

6201  
1496

М Е Х А Н И К А

Н.К. Мышкин  
М.И. Петроковец

И. М. ПЕТРОВИЧ  
С. И. ПЕТРОВИЧ  
С. И. ПЕТРОВИЧ

# ТРЕНИЕ, СМАЗКА, ИЗНОС

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТРИБОЛОГИИ

Брянск  
Брянский государственный технический университет  
1998

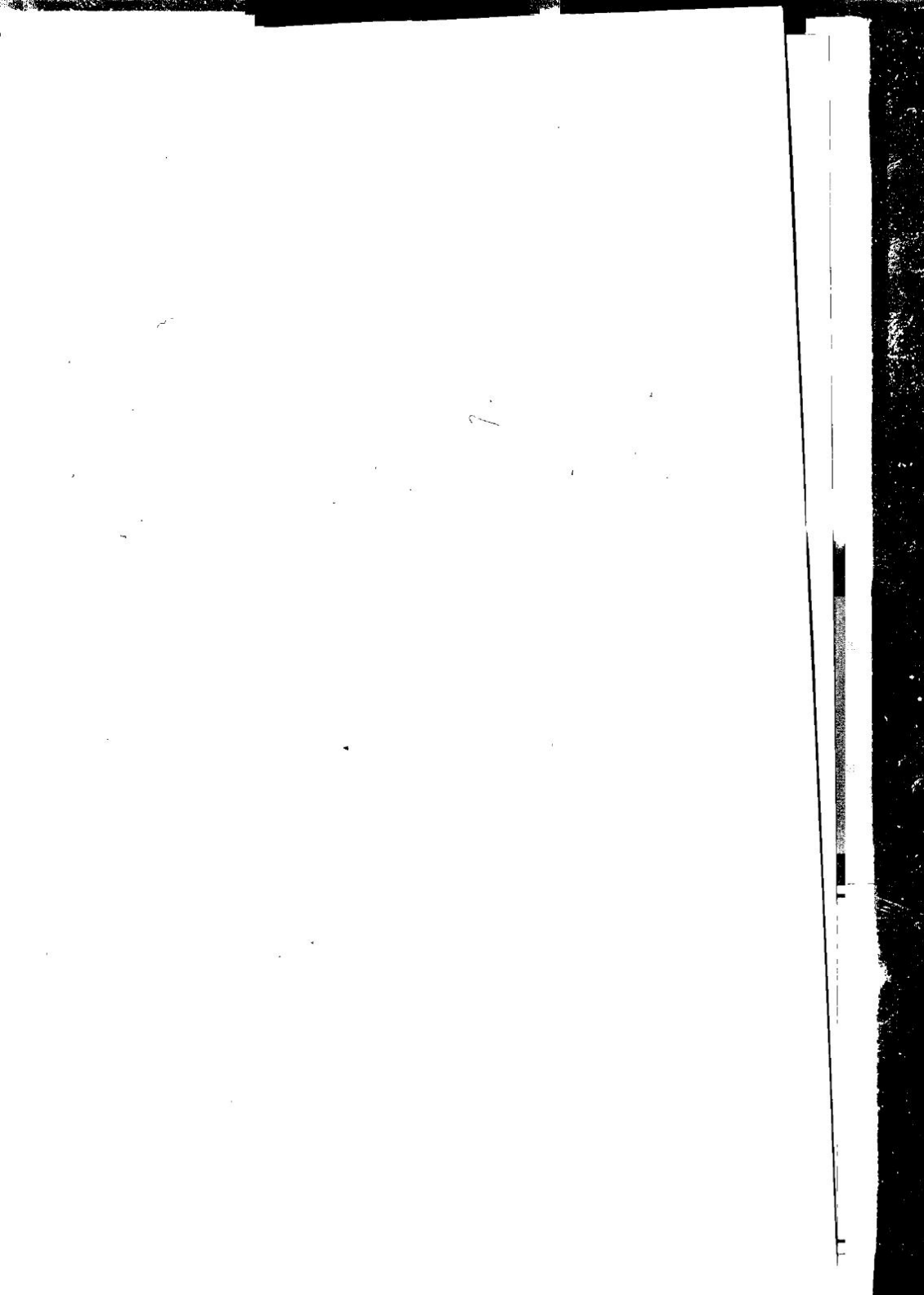
687284

НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
Брянского государственного  
технического университета



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2007

Институт физики  
и механики  
Сибирского федерального университета  
660041, Красноярск, Сибирский тракт, 40  
Тел. (3902) 23-15-15, 23-15-16, 23-15-17, 23-15-18, 23-15-19, 23-15-20, 23-15-21, 23-15-22, 23-15-23, 23-15-24, 23-15-25, 23-15-26, 23-15-27, 23-15-28, 23-15-29, 23-15-30, 23-15-31, 23-15-32, 23-15-33, 23-15-34, 23-15-35, 23-15-36, 23-15-37, 23-15-38, 23-15-39, 23-15-40, 23-15-41, 23-15-42, 23-15-43, 23-15-44, 23-15-45, 23-15-46, 23-15-47, 23-15-48, 23-15-49, 23-15-50, 23-15-51, 23-15-52, 23-15-53, 23-15-54, 23-15-55, 23-15-56, 23-15-57, 23-15-58, 23-15-59, 23-15-60, 23-15-61, 23-15-62, 23-15-63, 23-15-64, 23-15-65, 23-15-66, 23-15-67, 23-15-68, 23-15-69, 23-15-70, 23-15-71, 23-15-72, 23-15-73, 23-15-74, 23-15-75, 23-15-76, 23-15-77, 23-15-78, 23-15-79, 23-15-80, 23-15-81, 23-15-82, 23-15-83, 23-15-84, 23-15-85, 23-15-86, 23-15-87, 23-15-88, 23-15-89, 23-15-90, 23-15-91, 23-15-92, 23-15-93, 23-15-94, 23-15-95, 23-15-96, 23-15-97, 23-15-98, 23-15-99, 23-15-00



7.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
Введение . . . . .	9
<b>Глава 1. Поверхность твердого тела . . . . .</b>	<b>12</b>
1.1. Поверхность как физический объект . . . . .	12
1.2. Геометрические параметры поверхности . . . . .	19
1.3. Текстура поверхности . . . . .	29
1.4. Современные методы исследования поверхности . . . . .	37
1.4.1. Физические методы исследования поверхности (37). 1.4.2. Исследование шероховатости поверхности (39).	
Список литературы . . . . .	45
<b>Глава 2. Концепции трения, изнашивания и смазки . . . . .</b>	<b>46</b>
2.1. Трение . . . . .	46
2.1.1. Законы трения (46). 2.1.2. Элементарная модель трения (50).	
2.2. Изнашивание . . . . .	53
2.2.1. Стадии изнашивания (54). 2.2.2. Элементарная модель изнашивания (55).	
2.3. Смазка . . . . .	58
2.3.1. Роль смазки в технике (58). 2.3.2. Вязкость и режимы смазки (60).	
2.4. Развитие концепций микро- и нанотрибологии . . . . .	65
Список литературы . . . . .	70
<b>Глава 3. Механика и физика контакта твердых тел . . . . .</b>	<b>72</b>
3.1. Контакт гладких тел . . . . .	72
3.1.1. Упругий контакт (72). 3.1.2. Пластический и упругопластический контакт (83).	
3.2. Упругий контакт с адгезией . . . . .	87
3.2.1. Модель Дерягина-Муллера-Топорова (ДМТ) (88). 3.2.2. Модель Джонсона-Кендалла-Робертса (ДКР) (90). 3.2.3. Сравнительный анализ моделей адгезионного контакта (94).	
3.3. Контакт шероховатых поверхностей . . . . .	96
3.3.1. Модель Демкина (97). 3.3.2. Модель Гринвуда-Вильямсона (101). 3.3.3. Критерий перехода от упругого контакта к пластическому (105).	
Список литературы . . . . .	107
<b>Глава 4. Механика и физика трения скольжения . . . . .</b>	<b>108</b>
4.1. Трение скольжения . . . . .	109

УДК 620.179.112

ББК 34.41

М 96

Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 368 с. — ISBN 978-5-9221-0824-9.

Изложены физико-технические основы современной трибологии как науки о закономерностях трения, изнашивания и смазки. Особое внимание уделяется физическим и механическим процессам, сопровождающим формирование и разрушение молекулярных связей. Обсуждаются прикладные аспекты трибологии, охватывающие широкий диапазон вопросов от основ фрикционного материаловедения, технологических способов повышения износостойкости трущихся поверхностей до конкретных деталей узлов трения. Книга содержит обширный справочный материал о триботехнических характеристиках смазок, материалов, деталей машин и способах модифицирования поверхностей.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников в области машиностроения, а также будет полезна студентам и аспирантам, изучающим проблемы трения, изнашивания и смазки.

Табл. 46. Ил. 162. Библиогр. 140.



ISBN 978-5-9221-0824-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2007

© Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, 2007

8.4.1. Методы диагностики изнашивания (217). 8.4.2. Анализ продуктов изнашивания (219). 8.4.3. Мониторинг изнашивания трибосистем (228).	
Список литературы . . . . .	232
<b>Глава 9. Материалы для узлов трения . . . . .</b>	<b>233</b>
9.1. Металлы и сплавы . . . . .	235
9.2. Керамические материалы . . . . .	242
9.3. Полимеры . . . . .	244
9.4. Композиционные материалы . . . . .	248
9.5. Перспективы триботехнического материаловедения . . . . .	253
Список литературы . . . . .	253
<b>Глава 10. Смазки и масла . . . . .</b>	<b>255</b>
10.1. Смазочные масла и пластичные смазки . . . . .	256
10.2. Присадки . . . . .	263
10.3. Твердые смазки . . . . .	269
10.4. Направления развития смазочных материалов . . . . .	271
Список литературы . . . . .	272
<b>Глава 11. Покрyтия и модифицирование поверхности . . . . .</b>	<b>273</b>
11.1. Покрyтия триботехнического назначения . . . . .	274
11.1.1. Электрохимические покрyтия (274). 11.1.2. Наплавленные покрyтия (276). 11.1.3. Испарительные методы (279).	
11.2. Полимерные и металлополимерные покрyтия . . . . .	282
11.3. Модифицирование поверхности . . . . .	284
11.3.1. Модифицирование структуры (284). 11.3.2. Модифицирование химического состава (286).	
11.4. Направления развития методов модифицирования поверхности и нанесения покрyтий . . . . .	287
Список литературы . . . . .	289
<b>Глава 12. Узлы трения . . . . .</b>	<b>290</b>
12.1. Подшипники скольжения . . . . .	290
12.1.1. Конструкции подшипников скольжения (290). 12.1.2. Режимы трения подшипников скольжения (292). 12.1.3. Прогнозирование эксплуатационных свойств подшипников скольжения (295).	
12.2. Подшипники качения . . . . .	301
12.2.1. Конструкции подшипников качения (302). 12.2.2. Долговечность и надежность подшипников качения (307). 12.2.3. Трение в подшипниках качения (310). 12.2.4. Износ подшипников качения (312).	
12.3. Зубчатые передачи . . . . .	313
12.3.1. Типы зубчатых передач (314). 12.3.2. Трение, износ и усталость зубчатых колес (316).	
12.4. Электрические контакты . . . . .	323
12.4.1. Классификация электрических контактов (323). 12.4.2. Конструктивные аспекты (325). 12.4.3. Материалы (325). 12.4.4. Смазки для электрических контактов (326).	

4.1.1. Фактическая площадь контакта (109).	4.1.2. Межповерхностные связи (113).	4.1.3. Деформация при трении (115).	4.1.4. Расчет коэффициента трения (116).	4.1.5. Влияние эксплуатационных факторов на трение (121).	4.1.6. Предварительное смещение (124).	4.1.7. Фрикционные автоколебания (126).	
4.2. Тепловыделение при трении.							127
4.2.1. Постановка тепловой задачи трения (128).	4.2.2. Температура фрикционного контакта (132).	4.2.3. Термическая неустойчивость фрикционного контакта (133).					
Список литературы							135
<b>Глава 5. Механика и физика трения качения</b>							136
5.1. Упругий гистерезис							137
5.2. Микропроскальзывание							139
5.3. Адгезия							144
5.4. Пластическая деформация							146
5.5. Общее сопротивление качению							147
Список литературы							148
<b>Глава 6. Изнашивание</b>							150
6.1. Основные механизмы изнашивания							150
6.2. Абразивное изнашивание							154
6.3. Адгезионное изнашивание							159
6.4. Усталостное изнашивание							162
6.5. Коррозионное изнашивание, фреттинг, эрозия и кавитация							165
6.6. Комбинированные виды изнашивания							175
Список литературы							176
<b>Глава 7. Гидродинамика смазки</b>							177
7.1. Вязкое течение							177
7.1.1. Физические соотношения (177).	7.1.2. Уравнение неразрывности (179).	7.1.3. Уравнение движения (180).	7.1.4. Уравнение энергии (183).				
7.2. Гидродинамическая смазка							184
7.2.1. Основы гидродинамической смазки (184).	7.2.2. Формула Петрова (187).	7.2.3. Уравнение Рейнольдса (189).	7.2.4. Уравнение Рейнольдса для радиального подшипника (191).				
7.3. Упругогидродинамическая смазка							200
Список литературы							203
<b>Глава 8. Физико-технические методы контроля изнашивания</b>							205
8.1. Испытания на трение и изнашивание и их данные							205
8.2. Обработка, представление и стандартизация результатов трибоиспытаний							207
8.3. Трибологические базы данных							211
8.4. Диагностика и мониторинг изнашивания							216

## Предисловие

История появления данной книги несколько необычна, так как ее прототип был впервые опубликован на английском языке в Сеуле и служит уже несколько лет учебным пособием для аспирантов и студентов не только азиатских стран, но и стран Запада. В связи с этим книга была построена, в основном, на материале, доступном англоязычному читателю.

Реакция на англоязычное издание была положительной, и было отмечено, что книга представляет значительный интерес, так как ее содержание и уровень сложности материала удачно заполняет пробел между монографиями, справочниками и учебниками. Поэтому в 2003 г. авторы решились переработать книгу для русского издания и представить на суд научного и инженерного сообществ стран СНГ. Авторы хотели сблизить подходы, существующие в русскоязычной и западной литературе при изложении основных проблем трения, смазки и изнашивания. Это русское издание получило высокую оценку читателей, многие из которых сделали ряд конструктивных замечаний по содержанию и форме изложения материала.

Настоящее издание было подготовлено для Физматлита, и авторы сделали основной акцент на физических аспектах процессов трения, смазки и изнашивания.

Несколько слов о структуре книги. В первых двух главах авторы ставили перед собой целью дать общее представление о предмете. Последующие главы — это своеобразный переход к более строгому и систематическому изложению, основой которого служит контактная механика, теория трения и изнашивания, теория гидродинамической смазки и тепловых явлений при трении. Трение скольжения, трение качения и изнашивание рассматриваются в этих главах. Отдельные главы посвящены методам испытаний, материалам, покрытиям и смазкам. Последняя глава посвящена описанию наиболее распространенных узлов трения. Несомненно, что рассмотрение некоторых вопросов носит дискуссионный характер, но есть надежда, что книга будет полезна широкому кругу специалистов, а также студентам и аспирантам.

Хотелось бы выразить благодарность коллегам по работе в Институте механики металлополимерных систем им. В.А.Белого НАН Беларуси А.Я.Григорьеву и Л.В.Марковой, а также читателям первого русского варианта книги, многие из которых внесли ценные предложения по существу издания, в частности И.Г.Горячева и М.Н.Добычин. Отдельной благодарности заслуживают зарубежные коллеги, сделавшие замечания и пожелания на

12.5. Уплотнения . . . . .	327
12.5.1. Типы уплотнений (328). 12.5.2. Трение и износ уплотнений (332).	
12.6. Тормозные устройства . . . . .	334
12.6.1. Некоторые конструкции фрикционных устройств (335). 12.6.2. Трение и износ в тормозах (336).	
Список литературы . . . . .	339
Приложение 1. Способы описания шероховатой поверхности . . . . .	340
Приложение 2. Основные положения теории теплопроводности . . . . .	350
Приложение 3. Формы представления данных и стандарты испытаний на трение и износ . . . . .	358
Предметный указатель . . . . .	365



Светлой памяти наших учителей  
Игоря Викторовича Крагельского  
и Владимира Алексеевича Белого

## Введение

Определение комплекса научных и инженерных дисциплин, изучающих процесс трения, смазки и изнашивания, — трибологии, было дано в 1966 г. в докладе комитета при кабинете министров Великобритании, возглавляемого П. Джостом. Это определение было соединением греческого корня «трибос» (тереть) с окончанием «логос» и таким образом обозначает науку о трении. Более формально трибология определяется как наука и технология процессов взаимодействия тел при их относительном движении. Таким образом, охватывается множество процессов контактного взаимодействия, трения, смазочного действия, изнашивания, реализуемых во всех областях техники — от горнодобывающей до аэрокосмической.

Введение данного определения — это отражение нового синтетического подхода к проблеме, имеющей тысячелетние корни. Инженерные решения проблем трения, смазки и изнашивания восходят к изобретению колеса, превратившего трение скольжения в трение качения, первых смазок на основе растительных и животных продуктов и других гениальных изобретений, без которых развитие техники и прогресс человечества был бы невозможен. С историей трибологии связаны имена таких гениев науки, как Архимед, Леонардо да Винчи, Кулон и Ломоносов.

Последние десятилетия во всех промышленно развитых странах характеризуются усилением внимания к проблемам трения и изнашивания, вредные последствия которых глобальны. Эти последствия связаны, прежде всего, с потерями энергии в узлах трения, потерями материалов при изнашивании и выходе оборудования из строя, вредными экологическими последствиями износа уплотнений, подшипников, направляющих и других подвижных сопряжений.

Исследования трения и изнашивания в СНГ имеют давние корни. Первые такие научные работы были опубликованы в России в конце XIX в. Наиболее яркой фигурой этого периода, безусловно, является П. П. Петров — один из родоначальников гидродинамической теории смазки, труды которого получили международное признание. Менее известны другие исследования, например работы великого химика Д. И. Менделеева, посвященные контролю трения в точных приборах и синтезу смазочных масел.

Великобритания

основе своего знакомства и опыта использования в преподавании английского издании — Б. Бушан, Т. Бланше, Дж. Вильямс и К. Лудема.

Нельзя не остановиться на том факте, что написание книги вряд ли было бы возможным без многолетнего влияния на авторов учителей, светлой памяти которых она посвящена — Игоря Викторовича Крагельского и Владимира Алексеевича Белого. Не нуждается в оценке их огромный вклад в науку, но стоит отдельно сказать, что, пожалуй, не менее важно, как много они сделали для объединения усилий специалистов вокруг проблем трения и изнашивания, организации журнала «Трение и износ», укрепления связей отечественной научной школы с зарубежными учеными. К сожалению, выхода книги в свет не дождался один из ее авторов — Марк Иосифович Петроковец, оставивший заметный след в науке о трении и износе.

Н. К. Мышкин

Разработка средств и методов получения компонентов узлов трения с принципиально новыми характеристиками. Нанесение покрытий и модифицирование поверхности находятся на подъеме, и их развитие принесет новые возможности в совершенствовании устройств, реализующих фрикционное взаимодействие с наибольшей эффективностью.

Интегрированный подход к диагностике и непрерывному контролю рабочих режимов узлов трения, их анализу на основе баз данных, совмещенных с экспертными системами, прогнозированию долговечности.

Развитие указанных научных направлений и их практическая реализация — это многообещающая область приложения человеческого интеллекта и энергии. Авторы данной книги считали бы свою задачу выполненной, если бы их книга стимулировала интерес к древней по существу и юной по определению науке — трибологии, прогресс которой от древнего деревянного колеса до современного накопителя памяти в персональном компьютере всегда был неотъемлемой частью общего прогресса человечества.

