлении, перпендикулярном относительному перемещению,  $\gamma_1$  — удельная плотность материала образца-колодки.

Для образца-ролика за период испытаний с числом оборотов  $n$  интенсивность изнашивания

$$I_2 = \frac{h_2}{L_2} = \frac{\Delta q_2}{2\pi R n b l \gamma_2} \quad (д)$$

где  $h_2$  — средняя толщина изношенного слоя образца-ролика за  $n$  оборотов;  $L_2 = l$  — наибольший путь трения точек поверхности образца-ролика за один оборот;  $\Delta q_2$  — потеря массы образца-ролика за  $n$  оборотов;  $\gamma_2$  — удельная плотность материала образца-ролика.

При торцевом трении

$$I = \frac{\Delta h}{2\pi r_{cp} n} \quad (е)$$

где  $\Delta h$  — средний линейный износ за  $n$  циклов испытаний;  $r_{cp}$  — средний радиус площади контакта;  $n$  — суммарное количество оборотов подвижного образца.

В случае вытирания лунки цилиндрическим образцом на плоском образце при измерении суммарного износа средние интенсивности изнашивания при наборе оборотов  $n$ , вычисляют по формуле

$$I_w = \frac{h_i}{30\pi n_i} \quad (ж)$$

где  $h_i$  — среднее значение перемещений, мм.

Кроме интенсивности изнашивания результаты испытаний оценивают относительной износостойкостью. При взвешивании образцов до и после испытаний определяют среднее арифметическое значение потери массы  $g$ , эталонных образцов и среднее арифметическое значение  $g_n$  потери массы образцов исследуемого материала:

$$g_s = \frac{\sum_{i=1}^m g_{si}}{m} \quad (з)$$

$$g_n = \frac{\sum_{i=1}^m g_{ni}}{m} \quad (и)$$

где  $g_{si}$ ,  $g_{ni}$  — потери массы, г, при испытаниях эталонных образцов и образцов исследуемого материала,  $m$  — количество образцов исследуемого материала.

Относительная износостойкость исследуемого материала

$$K_n = \frac{g_s \cdot \rho_n \cdot n_n}{g_n \cdot \rho_s \cdot n_s} \quad (к)$$

где  $\rho_s$ ,  $\rho_n$  — плотности эталонного и исследуемого материалов, г/см<sup>3</sup>;  $n_s$ ,  $n_n$  — количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого материалов.

При измерении размеров образцов до и после испытаний относительную износостойкость вычисляют по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_s}{\Delta h_n} \left( \frac{d_s}{d_n} \right)^2 \quad (л)$$

где  $\Delta h_s$  — абсолютный линейный износ эталонного образца — толщина изношенного слоя,  $\Delta h_n$  — абсолютный линейный износ испытуемого образца,  $d_s$  — фактический диаметр эталонного образца,  $d_n$  — фактический диаметр испытуемого образца.

При равенстве плотностей материалов эталонного и испытуемого образцов отношение абсолютных линейных износов в формуле (л) допускается заменять отношением абсолютных массовых износов. Допускается пересчитывать массовые износы на линейные с учетом плотностей материалов образцов, когда невозможно точно измерить абсолютные линейные износы, а также при разных плотностях эталонного и испытуемого образцов. За результат испытания материала принимают относительную износостойкость, вычисленную как среднее арифметическое результатов двух идентичных опытов.

В действующих ГОСТах и РД для оценки износостойкости применяют такие показатели, как показатель истирания, показатель износа, показатели фрикционного упрочнения и фрикционной стабильности.

### 3.3. Методы оценки износа

Изнашивание — это процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопление его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела (ГОСТ 27674—88). Исходя из этого определения рассмотрим следующие методы измерения износа.

*Измерение износа по потере массы.* Это наиболее распространенный в практике и простой метод. С его помощью оценивают износ, связанный с удалением продуктов изнашивания:

$$\Delta h = \Delta m / \rho A a,$$

где  $\Delta m$  — потеря массы,  $\rho$  — плотность вещества,  $Aa$  — площадь поверхности трения,  $\Delta h$  — измеряется в единицах длины (линейный износ), т.е. толщина изношенного слоя.

*Измерение износа микрометрированием.* Размеры образцов в определенных направлениях до и после трения измеряют микрометром и по разности линейных величин оценивают износ.

В лабораторных исследованиях применяют также ряд стандартизированных методов оценки износа по ГОСТ 27860—88 «Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа» [57], в частности:

1. Метод поверхностной активации и радиоактивных марок.
2. Метод активационного анализа смазочных материалов.



3. Метод спектрального анализа смазочных масел.
4. Метод вырезанных лунок.
5. Метод профилографирования (износ определяют по профилограммам — разностью высот профиля до и после трения).

#### **Метод поверхностной активации и радиоактивных марок**

*Сущность метода.* Поверхность исследуемой детали или вставок в крупногабаритные детали перед испытаниями подвергают бомбардировке  $\gamma$ -излучением, а в процессе испытаний непрерывно или периодически измеряют уменьшение интенсивности  $\gamma$ -излучения, по которому оценивают линейный износ. При этом методе ожидаемый линейный износ деталей не должен превышать 150 мкм.

При измерении износа более 150 мкм используют разновидность метода поверхностной активации, называемую методом радиоактивных марок, когда активируют участки торцевой поверхности, примыкающей к изнашиваемой.

*Устройства для испытаний.* Бомбардировке протонами, ускоренными до энергии  $E_p = 11,4 \pm 0,2$  МэВ, испытываемые детали подвергают на циклотроне I-150 или других ускорителях. Режим активации должен обеспечивать получение радионуклидов  $^{56}\text{Co}$  для сплавов на основе железа и  $^{65}\text{Zn}$  для сплавов на основе меди. Начальная интенсивность излучения активированного образца должна превышать уровень естественного фона в месте проведения испытаний не менее чем в два раза. Продолжительность активации выбирают в зависимости от величины электрического тока, протекающего через деталь при активации, и требуемой активности детали.

Измерения интенсивности  $\gamma$ -излучений проводят, например, с помощью сцинтилляционного блока детектирования  $\gamma$ -излучения СЭГ-СЗ-01 в комплексе с цифропечатающим устройством УВЦ-2-95 или им подобными.

*Особенности испытаний.* Необходимо руководствоваться действующими нормативными документами по санитарным правилам работ с использованием ионизирующих излучений.

Для всех методов с применением  $\gamma$ -излучений разработаны и стандартизированы математические алгоритмы обработки результатов измерений.

#### **Метод активационного анализа смазочных материалов**

*Сущность метода.* Поверхность испытуемой детали перед испытаниями подвергают бомбардировке  $\gamma$ -излучениями, в процессе испытаний за счет ионизированных продуктов изнашивания увеличивается радиоактивность смазочного материала, по которой судят об износе детали.

*Устройство для испытаний.* Для измерений радиоактивности смазочного материала используют многоканальный анализатор импульсов с полупроводниковым блоком детектирования для определения энергетического состава спектра  $\gamma$ -излучения и измерения его интенсивности в заданном диапазоне энергий. Рекомендуемый объем пробы — не менее 10 мл. При последовательных измерениях пробы отбирают без прекращения испытаний и разборки испытуемого объекта из одного и того же места, предпочтительно из области наибольшей циркуляции масла.

*Особенности испытаний.* Поскольку концентрация продуктов изнашивания в смазочном материале относительно мала, требуется существенная активация деталей, что делает метод опасным для применения [58].

#### **Метод спектрального анализа смазочного масла**

*Сущность метода.* Износ оценивается по уменьшению интенсивности сцинтилляций (свечения) смазывающего поверхности трения масла, находящегося под действием источника ионизирующего излучения, по мере увеличения количества продуктов изнашивания в анализируемых пробах масла равного объема. Световая энергия сцинтилляционных вспышек, возникающих в масле, помещенном в измерительную камеру прибора, преобразуется в импульсы электрического тока фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). По скорости счета импульсов оценивают интенсивность сцинтилляций и концентрацию продуктов изнашивания в анализируемой пробе масла, по которой оценивают значение износа испытываемого объекта. Чувствительность метода составляет  $10^{-5}$  % при погрешности  $\leq 5$  %.

*Устройство для испытаний.* Установка для испытаний на износостойкость, имеющая систему смазывания трущихся образ-

цов, обеспечивающую полный переход продуктов изнашивания из зоны трения в смазочное масло. Для испытаний требуются: радиометрический прибор (радиометр) типа «Альфа» или аналогичный прибор, не уступающий ему по основным измерительным характеристикам; набор стеклянных измерительных стаканов с нанесенным на наружную поверхность светоотражающим покрытием; источник  $\gamma$ -излучения с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ , поставки ВО «Изотоп», активностью до 0,01 мкКи; смазочные масла: веретенное масло АУ по ГОСТ 1642-75, приборное масло МВП по ГОСТ 1805-76, вазелиновое масло по ГОСТ 20799-75, масло для форвакуумных насосов по ГОСТ 23013-78, масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-75, полиэтилсилоксановые жидкости ПЭС-3 и ПЭС-4 по ГОСТ 13004-77 и добавки. Добавки в смазочные масла должны быть сцинтилляционными или химически чистыми: 2,5-дифениллоксазол (РРО); 1,4-ди(5-фенил-2-оксазол)бензол (РО-РОР);  $\alpha$ -метилнафталин — по нормативно-технической документации.

#### Метод вырезанных лунок

Принцип вырезанных лунок [59] заключается в том, что на поверхности трения создаются углубления известной геометрической формы, закономерно сужающиеся в глубину детали и позволяющие по уменьшению их размера на поверхности (при изнашивании детали) оценивать величину износа. Эти углубления (лунки) весьма малы и никакого влияния на служебные свойства поверхности и прочность самих деталей не оказывают.

Лунку вырезают передней гранью  $ABC$  (рис. 3.2) алмазного трехгранного резца  $l$  на поверхности  $2$ . Резец приводят во вращение от руки вокруг оси  $XX$ . Длину  $EF$  вырезанной лунки  $3$  измеряют при помощи микроскопа. Остроконечная форма лунки обеспечивает измерение ее длины с большой точностью.

Измерив длину лунки  $EF = l$  на плоской поверхности и зная радиус  $r$  от оси вращения до его вершины ( $r = OA$ ), можно вычислить глубину лунки

$$h = l^2 / 8r. \quad (м)$$

Схема (рис. 3.3) поясняет, как определяется линейный износ плоской поверхности с помощью этого метода. Положим, что начальная длина лунки была  $l_1$  (поверхность  $A$ ) и глубина  $h_1$ , а в

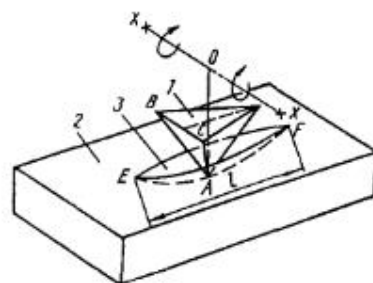


Рис. 3.2. Схема вырезывания лунки:  $XX$  — ось вращения резца,  $EF$  — длина лунки,  $OA$  — радиус вращения вершины резца ( $l$ —3 см. текст)

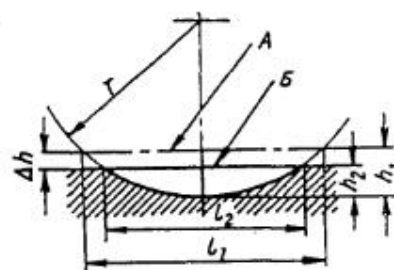


Рис. 3.3. Схема измерения износа:  $A$  и  $B$  — поверхности трения до и после изнашивания

результате изнашивания получилась новая поверхность  $B$  с длиной лунки  $l_2$  и глубиной  $h_2$ . Величину линейного износа  $\Delta h$  определяют как разность глубин лунки  $h_1$  и  $h_2$ , т.е.

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 0,125(l_1^2 - l_2^2) / r. \quad (н)$$

Если лунка вырезана на цилиндрической поверхности так, что длина ее расположена перпендикулярно к образующей, то глубину лунки для вогнутой поверхности, например цилиндров двигателей, определяют по формуле:

$$h = 0,125l^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right), \quad (о)$$

где  $R$  — радиус цилиндрической поверхности, на которой вырезается лунка.

Износ цилиндра

$$\Delta h = 0,125(l_1^2 - l_2^2) \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad (п)$$

Если же лунка вырезана на цилиндрической выпуклой поверхности так, что ее длина нормальна к образующей, например на наружной цилиндрической поверхности поршневого кольца, то глубину ее определяют по формуле

$$h = 0,125l^2 \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right). \quad (р)$$

Тогда износ поршневого кольца

$$\Delta h = 0,125(l_1^2 - l_2^2) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) \quad (с)$$

Если лунка вырезана на цилиндрической поверхности так, что длина ее расположена вдоль образующей, то величина износа определяется, как и для плоской поверхности [см. (н)].

Экспериментально установлено, что лунку следует располагать длиной нормально к направлению трения. Для вырезания лунки служит специальный вырезающий механизм (ГОСТ 23.301—78) [60]. Для нахождения лунок при повторных измерениях предусмотрена система перемещений, позволяющая обозначать координатами место вырезанной лунки и устанавливать прибор так, чтобы на это место навести микроскоп.

Следует учитывать, что углубление может иметь вид не только лунки, но один из его размеров должен закономерно уменьшаться по глубине.

#### Устройство для непрерывного автоматического фиксирования суммарного износа испытываемых образцов (ГОСТ 23.216—84)

С целью обеспечения непрерывной записи износа испытываемых образцов рекомендуется [61, 62] применять устройство, показанное на рис. 3.4. Устройство имеет корпус 5, соединенный с герметичной камерой 6. В корпусе размещен потенциометр 2 с ползунком 3, перемещение которого осуществляется штоком 4. Опускание штока происходит в результате уменьшения суммарного размера испытываемых образцов 8 и 9, находящихся под нагрузкой. Нагрузку образцов производится через рычаг 7. Корпус устройства закрывается герметичной крышкой 1. Питание потенциометра  $E_1$  производится от стабилизированного источника питания или от сухого элемента через добавочное сопротивление  $R_1$ . Включение и выключение источника питания  $E_1$  производится выключателем  $B_{к1}$ . Переменное сопротивление  $R_2$  образует с потенциометром мостовую схему и служит для установки нуля на приборе.

Регистрацию и запись производят с помощью прибора с большим входным сопротивлением, например типа КСП-4. Устройство работает следующим образом. В результате износа образцов происходит опускание штока и перемещение ползунка

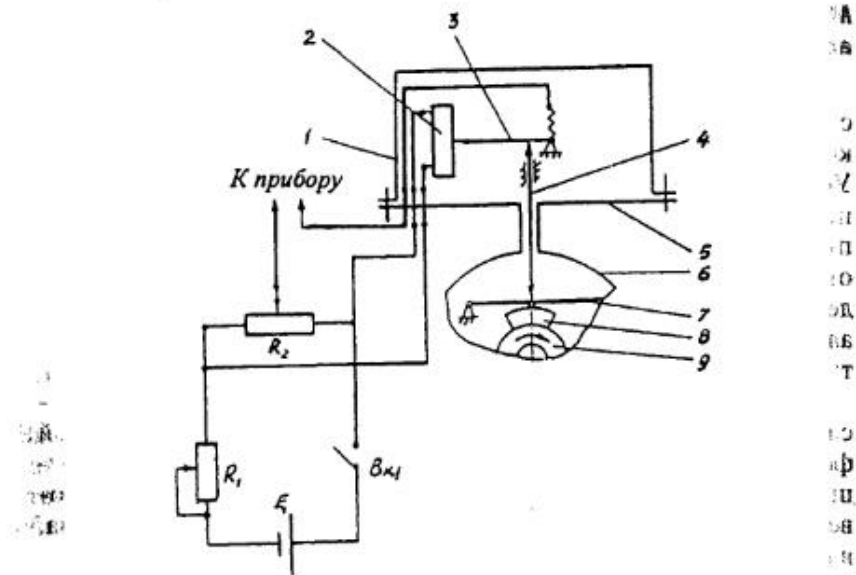


Рис. 3.4. Схема устройства для непрерывного автоматического фиксирования суммарного износа испытываемых образцов

потенциометра. Это приводит к разбалансировке мостовой схемы и на прибор будет подан сигнал, прямо пропорциональный изменению размеров образцов (суммарному линейному износу). Максимальная чувствительность устройства 0,5 мкм.

Проведение многочисленных испытаний с помощью описанного устройства показало высокую надежность и достоверность измерений суммарного износа испытываемых образцов.

#### 3.4. Методы оценки коэффициента трения

ГОСТ 27640—88 «Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения» [63] включает:

1. Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении.
2. Метод определения коэффициента трения при ударе.
3. Метод оценки коэффициента трения качения.

### Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел

Определение адгезионных свойств материала и адгезионной составляющей коэффициента трения проводят на трибометрах, в которых доля механической составляющей предельно мала [58]. Увеличение адгезионного взаимодействия (уровня схватывания при трении) выше некоторой величины (критической плотности пятен адгезионного контакта) может привести к заеданию. При отсутствии заедания повышенный уровень адгезионного взаимодействия ювенильных поверхностей приводит к повышенному адгезионному изнашиванию, или, иначе, изнашиванию при схватывании.

Метод определения прочности адгезионной связи заключается в том, что цилиндрический образец с торцом сферической формы из более твердого материала исследуемого сочетания трущихся материалов устанавливают в направлении нормали к поверхности плоского контрообразца из менее твердого материала, вдавливают с силой, вызывающей пластическую деформацию последнего, вращают относительно оси, направленной по нормали к поверхности контрообразца, измеряют моменты, развиваемые силами трения в контакте образца и контрообразца, разгружают образцы и измеряют размеры отпечатков на контрообразце, затем испытание повторяют при другой нагрузке и по результатам

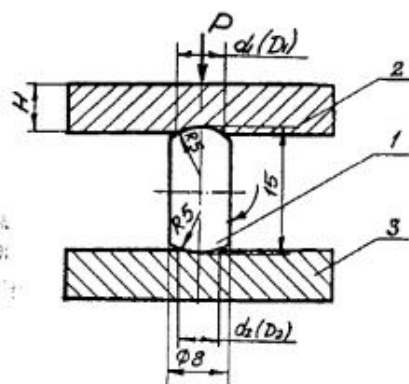


Рис. 3.5. Схема испытаний при определении адгезионной связи (ГОСТ 27640-88)

измерений определяют прочность адгезионной связи. Схема испытываемого узла трения показана на рис. 3.5. Образцы для испытаний: вращающийся образец 1, выполненный из более твердого материала исследуемого сочетания трущихся материалов в виде цилиндра со сферическими торцами радиусом  $5 \pm 0,05$  мм; плоские контрообразцы 2 и 3, выполненные из материала твердостью HV450. Шероховатость рабочих поверхностей образца и контрообразца  $K_r$  должна быть  $0,16 - 0,32$  мкм.

**Особенности испытаний.** После нанесения смазочного материала образцы выдерживают при комнатной температуре 30—40 мин. Затем образцы нагружают, выдерживают под нагрузкой в течение определенного времени и цилиндрический образец вращают с частотой 2 об/мин с погрешностью  $\pm 10$  %. После поворота образца на 30—60 град непрерывно регистрируют величину момента  $m$  сопротивления проворачиванию с погрешностью  $\leq \pm 5$  % на протяжении углового перемещения до  $90^\circ$ . Далее образец смещают относительно контрообразцов. Проводят испытание при второй испытательной нагрузке. Испытание повторяют не менее 10 раз. Измеряют диаметры каждого отпечатка для первого нагружения и каждого отпечатка для второго нагружения в двух взаимно перпендикулярных направлениях с погрешностью  $\leq 0,01$  мм.

Обрабатывают результаты измерений в следующем порядке. Вычисляют диаметры отпечатков  $d$  и  $D$  для каждого испытания как среднюю арифметическую величину измерений двух соответствующих отпечатков на двух одновременно испытываемых контрообразцах в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для каждого испытания по величинам диаметров отпечатков  $d$ ,  $D$  и соответствующим им величинам моментов сил трения  $m$  и  $M$  вычисляют параметры  $\tau_0$  и  $\beta$  зависимости прочности адгезионной связи от нормальных контактных напряжений  $\sigma$  по формулам:

$$\tau_0 = \frac{0,75}{\pi(\sigma_2 - \sigma_1)} \left( \frac{m\sigma_2}{(0,5d)^3} - \frac{M\sigma_1}{(0,5D)^3} \right);$$

$$\beta = \frac{6}{\pi(\sigma_2 - \sigma_1)} \left( \frac{M}{(0,5D)^3} - \frac{m}{(0,5d)^3} \right),$$

где  $\sigma_1 = 4P_1 / \pi d^2$ ;  $\sigma_2 = 4P_2 / \pi D^2$  — средние величины нормальных контактных напряжений при первом и втором нагружениях соответственно.

Вычисляют средние арифметические значения  $\tau_0$  и  $\beta$ .

Прочность  $\tau$  на сдвиг адгезионной связи при трении определяют по соотношению

$$\tau = \tau_0 + \beta\sigma,$$

где  $\sigma$  — контактное нормальное напряжение, для которого устанавливают прочность адгезионной связи.

### Метод определения коэффициента трения при ударе

Свободно падающий с заданной высоты  $H$  вращающийся с требуемой частотой вокруг горизонтальной оси образец соударяется с горизонтальной плоскостью неподвижного образца, отскакивает от него (см. рис. 2.6), и по величинам длины и продолжительности полета в результате отскока от неподвижного вычисляют коэффициент трения.

Устанавливают два метода испытаний:

А — испытания при разных высотах падения, обеспечивающих изменение контактных давлений, и разных скоростях скольжения с использованием в качестве вращающегося образца кольца из исследуемого материала;

Б — сравнительные испытания при высоте падения  $H = 500 \pm 0,5$  мм и разных скоростях скольжения с использованием в качестве вращающегося образца шара из определенного материала.

Метод А может быть распространен на испытания пневматических колес транспортных средств в ведущем режиме с целью определения коэффициента трения при ударе о покрытие дороги.

Неподвижный образец в том и другом случае выполнен из исследуемого материала.

При испытаниях со смазочным материалом последний наносят на исследуемую поверхность неподвижного образца.

Испытательная установка для реализации требуемой схемы испытаний должна состоять из приспособления для фиксации неподвижного образца, механизма раскручивания и сброса вращающегося образца, устройства для измерения длины и продолжительности полета вращающегося образца. Образцы для испытаний: неподвижный образец из исследуемого материала, твердость которого должна быть не менее чем в 1,5 раза меньше твердости материала вращающегося образца; вращающийся образец, выполненный в виде шара по ГОСТ 3722—60 II степени точности группы Н диаметром 10 мм из стали марки ШХ15 по ГОСТ 801—78 и кольцо из исследуемого материала.

Технологию изготовления образцов, шероховатость их исследуемых поверхностей и смазочные материалы выбирают в требуемом сочетании. При проведении сравнительных испытаний по методу Б используют неподвижные образцы с шероховатостью исследуемой поверхности  $Rz = 0,32 \pm 0,16$  мкм.