Содержание

1. Введение

2. Трибология — наука о трении, износе и смазке

3. Задачи трибологии

4. Классификация трибологии

5. Трибология в технике

6. Трибология в природе

7. Трибология в биологии

8. Трибология в космосе

9. Трибология в медицине

10. Трибология в спорте

11. Трибология в искусстве

12. Трибология в истории

13. Трибология в будущем

14. Трибология в промышленности

15. Трибология в транспорте

16. Трибология в сельском хозяйстве

17. Трибология в строительстве

18. Трибология в энергетике

19. Трибология в машиностроении

20. Трибология в металлургии

21. Трибология в химической промышленности

22. Трибология в пищевой промышленности

23. Трибология в легкой промышленности

24. Трибология в текстильной промышленности

25. Трибология в полиграфической промышленности

26. Трибология в фармацевтической промышленности

27. Трибология в косметической промышленности

28. Трибология в ювелирной промышленности

29. Трибология в обувной промышленности

30. Трибология в легкой промышленности

31. Трибология в текстильной промышленности

32. Трибология в полиграфической промышленности

33. Трибология в фармацевтической промышленности

34. Трибология в косметической промышленности

35. Трибология в ювелирной промышленности

36. Трибология в обувной промышленности

37. Трибология в легкой промышленности

38. Трибология в текстильной промышленности

39. Трибология в полиграфической промышленности

40. Трибология в фармацевтической промышленности

41. Трибология в косметической промышленности

42. Трибология в ювелирной промышленности

43. Трибология в обувной промышленности

44. Трибология в легкой промышленности

45. Трибология в текстильной промышленности

46. Трибология в полиграфической промышленности

47. Трибология в фармацевтической промышленности

48. Трибология в косметической промышленности

49. Трибология в ювелирной промышленности

50. Трибология в обувной промышленности

Содержание (продолжение)

51. Трибология в легкой промышленности

52. Трибология в текстильной промышленности

53. Трибология в полиграфической промышленности

54. Трибология в фармацевтической промышленности

55. Трибология в косметической промышленности

56. Трибология в ювелирной промышленности

57. Трибология в обувной промышленности

58. Трибология в легкой промышленности

59. Трибология в текстильной промышленности

60. Трибология в полиграфической промышленности

61. Трибология в фармацевтической промышленности

62. Трибология в косметической промышленности

63. Трибология в ювелирной промышленности

64. Трибология в обувной промышленности

65. Трибология в легкой промышленности

66. Трибология в текстильной промышленности

67. Трибология в полиграфической промышленности

68. Трибология в фармацевтической промышленности

69. Трибология в косметической промышленности

70. Трибология в ювелирной промышленности

71. Трибология в обувной промышленности

72. Трибология в легкой промышленности

73. Трибология в текстильной промышленности

74. Трибология в полиграфической промышленности

75. Трибология в фармацевтической промышленности

76. Трибология в косметической промышленности

77. Трибология в ювелирной промышленности

78. Трибология в обувной промышленности

79. Трибология в легкой промышленности

80. Трибология в текстильной промышленности

81. Трибология в полиграфической промышленности

82. Трибология в фармацевтической промышленности

83. Трибология в косметической промышленности

84. Трибология в ювелирной промышленности

85. Трибология в обувной промышленности

86. Трибология в легкой промышленности

87. Трибология в текстильной промышленности

88. Трибология в полиграфической промышленности

89. Трибология в фармацевтической промышленности

90. Трибология в косметической промышленности

91. Трибология в ювелирной промышленности

92. Трибология в обувной промышленности

93. Трибология в легкой промышленности

94. Трибология в текстильной промышленности

95. Трибология в полиграфической промышленности

96. Трибология в фармацевтической промышленности

97. Трибология в косметической промышленности

98. Трибология в ювелирной промышленности

99. Трибология в обувной промышленности

100. Трибология в легкой промышленности

Содержание (продолжение)

101. Трибология в легкой промышленности

102. Трибология в текстильной промышленности

103. Трибология в полиграфической промышленности

104. Трибология в фармацевтической промышленности

105. Трибология в косметической промышленности

106. Трибология в ювелирной промышленности

107. Трибология в обувной промышленности

108. Трибология в легкой промышленности

109. Трибология в текстильной промышленности

110. Трибология в полиграфической промышленности

111. Трибология в фармацевтической промышленности

112. Трибология в косметической промышленности

113. Трибология в ювелирной промышленности

114. Трибология в обувной промышленности

115. Трибология в легкой промышленности

116. Трибология в текстильной промышленности

117. Трибология в полиграфической промышленности

118. Трибология в фармацевтической промышленности

119. Трибология в косметической промышленности

120. Трибология в ювелирной промышленности

121. Трибология в обувной промышленности

122. Трибология в легкой промышленности

123. Трибология в текстильной промышленности

124. Трибология в полиграфической промышленности

125. Трибология в фармацевтической промышленности

126. Трибология в косметической промышленности

127. Трибология в ювелирной промышленности

128. Трибология в обувной промышленности

129. Трибология в легкой промышленности

130. Трибология в текстильной промышленности

131. Трибология в полиграфической промышленности

132. Трибология в фармацевтической промышленности

133. Трибология в косметической промышленности

134. Трибология в ювелирной промышленности

135. Трибология в обувной промышленности

136. Трибология в легкой промышленности

137. Трибология в текстильной промышленности

138. Трибология в полиграфической промышленности

139. Трибология в фармацевтической промышленности

140. Трибология в косметической промышленности

141. Трибология в ювелирной промышленности

142. Трибология в обувной промышленности

143. Трибология в легкой промышленности

144. Трибология в текстильной промышленности

145. Трибология в полиграфической промышленности

146. Трибология в фармацевтической промышленности

147. Трибология в косметической промышленности

148. Трибология в ювелирной промышленности

149. Трибология в обувной промышленности

150. Трибология в легкой промышленности

Однако начало систематических исследований в России следует отнести к двадцатым годам прошлого столетия, когда В. Д. Кузнецов опубликовал первую статью о внешнем трении, а П. А. Ребиндер открыл эффект адсорбционного понижения прочности. Тридцатые годы стали «золотым десятилетием» науки о трении. В 1934 г. Б. В. Дерягин предложил свою теорию трения, основанную на межмолекулярных силах, а в 1939 г. И. В. Крагельский сформулировал молекулярно-механическую теорию. В тридцатых годах свои первые работы по граничной смазке опубликовал А. С. Ахматов; заложил основы исследований абразивного изнашивания М. М. Хрущов. В 1939 г. состоялась первая всесоюзная конференция по трению, износу и смазке.

В сороковых и пятидесятых годах продолжалось интенсивное развитие трибологии. В эти годы появились первые работы по контактной гидродинамике, усталостному изнашиванию, теплофизике трения. К концу семидесятых годов завершилось формирование трибологии как единой научной дисциплины. Если в более ранний период каждый из известных специалистов старался охватить практически все ее области, то в этот период произошло разделение на такие направления, как контактная механика трения, материаловедение, теория граничной смазки, контактная гидродинамика, теория изнашивания.

В глобальном потоке трибологических исследований советская школа занимает почетное место. Достаточно упомянуть имена И. В. Крагельского, Г. В. Виноградова, А. В. Чичинадзе, Н. А. Буше и Д. Н. Гаркунова среди лауреатов Золотой медали по трибологии, присуждаемой ежегодно с 1972 г. Международным фондом при Обществе инженеров-механиков (Лондон). Многие монографии и справочники отечественных ученых переведены на иностранные языки, журнал «Трение и износ» с момента основания в 1980 г. переиздается в США, участие отечественных специалистов — неотъемлемая часть всех важных конгрессов, конференций и семинаров по трибологии.

Анализ научных публикаций и тематики крупнейших конференций последних лет позволяет определить следующие области исследований в трибологии.

*Физика, химия и механика поверхностных явлений на контакте твердых тел.* Тенденция к миниатюризации узлов трения в прецизионных механизмах, устройствах обработки информации и микроэлектромеханических системах усилила интерес к фундаментальным проблемам адгезии, трения и смазки, а появление туннельной и атомно-силовой микроскопии позволило перевести исследования на атомно-молекулярный уровень.

*Исследование свойств и создание новых материалов для узлов трения.* Нанокompозиты на основе всех известных классов материалов — металлов, керамики, полимеров; интеллектуальные материалы — магнито- и электроуправляемые композиты; самоорганизующиеся монослои — это далеко не полный перечень новых горизонтов в трибологическом материаловедении.

## Глава 1

# ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА

### 1.1. Поверхность как физический объект

Трение — это процесс, происходящий при контакте поверхностей твердых тел. Важно, что поверхность может рассматриваться и как некий идеальный геометрический объект с определенной топографией, и как реальный физический объект, обладающий определенной толщиной и специфическими физико-механическими свойствами.

Особенности поверхности твердого тела как физического объекта во многом определяются ее положением в пространстве в качестве границы двух фаз. Атомы и молекулы на поверхности имеют меньше «соседей», чем в объеме. Этот очевидный факт имеет решающие последствия для геометрии и физики поверхности: изменяется взаимодействие таких атомов с соседями, и возникшее искажение силового поля охватывает слой в несколько межатомных расстояний (так называемый переходный слой). При этом появляется избыток энергии, который получил название поверхностной энергии.

Если две очищенные поверхности приведены в контакт на межатомном расстоянии, то между ними действуют такие же силы притяжения, что и в объеме материала. Можно выделить несколько типов таких сил (рис. 1.1).

*Ионная связь* возникает между анионами и катионами, удерживаемыми вместе электростатическими силами. Твердые тела с ионной связью обладают высокой прочностью, например оксид алюминия (рис. 1.1, а).

*Ковалентная (гомополярная) связь* между нейтральными атомами осуществляется посредством перекрытия их электронных полей, что приводит к возникновению очень сильной связи в таких кристаллах, как, например, алмаз (рис. 1.1, б).

*Металлическая связь* характерна для всех металлов и обусловлена наличием электронов, свободно движущихся между узлами ионной

решетки. Такая связь осуществляется между трущимися поверхностями только при отсутствии на их поверхностях пленок (например, при скольжении в высоком вакууме или в случае, когда скорость изнашивания пленки выше скорости ее образования) (рис. 1.1, в).

Ван-дер-Ваальсова связь может возникнуть между любыми атомами или молекулами за счет диполь-дипольного взаимодействия (атомы рассматриваются как мгновенные диполи, так как в каждый момент времени центры положительного и отрицательного зарядов не совпадают). Ван-дер-Ваальсова связь ответственна за физическую адсорбцию компонентов окружающей среды поверхностью твердого тела (рис. 1.1, г).

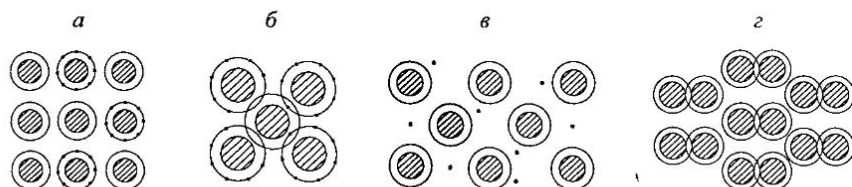


Рис. 1.1. Основные типы связей: а — ионная; б — ковалентная; в — металлическая; г — Ван-дер-Ваальсова

Каждый атом в объеме материала взаимодействует со своими ближайшими соседями посредством рассмотренных сил. Удельное количество энергии, связанное с этим взаимодействием, называют энергией когезии. Она играет важную роль в процессах трения и изнашивания. Атомы на поверхности, как отмечено ранее, имеют меньшее число соседей, следовательно, они не имеют связей за пределами тела (рис. 1.2). По этой причине поверхность твердого тела обладает некоторой избыточной энергией, которая обуславливает способность поверхностей к формированию адгезионных соединений.

Кроме того, в поверхностном слое наблюдаются все несовершенства, характерные для кристаллов: дефекты решетки (дефекты Френкеля и Шоттки), примеси, дислокации и т. д. Они приводят к изменению поверхностной энергии (как локальных ее значений, так и средних).

В соответствии с известным термодинамическим соотношением поверхностная энергия (ее избыток) выражается уравнением:

$$U = TS + F,$$

где  $T$  — температура,  $S$  — энтропия,  $F$  — свободная энергия поверхности.

Удельная свободная поверхностная энергия  $\gamma = F/A$  для жидкостей обычно отождествляется с поверхностным натяжением  $\gamma_{\text{пл}}$ . Однако в случае твердых тел из-за специфики их атомно-молекулярного строения, в частности вследствие относительно малой подвижности атомов, удельная свободная энергия уже не может совпадать с поверхностным

натяжением, трактуемым обычно как работа, затрачиваемая на растяжение (сжатие) поверхности. Действительно,

$$\gamma_{\text{пн}} = \frac{dF}{dA} = \frac{d(\gamma A)}{dA} = \gamma + A \frac{d\gamma}{dA}.$$

Здесь второе слагаемое, вообще говоря, не равно нулю, т. е.  $\gamma_{\text{пн}} \neq \gamma$ . В ряде случаев  $\gamma$  может рассматриваться как избыточное поверхностное натяжение.

В дальнейшем в качестве основной характеристики физической активности поверхности будем использовать ее удельную свободную

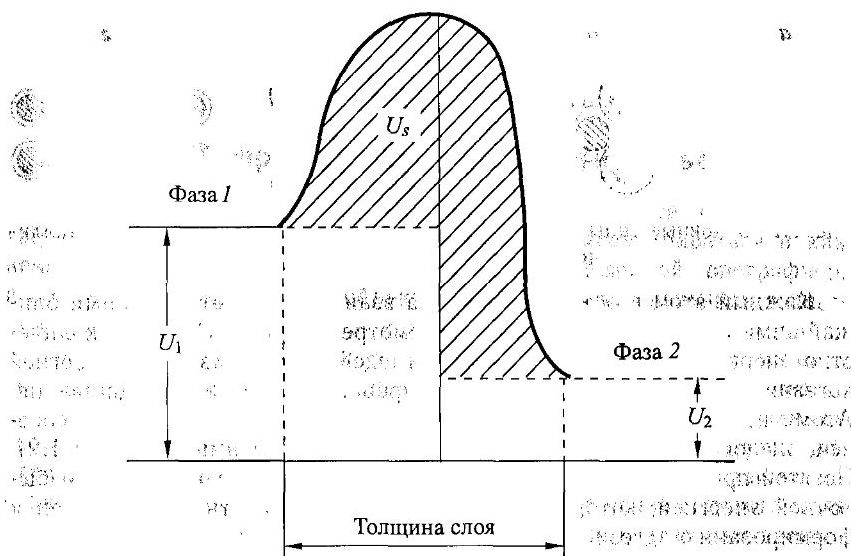


Рис. 1.2. Энергия межфазного слоя  $U_s$  при контактировании двух фаз 1 и 2, обладающих поверхностной энергией  $U_1$  и  $U_2$  (по Кашееву)

энергию, хотя методы расчета и экспериментального определения последней связаны со значительными трудностями.

Равновесное состояние поверхности определяется минимумом ее энергии, который может не совпадать с минимумом площади поверхности, что и обуславливает отклонение любой реальной поверхности от идеально гладкой и появление так называемой естественной шероховатости. Эта шероховатость превосходит по масштабу атомарную шероховатость, возникающую при колебаниях атомов и молекул вследствие термических флуктуаций.

Наличие поверхностной энергии обуславливает взаимодействие поверхности с окружающей средой (в том числе и со смазкой), которое получило название адсорбции и приводит к формированию граничных слоев. В результате адсорбции на поверхности всегда находятся

элементы соседних фаз, и поэтому понятие «чистая поверхность» во многом является условным. Различают два вида адсорбции — *физическую* и *химическую*. Для физической адсорбции характерно Ван-дер-Ваальсово взаимодействие адсорбата с поверхностью твердого тела. Его энергия, как правило, не превышает 20 кДж/моль адсорбата. Сформированные на поверхности полимолекулярные адсорбционные слои сравнительно легко удаляются, например, при снижении давления окружающей среды.

В процессе химической адсорбции энергия взаимодействия достаточно велика (80–400 кДж/моль), и на поверхности обычно формируется монослой, который удаляется с большим трудом даже при высокой температуре. Кроме того, не следует забывать и о химических реакциях поверхности с активными элементами среды, например об окислении. В отличие от хемсорбции, результатом таких реакций является образование на поверхности новой фазы.

Для каждого граничного слоя существует определенная критическая толщина, в пределах которой он сохраняет свойства твердого тела. Так, для высокомолекулярных насыщенных жирных кислот эта толщина составляет  $\approx 0,05$ – $0,1$  мкм. Механические характеристики граничных слоев зависят от их толщины и внешних параметров, например давления. Чем тоньше слой, тем выше его упругость и ниже пластичность. Однако если имеет место проникновение активных молекул среды во внутреннюю поверхность твердого тела, предел текучести

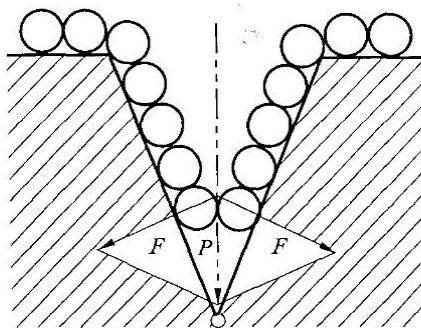


Рис. 1.3. Эффект расклинивания поверхностной трещины полярными молекулами:  $P$  — нагрузка, обусловленная адсорбционным слоем;  $F$  — расклинивающие силы

с ростом давления может и убывать. На рис. 1.3 показано расклинивающее действие молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ) в микротрещине, когда отталкивание молекул вызывает рост трещины и падение твердости. Впервые это явление наблюдал Ребиндер (*эффект Ребиндера*). Как правило, эти вещества имеют органическую природу (жирные кислоты, спирты, мыла и т.п.) и содержатся в смазках.



В результате эффекта Ребиндера при трении формируется тонкий пластичный слой (толщиной около 0,1 мкм) с низким сопротивлением сдвигу, что облегчает разрыв адгезионных соединений.

Не следует забывать, что адсорбированная пленка может оказывать противоположное действие, вызывая поверхностное упрочнение, например, за счет появления оксидов на некоторых металлах (*эффект Роско*). В любом случае адсорбированная пленка изменяет поверхностную энергию основного материала.

Следует отметить, что влияние окружающей среды на поверхность твердого тела весьма разнообразно. Так, в 20-х гг. XX в. Иоффе обнаружил, что галоидные кристаллы, например NaCl, будучи хрупкими в сухой атмосфере, становятся пластичными во влажной атмосфере и демонстрируют повышенную прочность. Иоффе объяснил этот эффект наличием пленки воды на поверхности твердого тела, предполагая, что вода «залечивает» поверхностные микротрещины. Такое изменение твердости материала, получившее название *эффекта Иоффе*, проявляется и у других твердых тел, например окислов магния и алюминия, чувствительных к присутствию воды на их поверхности. Средой, в которой реализуется эффект Иоффе, могут быть и некоторые другие вещества. Высокопрочная сталь, выдержанная в водороде, чувствительна к малым концентрациям кислорода. Эффект Иоффе сказывается на механических свойствах трущихся поверхностей и на процессах трения и изнашивания.

Таким образом, адсорбционная активность поверхностей приводит к тому, что на них образуется тонкий граничный слой, отличающийся по структуре и свойствам от поверхностного (переходного) слоя твердого тела. Структура граничного слоя достаточно сложна и схематически представлена на рис. 1.4. Наличие каждого из подслоев ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ) зависит от условий изготовления детали и ее трения.

Физическое состояние вещества такого граничного слоя может быть весьма различным (от близкого к газообразному до твердокристаллического) и зависит как от параметров состояния (температуры, давления и т. д.), так и от характера взаимодействия с твердой фазой. Соответственно и механическое поведение граничных слоев обнаруживает богатый спектр свойств: от вязких и вязкопластических до близких к идеально упругим.

Здесь уместно отметить, что уже при механической обработке и, конечно, в процессе трения под действием нормальных и тангенциальных усилий не только изменяются свойства граничного и переходного слоев, но и формируется нижележащая область деформированного материала. Область, обозначенная буквой М, — это не полностью однородный материал: ее верхняя часть состоит из сильно деформированных зерен.

Таким образом, в схематизированном виде поверхность и прилегающая к ней область твердого тела могут быть представлены в виде некоторой слоистой системы, состоящей из граничного (адсорбционного), переходного и деформированного слоев, покоящихся на твердой

(объемной) фазе основного материала. Молекулярное поле твердого тела есть некоторая комбинация молекулярных полей основного материала и адсорбционного слоя, причем последний часто весьма существенно экранирует молекулярное поле основного материала.

Когда твердые тела сближаются друг с другом, то именно взаимодействие их молекулярных (поверхностных) полей приводит к возникновению сил притяжения, ответственных за прилипание тел, или адгезию. Под адгезией понимают возникновение молекулярной связи

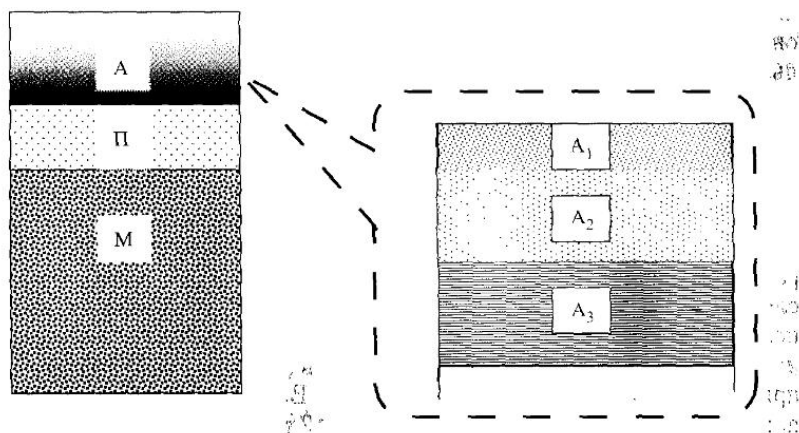


Рис. 1.4. Структура поверхностного слоя металла: А — граничный (адсорбционный) слой; П — переходной слой; М — металл; А<sub>1</sub> — слой адсорбированных влаги и полярных молекул органических веществ; А<sub>2</sub> — слой адсорбированного газа; А<sub>3</sub> — слой окислов металла

между поверхностями соприкасающихся твердых тел. Для сильной адгезионной связи необходимо, чтобы деформация в точках контакта была пластической, так как при упругом контакте запасенная потенциальная энергия может разрушить эту связь при снятии нагрузки. Термодинамическая работа адгезии  $\gamma_a$  двух тел 1 и 2, равная работе обратимого адгезионного отрыва, определяется по формуле Дюпре:

$$\gamma_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}, \quad (1.1)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — энергии, необходимые для создания единичных поверхностей тел 1 и 2 (их свободная энергия) и  $\gamma_{12}$  — избыточная (межфазная) энергия.

Природа адгезии сложна, и косвенным подтверждением этого может служить тот факт, что до настоящего времени отсутствует единая теория адгезии, хотя и предложено несколько моделей, в которых ее природа трактуется с механических, адсорбционных, электрических,

НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
Брянского государственного  
технического университета

000000

диффузионных или химических позиций. Адгезия трущихся поверхностей во многом определяет закономерности трения и изнашивания, о чем пойдет речь в последующих главах.

Поверхностные слои в процессе трения претерпевают разнообразные изменения, пространственно-временной масштаб которых очень широк. Эти изменения могут носить как обратимый, так и необратимый характер, являясь причиной износа, схватывания и других явлений, а в итоге и выхода узла трения из строя.

Первоисточник этих процессов, а в ряде случаев основная причина — напряженно-деформированное и тепловое состояния фрикционного контакта. Уже при простом статическом контакте двух твердых тел в их объеме возникает сложное напряженно-деформированное состояние. Вследствие дискретности реального контакта, обусловленной шероховатостью поверхностей соприкасающихся тел, номинальная область касания оказывается многосвязной, а на основное поле напряжений накладывается поле напряжений отдельных неровностей. В случае скольжения его можно рассматривать как некоторое флуктуационное поле напряжений, охватывающее область с характерным размером, соизмеримым с толщиной поверхностного слоя. При этом следует учитывать поверхностные напряжения, зависящие от силового поля контртела. Например, имеются экспериментальные свидетельства изменения подвижности макромолекул в пленках фторопласта Ф-42 при их контакте с другими полимерами. В зависимости от активности поверхности контртела подвижность Ф-42 может как убывать (контакт с низкоактивной поверхностью поликапроамида ПК-4), так и возрастать (контртело — полипропилен с высокой подвижностью молекул).

С напряженно-деформированным полем фрикционного контакта тесно связано его тепловое состояние. Оно является реакцией твердого тела на внешнее воздействие (нагрузку, скорость скольжения и т. д.). Связь температурного поля фрикционного контакта с его напряженно-деформированным состоянием является взаимной. В зависимости от теплового состояния зоны фрикционного контакта изменяются не только механические свойства трущихся тел (что особенно заметно для полимеров), но и физическая и химическая активности сопряженных поверхностей. Следовательно, при установившихся режимах трения поля напряжений и температур находятся в в самосогласованном состоянии.

Механическая нагрузка инициирует (а тепловая зачастую интенсифицирует) ряд сопутствующих трению процессов, которые, по существу, представляют ответную реакцию системы на данную нагрузку. Энергетический и пространственно-временной диапазоны этих явлений достаточно широки: от электронно-возбужденных состояний до разрушения поверхностного слоя, а сами реакции проявляются как экзоэмиссионные, трибохимические, электростатические, электромагнитные и другие явления. Эти явления должны учитываться при описании трения и изнашивания.

## 1.2. Геометрические параметры поверхности

Поверхности деталей машин и механизмов имеют отклонения разного масштаба от конструктивных форм, которые из технологических и эксплуатационных соображений назначаются геометрически правильными. Эти отклонения формируются как в процессе изготовления детали, так и при ее эксплуатации (изнашивании), и проявляются в виде неровностей поверхности. Неровности обычно описываются набором параметров, чаще всего высотных и шаговых.

Высотные (амплитудные) размеры неровностей лежат в широких пределах от десятых долей нанометра до нескольких миллиметров. Диапазон изменения шаговых параметров неровностей еще шире и порой имеет порядок размеров самой детали. При этом нижние пределы указанных интервалов естественным образом связаны с размерами атомных и молекулярных образований, а верхние зависят от вида и режима обработки, а также от структуры рассматриваемых материалов. По-видимому, отсутствуют какие-либо физически обоснованные

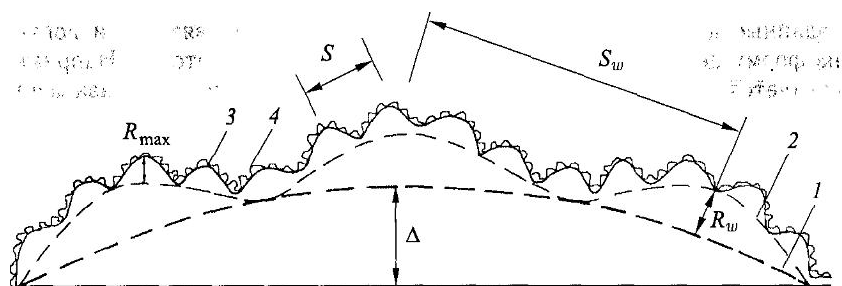


Рис. 1.5. Составляющие профиля поверхности: 1 — макроотклонение,  $\Delta$ ; 2 — волнистость; 3 — шероховатость; 4 — субшероховатость;  $S_w$ ,  $R_w$  — шаг и высота волнистости;  $S$ ,  $R_{max}$  — шаг и высота шероховатости

ограничения на существование неровностей в рамках указанных диапазонов, как высотных, так и шаговых. Однако опыт исследования шероховатых поверхностей и разработки соответствующего аппаратного обеспечения показывает, что целесообразно подразделять неровности на четыре размерных уровня: макроотклонения или отклонения формы, волнистость, шероховатость и субшероховатость (рис. 1.5).

*Макроотклонения* определяются как отклонения формы реальной поверхности или реального профиля от геометрической формы поверхности или геометрического профиля. Эти отклонения имеют сравнительно малую высоту (1–50 мкм) и большой шаг (1–5000 мм) и, как правило, их отношение  $\leq 0,001$ . Макроотклонения обычно представляют собой единичные, регулярно не повторяющиеся неровности поверхности. Так, для цилиндрической детали в поперечном направлении

это могут быть овальность и огранка, в продольном — конусность, бочкообразность, корсетность и изогнутость; для плоской поверхности отклонения формы характеризуются непрямолинейностью и неплоскостностью. Макроотклонения являются следствием погрешностей при обработке деталей, определяются неточностью изготовления станка и инструмента, износом режущего инструмента и наличием упругих деформаций в системе СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь).

Отклонение формы регламентировано стандартом (ГОСТ 24642-81, ГОСТ 25069-81), согласно которому оно оценивается количественно параметром  $\Delta$  — наибольшим расстоянием от точек реальной поверхности до прилегающей поверхности по нормали к последней (см. рис. 1.5). Стандарт определяет прилегающую поверхность как поверхность номинальной формы, соприкасающуюся с реальной поверхностью и расположенную вне материала детали так, чтобы отклонение от нее наиболее удаленной точки реальной поверхности в пределах нормируемого участка имело минимальное значение.

Обычно при рассмотрении отклонения формы исключают шероховатость. В действительности же отклонение формы и шероховатость, заданные для одной и той же поверхности, взаимосвязаны, и допуск на форму детали налагает ограничения и на шероховатость. Например считается, что высота неровностей  $R_z$  должна быть в 1,5–2 раза меньше предельных отклонений формы.

При изучении контактного взаимодействия реальных поверхностей следует иметь в виду, что макроотклонения приводят к перераспределению давления в пределах номинальной области касания и, как следствие, к концентрации напряжений в соответствующих областях контакта и неравномерному износу трущихся поверхностей.

*Волнистость* представляет собой совокупность квазипериодических неровностей с относительно большим шагом, рассматриваемых на участке, длина которого превышает нормированную базовую длину  $l$ , установленную для измерения шероховатости поверхности. Зона волнистости охватывает размерную область с шагом неровностей 0,8–10 мм (для больших деталей верхний предел может быть увеличен до 200–300 мм) и высотой 0,01–500 мкм. Согласно ГОСТ 24642-81, волнистость включается в отклонение формы и лишь в обоснованных случаях ее допускается нормировать отдельно. В ряде стран (ФРГ, Швейцария, США и др.) имеются стандарты на волнистость.

Строго установленная граница между волнистостью и шероховатостью отсутствует. Условно, для удобства измерения и классификации в качестве такой границы принимают или шаг волнистости (нижняя шаговая граница волнистости должна превышать базовую длину, используемую для измерения шероховатости), или отношение шага волнистости к ее высоте, которое, как правило, больше 40.

Основной причиной возникновения волнистости являются колебания (вынужденные и собственные) в системе СПИД. Волнистость

может также возникать в процессе трения и изнашивания деталей. С ней во многом связана кластерная структура фактического контакта твердых тел, что в ряде случаев оказывается существенным при изучении переноса энергии через зону контакта.

*Шероховатость* образует микрорельеф поверхности и определяется как совокупность неровностей с относительно малыми шагами, выделенная, например, с помощью базовой длины  $l$ , представленной на рис. 1.6 (ГОСТ 25142-82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения»). Обычно шероховатость возникает в результате

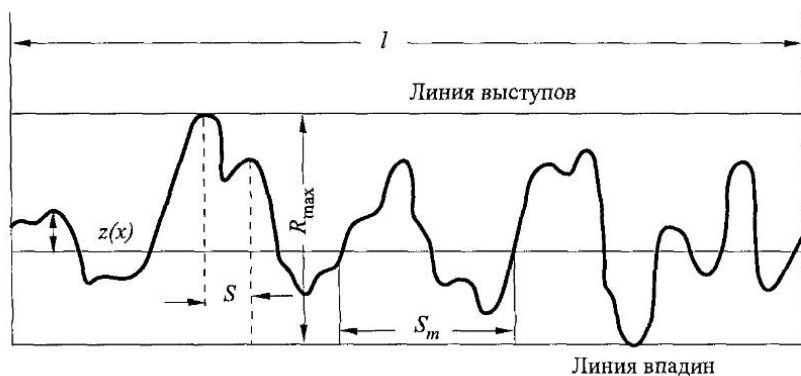


Рис. 1.6. Профиль шероховатости  $z(x)$

образования следов технологическим инструментом (резцом, фрезой или абразивным инструментом), зависит от кинематической схемы и способа обработки, механических свойств материала и колебаний в системе СПИД. Исходная шероховатость рабочих поверхностей превышает значительные изменения в процессе трения и изнашивания деталей, достигая так называемой равновесной шероховатости, которая при нормальных условиях трения, по-видимому, сохраняется постоянной.

*Субшероховатость* характеризует тонкую топографическую структуру реальной поверхности, имеет нанометровый масштаб и оказывает влияние на формирование так называемого физического рельефа. Субшероховатость проявляется как случайное и несовершенное расположение кристаллографических плоскостей, хаотическое расположение зерен и островковых пленок (в том числе оксидных и адсорбционных).

Таким образом, реальная поверхность имеет достаточно богатый набор топографических элементов, которые можно разбить на две группы и четыре уровня отклонений формы: макрогеометрию (макроотклонения и волнистость) и микрогеометрию (шероховатость и субшероховатость), которые различаются масштабом, характером распределения и своей ролью в процессах трения и изнашивания. Условно области существования каждой из этих форм можно представить в виде неко-

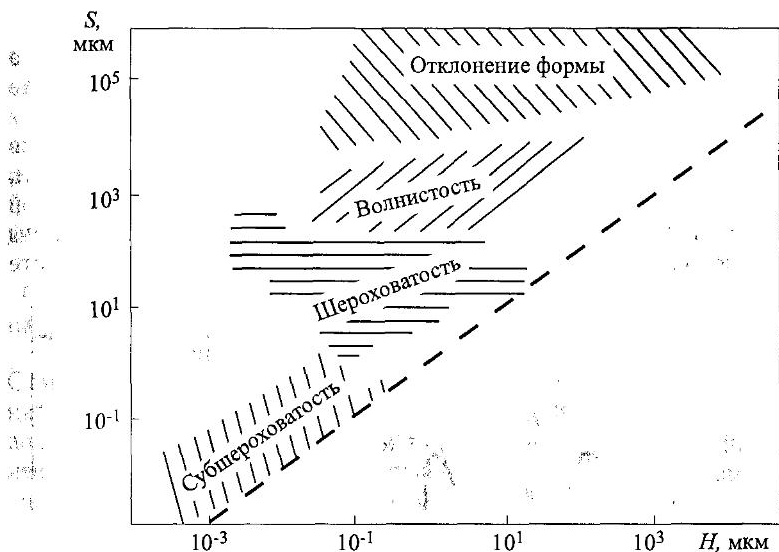


Рис. 1.7. Соотношение характерных размеров основных топографических элементов реальной поверхности

торых подмножеств в координатной системе, осями которой служит высота неровностей  $H$  и среднее расстояние между ними  $S$  (рис. 1.7).

Даже если на поверхности имеются неровности только одного уровня, ее описание представляет собой нетривиальную задачу. В трибологии сложились четыре подхода к описанию реальных поверхностей: детерминистический, параметрический, вероятностный и фрактальный. Подробно эти подходы рассматриваются в приложении 1. Остановимся ниже на их кратком описании.

**1. Детерминистический подход** представляет собой описание поверхности в виде некоторой периодической функции, непрерывной или кусочно-непрерывной, и восходит к работам основоположников трибологии, хотя и не потерял своей актуальности до сих пор. Интересно сравнить фрагмент из работы Кулона 1821 г. (рис. 1.8, *a*) с рисунком

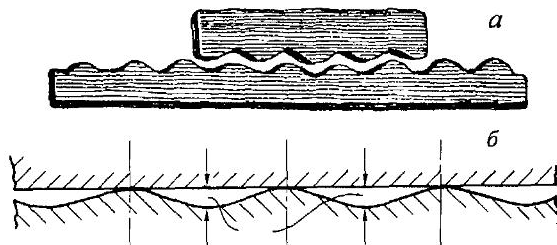


Рис. 1.8. Фрагменты рисунков из работ Кулона (a) и Джонсона (b)

из современной монографии Джонсона 1987 г. (рис. 1.8, б). При всей кажущейся наивности такого представления поверхности, оно все же позволяет отразить одну из принципиальных особенностей фрикционного взаимодействия шероховатых поверхностей — его дискретность, пренебрегая другой особенностью — стохастичностью.

**2. Параметрический подход** базируется на описании поверхности совокупностью неких параметров, которые, как правило, находятся путем обработки профилограмм, представляющих собой геометрический образ (двух- или трехмерный) поверхности. Параметры шероховатости рассчитываются относительно некоторой базовой линии (поверхности), которая определенным образом проводится относительно шероховатой поверхности или ее профиля. В качестве базовой линии (поверхности) чаще всего используется средняя линия (поверхность). Обычно профиль поверхности характеризуется набором параметров. Этот набор, вообще говоря, достаточно широк, а входящие в него параметры подразделяются на высотные (амплитудные), шаговые и гибридные. Рассмотрим основные параметры, используемые в инженерной практике и научных исследованиях.

*Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$*  определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины  $l$ :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx, \quad (1.2)$$

где  $z(x)$  — уравнение профиля, которое часто задается графически или таблично. В последнем случае  $R_a$  рассчитывается по формуле

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i.$$

Обычно  $R_a$  находится как среднее по нескольким базовым длинам, от 2 до 20 в зависимости от национального стандарта. Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  есть сумма средних абсолютных значе-

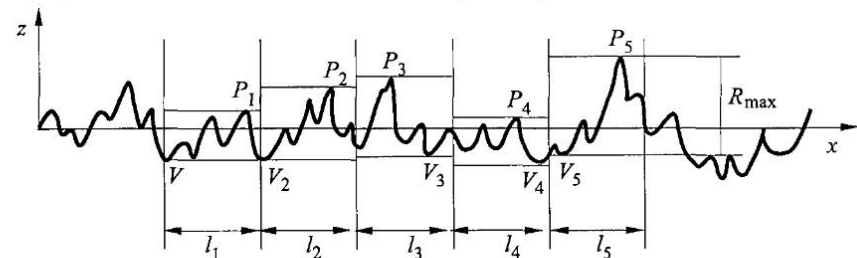


Рис. 1.9. Последовательные базовые длины  $l_1-l_5$ , составляющие длину оценки  $L$



ний пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин в пределах базовой длины:

$$R_z = \left( \sum_{i=1}^5 |z_{ip}| + \sum_{i=1}^5 |z_{iv}| \right) / 5, \quad (1.3)$$

где  $z_{ip}$  — высота  $i$ -го наибольшего выступа,  $z_{iv}$  — глубина  $i$ -й наибольшей впадины (рис. 1.9).

Этот параметр имеет большой разброс, зависит от длины оценки  $L$ , плохо отражает эксплуатационные свойства поверхности и может служить лишь грубым ее показателем.

*Наибольшая высота неровностей профиля*  $R_{\max}$  (рис. 1.6) определяется как расстояние между линией выступов (проходящей через высшую точку профиля параллельно средней линии) и линией впадин (проходящей через низшую точку профиля параллельно средней линии). Этот параметр весьма чувствителен к высоким пикам и глубоким впадинам, но имеет большой разброс из-за случайного характера используемой выборки.