**Особенности испытаний.** После установки образцов раскручивают вращающийся образец до заданной частоты вращения из

ряда 950, 1910, 3820, 5730, 7640, 9550 об/мин для кольцевого образца, что соответствует скорости скольжения 1,5; 3; 6; 9; 12; 15 м/с, и ряда 970, 1930, 3870, 5820, 7740, 9680 об/мин для шара, что соответствует скорости скольжения 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 м/с.

Освобождают вращающийся образец для падения на неподвижный образец. После каждого соударения изменяют положение неподвижного образца в горизонтальной плоскости.

При испытаниях по методу А высоту падения выбирают из необходимого давления.

При упругом деформировании неподвижного образца высоту падения вращающегося образца в миллиметрах для получения требуемого давления вычисляют по формуле

$$H = \frac{K}{m} P^2 \eta^4 R^3, \quad \text{H}$$

где  $P$  — максимальное контактное давление, кПа (кгс/см<sup>2</sup>);  $K$  — коэффициент, равный 22964 при  $P$ , кПа, и 2252 при  $P$ , кгс/см<sup>2</sup>;  $m$  — масса вращающегося образца, кг;  $R$  — радиус вращающегося образца, см;

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad \text{H}$$

— приведенный модуль упругости;  $E_1$ ,  $E_2$  и  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  — модули упругости материалов, кгс/см<sup>2</sup>, и коэффициенты Пуассона вращающегося и неподвижного образцов соответственно.

При упругопластическом деформировании неподвижного образца высоту падения вращающегося образца ( $H$ ), обеспечивающую возникновение требуемого контактного давления ( $P$ ) в кгс/см<sup>2</sup>, подбирают опытным путем, проведя расчет по формуле

$$P = \frac{6mg}{\pi h} \frac{H - gt^2}{0,75d^2 + h^2}, \quad \text{H}$$

где  $t$  — продолжительность первого отскока, с;  $h$  — глубина отпечатка, см;  $d$  — диаметр отпечатка, см.

Определив длину полета вращающегося образца  $l$  и его продолжительность, обрабатывают результаты испытаний.

Коэффициент трения вычисляют по формуле

$$f = \frac{2tl}{t\sqrt{g}(2\sqrt{H} + t\sqrt{g})}, \quad \text{H}$$

где  $H$  — высота падения вращающегося образца, см;  $l$  — среднее арифметическое значение длин первого отскока в горизонтальной плоскости, см;  $t$  — среднее арифметическое значение продолжительности полета вращающегося образца, измеряемое от момента его соударения с неподвижным образцом до момента первого соударения с поверхностью стола устройства для измерения длины полета, с;  $g$  — ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>.

За результат испытания образца принимают коэффициент трения  $f$ , вычисленный по средним арифметическим значениям 10 соударений. Коэффициент трения рассчитывают с точностью до 0,001.

#### Метод оценки коэффициента трения качения

*Сущность метода.* Метод оценки коэффициента трения качения заключается в измерении затухающих по времени амплитуд свободных колебаний маятника со стальными шаровыми опорами, установленными на плоскую поверхность образца из исследуемого материала.

*Условия испытаний* на трибометре: масса маятника 0,8 кг, период колебаний 3,8 с, линейная скорость перемещения пятна контакта  $2 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-2}$  м/с. Для опоры маятника используют шары из стали ШХ15 диаметром 12,3 мм, II степени точности группы Н по ГОСТ 3722—81.

Коэффициент трения качения определяют по формуле:

$$f_k = p(\cos \alpha_n - \cos \alpha_0)(2\pi n)^{-1},$$

где  $\alpha_0$  и  $\alpha_n$  — начальное и текущее (после  $n$  колебаний) значения амплитуды колебаний;  $n$  — количество полных колебаний с начала испытаний;  $p$  — расстояние от центра масс физического маятника до его оси.

#### 3.5. Стандартное руководство для измерения и записи коэффициента трения (ASTM G 115—98)

Руководство США содержит информацию по выбору методов измерений фрикционных свойств материалов. Сформулированы требования к необходимому минимуму данных и форме их представления. Руководство применимо для большинства твердых материалов и имеющейся техники измерений.

Руководство составлено на основе следующих стандартов:

В 460 «Метод испытаний для оценки динамического коэффициента трения и износа спеченных фрикционных материалов при сухом трении».

В 461 «Метод испытаний для оценки фрикционных характеристик спеченных фрикционных материалов при трении в среде смазочного материала».

В 526 «Метод испытаний для оценки коэффициента трения и износа спеченных фрикционных материалов в условиях сухих муфт сцепления».

С 122 «Метод испытаний растрескивания панелей, работающих в сверхтяжелых условиях бруска шамота».

С 808 «Руководство для представления результатов испытаний трения и износа промышленных углеродных и графитовых подшипников и уплотнительных материалов».

Д 1894 «Метод испытаний для оценки статического и кинетического коэффициента трения пластичных пленок и лент».

Д 2047 «Метод испытаний для оценки статического коэффициента трения полированных плоских поверхностей, измеренного на машине Джеймса».

Д 2394 «Метод моделированных служебных испытаний древесины и настила полов на древесной основе».

Д 2714 «Метод калибровки и измерений при трении на машине Фалекса блок-кольцо и машине для испытаний на износ».

Д 3028 «Метод испытаний для оценки кинетического коэффициента трения пластичных твердых тел».

Д 3108 «Метод испытаний для оценки коэффициента трения применительно к твердым телам».

Д 3247 «Метод измерения коэффициента статического трения гофрированного и твердого фибрового картона (метод горизонтальной плоскости)».

Д 3248 «Метод измерения коэффициента статического трения гофрированного и фибрового картона (метод наклонной плоскости)».

Д 3334 «Метод испытаний плетеных изделий из единичных волокон полиофелина».

Д 3412 «Метод измерения коэффициента трения».

Д 4103 «Практика препарирования поверхности подложки для испытаний и оценки коэффициента трения».

Е 122 «Практика для изменения положения места образца для оценки измерения качества изделий или процессов».

Е 303 «Метод измерений поверхностных фрикционных свойств с использованием британского маятникового прибора».

Е 305 «Практикум для получения и контроля кривых аналитической химической спектроскопии».

Е 510 «Практикум для определения фрикционных свойств поверхности и полирующих характеристик с использованием устройства малых размеров для момента кручения».

Указывается, что важным условием для триботехнических испытаний является чистота исследуемой поверхности и выбор оптимальной испытательной системы. На рис. 3.6 представлены наиболее распространенные схемы действия сил при трении и формулы для их оценки. Приведены также основные стандартизированные схемы испытаний.

Порядок представления данных триботехнических испытаний включает следующие положения:

1. Материалы пары трения.
2. Описание формы образцов.
3. Кинетический и статический коэффициенты трения.
4. Конфигурацию пары трения.
5. Название стандарта, согласно которому проводится испытание.
6. Дополнительные данные о состоянии испытываемых материалов, необходимые для описания процесса трения.
7. Условия испытаний (контактное давление, нормальная сила, скорость, тип движения, путь трения, объем образца, температура, окружающая среда, относительная влажность, смазочный материал, изменяемые параметры).
8. Полные данные о состоянии испытываемых материалов (название материалов, механическая обработка, термическая обработка, состояние поверхности).

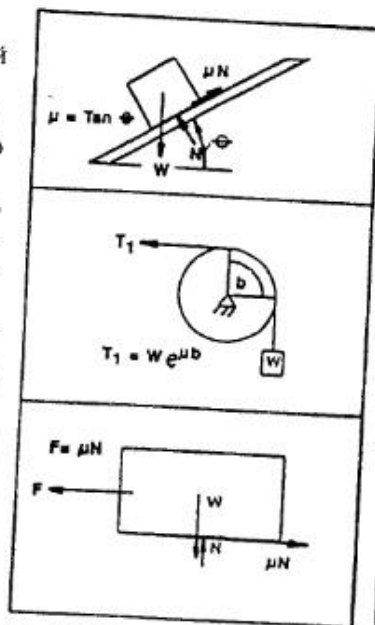


Рис. 3.6. Схемы действия сил при трении и формулы для их оценки

## Глава 4. СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Опыт экспериментальных исследований и практика эксплуатации позволили разработать комплекс стандартов, методических указаний и рекомендаций, который включает более 50 методов, классифицированных по объектам испытаний, видам и условиям нагружений, назначению и целям испытаний. Кроме того, существует во много раз больше нестандартизованных методов испытаний, разработанных для решения специальных задач.

Рассмотрим наиболее распространенные стандартизированные методы триботехнических испытаний.

### 4.1. Метод испытаний материалов на износостойкость при ударно-абразивном изнашивании (ГОСТ 23.207—79)

*Сущность метода* [64]. Метод испытаний материалов на износостойкость при ударно-абразивном изнашивании заключается в том, что образцом из исследуемого и эталонного материалов осуществляют повторные удары через слой твердых абразивных частиц по неподвижной наковальне с заданной энергией удара, скоростью и частотой соударений. Измеряют и сравнивают износ образцов из испытываемого и эталонного материалов.

*Установка и образцы для испытаний*. Схема испытаний приведена на рис. 4.1. Образец 1, укрепленный на ударнике 2, наносит

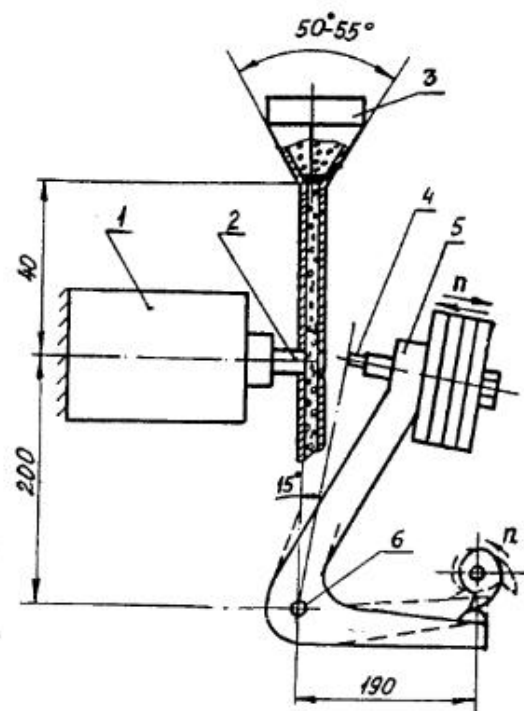


Рис. 4.1. Схема испытаний на ударно-абразивное изнашивание (ГОСТ 23.207-79)

удары по наковальне 3 со сменным вкладышем 4 через абразив, подающийся в зону удара из дозатора 5. Условия испытаний: масса наковальни  $\geq 50$  кг; энергия удара  $E = 2,94 + 294$  Дж, для общих сравнительных испытаний  $E = 4,9$  Дж; частота соударений  $n = 20 + 400$  мин<sup>-1</sup>, для общих сравнительных испытаний  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>; скорость соударения  $v = 0,5 + 5$  м/с, для общих сравнительных испытаний  $v = 1$  м/с; угол закру-

чивания торсиона 6 не менее 15 град; момент инерции ударника  $I = 17,87 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>; направляющий канал сечением 20×1 мм, длиной 40 мм; абразив — карбид кремния черный, зернистостью 0,63 мм; эталонный материал — сталь 45 твердостью HV 598+633; образцы цилиндрические диаметром 10 мм, длиной 35 мм с торцевой рабочей поверхностью.

**Особенности испытаний.** При оценке, относящейся к конкретным условиям изнашивания, значения крутящего момента  $M_{кр}$ , Н·м, и общей массы  $m$ , кг, сменных грузов в зависимости от необходимых значений энергии удара  $E$ , Дж, и скорости соударения  $v$  определяют по формулам:

$$M_{кр} = 3,82E + 0,131C,$$

$$m = (0,08 \frac{E}{v^2} - I) / r^2,$$

где ( $C \leq 7,63 M_{кр}$ ) — характеристика жесткости торсиона, Нм;  $r$  — расстояние от оси вращения ударника до центра тяжести сменных грузов, м.

Стандартная продолжительность испытаний 1000 ударов, после 2000 ударов заменяют сменный вкладыш наковальни. Критерий износостойкости — отношение износа массы эталонного и исследуемого образцов оценивают по формуле (к).

#### 4.2. Метод испытания материалов о нежестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208-79)

**Сущность метода** [65]. Образцы из исследуемого и эталонного материалов изнашивают абразивными частицами, подаваемыми в зону трения и прижимаемыми к образцу вращающимся резиновым роликом. Измеряют и сравнивают износ образцов испытываемого и эталонного материалов.

**Схема и условия испытаний.** На схеме (рис. 4.2) испытуемый образец 1, закрепленный в держателе 2, прижимается к вращающемуся резиновому ролику 3. Нагрузка передается через рычаг 4. Из дозатора 6 по направляющему лотку 5 в зону трения подается абразив. Условия испытаний: усилие прижатия ролика 44,1 Н, частота вращения ролика 1 с<sup>-1</sup>, продолжительность испытаний эталонного материала 600 оборотов ролика от момента подачи абразива; продолжительность испытаний исследуемого материала — в зависимости от твердости от 600 до 3600 оборотов.

Абразивный материал — электрокорунд зернистостью № 16-П по ГОСТ 3647-71 с относительным содержанием влаги не более 0,15 % — используют при общей сравнительной оценке износостойкости. В конкретных условиях изнашивания допускается использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию при эксплуатации, но с размером зерен не более 1,0 мм. Повторное использование абразивного материала не допускается.

Образцы из исследуемых и эталонных материалов изготавливают в виде пластин шириной 30, длиной 30–50 мм, толщиной  $h \geq 1$  мм и шероховатостью рабочей поверхности  $R_a \leq 2,5$



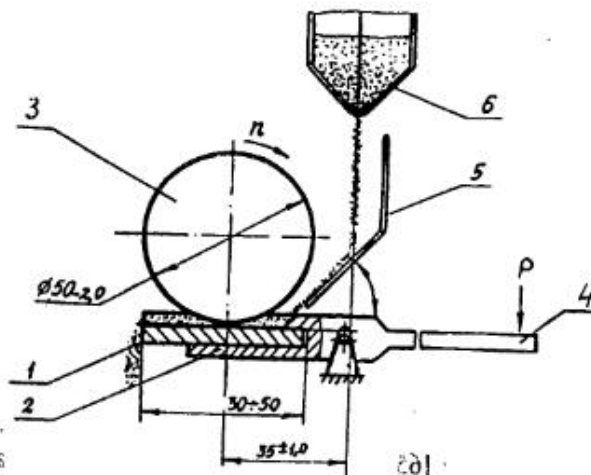


Рис. 4.2. Схема испытаний при трении о незакрепленную абразивную прослойку (ГОСТ 23.208-79)

мкм. Эталонные образцы изготовляют из стали 45 по ГОСТ 1050-74 в отожженном состоянии с  $HV 190-200$ . Резиновый прижимной ролик выполняют диаметром 50 мм.

Износ испытываемых и эталонных образцов определяют взвешиванием до и после испытаний с погрешностью  $\leq 0,1$  мг. Потеря массы образца вследствие изнашивания при испытаниях должна составлять  $\geq 5$  мг.

**Особенности испытаний.** Перед испытаниями резиновый ролик прирабатывают трением о стандартизованную шлифовальную бумагу, закрепленную на плоской стальной пластине, при нагрузке на ролик  $22 \pm 1$  Н до полного прилегания по всей длине образующей ролика.

Средняя арифметическая потеря массы эталонных образцов по результатам испытаний должна находиться в пределах  $67 \pm 6,1$  мг. Если среднее арифметическое значение выходит за эти пределы, то, проверив правильность выполнения, повторяют испытания. После каждых 12 испытаний проверяют наружный диаметр ролика и при диаметре  $< 48$  мм его заменяют с приработкой нового ролика.

Обрабатывают результаты испытаний с использованием формул (з)—(к).

#### 4.3. Метод испытания металлов на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71)

**Сущность метода** [66]. Испытуемый и эталонный образцы изнашивают о поверхность абразивной шкурки при статической нагрузке и отсутствии нагрева и полученные результаты сравнивают. Испытания проводят при трении торца цилиндрического образца по поверхности абразивной шкурки по спирали Архимеда в направлении от центра диска к периферии.

**Схема и условия испытаний.** Согласно рис. 4.3 испытуемый образец 1 прижимается к вращающемуся диску 2 с закрепленной на нем абразивной шкуркой 3 и совершает поступательное движение от центра диска к его периферии. Машина трения для проведения испытаний должна соответствовать следующим требованиям. Радиальная подача образцов на каждый оборот диска составляет 1 мм, а скорость трения образцов по абразивной шкурке должна быть такой, чтобы нагрев материала в процессе испытаний не влиял на его свойства.

Испытания проводят под действием статической нагрузки  $9,55 \text{ кгс/см}^2$  (из расчета  $0,3 \text{ кгс}$  на образец диаметром  $2,0 \text{ мм}$ ). Относительная погрешность нагрузки не должна превышать  $\pm 1\%$ .

Тип абразива шкурки выбирают следующим образом:

а) для выявления связи относительной износостойкости испытуемого материала с его физическими свойствами твердость абразивных частиц должна превышать твердость испытуемого материала не менее чем в 1,6 раза;

б) при определении относительной износостойкости испытуемого материала при действии кварцевого песка применяют кремневую шлифовальную шкурку по ГОСТ 5009-68 зернистости абразивного материала № 6 по ГОСТ 3647-59.

Твердость абразивных зерен, а также структурных элементов испытуемых материалов

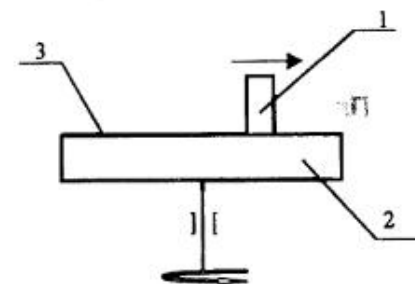


Рис. 4.3. Схема испытания металлов на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы

определяют методом испытания на микротвердость вдавливанием алмазной пирамиды по ГОСТ 9450—60. При измерении линейного износа пользуются микрометрами с ценой деления 0,01 мм; при измерении массового износа — аналитическими весами с ценой деления 0,1 мг. Минимальный абсолютный износ, подлежащий измерению, должен составлять: в линейных единицах 200 мкм; в единицах массы 5 мг.

Для испытаний применяют гладкие цилиндрические образцы диаметром  $2 \pm 0,1$  мм и длиной 15—20 мм. Шероховатость рабочей и боковой поверхностей образцов должна быть  $R_a \leq 1,25$  мкм, на них не должно быть следов коррозии, окалины, а также цветов побежалости, если это не предусмотрено условиями испытаний.

В качестве материала эталонного образца принимают: при испытании металлов с  $< HV 150$  — технически чистый алюминий по ГОСТ 11069—64 в отожженном состоянии; при испытании металлов с  $\geq HV 150$  — технически чистое железо в отожженном состоянии.

**Особенности испытаний.** Перед испытанием эталонные и испытуемые образцы должны подвергаться приработке для достижения полного прилегания образцов к шкурке в условиях, идентичных условиям испытаний. Износ испытуемого и эталонного образцов должен быть получен при одинаковых условиях: образцы должны пройти один и тот же путь трения в пределах всей серии испытаний.

Опыты проводят на двух листах абразивной шкурки в следующем порядке: на одном листе на первой его половине испытывают эталонный образец, на второй — исследуемый; на другом листе порядок испытания обратный.

Результаты испытаний обрабатывают с использованием формулы (л).

#### 4.4. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ (ГОСТ 11012—69)

**Сущность метода [67].** Испытуемый образец изнашивают о поверхность абразивной шкурки, закрепленной на вращающемся цилиндре, при перемещении образца вдоль направляющей цилиндра и определяют уменьшение объема образца в результате истирания. Показатель истирания предназначен для сравнительной оценки износа пластмасс при абразивном истирании без смазки.

**Схема и условия испытаний.** Согласно рис. 4.4 испытуемый образец 1 прижимается к вращающемуся цилиндру 2 с закрепленной на нем абразивной шкуркой и совершает поступательное движение вдоль направляющей цилиндра. Условия испытаний: окружная скорость вращающегося цилиндра диаметром 150—170 мм, на котором крепится шлифовальная шкурка (ГОСТ 344—57), должна составлять  $0,30 \pm 0,05$  м/с; длина цилиндра должна быть такой, чтобы путь истирания по винтовой линии был  $\geq 1,5$  м; регулируемая нагрузка ( $p$ ) на образец, приложенная перпендикулярно истирающей поверхности, 10—50 Н, необходимо равномерное перемещение патрона с испытуемым образцом вдоль образующей цилиндра на расстояние  $10 \pm 1$  мм за время одного оборота цилиндра.

В качестве образцов из пластмассы для испытания используют брусок квадратного сечения  $(10 \pm 0,4) \times (10 \pm 0,4)$  мм, высотой 10—20 мм; цилиндр диаметром  $10 \pm 0,4$  мм, высотой 10—20 мм; составной образец в виде бруска или цилиндра тех же размеров, со слоем испытуемой пластмассы толщиной  $\geq 2$  мм, прикрепленной к основанию из другого твердого материала. Эталон из металлического цинка чистоты 99,99 % с твердостью  $HV 5/30 - 62 \pm 2$  по ГОСТ 2999—59 или  $H_{500} - 60 \pm 2$  по ГОСТ 9450—60. Эталон служит для оценки истирающей способности шкурки. Он должен иметь форму и размеры, одинаковые с образцами. Нужная твердость достигается термообработкой заготовки.

**Особенности испытаний.** Перед испытанием образцов определяют истирающую способность каждого рулона шкурки нахождением для него фактической величины показателя истирания эталона.

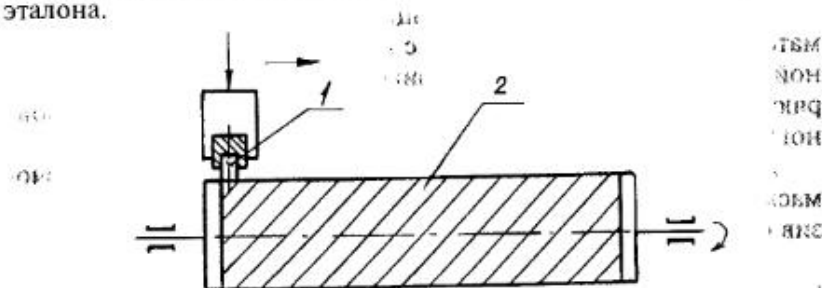


Рис. 4.4. Схема испытаний пластмасс на абразивный износ

Коэффициент пересчета, характеризующий истирающую способность рулона неэталонной шкурки, определяют по формуле:

$$K = 1,20 / V_i^2,$$

где  $V_i^2$  — среднее арифметическое показателей истирания эталона на образцах шкурки, вырезанных в начале, середине и конце рулона, мм<sup>3</sup>/м.

За показатель истирания образца пластмассы принимают уменьшение объема в кубических миллиметрах на 1 м пути истирания.

Показатель истирания каждого образца пластмассы, мм<sup>3</sup>/м, вычисляют по формуле:

$$V_i = 1000K \cdot \frac{G - G_1}{\rho \cdot L},$$

где  $K$  — коэффициент пересчета, характеризующий истирающую способность рулона шкурки,  $G$  — масса испытуемого образца с держателем до истирания, г,  $G_1$  — масса испытуемого образца с держателем после истирания, г,  $\rho$  — плотность образца, г/см<sup>3</sup>,  $L$  — длина пути истирания, м.

#### 4.5. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой (РД 50-339-82)

*Сущность метода* [68]. Образцы из испытуемого и эталонного материалов изнашивают в паре с контро образцом при дозированной подаче в зону трения абразивно-масляной суспензии, измеряют и сравнивают износ образцов из испытываемого и эталонного материалов. Устанавливают два метода испытаний:

А — общие сравнительные испытания при подаче абразивно-масляной суспензии (0,20±0,01) мл/мин с концентрацией абразивного материала в смазочном материале (3±0,05) % (по массе);

Б — сравнительные испытания при оценке износостойкости применительно к конкретным условиям изнашивания с использованием требуемой концентрации абразива в абразивно-масляной суспензии разного состава.

*Схема и условия испытаний.* Испытания проводят по схеме колодка—ролик (рис. 4.5), в которой колодка 1 является испытуемым образцом, а ролик 2 — контро образцом. Условия испытаний: вращение контро образца с частотой от 30 до 1000 мин<sup>-1</sup>; нагрузка на образец от 50 до 3000 Н; обеспечение автоматической дозированной подачи через трубку 3 абразивно-масляной суспензии в зону трения; контроль количества оборотов контро образца в процессе испытаний с погрешностью ≤ 100 оборотов; радиальное биение шпинделя для установки контро образца ≤ 0,03 мм; погрешность частоты вращения шпинделя ≤ 10 % от установленного значения; погрешность приложения нагрузки на образец ≤ 5 %. Рекомендуется использовать машины для испытания материалов на трение и износ марки СМЦ-2 или СМТ-1.

Нагрузку на образец назначают при испытаниях по методу А — 200 Н и при испытаниях по методу Б выбирают из ряда: 50; 100; 200; 400; 1000; 2000 Н. Частоту вращения контро образцов устанавливают при испытаниях по методу А — 300 мин<sup>-1</sup>; при испытаниях по методу Б частоту выбирают из ряда: 30; 50; 100; 300; 500; 1000 мин<sup>-1</sup>.

Устройство автоматической подачи абразивно-масляной суспензии должно обеспечивать ее равномерную подачу с погрешностью концентрации абразива в ней в процессе испытаний ≤ 0,05 %.

Материал контро образца — сталь 45 по ГОСТ 1050-74 в термообработанном состоянии до твердости HV 520—580. Материал эталонных образцов — сталь 45 по ГОСТ 1050-74 в отожженном состоянии с твердостью HV 190—220.

Для общих сравнительных испытаний по методу А используют абразивный материал по ГОСТ 8002-74 из кварцевого песка, соответствующего ГОСТ 2138-74. Смазочный материал в этом случае — масло Индустриальное-20 (ГОСТ 20799-75).

При оценке износостойкости по методу Б применя-

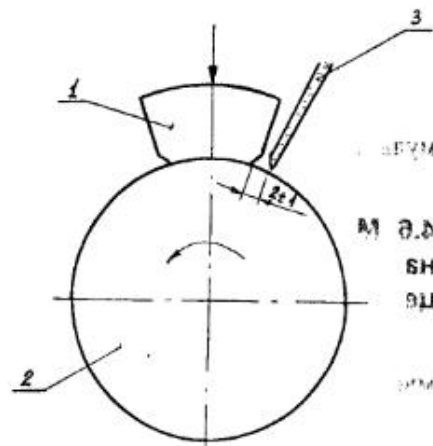


Рис. 4.5. Схема испытания на изнашивание абразивно-масляной прослойкой

ют абразивный и смазочный материалы, соответствующие материалам при эксплуатации, но с размером зерна абразива не более 0,4 мм и вязкости масла не более 50 сСт по ГОСТ 7163—63. Концентрацию абразива принимают из ряда: 0,01; 0,02; 0,04; 0,08; 0,16; 0,32; 0,60; 1,00; 2,00; 3,00; 5,00; 8,00 %.

Износ образцов и контрообразцов определяют взвешиванием или измерением линейных размеров до и после испытаний с погрешностью не более 0,0002 г и 0,005 мм соответственно.

**Особенности испытаний.** При испытаниях образцов с покрытиями толщиной до 0,15 мм для обеспечения плотности прилегания образца к контрообразцу  $\geq 95$  % рекомендуется селективный подбор образцов и контрообразцов. По окончании испытаний образцов с покрытиями должна быть сохранена сплошность покрытий по поверхности трения.

Перед испытаниями включают на 10 мин систему перемешивания абразивно-масляной суспензии.

Образцы из исследуемого и эталонного материалов испытывают в течение времени, соответствующего 18000 об/мин контрообразца при твердости испытуемого материала  $HV \leq 800$  и 36000 об/мин<sup>-1</sup> при твердости  $HV > 800$ . Обороты отсчитывают с момента нагружения образца.

При износе образца менее 20 мкм или 0,5 г устанавливают новый образец и проводят испытания, удваивая число оборотов контрообразца. Допускается использование одного контрообразца для испытаний не более 6 образцов. Повторное использование образцов не допускается.

Оценивают износ по результатам испытаний, используя формулы (з)—(к).

#### 4.6. Метод испытаний на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя (ГОСТ 23.201—78)

**Сущность метода** [69]. Поток абразивных частиц, выбрасываемых под действием центробежных сил из четырех каналов вертикального ротора-ускорителя, ударяет об испытуемые и эталонные образцы при заданных углах атаки  $\alpha$  и скоростях  $v$ .

**Условия испытаний.** Установка для испытаний показана на рис. 4.6. Исследуемый образец 1 устанавливают под углом к потоку

абразивных частиц, выбрасываемых из четырех каналов ротора 2, вращение которого осуществляется электродвигателем 3. Абразив в каналы ротора поступает из бункера 4. Частота вращения ротора задается датчиком 5. Расстояние от выходного окна канала до оси ротора  $100 \pm 0,5$  мм; сечение канала  $3 \times 7$  мм; длина канала  $82 \pm 0,4$  мм; диаметр выходного канала бункера  $6 \pm 0,2$  мм; угол конусности бункера  $\gamma = 90^\circ$ . Углы атаки  $\alpha = 15; 30; 60$  и  $90$

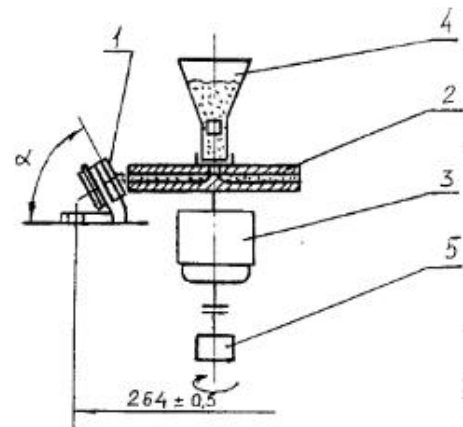


Рис. 4.6. Установка для испытаний на износостойкость в струе абразивных частиц

град. Частота вращения ротора 50 или 100 с<sup>-1</sup>; скорость потока частиц абразива 38 или 76 м/с. Исследуемые и эталонные образцы выполняют в виде пластин  $20 \times 15 \times 4$  мм с  $R_a = 0,16 + 0,32$  мкм. Эталонные образцы изготовляют из стали 45 по ГОСТ 1050—74 в отожженном состоянии с  $HV 185—195$ . В качестве абразива применяют кварцевый песок Приволжского месторождения по ГОСТ 6139—70 с размером зерен 0,5—0,9 мм.

В процессе испытаний определяют потерю массы испытуемого и эталонного образцов и относительную износостойкость испытуемого материала по формуле (к).

#### 4.7. Метод испытаний на изнашивание при ударе в условиях низких температур (ГОСТ 23.212—82)

**Сущность метода** [70]. По охлажденному до заданной температуры образцу наносят удары с заданной энергией, частотой и скоростью соударения металлическим контрообразцом непосредственно или через абразивную ленту и оценивают износостойкость по сравнению с износом эталонных образцов, испытанных в идентичных условиях, но при нормальной температуре.

*Схема и условия испытаний.* Установки для испытаний при низких температурах [58] должны либо быть достаточно малых размеров, чтобы их можно было разместить в холодильных камерах, либо иметь собственные источники охлаждения образцов, как предусмотрено в установке, используемой в ГОСТ 23.212—82. На схеме (рис. 4.7) испытуемый образец 1 установлен в теплоизолированную камеру 2 с охлаждающей средой 3. Ударник 4 наносит удары по образцу 1 через абразивную ленту 5. Приспособление 7 служит для отвода абразивной ленты от образца, патрубок 6 — для удаления продуктов износа подводимым в зону ударов воздухом. Температура фиксируется терморпарой 8.

Материал эталонных образцов — сталь 45 твердостью  $HV 190$ — $220$  при испытаниях через абразивную ленту твердостью  $HV 520$ —

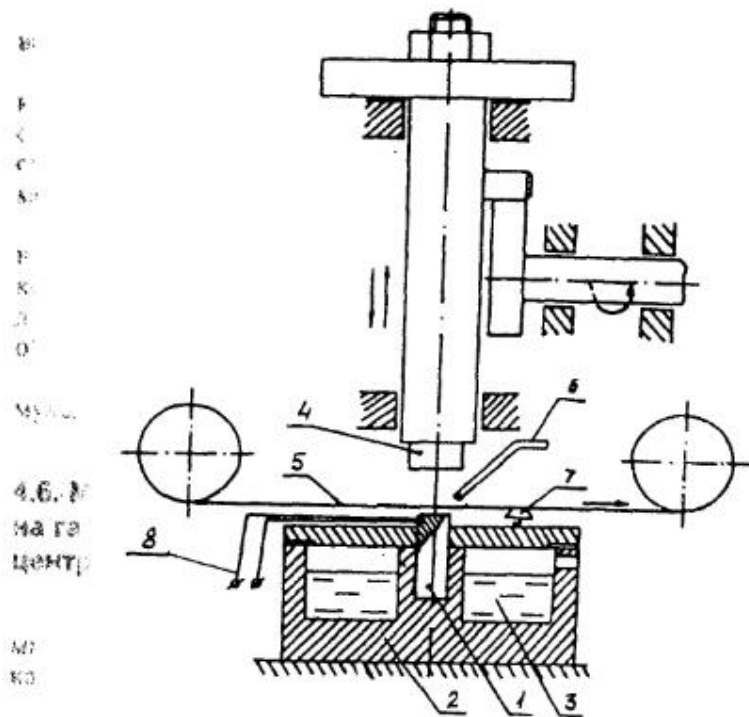


Рис. 4.7. Схема испытаний на изнашивание при ударе в условиях низких температур (ГОСТ 23.212—82)

580. Абразивная лента шириной 10 мм — из тканевой шлифовальной шкурки с нормальным электрокорундом марки 15А зернистостью 16-П по ГОСТ 3647, нанесенным электрическим методом на основе из особо легкой саржи на мездровом клее.

Стандартный режим испытаний: энергия удара 1 Дж, частота 1 с<sup>-1</sup>, продолжительность соударений  $\leq 0,1$  с. Температура образца исследуемого материала при общих сравнительных испытаниях 248 К, из эталонного материала в любых испытаниях 293 К.

Испытания проводят при числе ударов тем большем, чем больше твердость испытываемого материала.

*Особенности испытаний.* При отрицательных температурах увеличивается влияние пластических и вязкостных свойств на интенсивность абразивного изнашивания. С понижением температуры в общем случае изменяются свойства абразива, поэтому должны быть выполнены требования к специальной абразивной ленте, применяемой при испытаниях.

Критерием износостойкости является соотношение интенсивности изнашивания на один удар для эталонного и исследуемого материалов.

#### 4.8. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии (ГОСТ 23.211—80)

*Сущность метода* [71]. При фреттинге и фреттинг-коррозии изнашиваются материалы номинально неподвижных соединений, например втулки с прессовой посадкой, заклепочные и болтовые соединения [58]. Перемещения с малой амплитудой 20—100 мкм сопоставимы с размером пятен фактического контакта. Продукты износа не удаляются из зоны контакта и вследствие абразивного действия усиливают изнашивание и могут привести к заеданию.

При фреттинг-коррозии продукты изнашивания химически взаимодействуют со средой, что усиливается при работе во влажных средах и при повышении температуры. Оба эти вида изнашивания носят усталостный характер.

Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии заключается в том, что цилиндрический

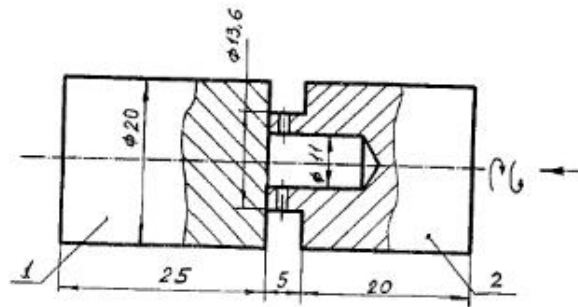


Рис. 4.8. Схема испытаний на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии

неподвижный образец из исследуемого материала и возвратно-вращающийся контрор образец соприкасаются торцевыми поверхностями. Движение осуществляют при заданном давлении с заданными амплитудой и частотой. Измеряют износ неподвижного образца за заданное количество циклов. По значению износа определяют интенсивность изнашивания исследуемого материала.

**Условия испытания.** Испытания проводят на машине трения МФК-1 по схеме торцевого трения (рис. 4.8), где 1 — неподвижный образец из исследуемого материала, 2 — подвижный контрор образец. Образцы в осевом направлении нагружают силами от 200 до 3000 Н с погрешностью  $\leq 25$  Н в диапазоне 200—1000 Н и  $\leq 50$  Н при  $>1000$  Н. Возвратно-вращательное движение контрор образца относительно неподвижного образца совершается с частотой от 10 до 35 Гц с погрешностью  $\leq 10\%$  и амплитудой от 10 до 1000 мкм с погрешностью  $\leq 2$  мкм в диапазоне от 10 до 30 мкм,  $\leq 5$  мкм в диапазоне от  $>30$  до 100 мкм и  $\leq 10$  мкм при  $>100$  мкм. Материал контрор образца — сталь 45 твердостью HV550—600.

При измерении износа с помощью метода профилографирования интенсивность изнашивания исследуемого материала определяют по формуле:

$$I = \frac{\sum \Delta h_i}{2ANk},$$

где  $\Delta h_i$  — средний износ  $i$ -го образца;  $A$  — амплитуда;  $N$  — число циклов испытаний;  $k$  — число испытываемых образцов.

#### 4.9. Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами (ГОСТ 23.219-84)

**Сущность метода** [72]. Гидро- (газоэрозионное) изнашивание возникает под воздействием высокоскоростного напора потока жидкости (газа или пара) [58].

Метод испытаний при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами заключается в соударениях вращающегося образца с потоком жидких частиц на роторной установке.

**Условия испытаний.** Схема установки для испытаний показана на рис. 4.9, где 1 — вакуумная камера, в которой вращается ротор 2 с установленными на нем двумя испытуемыми образцами 3. Рабочая жидкость подается из бака 4 через генератор дисперсных частиц 5.

Диаметр каплей назначают в соответствии с натурными условиями; эталонный средний  $d_k = (1 \pm 0,5)$  мм.

Минимальное расстояние между каплями в цепочке равно более четырех диаметров капель. При расстоянии между каплями, меньшем четырех диаметров капель, соседняя капля может взаимодействовать с образцом по еще не сброшенной с него жидкости от предыдущей капли, что приводит к демпфированию напряжений и искажению результатов.

Давление рабочей среды в камере — от 1 до 3 кПа. Ширина рабочей поверхности образца  $\geq 5 d_k$ . Высота изнашиваемой поверхности образца  $\geq 10 d_k$ .

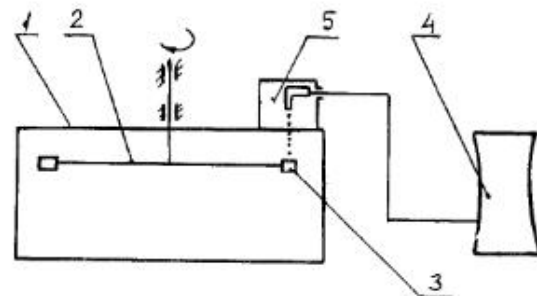


Рис. 4.9. Схема установки для испытаний на износостойкость при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами

#### 4.10. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении (ГОСТ 23.204-78)

*Сущность метода* [73]. Цилиндрический вращающийся ролик из испытуемого материала изнашивает своей радиальной поверхностью плоскую поверхность эталонного неподвижного образца. В процессе испытаний измеряют относительное сближение  $h$  плоского образца и оси ролика, а критерием истирающей способности поверхности является зависимость интенсивности изнашивания от давления.

*Схема и условия испытаний.* Согласно рис. 4.10, образец 1 — ролик, вращаясь, прижимается и вытирает лунку на плоском контробразце 2. В зону трения из капельницы 3 подается смазочное масло.

*Условия испытаний:* частота вращения цилиндрического образца (ролика)  $100 \pm 5$  мин<sup>-1</sup>; сила прижатия ролика к плоскому эталонному образцу  $98,1 \pm 1,96$  Н ( $10 \pm 0,2$  кгс); непараллельность оси ролика рабочей поверхности плоского образца  $\leq 0,1$  мм; скорость подачи смазочного масла в зону трения —  $40 \pm 5$  капель/мин.

*Требования к образцам для испытаний.* Ролики изготавливают из материалов твердостью  $\geq HV 30$ . Биение образующей ролика при вращении  $\leq 0,01$  мм. Эталонный образец изготавливают из прессованного фторопласта 4 по ГОСТ 10007-72. Высота образца 7—10 мм. Для смазывания применяют масло индустриальное 20 по ГОСТ 20799-75.

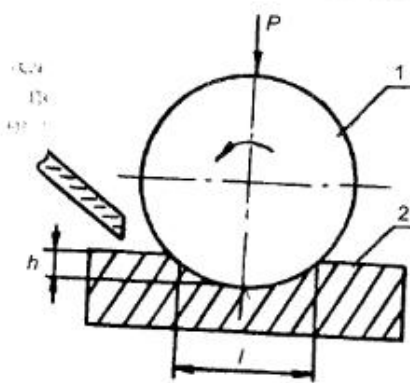


Рис. 4.10. Схема испытаний на истирающую способность поверхностей (ГОСТ 23.204-78)

*Особенности испытаний.* Ролик притирают по эталонному образцу 30 мин при нагрузке  $98,1 \pm 1,96$  Н ( $10 \pm 0,2$  кгс). Устанавливают новый эталонный образец, прижимают к нему ролик с силой 10 кгс и выдерживают под нагрузкой 3 мин. Приводят ролик во вращение с заданной частотой и регистрируют последовательно приращение  $h$ , перемещения оси ролика относительно плоского образца.

В процессе испытаний не допускается прекращение вращения ролика.

При испытаниях в результате истирания и непрерывного увеличения площади контакта происходит монотонное снижение давления. Площадь  $A_c$  поверхности контакта связана с диаметром  $r$  ролика, шириной  $b$  и глубиной  $h$  канавки приближенным соотношением [58]

$$A_c = b\sqrt{8rh},$$

где  $p$  — давление с площадью  $A_c$  связано соотношением:

$$p = P/A_c,$$

где  $I$  — интенсивность изнашивания аппроксимируется зависимостью

$$I = C(p - p_k),$$

где  $p_k$  — значение давления, при котором изнашивание практически прекращается.

Обработку результатов испытаний проводят с использованием формулы (ж).

#### 4.11. Метод оценки противозадирных свойств машиностроительных материалов (ГОСТ 23.213-83)

ГОСТ 23.213-83 [74] устанавливает три метода испытаний: метод А — оценка несущей способности граничных слоев смазочных материалов, сущность которого заключается в том, что на образец из исследуемого металлического материала наносят исследуемый смазочный материал, перемещают по его поверхности сферический индентор с возрастающей по мере его перемещения нагрузкой, регистрируют силу трения и глубину внедрения индентора, по значениям которых в момент скачкообразного возрастания силы трения судят о несущей способности граничных слоев смазочных масел. Метод А не распространяется на материалы твердостью  $> HRC 50$ ;

метод Б — оценка противозадирной стойкости металлических материалов по степени их упрочнения в процессе образования задиров. Сущность метода Б заключается в том, что образец и контр-

образец из исследуемых материалов прижимают один к другому нагрузкой, возрастающей с перемещением, и смещают один относительно другого на величину, достаточную для возникновения заедания, регистрируя силу трения. Измеряют геометрические характеристики повреждений поверхностей и микротвердость деформированных при заедании участков поверхности трения, по значениям которых судят о противозадирной стойкости материалов;

метод В — оценка стойкости к схватыванию металлических материалов. Сущность метода В заключается в том, что два установленных противоположно ролика-контрообразца с параллельно расположенными осями и находящийся между ними цилиндрический образец с осью, перпендикулярной плоскости осей роликов приводят в относительное перемещение в направлении нормали к плоскости осей роликов. Одновременно по мере перемещения увеличивают усилие прижатия роликов к образцу и угол их поворота, измеряют усилие перемещения и характеристики микрогеометрии поверхностей, по которым судят о стойкости к схватыванию материалов.

*Схемы и условия испытаний.* Схемы испытаний приведены на рис. 4.11, образец 1 из испытуемого материала и контрообразец 2 в виде индентора или ролика прижимаются один к другому возрастающей с перемещением нагрузкой.

*Режимы испытаний:* относительное перемещение образца и контрообразца происходит на длине  $\geq 50$  мм со скоростью  $\leq 100$  мм/об

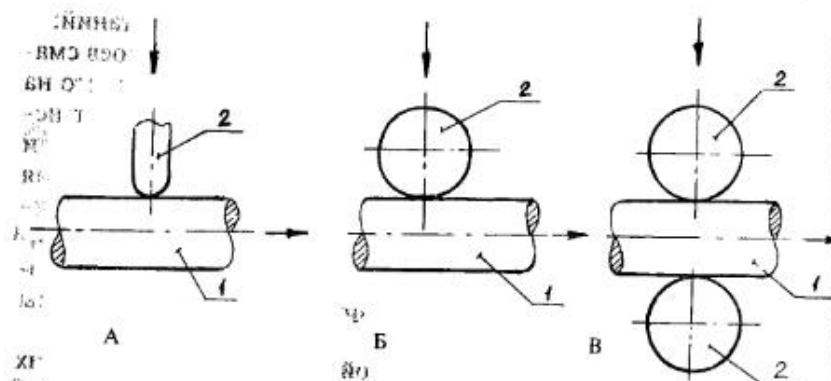


Рис. 4.11. Схема испытаний при оценке противозадирных свойств машиностроительных материалов

прижатие образца с силой до 2943 Н (300 кгс) при скорости монотонного возрастания  $\leq 59$  Н (6 кгс) на 1 мм перемещения образца; скорость поворота контрообразца-ролика — 3,5 град на 1 мм его поступательного относительного перемещения.

*Образцы:* квадратные со стороной 16 мм, цилиндрические диаметром 16 мм.