*Средний шаг неровностей профиля*  $S_m$  (рис. 1.6) есть среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины. Здесь под шагом неровностей профиля понимается отрезок средней линии, содержащий неровность, т. е. расстояние между двумя соседними пересечениями средней линии профилем в одну сторону, сверху вниз или наоборот (производные профиля в точках пересечения должны быть одного знака).

*Средний шаг местных выступов профиля*  $S$  (рис. 1.6) равен среднему арифметическому шагов местных выступов профиля, находящихся в пределах базовой длины. Местный выступ — это часть профиля, расположенная между его двумя соседними минимумами. Обычно местный пик принимается в расчет, если разность между его высотой и ближайшим минимумом не меньше, чем 1% наибольшей высоты неровностей.

*Относительная опорная длина профиля*  $t_p$  есть отношение суммы длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне  $p$  в материале выступов линией, эквидистантной средней линии, к базовой длине. Зависимость

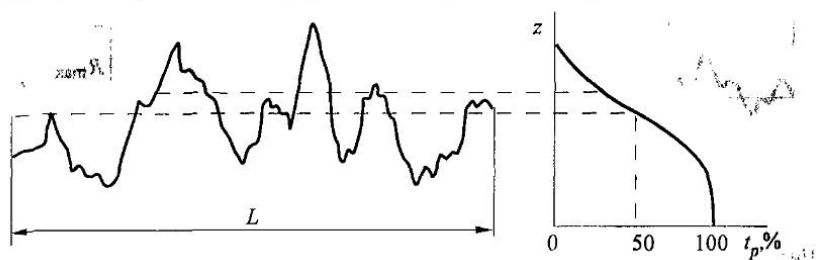


Рис. 1.10. Построение опорной кривой

$t_p$  от  $p$  называется *опорной кривой* (кривая Аббота-Файрстоуна в зарубежной литературе) (рис. 1.10).

Начальный участок этой кривой удобно аппроксимировать степенной функцией:

$$\eta = b\varepsilon^\nu, \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon = a/R_{\max}$ ;  $a$  — расстояние от линии выступов до заданного уровня  $p$ ;  $b$  и  $\nu$  — параметры шероховатой поверхности, зависящие от вида обработки (параметры Демкина).

**3. Вероятностный подход** к описанию геометрии шероховатой поверхности базируется на теории вероятности и теории случайных процессов. Он, как правило, более трудоемок, что в определенной мере компенсируется более полной информацией о топографии поверхности. Такой подход позволяет рассматривать профилограмму (двух- или трехмерную) как некоторую статистическую выборку ординат профиля (или вершин неровностей) или как некоторую реализацию случайного процесса.

В первом случае упомянутая выборка есть область значений высоты (ординаты) профиля  $z(x)$ , трактуемой как некоторая случайная величина, которая, как принято в теории вероятности, характеризуется функцией распределения  $F(z)$ . Последняя определяется как вероятность  $P$  того, что случайная величина  $z(x)$  принимает значение, не превышающее  $z$ :

$$F(z) = P\{z(x) \leq z\}.$$

Функция  $F(z)$  есть интеграл так называемой плотности вероятности  $f(z)$ , т. е.

$$F(z) = \int_{-\infty}^z f(\xi) d\xi.$$

Плотность вероятности  $f(z)$  в данной ситуации есть доля тех ординат профиля, которые лежат в интервале  $(z, z + dz)$ , другими словами,  $f(z)dz$  определяет вероятность попадания заданной ординаты в данный интервал. Функция  $f(z)$  проще всего находится путем построения соответствующей гистограммы и последующей ее аппроксимацией. Часто такие гистограммы удается аппроксимировать кривой Гаусса:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(z-a)^2}{2\sigma^2} \right],$$

где  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение ординаты профиля (то же самое, что и параметр шероховатости  $R_g$ , описанный в приложении 1), которое характеризует рассеяние (разброс) случайной величины и  $a$  — математическое ожидание случайной величины (среднее значение ординаты профиля). Если нормировать ординаты по  $\sigma$  и их отсчет произ-

водить от средней линии профиля, то  $a = 0$ , и получаем гауссовскую (нормальную) плотность вероятности в виде

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right]. \quad (1.5)$$

Шероховатые поверхности, ординаты которых распределены по гауссовскому закону, называются гауссовскими или нормальными. Сравнительная простота их математического описания послужила стимулом для разработки многочисленных теорий контактного взаимодействия таких поверхностей. Однако следует иметь в виду, что инженерные поверхности очень часто далеки от нормальных, и поэтому к выводам, сделанным на основе гауссовских моделей, нужно относиться весьма критически и рассматривать их как некоторое грубое приближение к реальной ситуации.

Обобщением изложенного выше вероятностного подхода является подход, основанный на теории случайных полей, когда шероховатость рассматривается как реализация некоторого случайного поля (процесса). Идея использования такого подхода для исследования шероховатости поверхностей принадлежит Линнику и Хусу (1954), хотя в зарубежной литературе ее часто приписывают Найаку (1971), который развивал такой подход несколько позже, но, по-видимому, независимо.

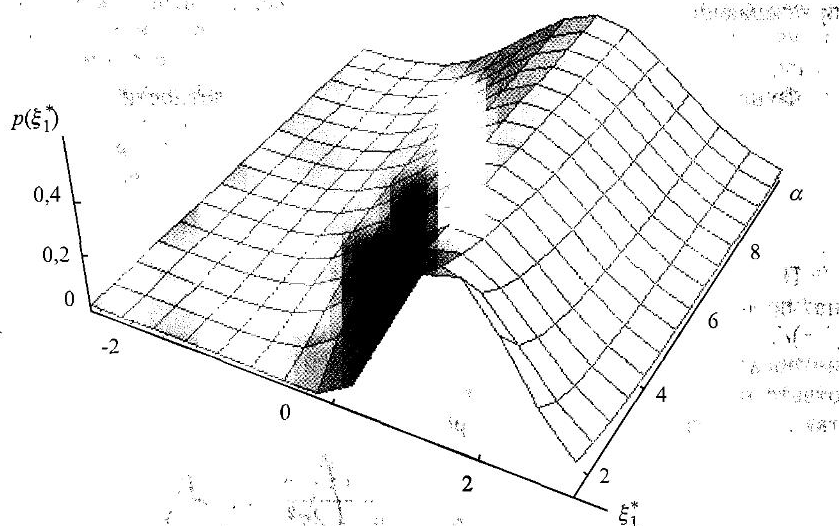


Рис. 1.11. Плотность вероятности распределения высот выступов шероховатой поверхности  $p(\xi_1^*)$  в зависимости от безразмерной высоты выступов  $\xi_1^*$  и параметра широкополосности  $\alpha$

Метод случайных полей разработан в основном для гауссовских (изотропных и анизотропных) поверхностей. Его преимущества становятся

особенно заметными при анализе трехмерного (3D) образа реальной поверхности. Дело в том, что изучение ее нормальных сечений (профилограмм) может давать искаженные статистические характеристики поверхности. Интуитивно понятно, что средняя линия профиля не лежит в средней плоскости шероховатой поверхности, а пики на профилограмме и на поверхности не совпадают ни по количеству, ни по кривизне. Последние два обстоятельства обусловлены тем, что весьма мала вероятность прохождения профилограммы по вершине неровности (игла профилографа чаще идет по склону неровности, чем по ее вершине), и в результате занижается число высоких пиков и искажается их кривизна. Как показано в приложении I, высоты выступов распределяются по закону Найака (рис. 1.11):

$$p(\xi_1^*) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ \xi_1^* \left[ \frac{3(2\alpha - 3)}{\alpha^2} \right]^{1/2} \exp(-C_1 \xi_1^{*2}) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} (\xi_1^{*2} - 1) \times \right. \\ \times \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \xi_1^* \left( \frac{3}{2(2\alpha - 3)} \right)^{1/2} \right) \right] \exp \left( -\frac{1}{2} \xi_1^{*2} \right) + \left[ \frac{2\pi\alpha}{3(\alpha - 1)} \right]^{1/2} \times \\ \left. \times \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \xi_1^* \left( \frac{\alpha}{2(\alpha - 1)(2\alpha - 3)} \right)^{1/2} \right) \right] \exp \left[ -\frac{\alpha \xi_1^{*2}}{2(\alpha - 1)} \right] \right\}, \quad (1.6)$$

где  $\xi_1^* = \xi_1/m_0^{1/2}$  — безразмерная высота выступа;  $\alpha = m_0 m_4/m_2^2$ ;  $C_1 = \alpha/(2\alpha - 3)$ ;  $m_0, m_2, m_4$  — моменты спектральной плотности.

В предельных случаях ( $\alpha \rightarrow 1,5$  и  $\alpha \rightarrow \infty$ ) распределение Найака вырождается в известные распределения Релея  $p_R(\xi^*)$  и Гаусса  $p_G(\xi^*)$  соответственно:

$$p_R(\xi^*) = \begin{cases} 0, & \xi^* < 0, \\ \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{2\pi}} [\xi^{*2} - 1 + \exp(-\xi^{*2})] \exp(-\xi^{*2}), & \xi^* > 0, \end{cases} \quad (1.7)$$

$$p_G(\xi^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^{*2}\right).$$

Видно, что при переходе от распределения Гаусса к распределению Релея (с уменьшением параметра  $\alpha$ ) вероятность существования высоких пиков возрастает.

**4. Фрактальный подход** к описанию шероховатой поверхности привлек внимание трибологов из-за того обстоятельства, что параметры шероховатости реальной поверхности оказались существенно зависящими от разрешающей способности используемой измерительной аппаратуры в силу многомасштабности фиксируемых неровностей (см. рис. 1.7). Это свойство шероховатых поверхностей, называемое нестационарностью, стимулировало поиск такого метода их описания,

который давал бы структурную информацию (набор параметров) о шероховатости, инвариантную для всех ее масштабных уровней.

В не очень строгом определении фракталом называется структура, состоящая из частей, которые подобны целому. Этому определению часто удовлетворяют шероховатые поверхности (рис. 1.12), если последовательно увеличивать точность измерения (уменьшать его масштаб),



Рис. 1.12. Фрактальность шероховатости реальной поверхности

фиксируя все более тонкие детали поверхности вплоть до субшероховатости и атомного размера. Такие поверхности принято называть фрактальными и приписывать им определенную размерность (число), которое является нецелым, в отличие от привычных нам размерностей 1, 2, 3, соответствующих прямой, плоскости, пространству. Не затрагивая вопрос, как строго определять фрактальную размерность, отметим только, что профильная кривая обычно имеет размерность  $D$  в пределах от 1 до 2, а шероховатая поверхность от 2 до 3.

Если для плоской кривой  $D = 1$ , то кривая и ее размерность понимаются в привычном для нас смысле. С увеличением  $D$  кривая становится все более разветвленной и при приближении к 2 стремится заполнить всю выделенную ей площадь. Последний факт не может служить, конечно, определением фрактала, а является лишь неким наглядным образом, удобным для эвристических рассуждений.

Таким образом, фрактальная размерность является параметром, который полностью описывает шероховатую поверхность независимо от иерархии составляющих ее элементов, и избавляет нас от трудностей, связанных с нестационарностью реальных поверхностей. Этот факт, рассматриваемый как основное достоинство фрактального подхода, послужил основанием для его критики, тем более, что трудно себе представить, чтобы такой сложный объект, как шероховатая поверх-

ность, мог быть описан единственным числом. Поэтому в современных работах привлекаются и другие параметры. Однако суть проблемы не в количестве параметров, а в доказательстве фрактальности конкретной поверхности. Обычно она просто постулируется, но есть много оснований сомневаться в этом постулате.

Следует отметить следующее. Способы моделирования реальных поверхностей описаны выше в той последовательности, в какой они возникали в процессе развития трибологии и в порядке нарастания сложности. Граница между ними условна. В исследовательской практике обычно пользуются комбинированными методами: в детерминистическое описание включают вероятностные элементы или фрактальное описание использует спектральные характеристики шероховатости. Выбор методов или их сочетаний определяется в основном той задачей, которая стоит перед исследователем.

### 1.3. Текстура поверхности \*)

При анализе шероховатости часто предполагается, что рельеф поверхности является изотропным и его геометрические свойства не зависят от направления, в котором они оцениваются. В действительности такая организация неровностей встречается не так часто и более характерна для тел с естественной шероховатостью. Большинство технических поверхностей анизотропны и характеризуются существенным различием своих геометрических характеристик по направлениям.

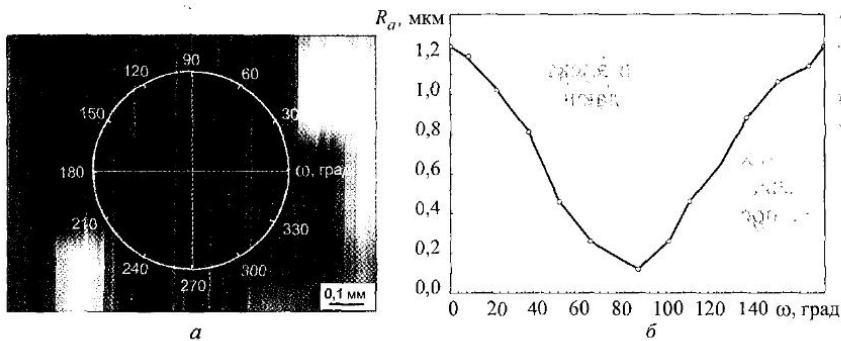


Рис. 1.13. Анизотропия геометрических свойств шероховатого слоя: *а* — поверхность стального образца после плоского шлифования; *б* — результат измерения среднего арифметического значения высот неровностей по разным направлениям

\*) Данный параграф написан вместе с А. Я. Григорьевым.

На рис. 1.13 представлена зависимость средних значений высот фрезерованной поверхности по направлениям. Как можно видеть, среднеарифметические высоты неровностей отличаются почти на порядок.

Однако анизотропия, оцениваемая как отношение тех или иных параметров шероховатости в выбранных направлениях, не позволяет выявить существование определенного порядка в расположении неровностей относительно друг друга. Технические поверхности обладают специфичным для каждого вида обработки рельефом, зависящим от степени кинематической и геометрической детерминированности схемы обработки.

При строгании, круглом точении или любой другой лезвийной обработке с простым главным движением инструмента формируется рельеф, образованный параллельно расположенными выступами и впадинами. Неровности поверхности после торцевого фрезерования образуют сложную картину пересекающихся окружностей. При шлифовании на компоненту, обусловленную простым главным движением, накладывается составляющая, связанная со случайным характером расположения зерен абразива и элементарных актов резания каждого из них. Результирующий рельеф уже обладает не только детерминированной, но и случайной составляющей. Абразивный инструмент в таких отделочных видах обработки как хонингование и суперфиниш имеет три степени свободы и совершает очень сложное по траектории движение. Соответственно, это приводит к образованию сложной, но, тем не менее, легко идентифицируемой структуры.



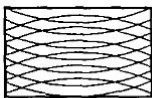
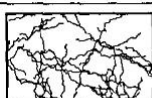
Полностью случайный и изотропный рельеф образуется при пескоструйной обработке с перпендикулярным направлением обдува поверхности. В этом случае практически отсутствует определенность движения абразива после его соударения с поверхностью. Аналогичные по своей топографической структуре поверхности образуются при дробеструйной или электроимпульсной (электроэрозионной) обработке, также не обладающих выраженной определенностью кинематики обработки.

В технических приложениях рассмотренные свойства поверхностей связываются с понятием направления обработки или направлений неровностей. В ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 9378-93 приведены основные типы расположения неровностей, характерные для технических поверхностей. Некоторые из них представлены в табл. 1.1.

Введение подобной классификации связано с тем, что направленность неровностей оказывает существенное влияние на многие эксплуатационные свойства поверхностей. В их числе такие важные для практических приложений характеристики, как износ, контактное сопротивление, отражающая способность, гидродинамическое сопротивление. Все это и вызвало необходимость регламентации свойств поверхности в конструкторской документации.

Необходимо отметить, что концепция направленности обработки не получила широкого распространения в научных приложениях. Это свя-

Т а б л и ц а 1.1. Направления неровностей при различных видах обработки поверхностей

Направления неровностей	Схематическое изображение	Виды обработки
Параллельное		Точение, расточка, фрезерование цилиндрическое, строгание, шлифование периферией круга
Дугообразное		Торцевое точение
Перекрещивающееся дугообразное		Торцевое фрезерование, шлифование
Не имеющее определенного направления		Электроэрозионная, пескоструйная и дробеструйная обработка
Путаный штрих		Полирование, шабрение, хонингование, суперфинишная обработка

зано с тем, что формально она применима только к поверхностям, полученным механической обработкой, и не покрывает всего разнообразия типов рельефов, встречающихся, например, при анализе поверхностей разрушения, износа, коррозионных повреждений и т. п. Кроме того, она не предполагает использования каких-либо численных оценок, основываясь на чисто качественных описательных характеристиках. По этим причинам в научных приложениях большее распространение получила концепция текстуры.

Введение концепции текстуры было обусловлено развитием представлений об особенностях формирования рельефа при эксплуатационной деградации поверхностей. Оказалось, что особенности морфологии поверхностей трения, коррозии и частиц износа обусловлены спецификой действующих механизмов разрушения поверхностей. На рис. 1.14 представлены примеры морфологических типов поверхностей трения, соответствующих различным механизмам изнашивания.

Несмотря на достаточно ясное интуитивное понимание того, что такое текстура, формально ее определить весьма непросто. Представление о ней основано на двух элементах. Первый связан с морфологией неровностей, а второй — с характеристиками расположения неровностей относительно друг друга. При этом морфология неровностей и



и, очевидно, по этой причине, по мнению многих исследователей, наследуют все их недостатки.

Преимущества параметрического подхода заключаются в простоте интерпретации соответствующих характеристик. К недостаткам следует отнести слабую эффективность описания особенностей текстурного строения поверхностей. Тем не менее, при использовании большого количества подобных характеристик подход позволяет решать задачи с достаточной для большинства практических приложений точностью. В настоящее время последователями данного направления активно обсуждаются проблемы выбора «достаточного» для дифференциации текстур набора параметров. В частности, это привело к расширению набора параметров, и в настоящее время его часто упоминают как «Бирмингем-14 + 3».

Тем не менее, многие исследователи придерживаются мнения, что получить репрезентативное представление текстурных свойств совокупностью эмпирико-статистических параметров невозможно. По этой причине был развит целый ряд продуктивных подходов, основанных на рассмотрении так называемых нормализованных инвариантных представлений.

*Инвариантные представления.* Сущность этого подхода заключается в использовании методов представления текстур в виде, не зависящем от масштаба и выбора начала координат. Обоснованием этого подхода может служить утверждение, что лучшей параметрической системой является сам объект, представленный в виде, не зависящем от его положения в поле зрения и масштаба.

Инвариантные представления используют различные способы разложения топокарт или изображений поверхностей по системам ортогональных базисных функций — Фурье, Уолша, Хадамара, Даубечи, построения бинарных деревьев экстремумов, фрактального сжатия и других подобных методов. При соответствующей нормализации эти разложения не зависят от выбора начала системы координат и масштаба объекта. Параметры как таковые при таком подходе не определяются. Считается, что все элементы полученных нормализованных представлений и являются параметрами. Недостатком данного подхода является невозможность содержательной интерпретации этих параметров.

Эти методы описания текстур получили достаточно широкое распространение при решении диагностических задач, основанных на анализе изображений. Учитывая, что большинство подобных методов основано на экспертном анализе изображений, представляется вполне очевидным и логичным необходимость определения параметров, отражающих визуальное содержание текстурных особенностей. Одна из реализаций такого подхода основана на использовании гистограмм совместной встречаемости (ГСВ) элементов изображений поверхностей. Мотивацией использования ГСВ является известное предположение о том, что вероятностные характеристики второго порядка признаков изображений отражают их визуальное содержание.