*Особенности испытаний.* Испытательный прибор устанавливается на подвижной траверсе разрывной машины, отвечающей требованиям ГОСТ 7855—77.

При испытании по методу А на рабочую поверхность образца наносят исследуемый смазочный материал с последующей выдержкой 2—4 ч. На участке деформированной поверхности образца в непосредственной близости от первых следов царапин с помощью профилографирования измеряют глубину выдвинутой канавки. Глубину канавки измеряют от вершин боковых навалов до дна канавки в диапазоне от 5 до 100 мкм с погрешностью  $\leq 5\%$ . Мера несущей способности — деформация (отношение глубины внедрения к радиусу индентора), при которой происходит лавинное разрушение сплошности граничного смазочного слоя.

По методу В в держатели контрообразцов устанавливают ролики из более твердого материала исследуемого сочетания, жестко фиксируя их положение в держателях.

В пределах рабочего участка в поперечном направлении снимают профилограммы поверхности. Измеряют параметры образцов: силу протягивания  $F_t$  и нагрузку  $N_t$  на образцы в пределах рабочего участка; площадь  $S_t$  поперечного сечения царапин, ограниченную профилем поверхности образца и средней линией микронеровностей, проведенной по участкам профиля поверхности без задира; микротвердость исходную  $H_{00}$  по ГОСТ 9450—76 на участках поверхности образца вне поверхности трения; конечную  $H_{01}$  на поверхности наростов. Количество повторных измерений микротвердости наростов  $\geq 50$ .

Критерии задиростойкости:  
показатель фрикционного упрочнения

$$\Psi = \frac{H_{01}}{H_{00}}$$



показатель фрикционной стабильности материала

$$\Phi_n = \frac{\overline{H_{01}} \cdot S_m}{f_m \cdot N_n}$$

По методу В в держатели контрообразцов устанавливают ролики из более твердого материала исследуемого сочетания, а в образцедержателе — цилиндрические образцы. По максимальным значениям усилий протягивания определяют линейную зависимость усилия протягивания от нагрузки методом наименьших квадратов.

#### 4.12. Метод оценки фрикционной теплостойкости материалов (РД 50-662-88)

*Сущность метода* [75] (оценки стойкости к горячему заеданию материалов) заключается в том, что вращающийся и неподвижный кольцевые образцы из материалов исследуемого сочетания устанавливают соосно, прижимают один к другому торцевыми рабочими поверхностями с заданной осевой нагрузкой, ступенчато изменяют температуру фрикционного разогрева посредством изменения частоты вращения образца и определяют коэффициенты трения и интенсивности изнашивания для каждой ступени температуры фрикционного разогрева, а о фрикционной теплостойкости материалов и покрытий судят по зависимости этих величин от температуры.

*Схема и условия испытаний.* Согласно рис. 4.12 вращающийся 1 и неподвижный 2 образцы установлены в державках 3 и прижимаются один к другому своими торцевыми поверхностями. Подвижный образец установлен с помощью шарнирного узла самоустановки 4.

Установка для проведения испытаний должна обеспечивать: нагружение кольцевых образцов в осевом направлении силами 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 350 и 400 кгс с погрешностью не более 0,5 кгс в диапазоне до 100 кгс и погрешностью не более 2 кгс в диапазоне от 100 до 400 кгс; вращение подвижного кольцевого образца с частотами 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000, 1500, 2000, 2500 и 3000 мин<sup>-1</sup>, с погрешностью не более 3%.

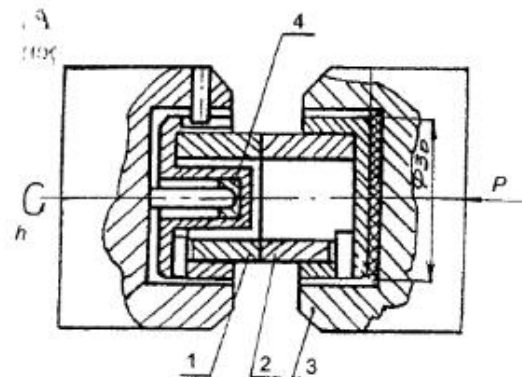


Рис. 4.12. Схема испытаний на фрикционную теплостойкость (РД 50-662-88)

Измерительная система прибора должна обеспечивать непрерывное измерение: температуры с погрешностью не более 1 °С; момента сил трения с погрешностью не более 5 кгс·см; суммарного количества оборотов вращающегося образца с погрешностью не более 1 об.

Для проведения испытаний рекомендуются машины трения типа УМТ-1 или МФТ-1.

Прибор для измерения износа должен обеспечивать измерение расстояния от рабочей поверхности до неизменной базовой поверхности образца с погрешностью не более 0,002 мм.

Рекомендуется также применение искусственных баз, например измерение износа методом вырезанных лунок по ГОСТ 27860-88.

*Особенности испытаний.* В отверстия неподвижного образца плотно устанавливают две термопары так, чтобы головки термопар находились от рабочей поверхности на расстоянии 1,5 мм и от оси образца на расстоянии 12 мм и непосредственно касались материала образца на дне отверстий.

Назначают нагрузку  $P$  испытаний, рассчитывая ее по формуле

$$P = p_a S,$$

где  $p_a$  — расчетная номинальная удельная нагрузка, применительная к которой оценивается фрикционная теплостойкость, кгс/см<sup>2</sup>;  $S$  — площадь рабочей поверхности образца.

Проводят приработку образцов при нагрузке  $P$  и частоте вращения  $50 \text{ мин}^{-1}$ . Площадь, занимаемая следами трения, контролируется визуально осмотром рабочих поверхностей после каждого 30 мин испытаний без съема образцов с испытательного прибора. При испытаниях на каждой из ступеней частот вращения интервале частот от  $50$  до  $700 \text{ мин}^{-1}$  включительно длительность испытаний на каждой ступени составляет  $60 \pm 1$  мин.

При испытаниях на каждой из ступеней частот вращения  $> 700 \text{ мин}^{-1}$ , длительность испытаний на каждой ступени  $15 \pm 0,5$  мин.

Определяют износ подвижного и неподвижного образцов, коэффициент трения и температуру.

Результаты измерения обрабатывают с использованием формулы (е).

#### 4.13. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладонными смесями (ГОСТ 23.216-84)

*Сущность метода* [61]. Метод распространяется на металлические и неметаллические материалы и устанавливает порядок проведения их триботехнических испытаний при смазывании смазочными материалами и маслогазовыми смесями в режиме избирательного переноса. Метод основан на непрерывной регистрации суммарного линейного износа, момента трения и температуры при взаимном перемещении (скольжении) прижатых один к другому с заданным усилием образцов из конструктивных материалов при смазывании [76].

*Схемы и условия испытаний.* На рис. 4.13 показана схема испытаний при возвратно-поступательном движении двух подвижных образцов  $1$  по двум неподвижным образцам  $2$ . Пары трения помещены в рабочую камеру  $4$  с жидким смазочным материалом  $3$  и газовой средой  $5$ .

На рис. 4.14 показаны схемы испытаний при вращательном движении подвижного образца: а) колодка  $1$  — ролик  $2$  для испытаний при нагрузке на образцы до  $60 \text{ Н}$ ; б) две колодки  $1$  — ролик  $2$  при нагрузке до  $120 \text{ Н}$ . Образцы размещены в рабочей камере  $5$  с жидким смазочным материалом  $3$  и газовой средой  $4$ . Нагрузка на колодки передается с помощью рычагов нагружения  $6$ .

Приборы для проведения испытаний должны обеспечивать герметизацию испытуемых образцов и систем их нагружения; взаимное прижатие подвижного и неподвижного образцов с усилием от  $0,1$  до  $120 \text{ Н}$  ( $0,01$ — $12 \text{ кгс}$ ) с погрешностью силоизмерителя не более  $5\%$  от устанавливаемого усилия; частоты вращения подвижного образца  $50 \text{ с}^{-1}$  с пределами допускаемой относительной погрешности  $\pm 5\%$ ; частоты перемещения подвижного образца при возвратно-поступательном движении  $1 \text{ с}^{-1}$  с амплитудой  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; непрерывную регистрацию линейного износа неподвижного и вращающегося образцов контактным методом при износе до  $0,5 \text{ мм}$  с порогом чувствительности  $0,5 \text{ мкм}$ ; непрерывную регистрацию силы (момента) трения при усилиях прижатия образцов до  $60 \text{ Н}$  ( $6 \text{ кгс}$ ); непрерывную регистрацию температуры образцов и смазочной среды в диапазоне от температуры окружающей среды до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  с погрешностью не более  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

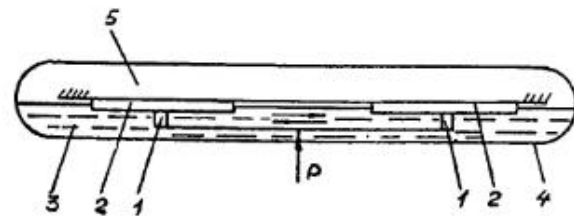


Рис. 4.13. Схема испытаний на трение и изнашивание при смазывании маслохладонными смесями и возвратно-поступательном движении подвижного образца

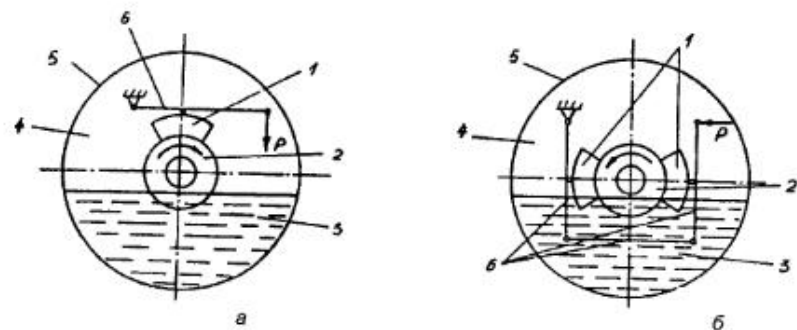


Рис. 4.14. Схема испытаний на трение и изнашивание при смазывании маслохладонными смесями и вращательном движении подвижного образца

Износ образцов, испытываемых по схемам рис. 4.14, измеряют прибором по расстоянию от рабочей до базовой поверхности образцов с погрешностью не более 0,02 мм. Рекомендуется применение искусственных баз, например измерение износа методом вырезанных лунок по ГОСТ 27860—88 с использованием приборов по ГОСТ 23.301—78.

В качестве износоизмерителя при испытаниях по схемам на рис. 4.14 рекомендуется электромеханическое устройство, описанное в п. 3.3.5. В качестве термоэлектрических преобразователей используют хромель-копелевые термодпары по ГОСТ 6616—74 с диаметром спая головки 0,5 мм.

*Особенности испытаний.* Испытания включают следующие этапы [76]. Нагрузку испытаний рассчитывают по формуле

$$P = A_a p_a$$

где  $A_a$  — площадь номинальной поверхности неподвижного образца;  $p_a$  — расчетное номинальное давление, применительно к которому оценивается износостойкость материалов.

Во время испытаний в режиме ограниченной подачи смазочного материала устанавливают фитиль. Погружением заполняют рабочую камеру необходимым количеством жидкого смазочного материала. При смазывании в режиме циркуляции включают насос.

Камеру вакуумируют до прекращения выделения пузырьков воздуха из смазочного материала. Заполняют камеру газом, применение которого и необходимое избыточное давление предусмотрено программой испытаний. При использовании хладагента по ГОСТ 19212—73 или ГОСТ 8502—73 10—15 мин выдерживают давление от 0,1 до 0,2 МПа. Затем проводят вторичное вакуумирование и заполнение рабочей камеры хладагентом до создания давления от 0,1 до 1,0 МПа в зависимости от программы испытаний.

Определяют предельную нагрузку  $P_{\max}$ , для чего включают привод испытываемых образцов и, не останавливая прибор, нагружают испытываемые образцы ступенями через каждые 10 Н. Во время испытаний ведут непрерывную запись основных параметров трения на ленте записывающего прибора. Длительность испытания на каждой ступени назначают от 5 до 10 мин. Испытания прекращают при появлении признаков заедания или разрушения трущихся материалов.

Для определения износостойкости и коэффициента трения материалов устанавливают новую пару образцов, нагружают их до

(0,3±0,5)  $P_{\max}$ , включают привод и непрерывно фиксируют основные параметры трения на ленте записывающего прибора.

Во время испытаний по схемам рис. 4.14 при установившихся значениях температуры и смазочного материала временно изменяют температурный режим на 5—10 °С посредством изменения подачи насоса, обеспечивающего циркуляцию жидкого смазочного материала, или усилением воздушного охлаждения рабочей камеры либо образцов.

Определяют изменение размеров образцов (тепловое расширение или сжатие) и температуры для расчета термической деформации.

Длительность испытаний принимают равной времени выхода на установившийся режим трения плюс 1 ч при использовании вязких смазочных материалов. Во время испытаний ведут непрерывное наблюдение, фото- и киносъемку процесса изнашивания и пленкообразования на поверхности подвижного образца через микроскоп, используя стробоскопический эффект.

Триботехнические характеристики оценивают по результатам испытаний с использованием формул (а)—(д).

#### 4.14. Метод оценки истирающей способности поверхности восстановленных валов (ГОСТ 23.220—84)

*Сущность метода* [77]. При заданных условиях испытаний цилиндрической поверхностью вала изнашивают поверхности образцов из эталонного материала. Определяют средний линейный износ эталонных образцов за определенный путь трения, по которому оценивают истирающую способность вала.

*Условия испытаний.* Схема установки для испытаний показана на рис. 4.15, где 1 — испытуемый вал, к которому прижимаются образцы 2 из эталонного материала, а 3 — опорный образец также из эталонного материала. Все образцы закреплены в державках 4, установленных в скобе 5. Смазка в зону трения подается из маслопровода 6. От проворачивания скобу 5 удерживает упор 7. Нагрузка на опорный ролик создается пружиной 8.

Скорость скольжения 0,2—0,3 м/с. Давление на каждый образец 98,2±1,96 Н. Скорость подачи масла 40±10 капель в минуту,

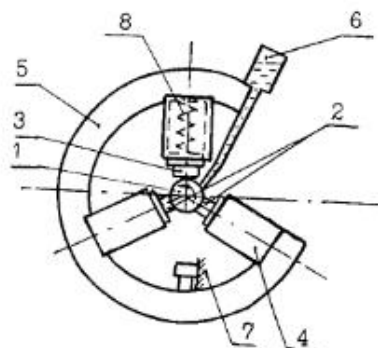


Рис. 4.15. Схема установки образцов при оценке истирающей способности поверхности трения вала

смазочное масло — И20А по ГОСТ 20.799—75. Размеры рабочей поверхности эталонных образцов 5×4 мм,  $R_a \leq 0,6$  мкм. Эталонный материал — прессованный фторопласт 4 по ГОСТ 10007—80. Интенсивность изнашивания образцов определяют по формуле (г).

#### 4.15. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей (ГОСТ 23.224—86)

*Сущность метода* [78]. По стандарту установлены четыре группы методов оценки износостойкости.

Методы группы А — сравнительные экспресс-испытания, заключающиеся в определении отношения интенсивностей изнашивания исследуемой и эталонной поверхностей, испытанных в одних и тех же условиях. Испытания группы А проводят в соответствии с ГОСТ 23.208—79 [65], ГОСТ 23.211—80 [71], ГОСТ 23.220—84 [77] и ГОСТ 23.224—86 [78].

Методы группы Б — моделирующие испытания, заключающиеся в том, что результаты лабораторных или стендовых испытаний с помощью масштабных коэффициентов или коэффициентов ускорения пересчитывают для оценки интенсивности изнашивания в эксплуатации.

Методы группы В — ускоренные ресурсные испытания по ГОСТ 23.205—79 [80] и ГОСТ 23.224—86 [78].

Методы группы Г, заключающиеся в определении диапазона нагрузок, скоростей скольжения и температур, обеспечивающих работоспособность материалов в определенных условиях их эксплуатации. Испытания группы Г проводят в соответствии с ГОСТ 23.221—84 [80] и ГОСТ 23.224—86 [79].

*Условия испытаний.* Испытания проводят на установках, обеспечивающих воспроизведение требуемого кинематического типа сопряжения. Кинематический тип определяется взаимоположением, геометрией и характером относительного движения трущихся поверхностей.

Кроме установок, применяемых при испытаниях по ГОСТ 23.208—79 [65], ГОСТ 23.211—80 [71] и ГОСТ 23.205—79 [80] испытания пар трения «поршневое кольцо — гильза цилиндра» и «юбка поршня — гильза цилиндра» и подобных им проводят на машине трения типа 77-МТ1, воспроизводящих возвратно-поступательное движение одной из деталей пары относительно другой при внутреннем касании неплоских поверхностей (рис. 4.16). Образцы представляют сегменты, вырезанные из колец, гильз цилиндров и поршней.

Испытания материалов при моделировании результатов для подшипников скольжения проводят на машине трения АЕ-5 по схеме «диск — три пальца» (рис. 4.17).

Испытания пар торцевого трения проводят на машинах УМТ-1 (см. рис. 4.12) или машине Н22. Скорость скольжения 0,5—0,8 м/с. Испытания деталей шарнирного типа проводят на установке, показанной на рис. 4.18.

*Особенности испытаний.* При моделировании эксплуатационных условий при испытаниях по группе Б эксплуатационное значение  $I_s$  интенсивности изнашивания на основе экспериментального значения  $I_m$  вычисляют по формуле:

$$I_s = I_m / K_m,$$

где  $K_m = \sqrt[4]{A_{\text{дмо}} A_{\text{днк}} S_{\text{до}} S_{\text{нк}} / A_{\text{нмо}} A_{\text{ннк}} S_{\text{мо}} S_{\text{нк}}}$  — масштабный коэффициент,  $A_a$  — площадь трения образца (о) и контрообразца (к) модели (м) и натурального узла (н);  $S$  — отношение свободных поверхностей (не участвующих в трении) к объему натурального узла (н) и модели (м).

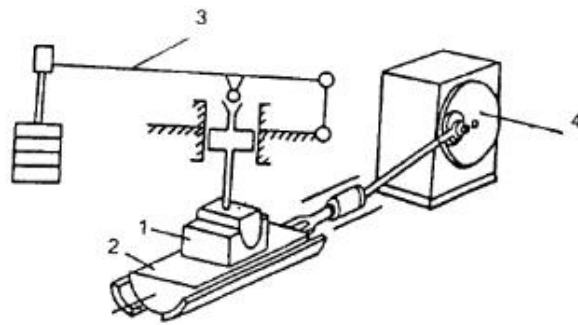


Рис. 4.16. Схема возвратно-поступательной машины трения 77-МТ-1: 1 - неподвижный, 2 - подвижный образцы, 3 - устройство нагружения, 4 - привод

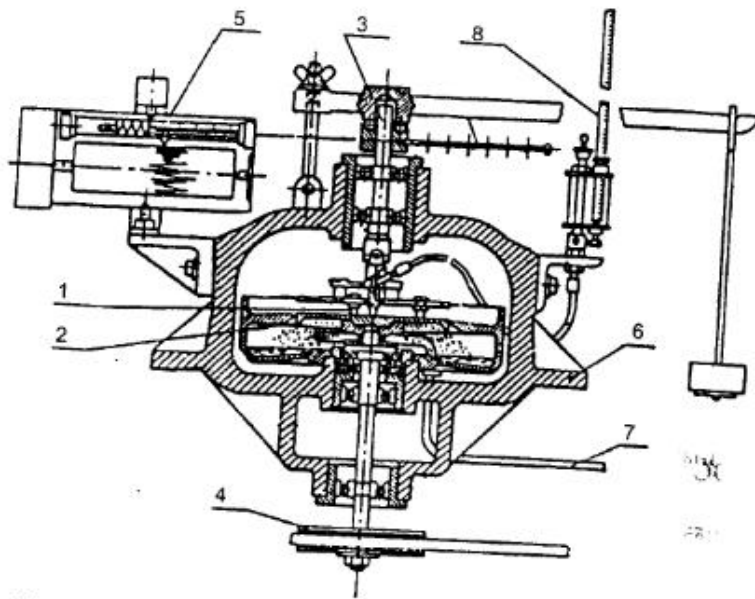


Рис. 4.17. Схема машины трения АЕ-5: 1 - пальчиковые образцы, 2 - дисковый образец, 3 - устройство нагружения образцов, 4 - привод, 5 - устройство для замера силы трения, 6 - корпус, 7 - подвод охлаждающей жидкости, 8 - устройство для подачи смазки

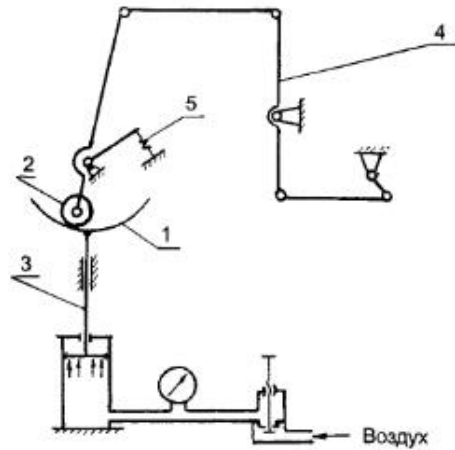


Рис. 4.18. Схема устройства для испытания деталей шарнирного типа: 1, 2 - неподвижный и подвижный образцы, 3 - устройство пневматического нагружения, 4 - привод, 5 - устройство для замера силы трения

#### Экспериментальная оценка прирабатываемости материалов ГОСТ 23.224-86

**Сущность метода.** Испытания состоят из трех основных этапов [58]:

для неприработанного образца в процессе трения по стальному или чугунному контробразцу с заданной скоростью скольжения и смазыванием выбранным смазочным материалом при быстро возрастающей нагрузке определяют значение давления  $P_{\text{МП}}$ , выше которого отмечается возрастание коэффициента трения, а также значение давления  $P_{\text{МН}}$ , при котором начинается раскливание;

- осуществляют приработку при ступенчатом нагружении, повышая нагрузку достаточно быстро, чтобы режим трения был в максимальной степени близок к режиму заедания, при этом оценивают максимальное для постоянного испытываемого материала значение  $P_{\text{МП}}$ , соответствующее переходу к заеданию, а также продолжительность  $t_{\text{п}}$  приработки от момента достижения давления  $P_{\text{МН}}$  до момента достижения давления  $P_{\text{МП}}$ ;

- осуществляют быстрое и непрерывное снижение действующей

шей нагрузки, в процессе которого оценивают значение давления  $P_{оп}$ , при котором прекращается снижение коэффициента трения.

Принимают, что лучшей прирабатываемостью обладают материалы с большей разницей между  $P_{мн}$  и  $P_{мп}$ , у которых эта разница в процессе приработки в режиме на грани заедания достигается за меньшее время. О несущей способности (грузоподъемности) материала в приработанном и неприработанном состояниях судят соответственно по значениям давлений  $P_{он}$ ,  $P_{мн}$ ,  $P_{оп}$ ,  $P_{мп}$ .