Этот подход в какой-то мере объединяет два предыдущих — параметрический и инвариантных представлений. С одной стороны, он основан на использовании нормализованных инвариантных представлений, а с другой — на методах выделения из него параметров, имеющих визуальную интерпретацию. Его особенностью является то, что он

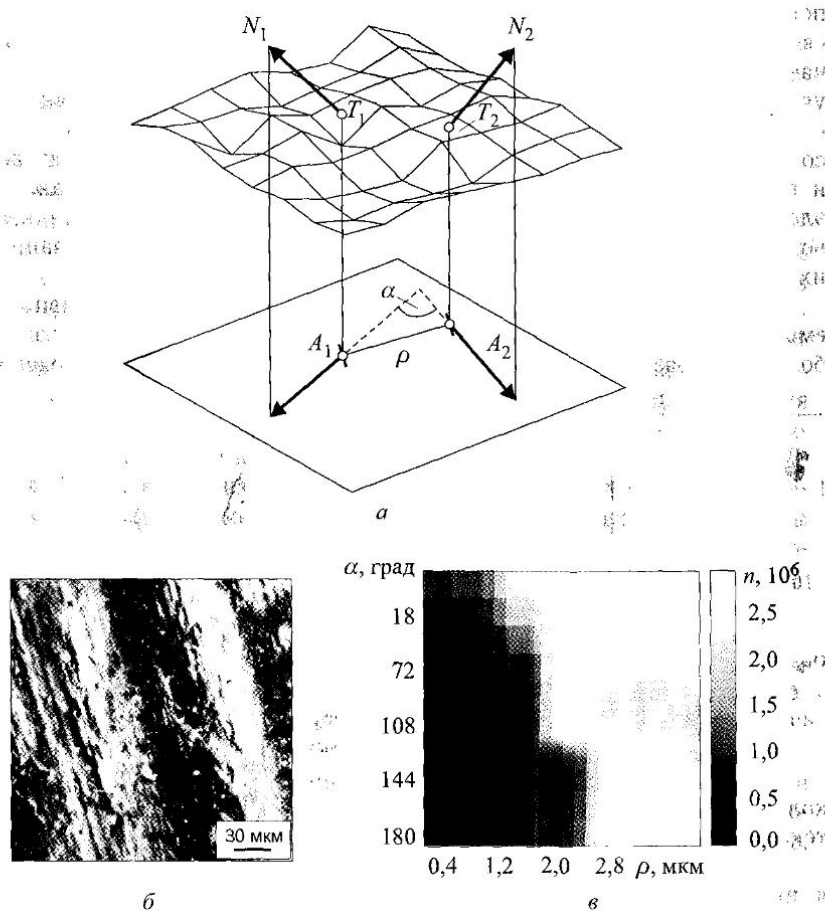


Рис. 1.16. Представление текстурных свойств поверхностей: *а* — схема определения текстурного элемента; *б* — изображение поверхности трения; *в* — гистограмма совместной встречаемости текстурных элементов поверхности «б»

всегда рассматривается в совокупности с методами анализа и классификации данных. Это вполне соответствует концепции экспертной диагностики — зрительное восприятие изображений всегда предполагает их анализ и классификацию.

В рамках данного подхода считается, что особенности строения шероховатого слоя обусловлены характером пространственных отношений элементарных участков поверхности — текстурных элементов (рис. 1.16).

Взаимное положение текстурных элементов описывается расстоянием между ними и разницей азимутальных направлений градиентов поверхностей в соответствующих точках. Представление текстурных свойств осуществляется с помощью гистограмм совместной встречаемости, каждый элемент которых равен числу пар элементарных участков поверхности, расположенных между собой на расстоянии  $\rho$  и имеющих разницу азимутальных направлений градиентов  $\alpha$ . При соответствующем нормировании эти описания не зависят от масштаба и положения объекта в поле зрения. Более того, поскольку каждый элемент ГСВ определяет некоторый участок поверхности, возникает возможность непараметрического сравнения текстур с визуализацией их сходства и различий.

Эта методика заключается в определении контраста ГСВ сравниваемых текстур и выделении на изображении участков, соответствующих большому (различие) или малому (сходство) значениям. Введение

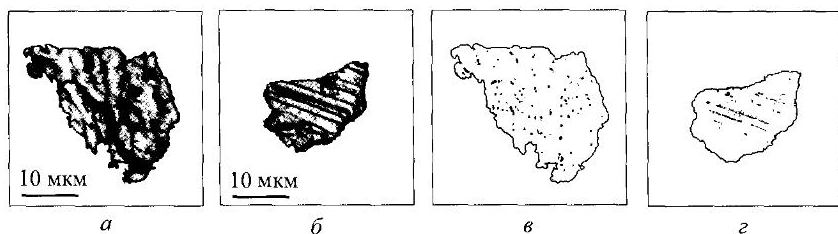


Рис. 1.17. Непараметрическое сравнение текстур с визуализацией их отличий: а, б — изображения частиц износа, образующихся при усталостном разрушении и жестком скольжении; в — отличия частицы «а» от «б»; г — отличия частицы «б» от «а»

количественных мер позволяет визуализировать отличия или сходства текстур с заданной степенью значимости (рис. 1.17).

Определение представительных признаков классов текстур сводится к применению известных методов анализа внутри и межклассовых дисперсий элементов ГСВ. Элементы ГСВ, соответствующие минимальной внутриклассовой и максимальной межклассовой дисперсии, принимаются в качестве дифференцирующих признаков рассматриваемых классов текстур. Эти признаки могут быть визуализированы, что делает возможным решение широкого класса задач, ранее возможных только с использованием качественных подходов.

Основными задачами анализа текстур являются их сравнение и классификация для выявления сходства/различия объектов, например при оценке состояния трибосистемы по морфологии частиц износа или

в экспертном контроле — при решении задач идентификации причин разрушения поверхностей. Однако методы текстурного анализа пока не получили достаточного распространения, что связано, в первую очередь, с отсутствием единого подхода к описанию текстуры.

## 1.4. Современные методы исследования поверхности

**1.4.1. Физические методы исследования поверхности.** Глубокое исследование механизма трения требует получения обширной информации о состоянии и свойствах поверхностных слоев. Именно с этим связано проникновение в экспериментальную практику самых современных физических методов анализа поверхностей. Рассмотрим некоторые из них.

*Инфракрасная (ИК) спектроскопия* базируется на том, что характер колебательных полос для ИК-спектров большинства атомных групп индивидуален по частоте. Исследование поверхности материалов методами ИК-спектроскопии почти во всех случаях проводится с использованием методики нарушенного полного внутреннего отражения. Адсорбционная ИК-спектроскопия применяется только при исследовании образцов с очень развитой поверхностью, в частности для изучения абразивных материалов, полученных шлифованием образца прозрачными для ИК-излучения порошками.

Зондирующее ИК-излучение проникает в материал на глубину, величина которой соизмерима с длиной волны, т.е. вклад в спектры вносят слои материала толщиной 1 мкм и более. Для получения информации об ультратонких адсорбированных слоях и пленках используются приставки многократного отражения. Распространены ИК-спектрометры с Фурье-преобразованием, позволяющие сразу записывать весь спектр. Они имеют ряд преимуществ перед обычными: уменьшение времени на получение требуемой информации, увеличение оптической пропускной способности, повышение точности при определении характеристических полос спектра, простота изменения спектральных диапазонов и возможность применения математических методов обработки информации. ИК спектроскопия эффективно используется для исследования пленок фрикционного переноса и физико-химических процессов, сопутствующих трению полимеров.

*Спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия)* базируется на измерении спектральных характеристик неупруго рассеянных фотонов и позволяет получать более полную информацию, чем в случае ИК-спектроскопии. Можно отметить два достоинства метода: 1) так как эффект комбинационного рассеяния не обусловлен поглощением излучения, то в принципе нет ограничений по прочности образца; 2) слабое поглощение сигнала комбинационного рассеяния в водной среде и стекле, что позволяет проводить исследование в стеклянных ампулах и воде. Для метода характерна очень высокая чувствительность.

*Спектроскопия полного рассеяния* основана на анализе рассеяния ионов низких энергий ( $\approx 1$  кэВ) атомами поверхности. Так как в отражении ионов участвуют атомы только первого слоя, то метод обладает очень высокой поверхностной чувствительностью. Он может быть использован для изучения процессов модификации поверхности, а также ориентации на поверхности активных функциональных групп.

*Оже-электронная спектроскопия* базируется на анализе распределения вторичных электронов по кинетическим энергиям, обусловленного протеканием двухступенчатого процесса их эмиссии в результате образования вакансии на одном из внутренних электронных уровней твердого тела при облучении его фотонами. Метод отличается высокой пространственной разрешающей способностью ( $\approx 50$  нм). Особенно перспективно применение оже-электронной спектроскопии для анализа поверхностей разрушения адгезионного контакта или межфазных границ в композиционных полимерных материалах. Эффективна локальная оже-электронная спектроскопия при исследовании и поверхностей трения порошковых материалов.

*Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС)* отличается от оже-спектроскопии тем, что образовавшаяся на одном из внутренних уровней в результате облучения вакансия заполняется одноступенчато. Если имеет место фотоионизация внешних валентных орбиталей, то метод носит название ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии. Метод РФЭС используется для определения энергии связи и химического анализа поверхности образцов (количественного анализа элементов и функциональных групп), в том числе для анализа поверхностей трения. Последние три метода часто объединяются под одним названием — электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА).

*Электронная микроскопия* широко применяется для исследования морфологии поверхностей. В сочетании с рентгеновским микроанализом получается информация о морфологии и составе материалов с высоким пространственным разрешением как на поверхности, так и в приповерхностных слоях. Часто используется при исследовании процессов трения. Представляет интерес новый метод исследования субтонких поверхностных слоев кристаллов — скользящая рентгеновская дифракция. Такие особенности структуры поверхностных слоев, как ступенька, искажение решетки, конечные размеры доменов и межфазные границы, удается достаточно точно интерпретировать с помощью анализа профиля и интегральной интенсивности рефлексов дифракции медленных электронов.

*Эллипсометрия* основана на том, что коэффициенты отражения и фазовые сдвиги очень чувствительны к адсорбированным слоям на полированных твердых поверхностях. Метод является неразрушающим и обычно применяется для измерения толщины пленок, исследования процессов адсорбции, коррозии и т. д. Предназначен также для оценки

шероховатости поверхности. Его достоинство — простота и скорость измерения.

**1.4.2. Исследование шероховатости поверхности.** В настоящее время существует большое количество методов экспериментальной оценки шероховатости поверхности. По-прежнему наиболее распространены шуповые методы, результаты измерения которыми лежат в основании современных стандартов. Получили широкое распространение оптические методы, использующие электромагнитное излучение (методы светового сечения, теневой проекции, интерференционный метод и т. д.). Известны электрические и термические методы, основанные на прохождении электричества и тепла через контакт шероховатых тел. Следует упомянуть также методы, основанные на взаимодействии

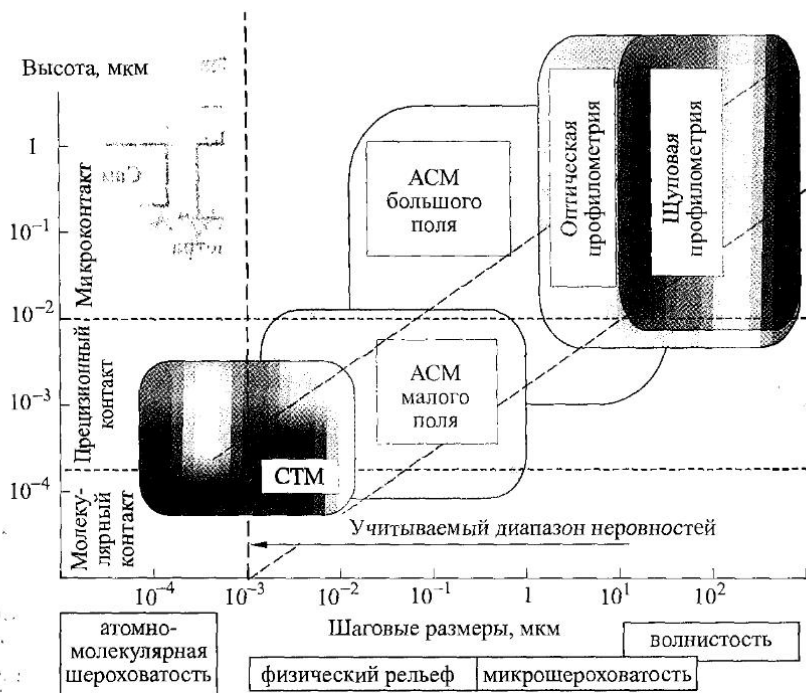


Рис. 1.18. Разрешающая способность различных методов измерения шероховатости

жидкостей или газов с шероховатой поверхностью и, наконец, методы, использующие принципы туннельной микроскопии. Некоторые возможности различных методов измерения шероховатости, в первую очередь их разрешающая способность в вертикальном и горизонтальном направлениях, представлены на рис. 1.18.

Анализ современных тенденций показывает, что интересы техники и науки сместились в настоящее время в сторону получения данных об очень гладких поверхностях, т. е. элементах шероховатости микро- и нанометрового масштаба, и воссоздания изображения образа реальной поверхности. Но, как и раньше, актуальными остаются щуповые



Рис. 1.19. Схема щупового профилометра

методы (рис. 1.19), сущность которых состоит в том, что игла с малым радиусом закругления (2–10 мкм) скользит по поверхности, повторяя ее рельеф. Перемещения иглы в вертикальном направлении преобразуются в электрические сигналы, которые усиливаются и записываются в виде профилограмм и обычно оцифровываются для обработки компьютером. Достоинства щупового метода достаточно очевидны: простота интерпретации результатов измерения и, прежде всего, хорошее приборное обеспечение. Современные профилометры в состоянии выдавать большой набор параметров шероховатости с высокой точностью.

Здесь уместно отметить следующее обстоятельство. Дело в том, что высота неровностей, как правило, значительно меньше их горизонтального размера. Поэтому удобно записывать профилограмму с большим увеличением по вертикали, чем по горизонтали (рис. 1.20, а). Такой вид профилограммы может вводить в заблуждение при ее анализе, что иногда, к сожалению, случается, когда делаются необоснованные заключения о высоте неровностей и их наклоне. Рис. 1.20 показывает, что впечатление о профиле поверхности сильно зависит от соотношения масштабов увеличения и что реальная шероховатость намного более пологая, чем нам представляется, когда мы смотрим на профилограмму.

Основные недостатки щупового метода обусловлены следующими обстоятельствами. Игла при своем движении по поверхности воспроизводит ее неадекватно: во-первых, и об этом уже говорилось выше,

она, как правило, не проходит через вершины неровностей, тем самым занижая их высоту и завышая радиус кривизны; во-вторых, из-за своих конечных размеров игла действует как низкочастотный фильтр, «выглаживая» поверхность. Более того, поскольку размеры иглы малы,

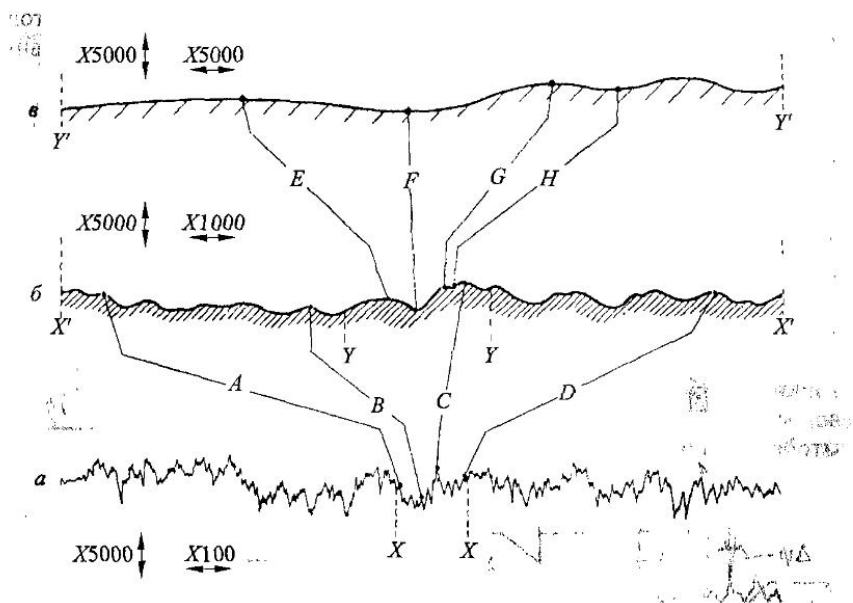


Рис. 1.20. Профиль реальной поверхности при различных увеличениях по вертикали и горизонтали: *a* — вертикальное увеличение в 50 раз больше горизонтального; *b* — та же поверхность при отношении увеличений 5:1; *c* — поверхность при одинаковом увеличении по вертикали и горизонтали

то даже при незначительных нагрузках, действующих на иглу (не более 0,7 мН), возникают существенные контактные давления, вызывающие упругую деформацию измеряемой поверхности, а в некоторых случаях даже ее пластическое течение. Это обстоятельство затрудняет профилометрирование «мягких» поверхностей, например полимерных, что и послужило побудительным мотивом для разработки бесконтактных методов измерения шероховатости.

Наибольшее распространение среди них получили оптические методы, обеспечивающие высокое разрешение по вертикали ( $< 0,1$  нм). На основе закономерностей рассеяния света, отраженного от неровностей поверхности, удается определить ряд важных характеристик шероховатой поверхности, например среднее квадратичное отклонение профиля, радиус корреляции и т. д. Известны также попытки применения эллипсометрии для измерения параметров шероховатости.



В научных исследованиях значительное место занимают методы изучения шероховатых поверхностей с помощью электронной микроскопии. Фактически речь идет о большой группе бесконтактных методов, реализованных в рамках просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, различающихся носителями информации (рассеянные, упруго отраженные или вторичные электроны) и методическими приемами (обработка стереопар, установка дополнительных

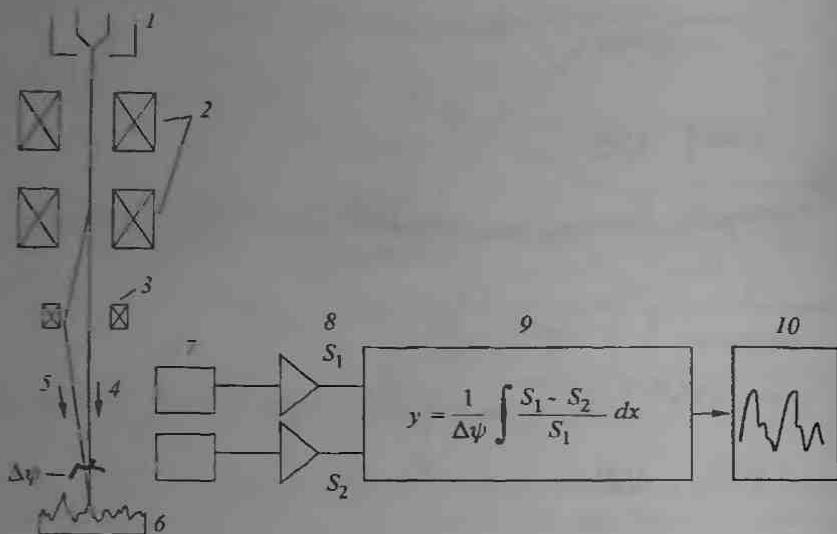


Рис. 1.21. Схема автоматизированной системы для исследования шероховатости с помощью сканирующей электронной микроскопии: 1 — источник электронов; 2 — ячейка формирования луча; 3 — отклоняющие катушки; 4, 5 — исходный и отклоненный лучи; 7 — детекторы; 8 — усилитель; 9 — компьютер; 10 — принтер

детекторов и т.д.) В качестве примера рассмотрим метод, разработанный в ИММС НАН Беларуси и основанный на использовании для формирования изображения низкоэнергетических вторичных электронов (рис. 1.21).