**Особенности испытаний.** Подвижный и неподвижный образцы при установке на испытательном стенде должны быть электрически изолированы один от другого с сопротивлением не менее 10 МОм. Образец или контролобразец с помощью специального инструмента обрабатывают таким образом, чтобы поверхность взаимного прилегания образца и контролобразца при установке на испытательном стенде составляла не менее 90% от номинальной расчетной поверхности контактирования. Прилегание контролируют визуально по пятну контакта. Для достижения указанной прилегания поверхностей допускается их шабрение.

При разобщенных поверхностях трения образца и контролобразца устанавливают напряжение, подаваемое к ним,  $20 \pm 0,5$  мВ. Образец прижимают к контролобразцу с нагрузкой, обеспечивающей расчетное давление  $1 \pm 0,1$  МПа и отмечают соответствующее значение напряжения  $U_{мин}$ , которое принимают за нижний порог регулирования. По моменту начала заедания устанавливают давление  $P_{мн}$  несущей способности испытываемого образца материала в неприработанном состоянии.

Устанавливают новую пару образцов (образец и контролобразец) из той же партии и проводят испытания, увеличивая нагрузку до тех пор, пока напряжение на стыке не достигнет  $U_{мин}$  — нижнего порога регулирования. Проводят испытания на постоянной нагрузке до тех пор, пока напряжение не достигнет  $U_{макс}$  — верхнего порога регулирования. Увеличивая нагрузку, испытания продолжают последовательно и непрерывно до заедания, определяя давление  $P_{мп}$  несущей способности испытываемого материала в приработанном состоянии.

Обработка результатов проводится по следующим формулам: показатель степени приращения грузоподъемности при приработке

$$II_{II} = \frac{P_{мп} - P_{мн}}{P_{мн}}$$

$P_{мн}$ ,  $P_{мп}$  — давления, определенные при проведении первого и второго этапов испытаний;

$II_{III}$  — показатель степени увеличения максимального давления усложненной несовершенной смазки при приработке

$$II_{III} = \frac{P_{оп} - P_{он}}{P_{он}}$$

$P_{он}$ ,  $P_{оп}$  — давления, определенные при проведении первого и второго этапов испытаний.

Определяют скоростной показатель прирабатываемости по эффекту приращения при приработке предельной грузоподъемности:

$$II_{IV} = \frac{P_{мп} - P_{мн}}{P_{мн} t_{II}}$$

$t_{II}$  — продолжительности испытаний (приработки) от момента начала до момента последнего достижения напряжения  $U_{мин}$ .

Определяют комплексный показатель прирабатываемости

$$II_{V} = \frac{P_{мп} - P_{мн}}{t_{II} IP_{мп}}$$

$II_{VI}$  — износ образца из испытываемого материала.

## 16. Метод определения триботехнических свойств

### инструментальных материалов

#### при взаимодействии с волокнистой массой

(ОСТ 23.223-97)

**Сущность метода** [79]. При ряде давлений  $p$  и скорости скольжения  $v$  о торцовую поверхность диска из исследуемого материала истирают волокнистую массу, например, хлопок-сырец. Изменяют силу трения, температуру образца и электростатический заряд на волокнистой массе, по которым определяют диапазон допускаемых значений давления и скорости скольжения для испытываемого материала. *Классификация и...*

Тог  
М  
Ес  
длина  
опред  
Э  
галь  
ки с  
78) [  
дусм  
орд  
что  
лун  
ся  
Ус  
ав  
ис  
об  
ш  
т  
к  
н  
к  
т  
с

**Условия испытаний.** Схема испытаний подобна схеме трехшариковой машины трения АЕ-5 (ГОСТ 23.224—86), в которой в месте пальцев установлены державки с волоконным материалом, масса которого  $50 \pm 2$  г. Давление на волоконный материал  $0,005 \pm 0,001$  МПа. Скорость скольжения волоконного материала о диск в диапазоне  $0,5-10$  м/с с шагом  $0,5$  м/с и погрешностью  $\pm 5\%$ .

#### 4.17. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима (ГОСТ 23.205—79)

**Сущность метода** [80]. Метод ускоренных ресурсных испытаний заключается в том, что испытания каждого образца проводят при последовательном ступенчатом чередовании нормального и форсированного режимов.

**Условия испытаний.** В качестве нормального режима используют режим, по отношению к которому оценивают ресурс изделия. Форсированный режим выбирают так, чтобы скорость изнашивания на каждой ступени с нормальным режимом при данном уровне износа не зависела от режима, при котором был накоплен этот износ. Продолжительность испытаний определяют по накопленному достоверному одинаковому износу на каждой ступени. Испытания начинают и заканчивают ступенями с нормальным режимом. Оценивают средние скорости изнашивания на ступенях нормальным режимом. Определяют зависимость скорости изнашивания от износа. Устанавливают функцию наработки испытываемого изделия в нормальном режиме от уровня износа и оценивают ресурс испытываемого образца.

#### 4.18. Материалы смазочные и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине (ГОСТ 9490—75)

**Сущность метода** [81]. Метод заключается в испытании смазочного материала на четырехшариковой машине при заданных осевых нагрузках и определении индекса задира, критической нагрузки, нагрузки сваривания и показателя износа.

**Установка и образцы для испытаний.** В качестве установки для испытаний используется четырехшариковая машина, узел трения которой представляет пирамиду из четырех контактирующих друг с другом стальных шариков (рис. 3.1, е).

Три нижних шарика закрепляют неподвижно в чашке машины с испытываемым смазочным материалом. Верхний шарик, закрепленный в шпинделе машины, вращается относительно трех нижних под заданной нагрузкой с частотой вращения  $1460 \pm 70$  об/мин.

Шарики выполняют по ГОСТ 3722—60 не ниже II степени чистоты, класс В из стали марки ШХ15 по ГОСТ 801—60 диаметром  $12,7$  мм.

**Особенности испытаний.** Продолжительность испытания от момента включения до момента выключения электродвигателя при определении критической нагрузки, нагрузки сваривания и индекса задира должна быть  $10 \pm 0,2$  с, при определении показателя износа —  $60 \pm 0,5$  мин.

Индекс задира характеризует способность смазочного материала снижать повреждения трущихся поверхностей из-за задира. Испытание начинают с начальной нагрузки  $20$  кгс. Последующие испытания проводят с возрастающими нагрузками. Индексом задира ( $I_z$ ) считают безразмерную величину, вычисленную по результатам измерения износа шариков от начальной нагрузки до нагрузки сваривания.

Для получения индекса задира ( $I_z$ ) предварительно вычисляют величину условной нагрузки, кгс:

$$Q = P \frac{d_r}{d_n}$$

где  $P$  — осевая нагрузка, кгс;  $d_r$  — диаметр, мм, площади упругой деформации по Герцу при нагрузке  $P$ ;  $d_n$  — средний диаметр, мм, при минимуме износа при нагрузке  $P_i$  осевой  $i$ -го испытания).

Индекс задира вычисляют по формуле

$$I_z = \frac{\sum Q}{n}$$

где  $\sum Q$  — сумма величин условной нагрузки от начальной до нагрузки, предшествующей нагрузке сваривания;  $n$  — число испытаний. с

Критическая нагрузка характеризует способность смазочного материала предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей. При определении критической нагрузки проводят ряд последовательных испытаний с убывающими или возрастающими нагрузками, максимально приближенными к предполагаемой критической нагрузке. Критической считают нагрузку, при которой средний диаметр пятен износа нижних шариков находится в пределах величины предельного износа ( $d_p + 0,15$ ).

Нагрузка сваривания характеризует предельную работоспособность смазочного материала в условиях испытания. При определении нагрузки сваривания проводят ряд последовательных испытаний с убывающими или возрастающими нагрузками, максимально приближенными к предполагаемой нагрузке сваривания. Нагрузкой сваривания считают наименьшую нагрузку, при которой произошла автоматическая остановка машины при достижении момента трения  $1180 \pm 25$  Н·см ( $120 \pm 2,5$  кгс·см) или сваривание шариков.

Показатель износа характеризует влияние смазочного материала на износ трущихся поверхностей. Его определяют при постоянной нагрузке, установленной в нормативно-технической документации на смазочный материал. Показателем износа ( $D$ ) в миллиметрах считают среднее арифметическое значение диаметров пятен износа нижних шариков двух параллельных испытаний.

#### 4.19. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении (ГОСТ 23.221-84)

*Сущность метода* [82]. При ступенчатом повышении температуры смазочного масла производят трение скольжения под заданной нагрузкой между одним вращающимся и тремя неподвижными шариками, погруженными в испытываемое масло. Критическую температуру определяют по скачкообразному изменению коэффициента трения.

Цель: определение нагрузки сваривания и показателя износа

*Установка и образцы для испытаний.* Рекомендуется применение машины для испытания материалов типа МАСТ.

Шарики выполняют II степени точности группы Н диаметром 10 мм по ГОСТ 3722-60 из стали ШХ15 по ГОСТ 801-60.

Уплотненное смазочное масло — по ГОСТ 3164-52 с добавлением 0,1% по массе стеариновой кислоты по ГОСТ 9419-60. Стеариновую кислоту растворяют при 60 °С (333 К).

*Особенности испытаний.* Каждое испытание при заданной температуре проводят с новой порцией смазочного масла и четырьмя новыми шариками. Испытание начинают проводить при температуре смазочного масла 20-30 °С. Затем температуру смазочного масла ступенчато повышают (через 20 °С) до температуры на 40-60 °С выше критической, при этом скорость нагревания должна быть не более 3 °С мин. При повторных испытаниях допускается увеличивать величину ступени в области критической температуры на до 5 °С. Температуру испытываемого смазочного масла измеряют термопарой, спай которой должен быть расположен в 1-3 мм от зоны трения.

При достижении заданной температуры к узлу трения машины прикладывают осевую нагрузку 11 кгс (107,8 Н), включают электродвигатели самописца и привода шпинделя. В процессе испытания самописец на трибограмме регистрирует изменение величины, пропорциональной коэффициенту трения. Продолжительность вращения шпинделя с шариками 1 мин. После остановки шпинделя выключают электродвигатели и снимают нагрузку. Испытания смазочного масла повторяют три раза при тех же заданных температурах.

По трибограммам, полученным при испытании смазочного масла, с помощью графика зависимости «коэффициент трения — отклонение стрелки самописца» определяют коэффициенты трения. При скачкообразном изменении коэффициента трения определяют его среднее, минимальное и максимальное значения. По результатам трех испытаний строят график зависимости коэффициента трения от температуры. За критическую температуру принимают минимальную температуру перехода к скачкообразному изменению коэффициента трения с амплитудой не менее 0,04.



#### 4.20. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок

*Сущность метода* [62]. При испытаниях смазывающее масло рассматривают с двух позиций:

- а) как вещество, при этом в качестве показателей используют:
  - кинематическую вязкость смазывающего масла при атмосферных условиях и температуре поверхностей трения;
  - пьезокоэффициент вязкости (испытания по схеме «ролик—ролик»);
- б) как объект, предназначенный для реального узла трения машины и механизма с соответствующими нагрузками, скоростями, температурами, средами и другими параметрами испытания по схеме «колодка—ролик», при этом в качестве показателей используют:
  - момент трения (коэффициент трения);
  - суммарный износ испытываемых образцов;
  - температуру поверхности трения;
  - температуру смазывающего масла.

*Установка и образцы для испытаний.* Испытания проводят на машине трения СМЦ-2 по схемам «ролик—ролик» и «колодка—ролик», обеспечивая измерения момента трения, суммарного износа испытываемых образцов и температуры поверхности трения смазывающего масла.

*Условия испытаний по схеме «ролик—ролик»:* скорости качения (частота вращения) испытываемых роликов 150 см/с ( $5 \text{ c}^{-1}$ ), 250 см/с ( $8,3 \text{ c}^{-1}$ ), 500 см/с ( $16,6 \text{ c}^{-1}$ ) при допустимых погрешностях  $\pm 10 \text{ см/с}$  ( $\pm 0,33 \text{ c}^{-1}$ ); нагрузка на ролики 1600, 2300, 2800, 3300 кгс/см<sup>2</sup> при допустимой погрешности  $\pm 100 \text{ кгс/см}^2$ .

*Условия испытаний по схеме «колодка—ролик»:* скорости скольжения (частота вращения) испытываемых роликов  $250 \pm 10 \text{ см/с}$  ( $16,6 \pm 0,33 \text{ c}^{-1}$ ); ступенчатая нагрузка на пару трения 34, 58, 84, 120, 170 кгс при допустимой погрешности  $\pm 1 \text{ кгс}$ ; время работы на каждой ступени 15 мин.

Испытуемые образцы должны изготавливаться из металла одной выбранной марки и плавки; технологический процесс изготовления испытываемых образцов при испытании по схеме «колодка—ролик» обеспечивать макро- и микрогеометрию поверхностей трения, а также их твердость, соответствующие поверхностям деталей машин,

из которых оцениваются служебные свойства смазывающих масел и присадок к ним; при испытаниях по схеме «ролик—ролик» оба испытываемых образца изготавливаться из одного материала: Армко-железа (ГОСТ 380—71), либо бронзы, например Бр05Ц5С5 (ГОСТ 6133—65), либо баббита, например Б83 (ГОСТ 1320—74).

*Особенности испытаний.* При испытании по схеме «ролик—ролик» при суммарной скорости качения  $U_{\Sigma} = 500 \pm 10 \text{ см/с}$ , что соответствует частоте вращения испытываемых роликов  $\omega = 16,6 \pm 0,33 \text{ c}^{-1}$ , в течение 15 мин испытательная установка работает на холостом ходу без нагрузки для определения влияния скольжения термопары по поверхности трения на ее показания и для уменьшения величины смещения «нуля» момента трения.

Испытуемые образцы нагружаются сначала соответствующей контактным давлениям  $P_{\text{max}} = 1600 \pm 100 \text{ кгс/см}^2$ , и после 5 мин работы на этой нагрузке производят запись момента трения и температур, а затем последовательное нагружение нагрузками, соответствующими контактным давлениям  $P_{\text{max}} = 2300 \pm 100 \text{ кгс/см}^2$ ,  $2800 \pm 100 \text{ кгс/см}^2$  и  $3300 \pm 100 \text{ кгс/см}^2$  и также после 5 мин работы на каждой ступени — запись моментов трения и температур. После этой процедуры ступенчато уменьшают нагрузки в обратном порядке и аналогичным образом после 5 мин работы на каждой ступени записывают момент трения и температуру последовательно три раза. Также поступают и при суммарных скоростях  $U_{\Sigma} = 250 \pm 10 \text{ см/с}$ , ( $\omega = 8,3 \pm 0,33 \text{ c}^{-1}$ ) и  $U_{\Sigma} = 150 \pm 10 \text{ см/с}$ , ( $\omega = 5 \pm 0,33 \text{ c}^{-1}$ ).

Вязкость смазывающего масла относят к температуре поверхности трения при соответствующих значениях суммарной скорости качения и контактных давлений.

Испытания по схеме «колодка—ролик» проводят в следующей последовательности:

а) на испытательной установке устанавливается частота вращения  $\omega = 16,6 \pm 0,33 \text{ c}^{-1}$ , что соответствует окружной скорости (скорости скольжения)  $U_{\text{ск}} = 250 \pm 10 \text{ см/с}$ ;

б) испытываемые образцы без остановки машины нагружаются первой ступенью  $Q_1 = 34 \pm 1 \text{ кгс}$ , и на этой ступени испытания проводятся в течение 15 мин. После этого испытываемые образцы последовательно нагружаются ступенями нагрузок —  $Q_2 = 58 \pm 1 \text{ кгс}$ ,  $Q_3 = 84 \pm 1 \text{ кгс}$ ,  $Q_4 = 120 \pm 1 \text{ кгс}$  и  $Q_5 = 170 \pm 1 \text{ кгс}$ , и на каждой ступени испытания проводятся в течение 15 мин. При испытаниях непрерывно записывают момент трения, суммарный износ ис-

пытуемых образцов и температуры поверхности трения и смазывающегося масла в камере.

Окончание процесса испытаний фиксируется по резкому увеличению:

- суммарного износа испытуемых образцов;
- момента трения;
- температуры поверхности трения и смазывающегося масла.

Оценочные характеристики служебных свойств смазывающих масел при испытаниях по схеме «колодка—ролик» — величины и зависимости:

- суммарного износа на каждой ступени нагрузки;
- коэффициентов трения на каждой ступени нагрузки;
- температуры поверхности трения и смазывающегося масла на каждой ступени.

#### 4.21. Стандарты США по методам триботехнических испытаний

##### Испытания на абразивный износ с помощью резинового колеса и сухого песка (ASTM G-65-83) [83]

В соответствии с этим стандартом проводят испытания, аналогичные регламентированному ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы». Отличие в том, что вместо резинового ролика применяют колесо, покрытое хлорбутиловой резиной (рис. 4.19). Частота вращения колеса  $200 \pm 10$  об/мин. Нагрузка  $45-130$  Н, путь трения  $71,8-4309$  м, продолжительность испытаний  $30 \pm 5$  мин.

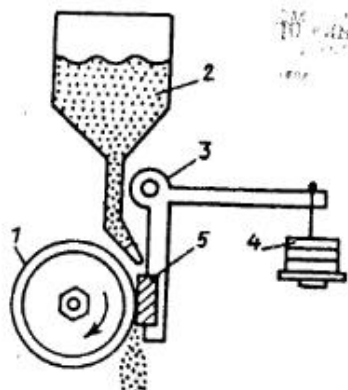


Рис. 4.19. Схема испытаний на износ по резине с сухим абразивом: 1 — резиновое колесо, 2 — абразив, 3 — рычаг, 4 — груз, 5 — образец

##### Метод испытаний на износ по схеме влажный песок — резиновое колесо (ASTM G-105-89) [84]

Метод испытаний отличается от испытания на абразивный износ с помощью резинового колеса (ASTM G-65-83, рис. 4.19) тем, что образец изнашивают, погружая узел трения наполовину в смесь абразива с жидкостью (рис. 4.20). Диаметр обрешиненного колеса  $178$  мм. Скорость вращения колеса  $245 \pm 5$  об/мин, нагрузка  $224,4 \pm 3,6$  Н, продолжительность испытаний от  $40$  до  $60$  мин при  $153$  °С.

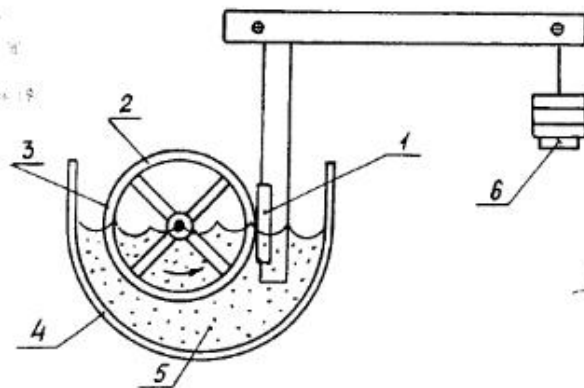


Рис. 4.20. Схема испытаний на износ по резине с влажным абразивом: 1 — образец, 2 — колесо, 3 — резиновый обод, 4 — сосуд с жидкостью, 5 — смесь абразива с жидкостью, 6 — груз

##### Метод испытаний по закрепленному абразиву по схемам с пальцем (ASTM G-132-96) [84]

Стандарт распространяется на четыре схемы испытания палец (1) — абразивная шкурка (2) (рис. 4.21), закрепленная на диске (движение пальца по спирали), на цилиндре (движение пальца по винтовой линии) и по плоскости (возвратно-поступательное и поступательное движение пальца). Условия испытаний: диаметр пальца  $6,35$  мм, сила прижатия пальца к абразивной ленте  $66,7$  Н, скорость скольжения  $0,04$  м/с, путь трения от  $4$  до  $16$  м, при вращении пальца угловая скорость может быть в диапазоне от  $1,57$  до  $5,24$  рад/с. Применяется абразивная лента с размером зерен от  $65$  до  $175$  мкм.

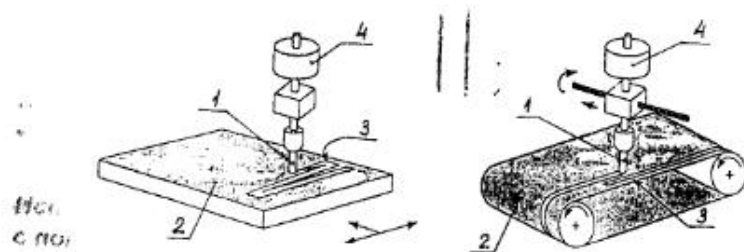
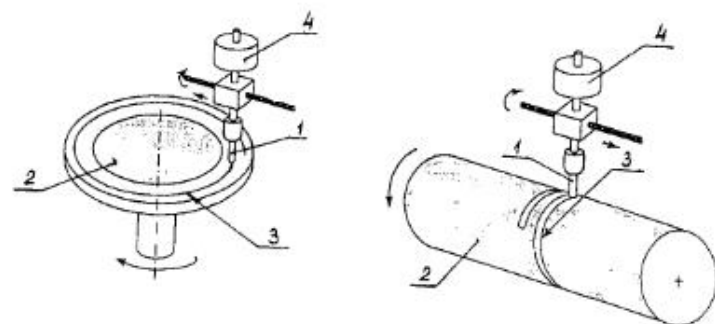


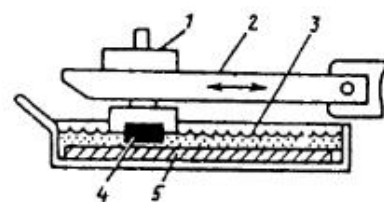
Рис. 4.21. Схемы испытаний по закрепленному абразиву: 3 — траектория движения пальца, 4 — груз, 1 и 2 — см. текст

Износ измеряется взвешиванием и сравнивается с потерей массы эталонного образца с учетом размера зерна абразивной ленты, пути трения и нагрузки, подобно ГОСТ 11012-69 [67].

#### Метод испытаний в абразивной суспензии (ASTM G-75-82) [83]

По определению стандарта суспензия является физической смесью твердых частиц с жидкостью. Размер частиц и их концентрация не оговариваются. Метод применяют как для оценки абразивности суспензий, так и для оценки износостойкости материалов в абразивной суспензии. Осуществляют возвратно-поступательное движение прямоугольного образца при его прижатии к резиновой подушке на дне ванночки с суспензией (рис. 4.22). Амплитуда движения 200 мм, частота 1/48 мин, на-

Рис. 4.22. Схема испытаний в абразивной суспензии: 1 — груз, 2 — рычаг, 3 — суспензия, 4 — образец, 5 — резиновая подушка



грузка 22,24 Н, время испытания 4 ч, материал эталонного образца — хромистый белый чугун.

#### Метод испытаний на газоабразивное изнашивание в струе твердых частиц воздушного потока (ASTM G-76-83) [83]

Испытуемый материал подвергают воздействию абразивных частиц из  $Al_2O_3$  в струе воздуха перпендикулярно к поверхности образца (рис. 4.23). Размер частиц  $Al_2O_3$  5 мкм, скорость  $30 \pm 2$  м/с обеспечивается расходом газа 8 л/мин и давлением  $>140$  кПа.

Расход абразива 2 мг частиц на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности образца в 1 с. Время испытаний 2, 4, 8 и 16 мин. Определяют временную зависимость износа массы образца.

#### Метод испытаний на абразивный износ при дроблении (ASTM G-81-83) [83]

Испытательная установка представляет небольшую щековую дробилку, одну из пластин которой изготавливают из испытуемого материала (рис. 4.24). Абразивом служит скальная порода с диаметром частиц 2,5—5 см. Износостойкость испытуемого материала оценивают при измельчении  $\sim 900$  кг породы, проходящей через установку; в качестве эталона принята сталь. Метод применим для стендовых испытаний сплавов горнодобывающей техники.

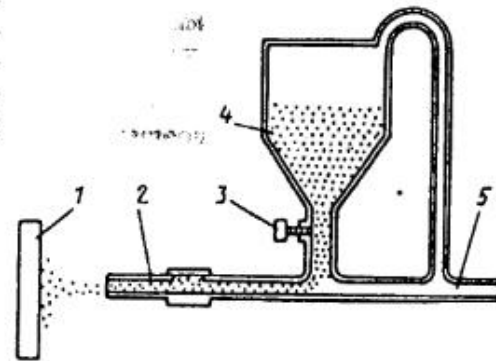


Рис. 4.23. Схема испытаний на газоабразивное изнашивание: 1 — образец, 2 — солено, 3 — клапан контроля подачи абразива, 4 — абразив, 5 — подача воздуха

### Испытания на кавитационное изнашивание при вибрациях (ASTM G-32-77) [83]

Изнашивают образец в жидкой среде при его вибрации (рис. 4.25), что обеспечивает колебания давления, а следовательно, достигают условий возникновения кавитационного изнашивания. Из испытуемого материала изготавливают наконечник ультразвукового вибратора, генерирующего частоту 20 кГц мощностью 250—500 Вт. В качестве рабочей среды применяют дистиллированную воду или любую другую жидкость. Время испытаний должно быть достаточным для разрушения испытуемого материала: для алюминиевых сплавов 15 мин, технически чистого никеля 1 ч, нержавеющей стали 2—3 ч, стеллита 8—10 ч.

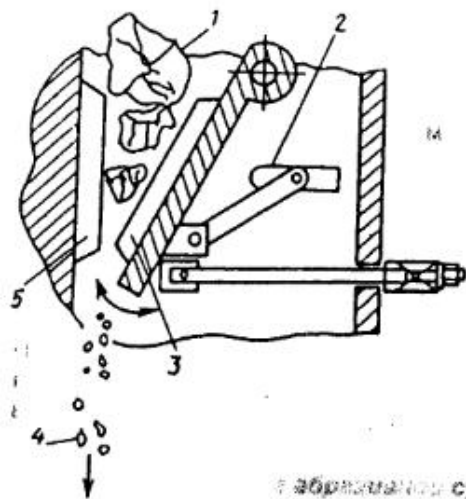
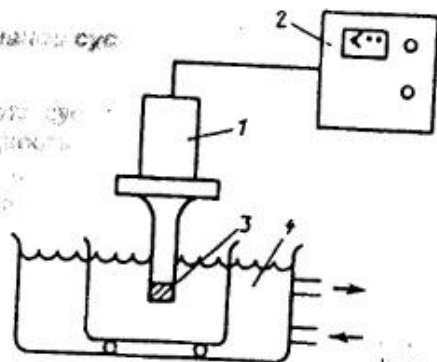


Рис. 4.25. Схема испытаний на кавитационное изнашивание при вибрациях: 1 — ультразвуковой вибратор, 2 — источник питания, 3 — образец, 4 — охлаждающая жидкость

Рис. 4.24. Схема испытаний на абразивное изнашивание при дроблении: 1 — порода, 2 — качательный механизм, 3 — образец, 4 — раздробленная порода, 5 — эталонный образец



### Испытания на стойкость гидроэрозионному и кавитационному изнашиванию при капельной эрозии (ASTM G-73-82) [83]

Испытания аналогичны рекомендуемым ГОСТ 23.219—84 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами» [72]. Испытуемый образец крепится к вращающемуся рычагу (рис. 4.26). Линейная скорость вращения образца от 2 до 600 м/с. Когда образец раскручивается до требуемой скорости, разбрызгивают капли воды, пересекая его траекторию. Источником капель могут быть отверстия в форме игл ширица или насадки. Размер, форму и частоту истечения капель тщательно контролируют. Оценивают временную зависимость износа массы образцов.

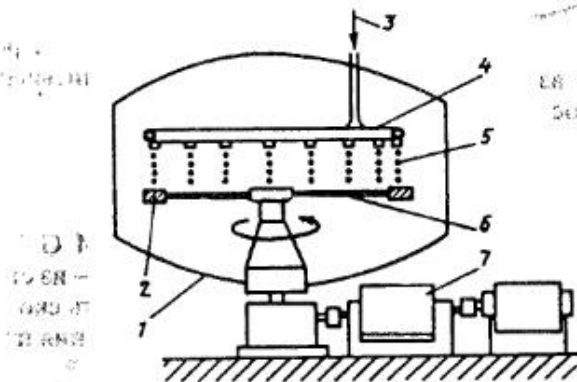


Рис. 4.26. Схема испытаний на стойкость к капельной эрозии: 1 — камера, 2 — образцы, 3 — вода, 4 — дождеватель, 5 — капли, 6 — ротор, 7 — привод

### Метод оценки износостойкости материалов по схеме колодка-ролик (ASTM G-77-98) [84]

Испытания аналогичны требованиям ГОСТ 23.204—78 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхности при трении» [73]. Вращающийся ролик изнашивает своей радиальной поверхностью неподвижную плоскую колодку (рис. 4.27). Ролик может вращаться с разной скоростью,

Испытания на

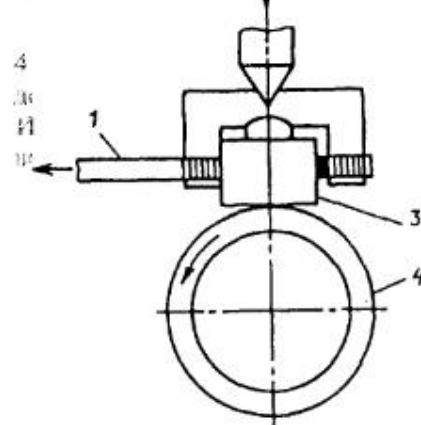


Рис. 4.27. Схема оценки износостойкости материалов по схеме колодка-ролик: 1 — датчик измерения силы трения, 2 — нагрузка, 3 — колодка, 4 — ролик

нагрузка достигает 2,7 кН. Кроме того, ролику могут сообщаться колебания. С помощью дополнительных приспособлений возможно проведение испытаний при повышенных температурах, в специальных средах и при погружении образцов в жидкости.

Износ колодки оценивают по ширине площадки, истираемой роликом. Износ ролика определяют взвешиванием, потерю массы пересчитывают в объемный износ.

#### Метод испытаний на износ пластмасс по схеме колодка-ролик (ASTM G-137-97) [84]

Испытания аналогичны ГОСТ 23.204-78 и ASTM G 77-98 (рис. 4.28). Колодка выполнена из пластмассы. Ролики — из стали с твердостью  $HRC\ 50+60$ ,  $R_a = 0,102+0,205$  мкм. Скорость скольжения 0,5—1 м/с, нормальная нагрузка 20—40 Н. Испытания проводят без смазки.

#### Метод испытаний на износ по схеме со скрещенными цилиндрами (ASTM G-83-96) [84]

При испытаниях один из цилиндров диаметром 12,26 мм вращается (рис. 4.29). Второй, неподвижный цилиндр тех же размеров под нагрузкой прижимается к первому перпендикулярно к оси подвижного цилиндра. На неподвижном цилиндре образуется круглое или овальное пятно износа, а по окружности вращающегося цилиндра — канавка. Износ измеряется взвешиванием, а затем рассчитывается объем изношенного материала. Метод позволяет оценить износ очень твердых инструментальных сталей при кратковременных испытаниях.

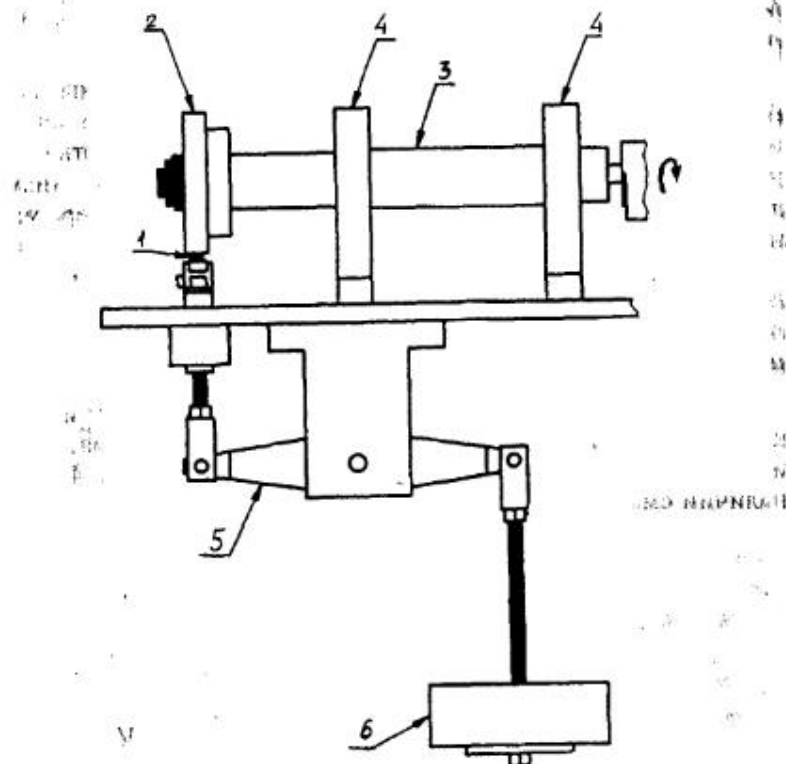


Рис. 4.28. Схема установки для испытаний на износ пластмасс: 1 — пластмассовая колодка, 2 — ролик, 3 — вал, 4 — опоры вала, 5 — система нагружения, 6 — груз

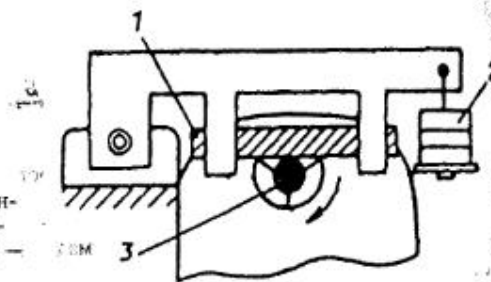


Рис. 4.29. Схема испытаний на износ на установке со скрещенными цилиндрами: 1 — неподвижный цилиндр, 2 — груз, 3 — вращающийся цилиндр

### Метод испытаний на износ по схеме палец—диск (ASTM G-99-95a) [84]

Торец неподвижного пальца цилиндрической формы из любого испытываемого материала под действием нормальной нагрузки изнашивают о вращающийся диск без абразива. Скорость вращения диска от 1 до 10 с<sup>-1</sup>. Диаметр пальца от 2 до 10 мм. Диаметр диска от 30 до 100 мм. Определяют износ пальца по потере массы и коэффициент трения в паре.

### Метод испытаний при возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости (ASTM G-133-95) [84]

Испытывают на трение скольжения с определением износа и коэффициента трения керамику, металлы и другие материалы используемые в сопряжениях «шар по плоскости» (рис. 4.30) при наличии смазки в контакте и без смазки.

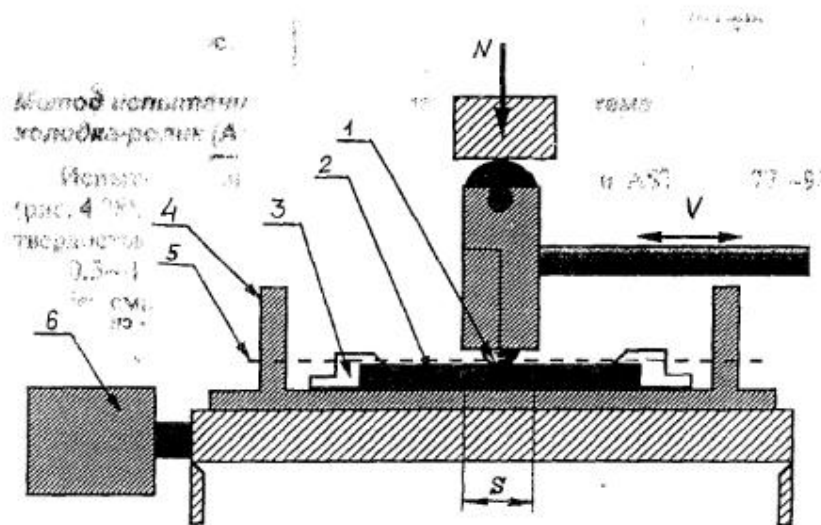


Рис. 4.30. Схема испытаний при возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости:

1 — образец-шар, 2 — образец-плоскость, 3 — держатель образца-плоскости, 4 — ванночка для смазки, 5 — уровень смазки (при ее использовании), 6 — устройство для измерения силы трения

Предусмотрены два вида испытаний: *A* — испытания без смазки при нормальной температуре, *B* — испытания со смазкой при повышенной температуре.

*Условия испытаний. A:* радиус шарового образца 4,76 мм, нормальная сила 25 Н, ход шарового образца  $S = 10$  мм, частота движения 10 Гц, температура окружающей среды  $22 \pm 3$  °С, без смазки, продолжительность испытаний 16 мин 40 с (путь трения 100 м);

*B:* радиус шарового образца 4,76 мм, нормальная сила 100 Н, ход шарового образца  $S = 10$  мм, частота движения 10 Гц, температура  $150 \pm 2$  °С, со смазкой, относительная влажность 40—60 %, продолжительность испытаний 33 мин 20 с (путь трения 400 м).

Измеряют износ только шара, или только плоского образца, или обоих образцов.

## Глава 5. НЕСТАНДАРТИЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

### 5.1. Методы испытаний материалов при трении о свободный абразив

Испытания при трении о свободный абразив применяют при выборе материалов, работающих при непосредственном взаимодействии с почвой, рудой, углем, строительными материалами [58].

1. «Способ гильзы» В. Ф. Лоренца (рис. 5.1). Изнашивают цилиндрическую поверхность образца 1 диаметром 25–30 мм, высотой 10 мм при трении о кварцевый песок 2 с размером зерна до 0,6 мм, уплотненный грузом 34 Н через диск 3. Торцевые поверхности образца защищены от износа шайбами 4. Частота вращения образца 150 об/мин. Возможна реализация на обычном сверлильном станке.

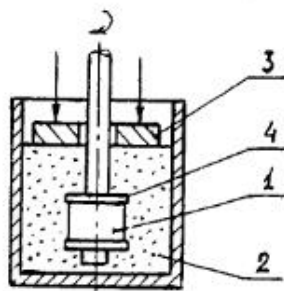


Рис. 5.1. Схема испытаний материала при трении о свободный абразив «способом гильзы»

2. Эксцентричное расположение образца по отношению к оси гильзы (К. Веллингер, Г. Уэтц), которая, как образец, вращается (с малой скоростью), что приводит к перемешиванию абразивной массы и возобновлению частиц, участвующих в трении. Условия испытаний: диаметр образца 25–45 мм, высота 50 мм, частота вращения образца 5–50 с<sup>-1</sup>, частота вращения гильзы 8 об/мин. Уплотнение абразивной массы не предусмотрено.

3. Дисковый образец 1 (рис. 5.2) вращают и прижимают к абразивной массе 2, одновременно уплотняя ее (М. М. Севернев). Соул с абразивной массой 3 опирается на подшипник качения 4, что дает возможность по фиксируемому с использованием диаметра 5 моменту, необходимому для удержания его от проворота, оценивать силы трения.

4. «Способ Мелле». Осуществляют вращение нескольких образцов — цилиндров диаметром 22 мм высотой 25 мм при их одновременных возвратно-поступательных перемещениях вверх-вниз, обеспечивающих перемешивание абразивной массы.

5. «Способ крыльчатки». Образцы устанавливают наклонно на вращающемся диске, совершающем возвратно-поступательное перемещение. Условия испытаний: скорость на оси образцов 0,67 м/с, вертикальная подача 0,05 мм/об., путь трения 2,5 км. Уплотняют абразив смачиванием песка. Возможно исследование взаимодействия образцов с абразивом при разных углах атаки.

6. «Способ лотка» (рис. 5.3). Шесть образцов 1 (три испытываемых и три эталонных) в форме трехгранной призмы перемещают по кругу со скоростью 1,46 м/с в чаше 2 с абразивной массой (рис. 5.3), которую уплотняют с помощью уплотнителя 3. Плотность абразива контролируют по разности  $H-h$  и регулируют, меняя

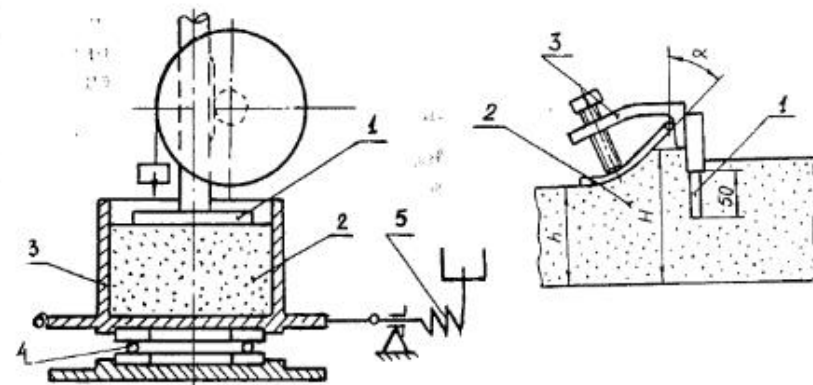


Рис. 5.2. Схема испытаний материалов при трении дискового образца о свободный абразив

Рис. 5.3. Схема испытаний материалов при трении о свободный абразив по «способу лотка»

угол  $\alpha$ . Предусмотрены также специальные скребки, установленные перед уплотнителем и служащие для перемешивания грунта. Износостойкость определяют по износу массы образцов за 600 км пути трения.

7. «Вращающаяся чаша» (Е. С. Беркович). Образцы вращают вокруг оси крыльчатки, на которой они закреплены, осуществляя попеременный вход в абразивную массу и выход из нее с одновременным перемешиванием абразива. В то же время специальный валик-каток уплотняет и выравнивает абразив. Сама емкость с абразивом выполнена в форме полой чаши и вращается вокруг своей оси. Принципиально схема близка к схеме лотка.

8. Схема, сочетающая «способ лотка» и «способ гильзы» (И. В. Южаков). Образцы крепят в оправке на конце шпинделя, вращающегося от электродвигателя через ременную передачу и перемещающегося в направлении, перпендикулярном вращению (вверх-вниз) с подачей 0,05 мм/об. Абразивную среду засыпают в чашу и уплотняют, изменяя влажность грунта. Путь трения образца 2,5 км, скорость перемещения образцов 40 м/мин.

9. «Способ шаровой машины» (Клапп и Дэверо) основан на исследовании износа сферических образцов, погруженных вместе с абразивной массой во вращающийся барабан.

10. «Вращающийся барабан» (рис. 5.4) (К. П. Чудаков, И. В. Петров). Плоские образцы 1 закрепляют на внутренней поверхности барабана 2, в котором находится определенное количество кускового абразивного материала. Возможны испытания при падении кусков сверху барабана (рис. 5.4, а) и при перемещении образцов в абразивной массе (рис. 5.4, б).

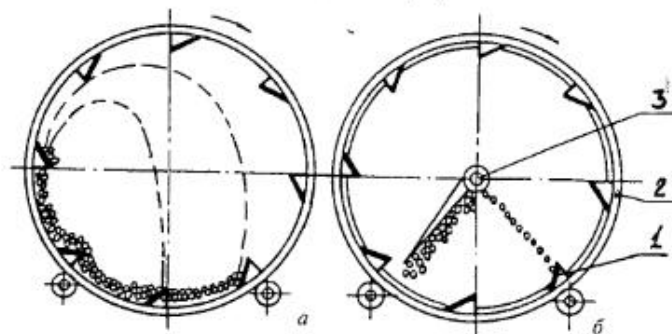


Рис. 5.4. Схема испытаний материалов по способу «вращающийся барабан»

## 5.2. Методы испытаний на гидроабразивную износостойкость материалов

1. Схема Штауффера. На шпинделе сверлильного станка крепят диск с установленными на его периферии образцами в форме цилиндра диаметром 10 мм и длиной 50 мм. Скорость движения образцов 5,83 м/с. Абразивную смесь, взвешенную в воде, подают на образцы.

2. Цилиндрические образцы устанавливают в трубопроводе, через который прокачивают гидроабразивную взвесь, в том числе и в эксплуатационных условиях реального производственного трубопровода.

3. Во внутреннюю поверхность цилиндрической обоймы устанавливают образцы и обеспечивают поток гидроабразивной смеси со скоростью 16–20 м/с под углом атаки, близким к нулю, за счет вращения лопаток.

4. Схема «мельничное колесо», в которой пластинчатые образцы размерами 72×25×9 мм закреплены на вращающемся с частотой 5 об/с колесе.

5. Образцы в виде сектора или диска из листового материала, вращающиеся с частотой 1000–1500 об/мин вокруг горизонтальной оси, помещены в прозрачный бачок вместимостью 3 л с гидроабразивной смесью (1 л воды с 50–400 г песка).

6. Цилиндрические образцы диаметром 10 мм, длиной 75 мм устанавливают между дисками шпиндельной головки и вращают со скоростью 6,4 м/с. Шпиндельная головка смещена относительно оси симметрии бака с гидроабразивной смесью. Время испытаний 1–6 ч.

7. Испытания в струе гидроабразивной смеси, образуемой пневматическим выдавливанием ее из бака, содержащего 2,1 л смеси, с использованием баллона со сжатым воздухом и редуктора. Гидроабразивная смесь вытекает со скоростью 30 м/с. Образец укрепляют под углом 45 град к оси сопла.

8. Раздельные потоки абразивных частиц и жидкости смешивают на основе эжекционного эффекта. В бак, содержащий 52 л воды, подают под давлением 0,4 МПа сжатый воздух. Абразивные частицы дозируют, смывают в воронку и эжектируют в струю воды основной магистрали. На расстоянии 130 мм от сопла диаметром 5 мм закрепляют образец 50×50×6 мм. Испытания каждого образца проводят до расходования 2 кг песка и 52 л воды.



9. Схема центробежного ускорителя (см. ГОСТ 23.201—78 [69]), в которой реализуют взаимодействие потока гидроабразивной смеси, вырывающейся из трубок, и поверхностей образцов, расположенных к ним под заданным углом. Частота вращения ускорителя 2800 об/мин, скорость истечения гидроабразивной смеси 29 м/с.

### 5.3. Метод испытаний на кавитационное изнашивание (КТИПП, Г. А. Прейс)

*Сущность метода* [58]. Поверхность испытуемых материалов подвергают воздействию ультразвуковой кавитации с заданной частотой и амплитудой колебаний при анодной поляризации для некоррозионностойких образцов. Относительную износостойкость оценивают сравнением износа исследуемых и эталонных образцов в идентичных условиях.