Известно, что интенсивность эмиссии вторичных электронов нелинейно зависит от локального угла падения электронного пучка:

$$C = C_0 \sec \theta,$$

где  $C_0$ ,  $C$  — интенсивности вторичного электронного излучения при нормальном и косом падении (под углом  $\theta$ ) первичного пучка. Профиль поверхности в некотором сечении определяется по относительному изменению интенсивности эмиссии вторичных электронов в одноименных точках при повороте образца или отклонении падающего пучка на

некоторый угол. Выражение, связывающее интенсивность эмиссии с параметрами шероховатости, имеет следующий вид:

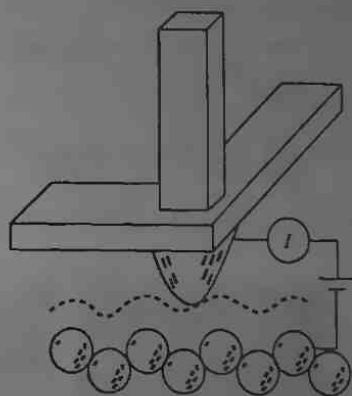
$$z = \frac{1}{\Delta\theta} \int \frac{C_1 - C_2}{C_1} dx.$$

Здесь  $z$  — высота профиля в некоторой точке,  $C_1, C_2$  — значения интенсивности вторичного электронного излучения до и после поворота образца на угол  $\Delta\theta$  (или отклонения пучка) относительно оси, перпендикулярной плоскости перемещения зонта.

Метод реализован на комплексе СЭМ — компьютер. Разработанный к нему пакет программ позволяет рассчитывать стандартные параметры шероховатости, моменты спектральной плотности, удельную площадь поверхности, получать гистограммы распределения углов наклона неровностей, определять плотность экстремумов и строить опорную кривую профиля.

Исследования очень гладких субшероховатых поверхностей получили дополнительный стимул в связи с изобретением сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), первые публикации о которой появились в 1982 г. Ее физической основой является туннелирование электронов между двумя близко расположенными электродами. Принцип работы

Рис. 1.22. Схема сканирующего туннельного микроскопа. Игла, изображенная в виде закругленного конуса, установлена на трехкоординатном пьезоприводе и при своем движении (траектория показана пунктирной линией) обнаруживает мельчайшие неровности поверхности вплоть до атомных размеров



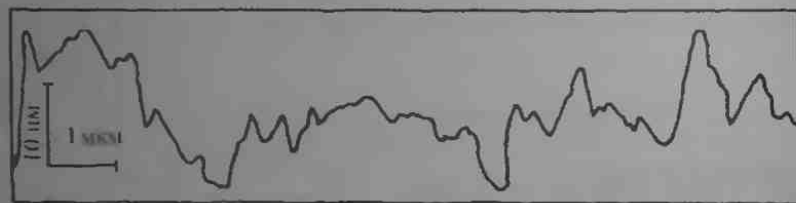
туннельного микроскопа состоит в том, что при перемещении металлической иглы, закрепленной в трехкоординатном пьезоприводе, над исследуемой поверхностью в зазоре между иглой и поверхностью под действием некоторого напряжения  $U$  возникает туннельный ток  $I$  (рис. 1.22).

Существуют два основных режима работы туннельного микроскопа. В одном из них туннельный ток поддерживается постоянным. Чтобы достичь этого, с помощью системы обратной связи, управляющей пьезоприводом перемещения иглы, изменяется номинальный зазор (рас-

стояние между иглой и некоторой условной, например средней, линией). Траектория движения иглы дает профиль измеряемой поверхности. В другом режиме номинальный зазор поддерживается постоянным. Поскольку расстояние между иглой и реальной поверхностью изменяется, то и величина туннельного тока изменяется, и это изменение соответствует профилю поверхности. Оба режима, а также их многочисленные модификации, позволяют измерять профиль поверхности с разрешением на уровне атомно-молекулярных размеров.

Создание СТМ привело к появлению нового класса приборов с аналогичным принципом работы. Большой перспективой и широкими возможностями обладает сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ), сочетающий в себе принципы СТМ и щупового профилометра. Отличительная черта АСМ — это измерение не туннельного тока, а силы взаимодействия иглы и образца при сканировании поверхности последнего, что позволяет исследовать в атомарном масштабе поверхности любых материалов — проводников, полупроводников и диэлектриков. Высокая и разрешающая способность АСМ: менее 0,1 нм в вертикальном направлении и примерно 2–5 нм в горизонтальном. Достоинством АСМ является то, что имеется возможность изучать не только топографию поверхности, но и исследовать такие процессы как трение, электростатическое отталкивание, химические реакции и т. д.

Теперь уже трудно представить исследование топографии очень гладких поверхностей, используемых в точной механике, без приме-



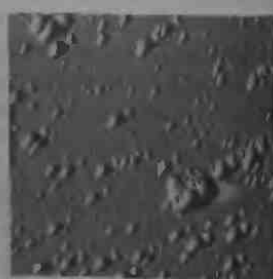
а



б



в



г

Рис. 1.23. Примеры применения СТМ и АСМ: СТМ-профиль алюминиевого сплава, обработанного алмазным инструментом ( $R_a = 7$  нм) (а) и АСМ-изображения электродитического кобальтового покрытия (б), полированной стали (в) и алмазоподобного покрытия (г); б–г — площадь изображения  $20 \times 20$  мкм

нения СТМ и АСМ. На рис. 1.23 представлены СТМ-профиль поверхности алюминиевого сплава и некоторые характерные типы гладких технических поверхностей, сканирование которых проводилось с помощью АСМ.

Таким образом, можно отметить основные тенденции развития методов измерения шероховатых поверхностей. Прежде всего это широкое распространение сканирующих методов, которые позволяют более адекватно отображать поверхность как трехмерный объект, представляя в распоряжение триболога параметры не только профиля, но и всей поверхности, т. е. трехмерную карту ее высот. Повышение точности и разрешающей способности методов измерения шероховатости, в том числе бесконтактных, позволяет получать информацию о предельно тонкой геометрической структуре поверхности, включая субшероховатость и атомарную шероховатость.

И, наконец, современные методы измерения шероховатости представляют в распоряжение исследователя такой большой объем информации, что ее правильная организация и оперативная обработка реально не осуществимы без применения вычислительной техники.

Что касается стандартных профилометрических (шуповых) методов измерения, то они остаются практически очень полезными в производственных условиях и не теряют своей актуальности в исследовательской деятельности.

### Список литературы

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз, 1963.
2. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. — М.: Машиностроение, 1986.
3. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968.
4. Зенгуил Э. Физика поверхности. — М.: Мир, 1960.
5. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1982.
6. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
7. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. — Л.: Химия, 1967.

## КОНЦЕПЦИИ ТРЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЯ И СМАЗКИ

### 2.1. Трение

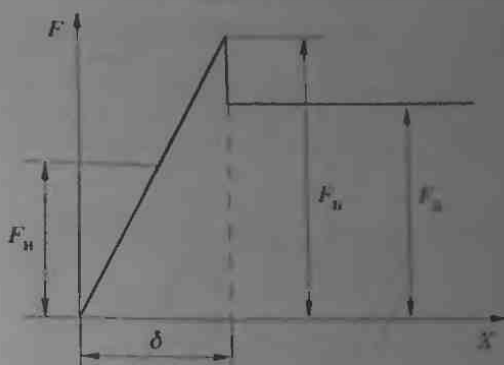
Трение — наиболее широко распространенное явление в нашей жизни, которое используется людьми с незапамятных времен, а история его исследования восходит к временам Аристотеля и Леонардо да Винчи. Трение сопровождает не только любое движение, но и присутствует при любом контакте, стремящемся стать подвижным. Само слово «трение» известно каждому, но иногда даже опытные специалисты испытывают трудности в объяснении этого явления.

Прежде всего, следует различать внутреннее трение, как сопротивление относительному перемещению частей одного и того же тела, и внешнее трение твердых тел, или просто трение, которое и рассматривается ниже.

**2.1.1. Законы трения.** Пусть одно тело находится в контакте с другим. Повседневный опыт показывает, что надо приложить некую касательную силу для их относительного смещения. Причем, когда эта сила возрастает от нуля до некоторой определенной величины, в зоне контакта возникают микроперемещения, которые называются *предварительным смещением*, но сами тела в целом остаются неподвижными до тех пор, пока касательная сила не достигнет предельного значения, которое называется силой трения покоя  $F_n$  (рис. 2.1). При этом предварительное смещение достигает своего предельного смещения  $\delta$ . Промежуточные значения приложенной тангенциальной силы называют неполной силой трения  $F_n$ .

Таким образом, между двумя контактирующими и неподвижными друг относительно друга телами существует некая сила, которая препятствует нарушению их покоя, сдвиганию одного тела относительно другого. Этот принципиальный факт следует рассматривать (по предложению Дерягина) как фундаментальный закон трения, который можно сформулировать следующим образом:

— существует конечная, не равная нулю сила трения покоя.

Рис. 2.1. Переход трения покоя к трению движения  $F_d$ 

Этот закон можно назвать нулевым, чтобы не нарушать нумерацию законов, принятую в литературе о трении. Значение его велико, несмотря на простоту формулировки. Прежде всего, наличие трения покоя есть характерная черта именно внешнего трения. Этот факт позволяет отличать его от внутреннего трения, возникающего при любой бесконечно малой тангенциальной нагрузке. Кроме того, мир без трения покоя был бы странным и удивительным, если бы вообще мог существовать. Люди не могли бы ходить в привычной обуви. Книга, которую мы положили на стол в надежде когда-либо ее прочитать, постепенно соскользнула бы на пол и забилась в угол комнаты, перемещаясь по полу как по наклонной плоскости. Ведущие колеса любого транспортного средства буксовали бы. Это была бы жизнь в условиях тотального «гололеда».

Вновь обратимся к рис. 2.1. После того как тело сдвинулось с места, сопротивление перемещению, как правило, уменьшается, но не исчезает полностью, а сохраняется примерно постоянным, если условия движения не изменяются. Это сопротивление движению называется трением движения, а сила сопротивления — силой трения движения. Отношение силы трения (покоя или движения) к нормальной нагрузке принято называть коэффициентом трения (соответственно, покоя или движения). Леонардо да Винчи (1452–1519) считал, что для гладких поверхностей коэффициент трения постоянен и равен 0,25, и эта точка зрения продержалась в науке очень долго. Амонтон (1663–1705) полагал, что коэффициент трения равен  $1/3$  для исследованных им поверхностей железа, кожи, свинца и дерева. На самом же деле коэффициент трения может находиться в достаточно широком диапазоне от примерно 0,001 в легко нагруженных подшипниках качения до десятков единиц для тщательно очищенных одноименных металлов, контактирующих в вакууме. В обычных условиях при трении на воздухе коэффициент трения, как правило, изменяется в сравнительно

узком диапазоне от 0,1 до 1. Но принципиальным здесь является не величина коэффициента трения, а его постоянство, что по существу и составляет содержание первого закона трения, часто называемого законом Амонтона. На рис. 2.2 представлена простая схема эксперимента, иллюстрирующая этот закон. Если на плоскости лежит некоторое тело

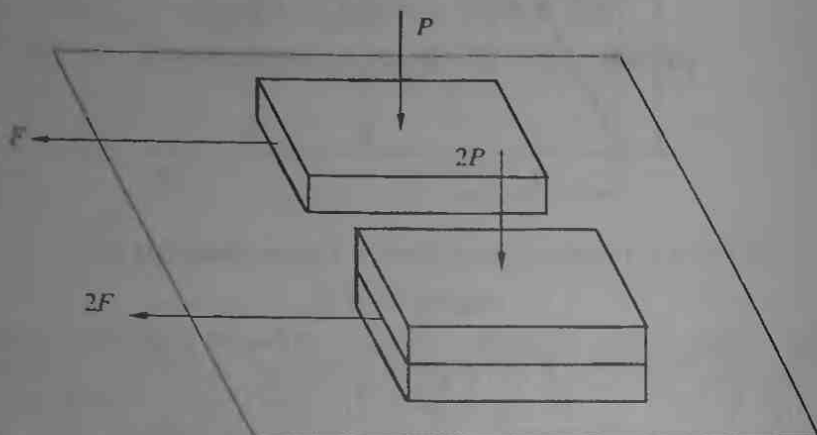


Рис. 2.2. Сила трения возрастает практически пропорционально приложенной нормальной нагрузке (1-й закон трения)

(скажем, книга), вес которого  $P$ , и сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть это тело с места, равна  $F$ , то, как показывает опыт, сдвинуть с места стопку из  $n$  книг (на рисунке  $n = 2$ ) можно, лишь приложив в  $n$  раз большее тангенциальное усилие (в данном случае  $2F$ ).

Таким образом, первый закон трения формулируется следующим образом:

— сила трения прямо пропорциональна нормальной нагрузке.

Если  $f$  обозначает коэффициент трения и, как следует из приведенной формулировки, есть константа, не зависящая от нормальной нагрузки, то первый закон трения записывается в виде

$$F = fP. \quad (2.1)$$

Но уже основоположники трибологии понимали, что это соотношение справедливо для определенных нагрузочно-скоростных режимов, сочетаний трущихся материалов и других условий трения. Еще Амонтон писал, что сила трения находится в сложной зависимости от нормального давления, времени и скорости скольжения. Однако в условиях граничного трения и для ряда несмазанных трущихся материалов оно выполняется с достаточной точностью.

Наиболее парадоксален второй закон трения:

— сила трения не зависит от формы и размера номинальной площади контакта.

Под номинальной площадью контакта понимается площадь, на которой соприкасались бы тела, если бы были идеально гладкими.

Рис. 2.3, воспроизводящий фрагмент работы Леонардо да Винчи, показывает, что усилие для перемещения тела по плоскости не зависит от того, по какой из разновеликих граней происходит трение.

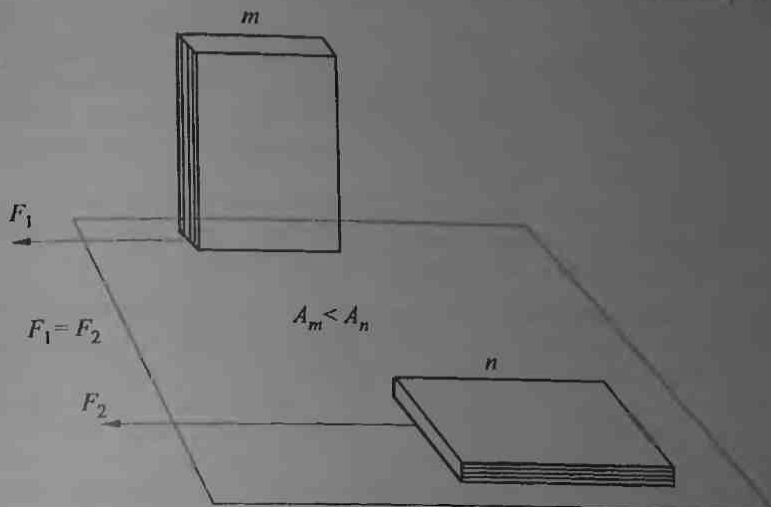


Рис. 2.3. Фрагмент рисунка из работы Леонардо да Винчи, иллюстрирующий второй закон трения ( $A_m$  и  $A_n$  — номинальные площади контакта разновеликих граней  $m$  и  $n$ )

Кстати, он же показал, что свернутый в бухту и вытянутый канат оказывает одинаковое сопротивление скольжению. Никто не заинтересовался причиной этого явления, пока Амонтон не показал своими экспериментами, что трение не зависит от номинальной площади контакта трущихся тел. Это утверждение Амонтона было с недоверием воспринято Французской академией наук, которая поручила Делагиру в 1699 г. перепроверить эксперименты Амонтона. Его опыты подтвердили оба закона Амонтона, а трактовка второго закона предвосхитила современные представления о дискретности контакта твердых тел.

Выражаясь современным языком, суть кажущегося парадокса Амонтона состоит в том, что твердые тела контактируют не всей номинальной поверхностью, а отдельными пятнами из-за шероховатости реальных поверхностей. Общая площадь таких пятен (фактическая площадь контакта, о которой более подробно будет рассказано в последующих главах) очень мала по отношению к номинальной площади. Если последняя задана, т. е. как показывает опыт, фактическая площадь растет линейно с увеличением нагрузки. В свою очередь, сила трения пропорциональна фактической площади контакта. Располагая образец различными гранями, мы сохраняем



величину фактического контакта, которая зависит только от нагрузки. Отсюда и вытекает независимость трения от площади номинального контакта.

К перечисленным выше законам иногда добавляют третий закон, приписываемый Кулону (1736–1806):

– сила трения не зависит от скорости скольжения.

Этот закон обоснован менее других. Между прочим, сам Кулон обнаруживал в экспериментах как возрастающую, так и убывающую скоростные зависимости силы трения. Однако если контактная температура при трении изменяется незначительно и свойства зоны контакта практически не изменяются, то этот закон может быть справедливым в некотором диапазоне скоростей.

В заключение следует отметить, что законы трения до сих пор являются хорошими эмпирическими правилами, позволяющими ориентироваться в ситуациях, возникающих на практике.

**2.1.2. Элементарная модель трения.** Пусть две шероховатые поверхности сближаются друг с другом. Первоначально по крайней мере две неровности вступают в контакт. Даже при очень малой нагрузке давление на контакте очень велико в силу малости площади контакта. Материал более мягкой неровности начинает пластически деформироваться, и в результате поверхности продолжают сближаться, приводя в контакт все большее количество неровностей. Этот процесс продол-

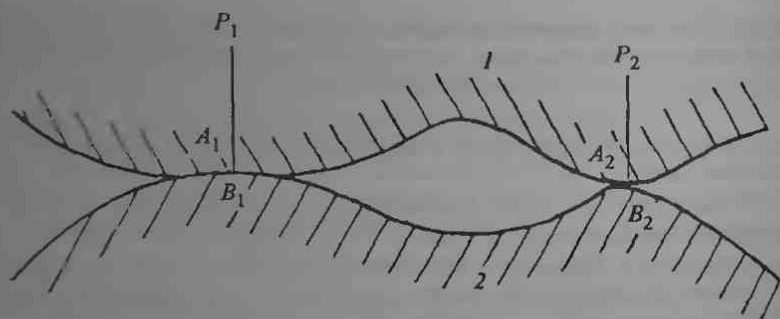


Рис. 2.4. Контакт шероховатых поверхностей

жается до тех пор, пока площадь контакта не станет достаточной, чтобы нести нагрузку (рис. 2.4).

Площадь отдельного пятна контакта  $A_n$  пропорциональна нагрузке  $P_n$  и обратно пропорциональна пределу текучести более мягкого материала  $p_m$ :

$$A_n = P_n / p_m.$$

Эта простая схема лежит в основе развитой Боуденом и Тейбором модели трения скольжения. Концептуально близка, но более глубоко разработана молекулярно-механическая теория трения Крагельского, о

которой речь пойдет в гл. 4. Боуден и Тейбор предположили, что на каждом пятне контакта образуются так называемые мостики сварки (адгезионные связи), сдвиговая прочность которых равна  $s$ . При относительном скольжении поверхностей эти связи разрушаются (срезаются), а сила трения по существу и есть эта сила среза (адгезионная составляющая трения). Аналитически сила трения может быть записана в следующем виде:

$$F = A_r s,$$

где  $A_r$  — общая площадь фактического контакта, равная  $\Sigma A_n$ . Подставляя это значение вместо  $A_r$ , получим

$$F = Ps/p_m,$$

где  $P = \Sigma P_n$ .

Из этого простого уравнения следует, что сила трения пропорциональна нагрузке и не зависит от номинальной площади контакта, что вполне согласуется с первыми двумя законами трения. Интересно отметить, что для большинства металлов  $s$  имеет порядок  $0,2p_m$ . Тогда коэффициент трения  $f = F/P$  будет равен  $s/p_m = 0,2$ , что близко к значению, предложенному в свое время Леонардо да Винчи, но маловато для реальных узлов трения. Дело в том, что обсуждаемая схема предельно упрощена и не учитывает большое число факторов. Например, до сих пор предполагалось, что пластическая деформация при сжатии материала и срез адгезионных связей происходят независимо друг от друга. Это не совсем так, если фрикционно взаимодействующие материалы упрочняются и/или рост адгезионных связей происходит при совместном действии нормальных и тангенциальных нагрузок. Действительно, согласно критерию пластического течения, между нормальными  $p$  и тангенциальными  $s$  напряжениями, действующими на связь, должно существовать соотношение типа

$$p^2 + \alpha s^2 = p_m^2.$$

Здесь  $\alpha$  — константа, зависящая от критерия пластичности;  $p_m$  — предел текучести материала при одноосном сжатии, а  $p = P/A_0$  и  $s = F/A_0$ , где  $A_0$  — начальная площадь контакта. Если неровность переходит в пластическое состояние только под действием нормальной нагрузки, то  $s$  равно нулю и  $p = p_m$ . При приложении тангенциальной нагрузки условие пластичности, вообще говоря, нарушается, а для его сохранения нормальные напряжения должны уменьшиться, а это имеет место при увеличении площади контакта до некоторой величины  $A$  за счет дальнейшего сближения поверхностей. Подставляя значения  $p$  и  $s$  в последнее соотношение, находим, что пятно контакта возрастает следующим образом:

$$A = A_0(1 + \alpha(F/P)^2)^{1/2}.$$

Казалось бы, что с ростом тангенциальной нагрузки площадь пятна контакта должна расти неограниченно, но в силу ряда факторов и, в первую очередь, из-за ограниченной прочности на срез  $s_a$  адгезионных связей, при определенном значении  $F = s_a A$  связи разрушаются и начинается скольжение. Из предыдущих уравнений следует, что коэффициент трения равен

$$f = s_a/p = (\alpha((s/s_a)^2 - 1))^{-1/2}.$$

Отсюда видно, что если прочность на срез адгезионной связи близка к сдвиговой прочности металла, то коэффициент трения может принимать сколь угодно большие значения. Однако он резко падает при уменьшении  $s_a$ , например, если  $s_a$  (при  $\alpha = 10$ ) составляет лишь 0,7 сдвиговой прочности металла, то площадь пятна контакта возрастает в 1,4 раза, а коэффициент трения становится равным 0,31.

Уже Боуден и Тейбор указывали в своем анализе на возможность существования дополнительных механизмов трения, в частности деформационной составляющей, обусловленной пропахиванием неровностями твердого материала поверхности более мягкого контртела. Представим единичную неровность в виде конуса с углом при вершине  $2\vartheta$  (рис. 25).

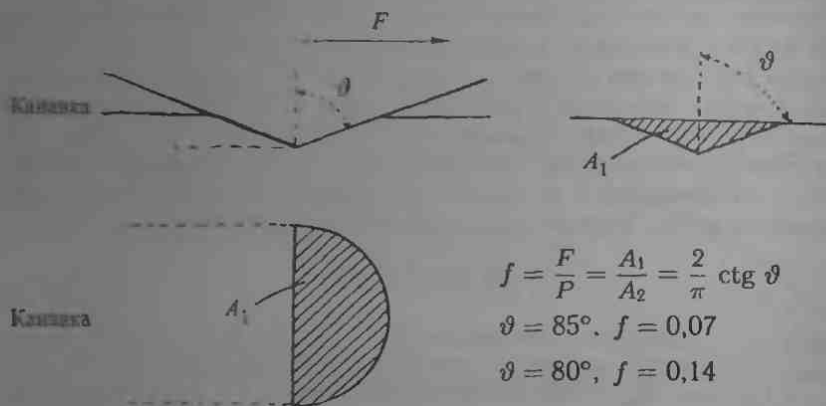


Рис. 25. Деформационная составляющая трения, возникающая при пропахивании пластического материала конической неровностью

Пусть под действием нагрузки  $P$  конус внедряется на глубину  $h$  в пластический материал, твердость которого  $H$ . Под действием тангенциальной силы  $F$  конус пропахивает в мягком материале дорожку, представляющую собой в поперечном сечении треугольник с высотой  $h$  и основанием  $2a$ . Очевидно, что при движении конуса нормальная нагрузка воспринимается полукругом радиуса  $a$ , т. е. между нагрузкой

$P$  и глубиной внедрения неровности  $h$  должно быть следующее соотношение:

$$P = 0,5\pi h^2 H \operatorname{tg}^2 \vartheta,$$

где учтено, что  $a = h \operatorname{tg} \vartheta$ .

С другой стороны, тангенциальное усилие (тнгушая сила), равное силе трения, должно преодолевать сопротивление материала перед индентором, т. е. воздействует на поперечное сечение дорожки, площадь которого равна  $a_h = h^2 \operatorname{tg} \vartheta$ ; тогда

$$F = H h^2 \operatorname{tg} \vartheta.$$

Таким образом, коэффициент трения, обусловленный пропахиванием (деформацией), записывается в виде

$$f_d = \frac{2}{\pi} \operatorname{ctg} \vartheta. \quad (2.2)$$

Как правило, неровности реальных поверхностей имеют наклон порядка  $5-10^\circ$ , т. е. угол  $\vartheta$  составляет  $80-85^\circ$ . Подставляя эти значения в последнюю формулу, находим, что деформационная (пропахивающая) составляющая коэффициента трения лежит в диапазоне  $0,07-0,14$ .

Обычно обе составляющие, адгезионная и деформационная, просто складываются арифметически, что предполагает их аддитивность. На самом деле это не совсем так: деформация, увеличивая площадь контакта, способствует росту адгезии, и наоборот, более сильная адгезия приводит к ужесточению деформации, сопровождающей трение. Тем не менее, как показывают многочисленные исследования, это предположение об их аддитивности вполне корректно и, более того, служит хорошим приближением для более глубокого проникновения в природу трения.

## 2.2. Изнашивание

Изнашивание определяется как удаление материала с контактной поверхности тела в результате его трения с другим телом. Более строгие определения даются в гл. 6, но даже это упрощенное определение показывает, что изнашивание играет важную роль в инженерной практике. Именно изнашиванием часто лимитируется долговечность и работоспособность трущихся узлов и машин в целом. Например, износ поршневых колец в автомобильном двигателе, достигнув лишь долей процента их диаметра, может вызвать полную потерю работоспособности двигателя.

Изнашивание — достаточно сложное явление, включающее большое разнообразие механизмов, которые далеко не всегда действуют отдельно и независимо. Тем не менее, довольно часто существует ведущий механизм, ответственный за вид и интенсивность изнашивания.

Изнашивание зависит от большого числа факторов, включая нагрузку, скорость скольжения, температуру, свойства трущихся материалов, смазку, параметры окружающей среды и т. д.

Количество материала, удаленного с поверхности трения (износ), измеряется в единицах длины (например, толщина изношенного слоя), объема или массы, и в этих случаях износ называется линейным, объемным или массовым соответственно. Величина износа, отнесенная к единице пути трения, называется *интенсивностью изнашивания*. В случае линейного износа интенсивность изнашивания — безразмерная величина. В отечественной литературе используется также понятие скорости изнашивания как величины износа за единицу времени. При постоянной скорости скольжения интенсивность и скорость изнашивания различаются лишь постоянным множителем, скоростью скольжения.

**2.2.1. Стадии изнашивания.** Изнашивание — это процесс, протекающий во времени. Если износ какой-либо пары трения при неизменных нагрузочно-скоростных параметрах изобразить графически как функцию времени (или пути трения), то наклон кривой в каждой точке характеризует интенсивность изнашивания. Обычно существуют три стадии изнашивания, показанные на рис. 2.6. Первый участок кривой

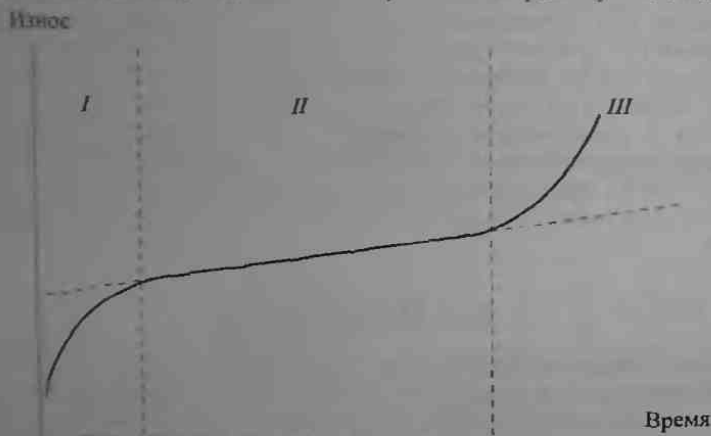


Рис. 2.6. Характерные стадии процесса изнашивания

(первая стадия I) представляет начальный период изнашивания, продолжительность которого невелика по сравнению с ожидаемой долговечностью узла трения. Эта стадия характеризуется нестационарным состоянием трибосистемы и большой интенсивностью изнашивания, которая постепенно понижается. Эта стадия называется *приработкой* трибосистемы, в течение которой трущиеся поверхности приспособляются друг к другу, и в частности устанавливается так называемая рав-

новесная шероховатость, а трение и износ изменяются таким образом, что трибосистема переходит в стационарное состояние.

Наступает вторая стадия II с наибольшей продолжительностью. Она характеризуется стабильными условиями трения и практически постоянной и относительно низкой интенсивностью изнашивания. Эта стадия относится к нормальной работе узла трения после завершения приработки. В ходе ее развития износ постепенно (почти линейно) возрастает, приводя к повреждению поверхности, изменению формы и зазора трущихся элементов пары, что в конечном итоге приводит к значительному изменению условий работы, интенсивность износа резко возрастает и наступает *катастрофический износ* (стадия III).

Здесь следует отметить, что реальные трибосистемы работают с остановками, и их повторный старт должен сопровождаться новой приработкой, но в меньшем масштабе.

**2.2.2. Элементарная модель изнашивания.** В отличие от трения, не существует общепринятых законов изнашивания; тем не менее, некоторые характерные особенности регулярно наблюдаются при испытаниях и эксплуатации узлов трения. Общепризнано, что износ возрастает с нагрузкой и длительностью процесса трения, что чем тверже трущийся материал, тем меньше износ, и т. д. Но даже эти почти очевидные закономерности имеют свои исключения.

Но речь далее пойдет не об исключениях, а о тех закономерностях, которые чаще всего подтверждаются экспериментально и которые вытекают из простой модели, предложенной Хольмом и Арчардом. Более содержательные представления о процессе изнашивания были разработаны Хрущовым, Костецким и Крагельским, о чем пойдет речь в гл. 6.

Эта модель, как и ранее описанная модель трения, основывается на допущении, что контакт двух шероховатых поверхностей дискретен, т. е. состоит из отдельных пятен контакта, сформированных неровностями сопряженных поверхностей. При этом площадь отдельного пятна вначале возрастает от нуля до своего максимального значения  $\pi a^2$  (здесь  $a$  — наибольший радиус пятна контакта), а затем убывает до нуля. Один из этапов этого процесса показан на рис. 2.7. На этих пятнах возникают адгезионные связи (мостики сварки), разрушение которых и составляет сущность рассматриваемого процесса изнашивания. Кроме того, предполагается, что локальная деформация неровностей носит характер пластического течения. Очевидно, что в такой ситуации нормальная нагрузка  $P_n$ , воспринимаемая пятном контакта, определяется выражением:

$$P_n = \pi a^2 p_m, \quad (2.3)$$

где  $p_m$  — давление текучести пластически деформированной неровности, которое близко к твердости материала  $H$ .

В процессе скольжения происходит непрерывное формирование и разрушение адгезионных связей. При этом может происходить отде-

ние частиц материала неровностей. Объем каждого такого фрагмента (частицы износа) зависит от характерного размера адгезионной связи, его породившей. Пусть объем частицы износа  $V_n$  пропорционален кубу контактного радиуса  $a$  (рост связей, о котором говорилось выше,

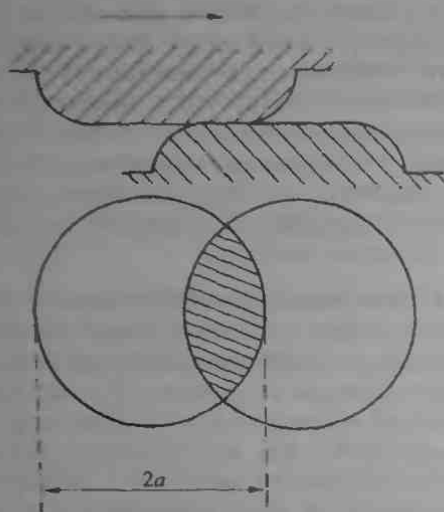


Рис. 2.7 Упрощенная схема формирования единичного пятна контакта (здесь не учитывается). Это предположение подразумевает, что форма частицы износа не зависит от ее размера, и мы можем рассматривать частицу износа как полусферу радиуса  $a$  с объемом

$$V_n = \frac{2\pi a^3}{3}.$$

Частица износа образуется на пути трения  $2a$  (см. рис. 2.7), тогда интенсивность изнашивания  $i_n$  (износ, отнесенный к единичному пути трения) равна  $V_n/(2a)$ , т. е.  $i_n = \pi a^2/3$ . Переписав последнее равенство с учетом (2.3), получаем

$$i_n = \frac{P_n}{3p_m}.$$

Если бы все пары взаимодействующих неровностей генерировали частицы износа, то общая интенсивность изнашивания равнялась бы сумме вкладов от всех пятен контакта:

$$I^* = \Sigma i_n = \frac{P}{3p_m},$$

где общая нормальная нагрузка на контакте есть  $P = \Sigma P_n$ .

Вполне резонно считать, что частицы износа появляются не на всех пятнах контакта, а лишь на некоторой части их, скажем  $k$ . Заметим,

что коэффициент  $k$  может также учитывать геометрическое подобие частиц износа и области деформирования пятен контакта. Следовательно,  $I = kI^*$ , что записывается в следующем виде:

$$I = \frac{kP}{3\rho_m}$$

Удобно обозначить  $K = k/3$  и предположить, что  $\rho_m = H$  (твердость материала), тогда уравнение изнашивания запишется в форме

$$I = \frac{KP}{H} \quad (2.4)$$

Это уравнение изнашивания, часто называемое уравнением Арчарда, показывает, что интенсивность изнашивания  $I$  (объем изношенного материала, приходящийся на единицу пути трения) прямо пропорциональна нормальной нагрузке  $P$  и обратно пропорциональна твердости более мягкого материала  $H$ . Константа  $K$ , обычно называемая коэффициентом износа, безразмерна и всегда меньше единицы.

Коэффициент износа  $K$  позволяет сравнивать интенсивности протекания процессов изнашивания в различных узлах трения. Для инженерных приложений часто оказывается предпочтительнее использовать отношение  $K/H$ , названное размерным коэффициентом износа, его размерность  $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ . Оценка износа с помощью такого коэффициента особенно полезна при сравнении интенсивностей изнашивания материалов разных классов.

Интересно отметить, что уравнение Арчарда легко получается с помощью анализа размерностей. Изношенный объем, отнесенный к пути скольжения, имеет размерность площади, а отношение  $P/H$  есть фактическая площадь контакта при пластическом деформировании неровностей. Единственная безразмерная величина (коэффициент износа) получается как отношение этих двух площадей.

Из уравнения Арчарда следует, что если  $K$  есть константа для данного сопряжения, то объем (или масса) изношенного материала должен быть пропорционален пути трения. Если же нормальная нагрузка  $P$  изменяется, то пропорционально должна измениться интенсивность изнашивания.

Громадное число исследований подтверждает, что износ многих узлов трения действительно пропорционален пути скольжения. Исключения могут наблюдаться в начале скольжения (при приработке), когда интенсивность изнашивания может быть выше или ниже своего установившегося значения в зависимости от характера процесса приработки. Что касается прямой пропорциональности интенсивности изнашивания нормальной нагрузке, то для многих систем она наблюдается лишь в ограниченном диапазоне нагрузок. Более того, с увеличением нагрузки интенсивность изнашивания может резко возрасти и затем вновь снизиться.



Хотя коэффициент износа  $K$  играет большую роль при исследовании и анализе трибосистем, его физический смысл не совсем ясен, а его значения могут быть определены лишь экспериментально. Коэффициент износа  $K$  изменяется в широком диапазоне, охватывающем около шести порядков, в зависимости от свойств материалов и режимов трения. Некоторые типичные значения коэффициента износа, измеренного на пальчиковой машине трения без смазки, представлены на рис. 2.8 для ряда материалов. Следует иметь в виду, что уравнение

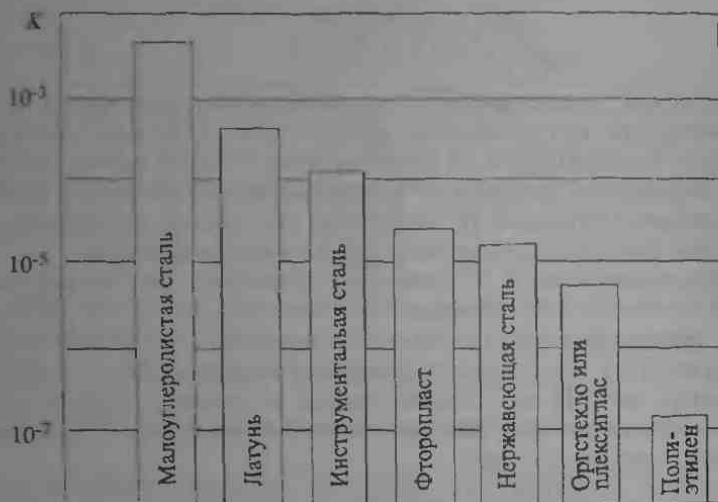


Рис. 2.8. Значения безразмерного коэффициента износа  $K$  для разных материалов, трущихся по малоуглеродистой стали, на пальчиковой машине трения без смазки

изнашивания Арчарда справедливо лишь при таких условиях, когда механизм изнашивания остается неизменным. Небольшие изменения в условиях эксплуатации могут привести к изменению этого механизма, и тогда, по крайней мере, коэффициент износа должен измениться. Следовательно, этот коэффициент оставляет большой простор для самых разных интерпретаций, и уравнения износа, подобные уравнению Арчарда, могут быть выведены на основе других предположений, что часто и делается.

## 2.3. Смазка

**2.3.1. Роль смазки в технике.** Смазка определяется как некоторый процесс, в результате которого уменьшаются трение и износ трущихся поверхностей за счет применения смазочного материала. В качестве смазочных материалов могут использоваться как газообраз-

ные и жидкие, так и твердые материалы, обладающие определенными свойствами, о которых речь пойдет ниже.

Прежде всего, следует несколько уточнить сделанное определение. Существуют ситуации, в которых важно не столько уменьшить трение, сколько сохранить его неизменным, например чтобы снизить вибрацию направляющих обрабатывающего инструмента, обеспечить равномерное движение полосы при прокатке металла или устранить визг тормозов.