Анодная поляризация обеспечивает интенсификацию коррозионных процессов, степень которой регулируют анодным током.

*Условия испытаний.* Схема испытаний на износостойкость при кавитационном изнашивании методом КТИПП показана на рис. 5.5, где 1 — испытуемый образец, 2 — магнитострикционный вибратор, 3 — опора вибратора, 4 — генератор ультразвуковых колебаний, 5 — источник постоянного тока, 6 — сосуд с рабочей жидкостью, 7 — вспомогательный электрод. Резонансная частота  $21 \pm 1$  кГц, амплитуда колебаний цилиндрического образца  $l$  в осевом направлении  $35 \pm 5$  мкм; потенциал рабочего электрода от  $-4$  до  $+4$  В с погрешностью  $\leq 1$  мВ; ток от  $-0,5$  до  $+0,5$  А с погрешностью установки  $\leq 0,5$  мА. Эталонный материал образца 1 — сталь 45.

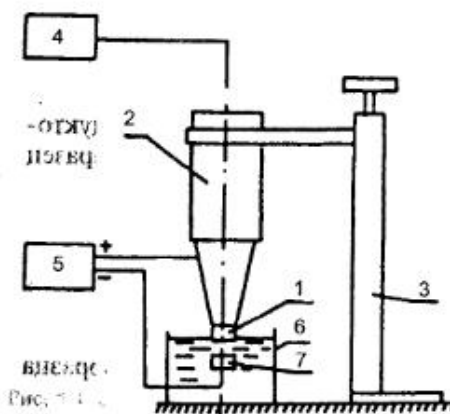


Рис. 5.5. Схема испытаний на износостойкость при кавитационном изнашивании методом КТИПП

Диаметр образца должен быть равен диаметру торца акустического трансформатора, длина — обеспечивать нужные характеристики колебаний.

### 5.4. Методы триботехнических испытаний в вакууме

К основным особенностям работы узлов трения в вакууме относят: затрудненность образования окисных и адсорбированных пленочных пленок на поверхностях трения, испарение материалов, смещение равновесия химических реакций материалов на поверхностях трения, возможность деструкции материалов, изменения фазового состояния и (как следствие этого) механических свойств материалов, отсутствие конвективного теплоотвода.

Особенности работы узлов трения в вакууме приводят к значительным отличиям триботехнических характеристик материалов по сравнению с их работой на воздухе, что определяет необходимость специальных условий испытаний [85].

#### Метод испытаний при фрикционном разогреве посредством ступенчатого изменения частоты вращения образца

*Сущность метода.* Вращающийся и неподвижный кольцевые образцы из материалов исследуемого сочетания устанавливают соосно, прижимают один к другому торцевыми рабочими поверхностями с заданной осевой нагрузкой, ступенчато изменяют температуру фрикционного разогрева ступенчатым изменением частоты вращения образца и определяют коэффициент трения и интенсивность изнашивания для каждой температуры фрикционного разогрева, а о фрикционной теплостойкости судят по зависимости этих величин от температуры. Испытания проводят в вакууме и отличие от метода испытаний по РД 50-662—88 [75].

*Условия испытаний.* Установка для испытания материалов на фрикционную теплостойкость в вакууме состоит из следующих основных частей: системы получения в рабочей камере вакуума, машины трения, системы контрольно-измерительных приборов для измерения вакуума и параметров трения. При необходимости установка может быть приспособлена для испыта-

ний в газовых средах, для этого ее дополнительно оборудуют системами подачи в рабочую камеру необходимого газа и контроля атмосферы.

Машина трения И-47-В-2 [86] позволяет проводить испытания в вакууме до  $5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. и имеет следующую характеристику:

Диапазон изменения скоростей вращения, мин <sup>-1</sup>	200—10000
Диапазон изменения давления, кПа	50—500
Мощность электродвигателя, кВт	0,5
Вращающий момент магнитной муфты, Н·см	60

Образцы и порядок испытаний регламентированы РД 50 662—88.

#### Метод испытаний при разогреве с помощью нагревателя

*Сущность метода.* Пальчиковые подвижные образцы из испытываемого самосмазывающегося материала прижимаются с заданной осевой нагрузкой к неподвижному диску, закрепленному на оправке, имеющей спиральный нагреватель. С помощью нагревателя ступенчато изменяют температуру неподвижного диска и определяют соответствующие значения коэффициента трения, а о фрикционной теплостойкости судят по зависимости коэффициента трения от температуры. Испытания проводят в вакууме.

*Условия испытаний.* Схема испытаний — три пальчиковых образца — диск. Установка для исследования трения материалов при высоких температурах в вакууме содержит [85]: рабочий вал, установленный в опорах качения (или скольжения), которые вмонтированы в корпус, имеющий рубашку охлаждения. К рабочему валу крепится оправка с тремя подвижными пальчиковыми образцами с самоустанавливающейся опорой. Неподвижный образец-диск закреплен в оправке, имеющей спиральный нагреватель. В зависимости от поставленной задачи и методики оправки и формы образцов изменяют. Нагрузка на испытуемый узел трения создается с помощью рычага через сильфонное уплотнение и измеряется пружиной с наклеенными на нее тензодатчиками. Момент трения измеряют по углу поворота вала, установленного в опорах качения. Поверхностные слои испытываемых материалов вместе с оксидами и адсорбированными газами механически удаляются как до, так и в процессе испытаний.

#### 4.5. Метод триботехнических испытаний конструкционных материалов для пар трения технологического оборудования (ИИИТСХМ, ИМАШ РАН)

*Сущность метода* [86]. При разных видах движения в паре проводят сравнительные испытания при ступенчато повышаемых давлениях до появления катастрофических износов образцов, задерживая либо значительного повышения коэффициента трения. О неустойчивости пары судят по предельно допустимому давлению, предшествующему износу пары. Об износостойкости материалов судят по интенсивности изнашивания, определяемой по формулам 3.1—3.4 по потере массы каждого из образцов пары при

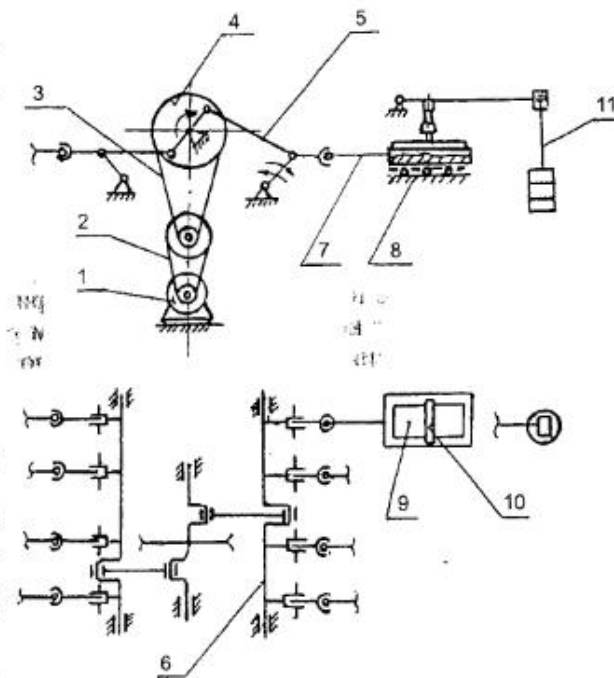


Рис. 5.6. Кинематическая схема восьмипозиционной машины трения МТ-8 по направлению движения

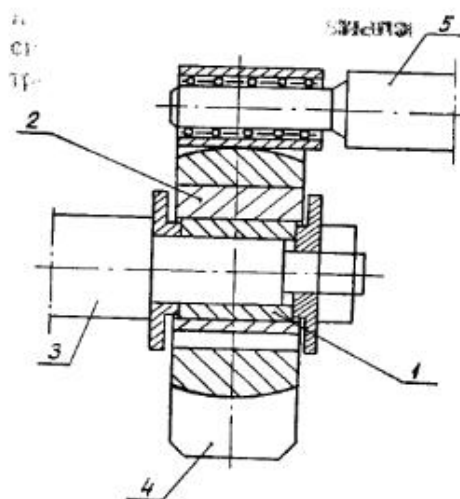


Рис. 5.7. Схема установки образца сопряжения втулка на машине трения МИ-1: 1 — образец-вал, 2 — образец-втулка, 3 — вал машины трения, 4 — крепление втулки, 5 — механизм нагружения

определенном давлении. Метод применяют для сравнительных испытаний металлов, пластичных смазок и присадок к смазочным материалам.

**Условия испытаний.** Проводят на машине трения

77-МТ-1 (см. рис. 4.16) или МТ-8 (восьмипозиционная машина трения конструкции НИИТСХМ), кинематическая схема которой показана на рис. 5.6. Основными узлами машины являются: 1 — двигатель, две клиноременные передачи 2 и 3, кривошипно-шатунный механизм, (4 — эксцентрик, 5 — шатун, 6 — кройщик, 7 — водило), 8 — каретка, 9 и 10 — подвижный и неподвижный образцы, 11 — нагрузочное устройство. Движение от двигателя через клиноременные передачи передается на кривошипно-шатунный механизм и от него к подвижным частям рабочей пары. Скорости скольжения на машине МТ-8 от 0,1 до 0,4 м/с. Нагрузка до 1250 Н. Ступени нагружения: 0,2; 1,25; 2,5; 3,75; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40 МПа при работе с пластичными смазками и 0,5; 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40 при работе в жидких маслах.

Испытания при вращательном движении проводят на машине трения СМЦ-2 и МИ-1 по схеме колодка-ролик (см. рис. 4.5) и втулка-вал (рис. 5.7). Скорости скольжения от 30 до 1000 мин<sup>-1</sup>, нагрузка от 50 до 2000 Н. Ступени нагружения: 0,6; 1,25; 2,5; 3,75; 5; 7,5; 10 МПа.

По результатам испытаний по данной методике создана база данных по триботехническим характеристикам пар трения (см. п. 6).

## 5.6. Метод испытаний сопряжения торца поршневого кольца — канавка поршня

**Сущность метода.** При одинаковых условиях осуществляют возвратно-поступательное движение одной из деталей пары относительно другой с малыми перемещениями при смазывании смазочными материалами.

В процессе испытаний определяют и регистрируют силу трения в контакте испытуемых образцов; износ массы образцов и температуру рабочей поверхности образцов.

Триботехнические характеристики испытуемых пар трения сравнивают с триботехническими характеристиками эталонных пар, испытания которых проводят параллельно с испытуемыми.

**Условия испытаний.** Кинематическая схема машины трения приведена на рис. 5.8. Основными узлами машины являются: двигатель, эксцентрик, кривошипно-шатунный механизм, рабочая позиция, состоящая из полуцилиндрических направляющей и платформ, на которой закрепляют подвижный образец. Неподвижный образец закрепляют в рычаге, являющемся частью нагрузочного устройства. Движение от двигателя передается на кривошипно-шатунный механизм через эксцентрик в отличие от машины 77МТ-1, где между двигателем и кривошипно-шатунным механизмом установлен редуктор. Эксцентрик позволяет осуще-

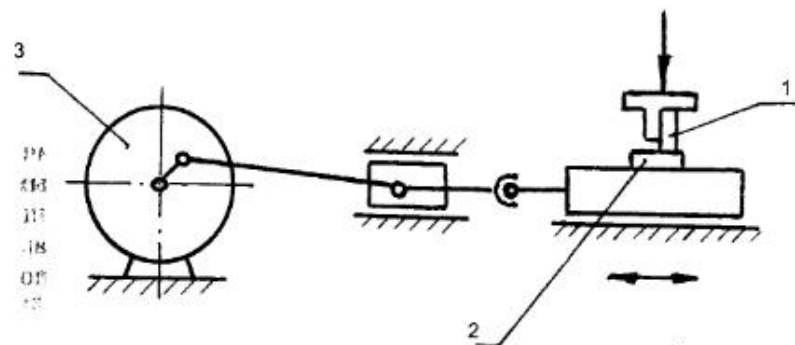


Рис. 5.8. Схема испытаний пары трения торца поршневого кольца — канавка поршня: 1 — образец-поршень, 2 — образец-кольцо, 3 — механизм нагружения

ствлять движение с малыми перемещениями и большой частотой, что характерно для пары трения «торец поршневого коленца — канавка поршня». Средняя скорость скольжения в паре  $0,05-0,15$  м/с. Ход подвижного образца  $0,5-1,5$  мм. Наибольшая нагрузка на пару  $1250$  Н. Число оборотов двигателя  $2830$  об/мин. Образцы, моделирующие узел трения, изготавливают из реальных деталей. Интенсивности изнашивания определяют по потере массы каждого из образцов пары по формулам (а), (б).

### 5.7. Метод триботехнических испытаний сопряжений вкладыш подшипника—шейка коленчатого вала (ИМАШ РАН)

**Сущность метода.** Испытания сопряжения проводят при постоянном давлении в контакте в режиме пуска — остановки с капельной подачей в зону трения смазочного масла. Регистрируют момент трения, износ массы вкладышей, износ образца-шейки профилографированием, температуру в зоне трения.

**Условия испытаний.** Установка для проведения испытаний включает два двигателя АО-112М-6, установленные на одном столе, на валах которых располагаются рабочие позиции с испытуемыми образцами. Конструктивная схема рабочей позиции представлена на рис. 5.9. Здесь 3 — электродвигатель, на валу которого закрепляется образец-вал 2. Образцы вкладыши 1 закрепляются в оправках 4 и устанавливаются на образец 2 один против другого. Количество одновременно работающих вкладышей на одной рабочей позиции — два. Прижим образцов друг к другу осуществляется винтом. Усилие прижима контролируется градуированной пластиной и индикатором с ценой деления  $0,01$  мм —  $17$  Н. Поворот оправки 4 ограничивается упором 5, представляющим собой балочку с наклеенными на нее тензодатчиками для измерения силы трения, возникающей в процессе работы пары. Для измерения температуры в контакте трущихся пар к вкладышу, закрепленному в нижней оправке, подведен спай хромель-копелевой термопары 7.

Сила трения регистрируется усилителем Топаз-4 и далее может быть либо записана на самописце, либо зафиксирована по шкале цифрового вольтметра Ш-1314. Сигнал от термопары подается и снимается со шкалы милливольтметра Ш 4500.

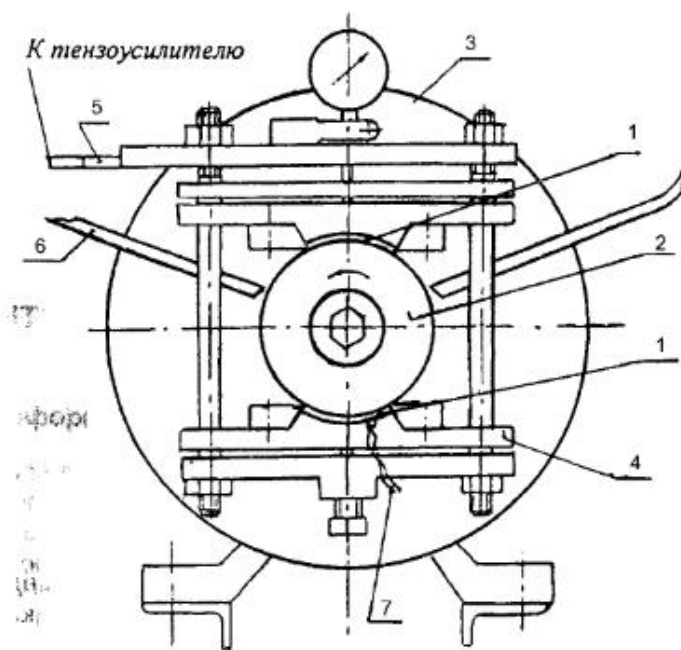


Рис. 5.9. Стенд для испытаний пар трения вкладыш — шейка коленвала

Испытания проводят при подаче в зону трения масла по подводу 6 со скоростью  $20$  капель в минуту, для чего на машине установлен узел смазки, или смеси масла с абразивом при помощи дозатора.

Время цикла и длительность вращения образца-вала задается специальным таймером. В качестве образцов, имитирующих коленчатый вал, используются образцы, выполненные в виде ролика диаметром, равным диаметру вала, и шириной  $30$  мм.

Образцы-вкладыши изготавливают из реальных вкладышей подшипников скольжения.

Средняя скорость скольжения в паре трения  $1$  м/с. Наибольшая нагрузка на пару  $100$  Н.

Число оборотов двигателя в минуту —  $960$ . Потребляемая мощность  $1,1$  кВт. Наибольшая сила трения  $250$  Н. Режим работы — «пуск—остановка». Время цикла  $1$  мин. Длительность вращения образца-вала —  $30$  с.

## Глава 6. ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРЯЖЕНИЙ

### 6.1. Базы данных по триботехническим характеристикам пар трения (БД)

В России и странах СНГ разработано несколько баз данных по триботехническим характеристикам материалов, работающих в разных условиях. К ним относятся: база по материалам для работы в вакууме и при низких температурах (Украина) [87], по свойствам полимеров (Белоруссия) [88], по материалам для узлов трения скольжения технологического оборудования (Россия) [89], по материалам для железнодорожного транспорта (Россия) [90], по температурной диагностике трения (Россия) [91] и база технической информации об узлах трения двигателей внутреннего сгорания разных назначений и модификаций (Россия) [92]. За рубежом созданию баз данных по триботехническим характеристикам материалов уделяется очень большое внимание; в настоящее время трибологические БД находятся в стадии интенсивной разработки. Создание развитой сети банков триботехнических данных является основным направлением развития трибологии в ближайшее время [93].

База данных по триботехническим характеристикам пар трения позволяет обобщить данные по поведению конструкционных материалов (металлы и неметаллы) в условиях трения, постоянно дополняя их. Триботехническая информационно-поисковая система включает базу триботехнических характеристик и программу

поиска пар трения из базы данных по заданным критериям. Разрабатываемые БД и ИПС вооружат исследователей, конструкторов и технологов исчерпывающими знаниями о поведении материалов в конкретных условиях испытаний.

В базе данных обобщены результаты исследования триботехнических характеристик пар трения, полученные на машинах трения и стендах при возвратно-поступательном, вращательном и возвратно-вращательном движениях. В настоящее время внесены сведения о более чем 500 сочетаниях материалов, работающих в разных условиях нагружения и смазки.

### 6.2. Информационно-поисковая система (ИПС)

Аналогом описываемой базы данных является база по триботехническим свойствам конструкционных материалов для узлов трения скольжения технологического оборудования [89].

Триботехническая ИПС использует систему управления базами данных «Ребус» (dBASE III Plus), выбранную по рекомендации секции информационных систем Межведомственного научного совета по трибологии с целью унификации доступа к триботехническим базам, разрабатываемым в стране и за рубежом. Структура файла БД также соответствует структуре, разработанной в рамках Межведомственного научного совета общими усилиями специалистов под руководством докт. техн. наук С. М. Захарова, и содержит 80 полей для каждой записи, позволяющих представить информацию по условиям испытаний, по результатам испытаний с учетом оценки вида изнашивания, статических и динамических характеристик, критических точек, состояния поверхности и др. Программа поиска пар трения в БД по заданным критериям разработана применительно к персональным ЭВМ в режиме диалога ПЭВМ — пользователь и ориентирована на специалистов, занимающихся проблемами трения и износа в узлах машин, приборов и оборудования.

Система обеспечивает автоматизацию выбора материалов при проектировании и эксплуатации узлов трения скольжения с учетом действующей на узел трения нагрузки, скорости скольжения, вида смазочного материала, вида движения в паре. Система обеспечивает также поиск и нахождение оптимального сочетания

материалов по основным триботехническим характеристикам, наименьшим интенсивности изнашивания пары и коэффициенту трения в паре.

В базу данных включены сведения о парах трения скольжения, работающих при возвратно-поступательном, вращательном, возвратно-вращательном движениях в диапазоне скоростей скольжения 0,1—0,4 м/с, при давлениях от 0,2 до 40 МПа, при использовании пластичных смазок и жидких масел без присадок и с присадками. В базе содержатся сведения о разных видах упрочнений: объемной, ТВЧ, лазерной закалке, цементации, нитроцементации, азотировании, азотировании в тлеющем разряде, ионной имплантации азота, покрытиях КИБ, металлоорганических, плазменных, ФАБО и др.

Каждая из характеристик пары трения заносится и хранится в месте, называемом полем. Описание каждой пары представляет совокупность полей и называется записью. Запись любой пары трения имеет одинаковое количество полей, следующие одно за другим в одном и том же порядке. Совокупность записей обо всех парах трения образует файл данных. Файл можно рассматривать как некоторую таблицу, каждая строчка которой — запись файла, а поле записей — элемент столбца таблицы (табл. 6.1). Такая модель файла является базовой для файла данных dBASE III Plus, как системы управления базой данных. В нашем случае файл данных получил название TRIBSTR2.DBF. При отсутствии информации для заполнения какого-либо из полей надо переходить к следующему полю, имеющему информацию для заполнения.

Для каждой пары трения основными, обязательными триботехническими характеристиками являются износостойкость, фрикционность, несущая способность. Показателем износостойкости является интенсивность изнашивания каждой детали пары  $I_1 = h_1/L_1$ ,  $I_2 = h_2/L_2$  и суммарная интенсивность изнашивания пары  $I_{\Sigma}$  (где  $h_i$  — толщина изношенного слоя,  $L_i$  — путь трения). База позволяет вносить значения интенсивностей изнашивания разных размерностей с обязательным их указанием. Однако для сравнения и выбора пар трения по наименьшей величине интенсивности изнашивания требуется введение в базу данных величин интенсивностей изнашивания одной и той же размерности. В БД используется безразмерная величина [мм износа / мм пути трения].

Таблица 6.1

## Полная структура файла

№ поля	Содержание поля данных	Режимы и варианты ответов
1	Масштаб перемещений	Покой, предварительное смещение, движение
2	Кинетика	Квазистатическое, кинетическое
3	Кинематика	Скольжение, качение, качение со скольжением, верчение
4	Характер относительного движения	Непрерывное, скачкообразное (более 0,1 мкм)
5	Вид движения	Вращательное, поступательное, возвратно-вращательное, возвратно-поступательное
6	Наличие смазки	Со смазкой, без смазки
7	Вид смазочного действия	Гидродинамическое, газодинамическое, гидростатическое, при граничной смазке, газостатическое, твердосмазочное и др.
8	Схема испытания или геометрия пары (ведущий 1 — ведомый 2)	Плоскость—плоскость, цилиндр—цилиндр, конус—конус, плоскость—конус, цилиндр—плоскость, шар—плоскость, другие сочетания
9	Площадь контакта, м <sup>2</sup>	
10	Размеры образцов, мм	
11	Испытательное оборудование	Тип испытательной системы
12	Режим испытаний	Непрерывный, циклический
13	Время цикла испытаний, мин	
14	Нагрузка, вид	Постоянная, ступенчатая, переменная
15	Нагрузка постоянная, Н	
16	Нагрузка ступенчатая P, Н	
17	Нагрузка переменная, амплитуда, Н	
18	Нагрузка переменная, частота, Гц	
19	Скорость линейная, м/с	

См. продолжение

Продолжение табл. 6.1

№ поля	Содержание поля данных	Режимы и варианты ответов
20	Скорость угловая, 1/с	Смазочные масла, пластичные смазки, полужидкие смазки, рабочие жидкости, топлива, технологические среды
21	Смазочные материалы	
22	Марка смазочного материала	
23	Способ введения смазочной среды	Непрерывный под давлением, непрерывный без давления, периодический под давлением и без давления, капельный и др.
24	Температуры, при которых определялась вязкость, °С	Газообразное, жидкое, твердое, плазма, смеси
25	Значение кинематической вязкости при заданных температурах, мм <sup>2</sup> /с	
26	Пьезокоэффициент вязкости, 1/Па	
27	Физическое состояние среды	Нейтральное, окислительное, механическое, диффузионное, другие виды
28	Воздействие среды	Закрепленный абразив, свободные частицы, другие виды
29	Давление среды, Па	
30	Температура среды, °С	
31	Абразивное действие	Углеродистая сталь, легированная сталь, чугун, алюминий и его сплавы, медь и ее сплавы, бронза, антифрикционные, самосмазывающие,
32	Концентрация абразивных частиц, %	
33	Средний размер абразивных частиц, мкм	
34	Вид материала элемента пары 1	

См. продолжение

Продолжение табл. 6.1

№ поля	Содержание поля данных	Режимы и варианты ответов
		специальные антифрикционные композиции
35	Вид материала элемента пары 2	То же
36	Марка материала элемента пары 1	кнпгпгжон глнпггггМ ; гнтг гнтг
37	Марка материала элемента пары 2	
38	Твердость поверхности материала 1	
39	Твердость поверхности материала 2	
40	Исходная шероховатость материала 1	Точение, фрезерование, строгание, притирка, В полирование и др. глжжм
41	Исходная шероховатость материала 2	
42	Технология окончательной обработки поверхности материала элемента 1 пары	
43	Технология окончательной обработки поверхности материала элемента 2 пары	То же
44	Вид поверхностного упрочнения материала 1	Деформационное, термическое, лазерное, химико-термическое и др.
45	Вид поверхностного упрочнения материала 2	То же
46	Вид технологического процесса упрочнения материала 1	Чеканка, нитроцементация, закалка с НТО и др.
47	Вид технологического процесса упрочнения материала 2	
48	Тип покрытия материала 1	То же Без покрытия, ионно-плазменное, плазмо-химическое, гальваническое, электроискровое, лазерное, другие

См. продолжение

Продолжение табл. 6.1

№ поля	Содержание поля данных	Режимы и варианты ответов
49	Тип покрытия материала 2	Без покрытия, мягкие металлы, оксиды металлов, твердые смазочные покрытия, сверхтвердые износостойкие
50	Материал покрытия элемента пары 1	
51	Материал покрытия элемента пары 2	
52	Толщина покрытия материала 1, мкм	
53	Толщина покрытия материала 2, мкм	
54	Ведущий вид износа по виду взаимодействия	Механический, механо-химический, электрохимический
55	Ведущий вид износа по механизму взаимодействия	Абразивный, кавитационный, коррозионный, фреттинг, фреттинг-коррозия, износ при виброперемещениях, другие виды
56	Ведущий вид износа по процессу разрушения	Контактная усталость, микрорезание, отслаивание, полирование, перекос
57	Размерность износа материала (покрытия) 1	
58	Размерность износа материала (покрытия) 2	
59	Размерность суммарного износа	
60	Величина износа материала (покрытия) 1	
61	Величина износа материала (покрытия) 2	
62	Величина суммарного износа	
63	Среднее значение силы трения, Н	

См. продолжение

Продолжение табл. 6.1

№ поля	Содержание поля данных	Режимы и варианты ответов
64	Коэффициент трения	
65	Место измерения температуры	Поверхность (< 0,1 мм), объемная температура (0,1—0,2 мм)
66	Среднее значение температуры за период снятия трибологических характеристик	
67	Предельное допустимое давление, МПа	
68	Критическое давление, МПа	
69	Индекс задира смазочного материала при трении	
70	Критическая температура $T_{кр}$ , °C	
71	Температура химической модификации $T_{хм}$ , °C	
72	Критическая температура смазочного материала $T_{хр}$ , °C	
73	Диаграммы PV	Нет, да — вход в подбазу данных диаграмм состояния
74	Наличие кривой износа	Нет, да — вход в подбазу данных по кривым износа с табличным и графическим представлениями результатов
75	Динамические характеристики трибосистемы	Нет, да — вход в подбазу данных по динамическим характеристикам трибосистемы
76	Амплитудно-частотные характеристики контакта	Нет, да — вход в подбазу данных по амплитудно-частотным характеристикам
77	Режим анализа результатов	Нет, да — вход в экспериментальную систему анализа результатов и вычисление различных характеристик трения

См. продолжение



Продолжение табл. 6.1

№ поля	Содержание поля данных	Режимы и варианты ответов
78	Организация, где получены данные	
79	Фамилия получившего	
80	Дата получения или занесения	

Показатель фрикционности применительно к парам скольжения — коэффициент трения, который определяется в процессе испытаний как отношение силы трения к силе нормального давления. Несущая способность или стойкость к заеданию определяется предельно допустимым давлением, до величины которого включительно пары работают устойчиво, без заеданий и катастрофических износов.

Программа поиска оптимального сочетания материалов в паре трения по их основным триботехническим характеристикам, а также программа сортировки выбранных пар трения по критериям наименьшей интенсивности изнашивания в паре и наименьшего коэффициента трения в паре разработаны на языке программирования dBASE с использованием компилятора Clipper применительно к персональным компьютерам типа IBM PC AT. Программы разработаны в режиме диалога ЭВМ — пользователь с использованием сервисных меню. Они ориентированы на специалистов, занимающихся проблемами трения, износа и смазки в узлах машин и механизмов, не являющихся профессиональными пользователями ЭВМ.

Для использования базы данных необходимо запустить на выполнение программу MTR.EXE. На экране высвечивается заставка с названием программы «Справочник. Пары трения», после которой появляется основное меню программы — выбора условий работы, позволяющее осуществить режим выбора из базы удовлетворяющих этим условиям пар трения, их отбора и вывода. Выход на нужные условия осуществляется перемещением курсора по экрану дисплея к названию выбранного условия и нажатием клавиши ENTER.

Меню выбора условий работы пары трения позволяет выбирать пары по следующим признакам:

- а) вид движения в паре,  $X_i$
- б) скорость скольжения, м/с,  $v_{sl}$
- в) давление в контакте, МПа,
- г) вид смазочного материала,
- д) тип материала первой детали (подвижной),
- е) тип материала второй детали (неподвижной).

Выбор пар трения должен осуществляться не менее чем по одному признаку и не обязательно по всем. При выборе признака от а) до е) на экране высвечиваются характеристики этого признака:

- а) вращательное, поступательное, возвратно-вращательное, возвратно-поступательное;
- б)  $\dots \leq 0,1$ ;  $0,1 < \dots \leq 0,2$ ;  $\dots > 0,2$ ;
- в)  $0 \dots 5$ ;  $5 \dots 10$ ;  $35 \dots 40$ ;  $> 40$ ;
- г) смазочное масло, пластичная смазка, полужидкая смазка, рабочие жидкости, топлива, технологические среды;
- д,е) углеродистая сталь, легированная сталь, чугун, алюминиевые сплавы, антифрикционные самосмазывающиеся материалы, специальные антифрикционные композиции.

После выбора необходимых условий работы следует переход в режим «отбор», по окончании которого сообщается о количестве пар трения, удовлетворяющих выбранным признакам.

В режиме «Вывод» на экране появляется меню с информацией о возможности вывода отобранных пар трения, отсортированных по критериям:

- суммарной интенсивности изнашивания,
- коэффициента трения.

После сортировки на экране возникает меню о характере вывода:

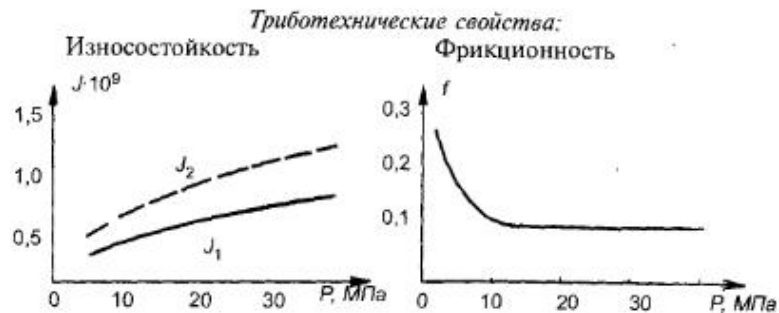
- на печать,
- на экран.

3- В качестве примера приведены данные о паре сталь ШХ15—сталь 38ХМЮА (см с.146).

При отсутствии в базе данных пар с заданными пользователем признаками на экране появляется запись: «Пар трения с заданными характеристиками в базе данных нет». Выход из программы mtr.exe осуществляется клавишей Esc.

Таким образом, использование созданной базы данных по триботехническим характеристикам пар трения поможет освободить пользователя от просмотра и анализа обширной литературы по

## Паспорт пары трения сталь ШХ15 — сталь 38ХМЮА № 20



$$J_{\sigma_1} = 0,80 \cdot 10^{-9}; J_{\sigma_2} = 1,26 \cdot 10^{-9}; J_{\Sigma_{\text{ср}}} = 0,63 \cdot 10^{-9}; f = 0,1$$

Стойкость к заеданию:  $P_{\text{д}} = 40$  МПа  $P_{\text{кр}} = 40$  МПа

Сталь ШХ15, деталь 1      Сталь 38ХМЮА, деталь 2

*Вид обработки поверхности:*

Закалка, HRC 60-65      Азотирование, HRC 60-65

Смазка — солидол

*Кодируемые характеристики:*

Относительное движение	Возвратно-поступательное	
Нагружение	Постоянная прижимающая нагрузка	
Давление в контакте, МПа	35—40	
Скорость скольжения, м/с	0,1—0,2	
Температура в контакте, °С	≤ 70	
Окружающая среда	Воздух	

*Эмпирические зависимости J(p):*

$$J_1 = 0,11 \cdot 10^{-9} + 0,75 \cdot 10^{-10} p^{0,6} \quad J_2 = 0,15 \cdot 10^{-9} + 0,12 \cdot 10^{-9} p^{0,6}$$

*Вероятностные характеристики:*

$$\sigma_1 = 0,28 \cdot 10^{-9} \quad \sigma_2 = 0,22 \cdot 10^{-9}$$

изучаемой проблеме, свести выбор материалов и других условий к рассмотрению предложенных базой; уменьшить время проектирования машин при улучшении его качества; наметить области исследований, имеющие пробелы по использованию условий минимальных потерь на трение; устранить возможность повторений в исследовательских работах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зозуля В.Д., Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Браун Э.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. — Киев: Наукова думка, 1990. — 264 с.
2. Дерягин Б.В. Что такое трение? — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 230 с.
3. ГОСТ 27674—88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
4. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
5. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. — Киев: Техника, 1976. — 292 с.
6. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. — М.: Металлургия, 1976. — 176 с.
7. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания / В Сб. Физика износостойкости поверхности металлов. — Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, 1988. С. 8—41.
8. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. — Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1991. — 64 с.
9. Буше Н.А., Копытко В.В. Совместимость трущихся поверхностей. — М.: Наука, 1981. — 127 с.
10. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. — М.: Машиностроение, 1982. — 212 с.
11. Беркович Е.С., Крапошина Л.Б. Новый прибор ИМАШ — глубиномер интерференционный для испытания на микротвердость по глубине отпечатка. Примеры его применения / В кн.: Новое в области испытаний на микротвердость. — М.: Наука, 1974. С. 93—100.
12. Гаркунов Д.Н. Триботехника, М.: Машиностроение, 1989. — 329 с.
13. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хеды и А.В. Чичинадзе, в 3-х т. Т.1. Теоретические основы — М.: Машиностроение, 1989. — 400 с.
14. Рыбакова Л.М. Рентгенографический метод скользящего пучка лучей и его возможности при исследовании избирательного переноса и поверхностей трения твердых тел. Эффект безызносности в триботехнологии. 1997. № 1. С. 54—66.
15. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов. — М.: Недра, 1996. — 364 с.
16. Иванова В.С., Семенов Б.И., Браун Э.Д. Анализ критических точек трибосистемы на стадии приспособляемости с позиций синергетики // Вестник машиностроения. 1998. № 10. С. 3—12.
17. Поляков А.А., Рузанов Ф.И. Трение на основе самоорганизации. — М.: Наука, 1992. — 135 с.

18. Hall A.D., Fagen R.E., Definition of System // General Systems. V. 1. 1956. P. 18—28.
19. Vstovsky G.V. Transform Information: A Symmetry Breaking Measure. // Foundations of Physics. 1997. V.27. № 10. P. 1413—1444.
20. Vstovsky G.V. Interpretation of the Extreme Physical Information Principle in Terms of Shift Information // Physical Review E. 1995. V. 51. № 2. P. 975—979.
21. Vstovsky G.V., Kolmakov A.G., Terentjev V.F. Using Multifractal Information for Quantitative Evaluation of Broken Symmetries of Materials Structures // MEDŽIAGOTYRA (Materials Science). 1999. № 2 (9). P. 62—65.
22. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф. Применение мультифрактальной параметризации для количественной оценки степени нарушенной симметрии структур металлических материалов, формирующихся в неравновесных условиях // Вестник ВГТУ. Сер. «Материаловедение». 1999. Вып. 1.5. С. 34—39.
23. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г. Механические свойства металлических материалов при статическом нагружении. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1998. — 80 с.
24. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. — М.: Мир, 1990. — 344 с.
25. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979. — 515 с.
26. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. — М.: Наука, 1994.
27. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. — М.: Наука, 1992. — 160 с.
28. Вахал А., Хебда М. Понятие о трибологических системах // В кн.: Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе). Т.1. Теоретические основы. — М.: Машиностроение, 1989. С. 42—45.
29. Salomon G. Application of Systems Thinking to Tribology // ASLE Trans. 1974. V. 17. № 4. P. 295—299.
30. Tribology — a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear. — Amsterdam: Elsevier Publ. co., 1978.
31. Czichos H., Molgaard J. Towards a General Theory of Tribological Systems // Wear. 1977. V. 44. № 2.
32. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. — М.: Наука, 1974. — 280 с.
33. Семенов Б.И., Семенов А.Б., Игнатова Е.В. Принципы и средства синергетического управления приработкой трибопары // Сб. трудов 7-й конф. «Моделирование и исследование сложных систем, сентябрь 2000, Севастополь. — М.: МГА-ПИ, 2001.
34. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов. Под ред. В.Е.Панина, — Новосибирск: Наука, 1995. Т.1. — 298 с. Т.2. — 320 с.
35. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. — New York: Freeman, 1983.
36. Бунин И.Ж., Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Терентьев В.Ф. Концепция фрактала в материаловедении. Сообщение 1. Фрактальная параметризация структур материалов // Материаловедение, 1999. № 2. С. 19—26.
37. Федер Й. Фракталы. — М.: Мир, 1991. — 254 с.
38. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф. Мультифрактальный анализ особенностей разрушения приповерхностных слоев молибдена // Металлы. 1993. № 4. С. 164—178.

39. Бунин И.Ж., Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Терентьев В.Ф. Концепция фрактала в материаловедении. Сообщение 2. Методология мультифрактальной параметризации структур // Материаловедение. 2000. № 1. С. 16—25.
40. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф. Методология мультифрактальной параметризации структур материалов // Вестник ВГТУ, Сер. «Материаловедение». 1999. Вып. 1.6. С. 46—52.
41. Малышев В.Н., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Оптимизация режимов получения и свойств оксидных покрытий на алюминиевом сплаве с использованием метода мультифрактального анализа // Физика и химия обработки материалов. 1997. № 5. С. 77—84.
42. Булычев С.И., Малышев В.Н. Об оценке характеристик пористости из испытаний на кинетическую микротвердость // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 5. С. 98—102.
43. Петросяц А.А., Малышев В.Н., Федоров В.А. и др. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 2. С. 350—354.
44. Малышев В.Н., Булычев С.И., Марков Г.А. и др. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 1. С. 82—87.
45. Алексин В.П., Федоров В.А., Булычев С.И. и др. Особенности микроструктуры упрочненных поверхностных слоев, получаемых микродуговым оксидированием // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 5. С. 121—126.
46. Малышев В.Н., Голуб М.В., Харламенко В.И. Исследование относительной износостойкости композиционных материалов // РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. Машины и нефтяное оборудование. 1983. № 4. С. 4—6.
47. Машиностроительные материалы: Краткий справочник / В.М.Раскатов, В.С.Чуенков, Н.Ф.Бессонов, Д.А.Вейс. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
48. Хрущов М.М. О стандартизации одного из методов испытания на абразивное изнашивание. / В кн.: Методы испытания на изнашивание. — М.: Наука, 1962. С. 40—47.
49. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф. Описание эволюции структуры металлической поверхности при механической обработке с использованием метода мультифрактального анализа // Материаловедение. 1998. № 2. С. 19—24.
50. Kolmakov A.G., Vstovsky G.V. Multifractal Analysis of Metallic Surface Structure Changes during Mechanical Treatment // Materials Science and Technology. 1999. V. 15. № 6. P. 705—710.
51. Колмаков А.Г. Зависимость механических характеристик проволок из малолегированных сплавов молибдена от качества обработки поверхности // Физика и химия обработки материалов. 1993. № 4. С. 110—119.
52. Колмаков А.Г., Геминев В.Н., Терентьев В.Ф. Влияние качества поверхности на усталостную прочность малолегированного молибдена // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 1. С. 87—95.
53. Вальднер В.О., Заболотный В.Т., Старостин Е.Е. // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 5. С. 77—78.
54. Вальднер В.О., Заболотный В.Т., Свитов В.И., Старостин Е.Е. Топография покрытий, полученных методом ионно-атомного осаждения // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 5. С. 51—54.

55. Старостин Е.Е., Колмаков А.Г. Мультифрактальное описание топографической структуры покрытий, полученных термическим напылением в вакууме // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 5. С. 38—47.
56. Колмаков А.Г., Старостин Е.Е., Терентьев В.Ф. Исследование процессов самоорганизации топографической структуры покрытий, формирующихся из паровой фазы // Вестник ВГТУ. Сер. «Материаловедение». 1999. Вып. 1.5. С. 29—33.
57. ГОСТ 27860—88. Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа.
58. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира / Под ред. проф. В.С. Кершинбаума. Центр «Наука и техника». 1993. 327 с.
59. Беркович Е.С. Приборы моделей 965, 966 и 967 для измерения износа деталей машин. — М.: НИИМАШ, 1975. — 36 с.
60. ГОСТ 23.301—78. Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования на приборы.
61. ГОСТ 23.216—84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладоновыми смесями.
62. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазочных масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок. Методические указания. — М.: Госстандарт СССР, 1980. — 60 с.
63. ГОСТ 27640—88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения.
64. ГОСТ 23.207—79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на износостойкость при ударно-абразивном изнашивании.
65. ГОСТ 23.208—79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов о жестко закрепленные абразивные частицы.
66. ГОСТ 17367—71. Металлы. Метод испытания металлов на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы.
67. ГОСТ 11012—69. Пластмассы. Метод испытаний на абразивный износ.
68. РД 50-339—82. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой.
69. ГОСТ 23.201—78. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя.
70. ГОСТ 23.212—82. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на изнашивание при ударе в условиях низких температур.
71. ГОСТ 23.211—80. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии.
72. ГОСТ 23.219—84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами.
73. ГОСТ 23.204—78. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении.
74. ГОСТ 23.213—83. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки противозадирных свойств машиностроительных материалов.

75. РД 50-662—88. Метод оценки фрикционной теплостойкости материалов.
76. Метод проведения триботехнических испытаний конструкционных и смазочных материалов в режиме избирательного переноса (Методические указания). Московский технологический институт. — М.: 1984. — 40 с.
77. ГОСТ 23.220—84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхности восстановленных валов.
78. ГОСТ 23.224—86. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки износостойкости восстановленных деталей.
79. ГОСТ 23.223—97. Обеспечение износостойкости изделий. Метод определения триботехнических свойств конструкционных материалов при взаимодействии с волокнистой массой.
80. ГОСТ 23.205—79. Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима.
81. ГОСТ 9490—75. Материалы смазочные и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине.
82. ГОСТ 23.221—84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении.
83. Annual Book of ASTM Standards. V. 3.02. 1984.
84. Annual Book of ASTM Standards. V. 3.02. 1999.
85. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. — М.: Наука, 1968. — 141 с.
86. Докучаева Е.Н., Лантеева В.Г., Каплина В.Ф. Износостойкость конструкционных материалов. Справочные данные по результатам лабораторных испытаний. — М.: НИИ тракторосельхозмаш, 1977. — 65 с.
87. Гамуля Г.Д., Контева Т.А., Пастухов Ю.В. Фактографическая автоматизированная информационно-поисковая система по трению и изнашиванию материалов. ТИМ КРИОВАК // Трение и износ. 1991. Т. 12. № 1. С. 154—162.
88. Кенько В.М., Кадовба Л.В. Информационно-поисковая система по триботехническим свойствам полимеров // Трение и износ. 1982. Т. 3. № 5. С. 924—929.
89. Докучаева Е.Н., Лантеева В.Г., Троицкая И.А., Каплина В.Ф. Информационно-поисковая система по триботехническим свойствам конструкционных материалов // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 4. С. 629—634.
90. Захаров С.М. Компьютерная трибология // Трение и износ. 1993. Т. 14. № 1. С. 98—106.
91. Богатин О.Б., Старостин Н.П., Черский И.Н., Донченко В.В., Баланов Г.И. Экспериментальная оценка эффективности восстановления моментов трения в системе несмазываемых подшипников по замерам температур // Трение и износ. 1991. Т. 12. № 3. С. 442—445.
92. Дроздов Ю.Н., Сорокин Г.К., Стадников Д.Я. Интеллектуальные системы оценки и прогнозирования ресурса машин // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 1. С. 122—129.
93. Трибология: Исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. — М.: Машиностроение, Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. — 454 с.

Справочное издание

Серия «Специалист-материаловед»

Куксенова Лидия Ивановна  
Лаптева Валерия Григорьевна  
Колмаков Алексей Георгиевич  
Рыбакова Людмила Михайловна

Методы испытаний на трение и износ

Редактор А.В. Савенков

Корректор Ю.И. Коровева

Компьютерная верстка М.Г. Севастьяновой  
Дизайн обложки М. Ф. Журавлевой

Изд. лиц. код 221 ЛР № 090171 от 17.04.97. Подписано в печать 18.07.01. Формат 60×88<sup>1/16</sup>.  
Бум. офсетная № 1. Гарнитура «Таймс». Усл.печ.л. 9,3. Уч.-изд. л. 8,7. Тираж 650 экз.  
Заказ № 742

«Интермет Инжиниринг»

103006, Москва, Старопименовский пер., д. 8, стр. 1-1А

Отпечатано в соответствии с качеством представленного оригинал-макета  
в ОАО Московской типографии № 9  
109003, Москва, Волочаевская ул., 40