Кроме того, смазка выполняет и другие функции, в частности может предотвращать перегрев трущихся поверхностей и/или защищать их от коррозии. Первый эффект достигается не только за счет снижения трения, т. е. уменьшения количества тепла, генерируемого в зоне контакта, но и путем отвода избыточного тепла из зоны трения. Что касается защиты от коррозии, то здесь необходимо отметить три момента: далеко не все смазки выполняют эту функцию (лучшие из них, по-видимому, минеральные масла); некоторые смазки сами могут инициировать коррозию, если не принять определенные меры предосторожности и, наконец, некоторые смазки, обеспечивающие в исходном состоянии коррозионную защиту, в процессе эксплуатации могут насыщаться водой или кислотами и стать опасными в этом отношении.

Смазочные материалы используются человечеством с древнейших времен. Люди очень быстро поняли буквальный смысл поговорки «не подмажешь — не поедешь». Свидетельством тому — боевые колесницы шумеров (XXIV–XXI вв. до н. э.), которые вряд ли представляли грозное оружие на несмазанных колесах. Пример использования смазки, используемой при транспортировке громадных статуй, оставили нам древние египтяне (рис. 2.9).

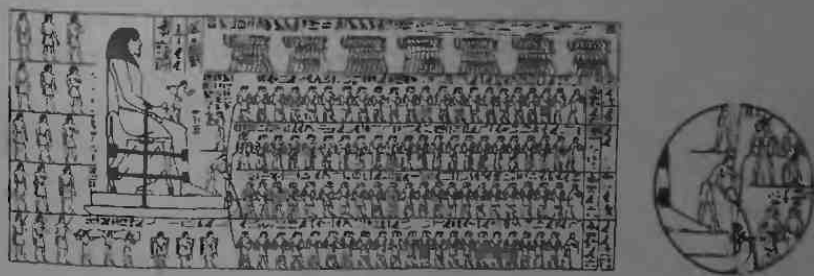


Рис. 2.9. Транспортировка гигантской статуи, установленной на платформе с полозьями (Древний Египет, около 1800 г. до н. э.)

Обратите внимание на человека, стоящего на переднем краю салазок и поливающего какой-то жидкостью поверхность скольжения. Это делается для того, чтобы предотвратить непосредственный контакт твердых поверхностей и заменить внешнее трение внутренним.

которое определяется только вязкостью смазки и значительно меньше внешнего.

**2.3.2. Вязкость и режимы смазки.** Рассмотрим наиболее простой случай внутреннего трения жидкости. Пусть две параллельные

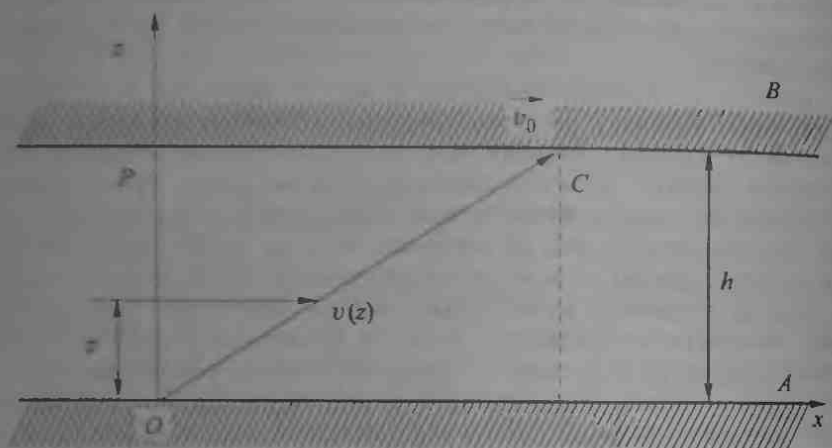


Рис. 2.10. Ламинарное течение жидкости между подвижной  $B$  и неподвижной  $A$  пластинами

пластины разделены слоем жидкости (рис. 2.10), и верхняя пластина  $B$  равномерно движется со скоростью  $v_B = v_0$  относительно неподвижной нижней пластины  $A$  ( $v_A = 0$ ).

Чтобы исследовать поведение жидкости, расположенной между двумя пластинами, Ньютон предложил мысленно разбить ее на тончайшие слои, причем слои, прилегающие к пластинам, прилипают к ним: слой, ближайший к пластине  $A$ , неподвижен, а слой, граничащий с пластиной  $B$ , увлекается ею, имея скорость  $v_0$ . При ламинарном течении, когда все слои движутся параллельно друг другу, естественно предположить, следуя Ньютону, что скорость слоев  $v$  изменяется линейно снизу вверх от  $0$  до  $v_0$ , т. е. градиент скорости равен

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v_0}{h},$$

где  $h$  — зазор между пластинами.

Различие в скоростях рассматриваемых слоев обусловлено трением между ними, которое и называется внутренним трением. Пусть  $\tau = F/S$  — напряжение сдвига, действующее на пластины, где  $F$  — постоянная тангенциальная сила, которая перемещает пластину  $B$  относительно  $A$ , а  $S$  — площадь пластин (или сдвигаемых слоев). Это напряжение сдвига (или удельная сила трения) передается от слоя к слою за счет внутреннего трения между ними и, более того, пропорцио-

нально градиенту скорости, как предположил Ньютон, и экспериментально это подтвердили:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz} \quad (2.5)$$

Здесь  $\eta$  — коэффициент пропорциональности, называемый *вязкостью* или коэффициентом вязкости.

Легко убедиться, что в последнем уравнении  $dv/dz$  представляет собой скорость деформации (сдвига) жидкости, которая определяется как изменение прямого угла элемента жидкости. Действительно, точка  $P$ , находящаяся в некотором элементе жидкости, за время  $dt$  сместится на расстояние  $PC$ ; тогда прямой угол  $POA$  изменится на  $d\gamma$ . Отсюда следует:  $d\gamma/dt = v_0/h$ . Теперь уравнение (2.5) можно переписать в виде

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.6)$$

Это простейшая форма закона Ньютона для вязкой жидкости при ее ламинарном течении. Тем не менее, эта простая модель позволяет понять физический смысл вязкости, определяемой уравнением (2.5) или (2.6), как меры сопротивления жидкости сдвиговому течению. Из уравнения (2.5) следует, что

$$\eta = \frac{F}{S} \bigg/ \frac{dv}{dz},$$

и вязкость можно трактовать как тангенциальную силу, приложенную к единице поверхности сдвигаемого слоя, чтобы сохранить его ламинарное течение с единичным градиентом скорости, нормальным направлению течения. Определенная таким образом вязкость часто называется *динамической вязкостью* и имеет размерность масса  $\times$  длина<sup>-1</sup>  $\times$  время<sup>-1</sup>. Именно эта вязкость часто используется при расчете подшипников. В системе СИ размерность динамической вязкости — Н  $\cdot$  с/м<sup>2</sup> или Па  $\cdot$  с. Эта единица вязкости не имеет особого наименования, в отличие от СГС единицы пуаз (Пз), названной в честь французского ученого Пуазейля, занимавшегося исследованием течения крови в капиллярах. Один пуаз определяется как вязкость такой жидкости, в которой на каждый квадратный сантиметр текущего слоя действует сила трения, равная 1 дине при градиенте скорости 1 см/с на см. Видно, что 1 Па  $\cdot$  с = 10 Пз (или 1 Пз = 0.1 Па  $\cdot$  с). Обычно используется сантипуаз (1 сПз = 10<sup>-3</sup> Па  $\cdot$  с); такую вязкость имеет вода при комнатной температуре. Динамическая вязкость распространенных смазочных масел находится в диапазоне от 2 до 400 сПз.

Производители и пользователи часто отдают предпочтение *кинематической вязкости*  $\nu$ , которая определяется как отношение динамической вязкости  $\eta$  к плотности смазки  $\rho$  ( $\nu = \eta/\rho$ ). В системе СИ кинематическая вязкость, как и температуропроводность, имеет размерность м<sup>2</sup>/с и не носит особого наименования, тогда как в СГС

системе она измеряется в стоксах ( $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$ ) в честь известного английского ученого-механика Стокса. Кинематическая вязкость воды при комнатной температуре примерно равна 1 сСт.

**Трение смазанных поверхностей.** Смазка трущихся поверхностей существенно изменяет механизм трения, а степень этого изменения зависит от вязкости и толщины слоя смазки, а также условий работы узла трения. В качестве примера рассмотрим, как функционирует смазанный подшипник скольжения, точнее говоря, как изменяется коэффициент трения в зависимости от безразмерного параметра  $\eta v/p$  (число Герси), где  $v$  — скорость вращения вала,  $p$  — погонная нагрузка на подшипник (рис. 2.11). Пусть смазка обильная, т.е. она полностью

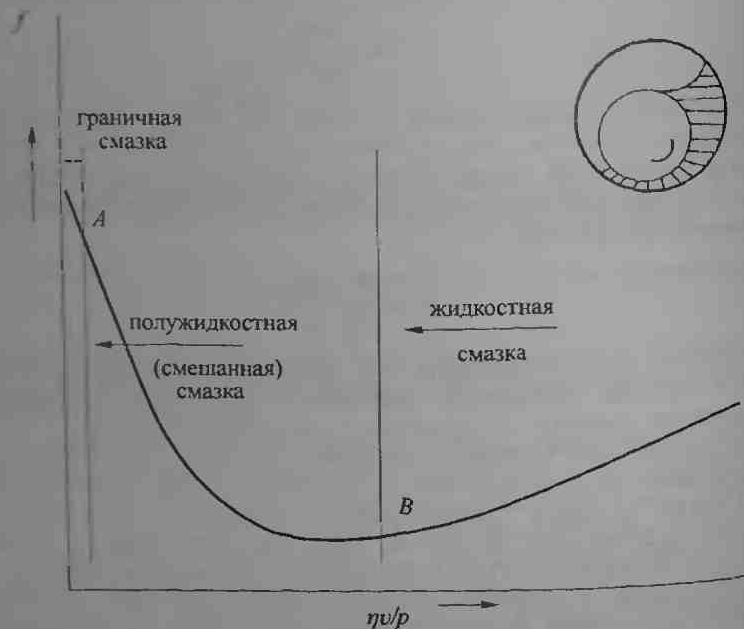


Рис. 2.11. Кривая Герси-Штрибека, описывающая зависимость коэффициента трения  $f$  от безразмерного параметра  $\eta v/p$

разделяет сопряженные поверхности и препятствует их непосредственному контакту. Для более строгого определения этого условия часто используют параметр  $\Lambda$ , который показывает, во сколько раз толщина слоя смазки  $h$  должна превышать эффективную шероховатость контактирующих поверхностей,  $\Lambda = h/R_{\text{эфф}}$ , где  $R_{\text{эфф}} = (R_{q1}^2 + R_{q2}^2)^{1/2}$ . В данном случае достаточно считать, что, как показывают исследования,  $\Lambda > 3$ . При своем вращении вал вовлекает смазку в зазор. Напомним, что ближайший к поверхности вала тонкий слой просто прилипает к

вала и движется вместе с ним, а остальные перемещаются за счет внутреннего трения. Поскольку всегда оси вала и подшипника расположены эксцентрично, то зазор сужается в сторону вращения вала, и смазка, являясь несжимаемой жидкостью и увлекаясь в самое узкое место зазора, создает противодействие (гидродинамическое давление), которое стремится раздвинуть вал и подшипник. Возникает эффект «масляного» клина, что является характерной чертой описываемого режима трения, названного гидродинамическим, основы которого были заложены Петровым. Более подробно и строго этот процесс проанализирован в гл. 7.

Описанное выше поведение смазки в зазоре подшипника, по существу, представляет механизм гидродинамического трения, который, в отличие от трения несмазанных поверхностей, сводится к внутреннему трению смазки. Этим и объясняются очень низкие значения коэффициента гидродинамического трения вплоть до 0,001. Здесь же уместно отметить, что более корректно говорить не о гидродинамическом трении, а о трении в условиях гидродинамической смазки, или просто о гидродинамической смазке.

Теперь обратимся к рис. 2.11, который называется диаграммой трения или кривой Герси-Штрибека. Происхождение минимума в точке *B* и пологой «гидродинамической» ветви фактически следует из приведенного выше описания механизма смазки и нескольких дополнительных пояснений. Справа от точки *B* коэффициент трения может возрастать с ростом вязкости (увеличиваются потери на внутреннее трение), с увеличением скорости вала (увеличивается градиент давления и, следовательно, реакция смазки на вал, вызывая увеличение зазора), с понижением нагрузки на вал (опять же увеличение зазора) или за счет совместного изменения этих параметров, приводящих к росту, согласно критерию  $\eta v/p$ . В этой области сопряженные поверхности полностью разделены смазкой, и износ практически не наблюдается.

Левая, более крутая ветвь, описывает трение в условиях, при которых толщина смазочной пленки уменьшается за счет соответствующего изменения рассматриваемых параметров, например увеличения нагрузки. Вблизи точки *B*, когда толщина смазки составляет 0,1–10 мкм, но, тем не менее, обеспечивает разделение трущихся поверхностей сплошной пленкой, уже нельзя пренебрегать деформацией контактирующих тел. Кроме того, повышенные давления вызывают рост вязкости смазки, увеличивая ее способность нести нагрузку. Эти два обстоятельства существенно изменяют картину контакта. Из-за деформации сопряженных тел площадь контакта возрастает и происходит перераспределение нагрузки, что в совокупности с возросшей вязкостью способствует повышению нагрузочной способности узла трения. Поскольку последняя определяется двумя факторами, упругим и гидродинамическим, то такой режим смазки называется *эластогидродинамическим*. Основы теории гидродинамической смазки были заложены Эртелем и Грубиным.

Дальнейшее уменьшение толщины пленки ( $1 < \Lambda < 3$ ) приводит к тому, что она уже не в состоянии полностью разделить контактирующие поверхности. Реализуется режим смешанной (полужидкостной) смазки, когда гидродинамический эффект (масляный клин) проявляется лишь на отдельных участках контакта, а на остальных его частях может происходить металлический контакт неровностей и/или, что имеет место наиболее часто, поверхности разделены очень тонкой пленкой ( $< 0.1$  мкм), вязкость которой перестает быть решающим фактором в процессах трения, и на первый план выступают другие характеристики. Считается, что такой режим, названный граничной смазкой, проявляется наиболее полно при  $\Lambda < 1$ .

*Граничная смазка.* Термин «граничная смазка» был введен в научный обиход известным английским исследователем Харди (1864–1934), который заложил основы этого важного раздела трибологии, становление которого во многом обязано фундаментальным работам Дерягина, Ахматова, Виноградова и Матвеевского. Дело в том, что чаще всего приходится сталкиваться именно с трением при граничной смазке, поскольку металлы, как правило, покрыты абсорбированной пленкой. Даже в условиях гидродинамической смазки узлы трения при пуске и останове некоторое время работают в режиме граничной смазки.

О формировании граничных слоев на твердой поверхности уже говорилось в п. 1.1, и остается лишь напомнить, что основными механизмами их формирования являются адсорбция (физическая и химическая) и химические реакции, и добавить следующие подробности. Не все смазки способны образовывать эффективный граничный слой на поверхности трения. Например, чистые минеральные масла мало пригодны для этого. Поэтому в их состав добавляют небольшое количество активных органических веществ, которые значительно улучшают способность масла формировать граничный слой. Прочность сцепления граничного слоя с металлом определяется электронной структурой адсорбированных молекул. Так, полярные молекулы (т. е. молекулы с активными концевыми группами) и молекулы, способные химически взаимодействовать с металлической поверхностью, наиболее прочно связаны с ней. Адсорбированные молекулы располагаются перпендикулярно поверхности и образуют пленку, структура которой подобна ворсу ковра. Граничные слои могут быть образованы и из твердых смазок, например графита, методом на-тирания.

Граничные слои выполняют при трении несколько важных функций. В первую очередь они предотвращают непосредственный контакт неровностей и, экранируя поверхностные поля трущихся тел, значительно снижают их адгезию. В силу своего специфического строения они обладают анизотропией механических свойств и низкой сдвиговой прочностью в сочетании с большим сопротивлением нормальному сжатию. Нагрузочная способность граничной пленки может достигать нескольких ГПа.

Все это позволяет представить упрощенную картину трения при граничной смазке. Тонкая граничная пленка, покрывающая шероховатые поверхности, повторяет их рельеф. Поэтому они контактируют через смазку, но по отдельным пятнам. Малая толщина смазочного слоя не может препятствовать упругой и пластической деформации контактирующих тел, но, что самое главное, сдвиговые деформации локализуются внутри пленки, которая, как отмечалось выше, обладает малым сопротивлением на сдвиг, что и приводит к снижению трения. Еще Харди заметил, что коэффициент трения стекла по стеклу ( $f = 1$ ) снижается примерно до 0,1, если их трущиеся поверхности покрыть тонким слоем стеариновой кислоты.

Кроме того, при значительной пластической деформации и повышенной температуре смазочная пленка может разрушаться на участках контакта. В результате адгезия контактирующих тел возрастает, и сопротивление скольжению и износ увеличиваются. А то обстоятельство, что граничная пленка не в состоянии предотвратить деформацию трущихся тел, делает неизбежным их износ. Неудачно же подобранная смазка может вызвать даже коррозию металлов.

## 2.4. Развитие концепций микро- и нанотрибологии

Трибология имеет статус междисциплинарной области знаний в силу своих специфических связей практически со всеми естественными науками. Так, зародившись в недрах механики и широко используя ее методы, результаты и подходы, трибология в свою очередь стимулирует интерес механиков к так называемым неклассическим задачам, поставленным с учетом дискретности реального контакта и/или поверхностных сил. Постановка таких задач все время совершенствуется в связи с имеющей место в трибологии тенденцией перехода к моделям, характерный масштаб которых микро- и даже нанометровый. Такой переход, с одной стороны, заставляет механиков подвергать ревизии физические основы своей науки, формулируя задачи на стыке с молекулярной и статистической физикой, а, с другой стороны, проливает свет на фундаментальные проблемы трибологии, такие как связь между адгезионными и деформационными механизмами трения. Условно обсуждаемая тенденция вместе с основными факторами, роль которых в процессах фрикционного взаимодействия, естественно, различна, может быть представлена в виде диаграммы, изображенной на рис. 2.12.

В этой связи следует отметить следующее. Механические свойства контактирующих материалов следует учитывать на любом масштабном уровне, но в зависимости от избранного уровня такие характеристики, как модуль Юнга и твердость, могут отличаться не только по величине, но и по физическому смыслу. Миниатюризация моделей фрикционного контакта требует перехода от объемных свойств материалов к их поверхностным свойствам, оцениваемым по данным атомно-силовой микроскопии, измерений адгезии, микро- и наноиндентирования. Но





Рис. 2.12 Факторы, влияющие на трение и изнашивание

основной проблемой остается физическая интерпретация экспериментальных данных при изменении масштаба измерения.

При этом следует иметь в виду, что при взаимном скольжении твердых тел механические свойства контактирующих материалов могут изменяться под действием тепла, генерируемого при трении. Хотя существуют многочисленные теории, позволяющие рассчитать объемную и поверхностную температуры и температуру вспышки, механизм генерирования тепла остается, по существу, не очень ясным. И здесь определенные перспективы можно связать с моделями нанотрибологии, описывающими процессы возникновения и разрушения молекулярных фрикционных связей.

Таким образом, выявление, классификация и детальное изучение структурных уровней деформации и разрушения при трении и построение на этой основе адекватных моделей элементарных фрикционных процессов с учетом новейших знаний в области физики, химии и механики поверхности могут быть отнесены к одному из основных направлений развития трибологии.

Учитывая важность узлов трения для промышленности, транспорта и других видов деятельности человека, следует отметить, что сохраняется острая необходимость в разработке триботехнических материалов, которые способны адаптироваться к изменению внешних условий и обладают заданными структурой и свойствами. При этом важная роль отводится применению упрочняющих технологий, основанных на новейших физических принципах, а также различных покрытий. Существует необходимость в расширении областей применения технической диагностики и мониторинга узлов трения машин. Остается актуальным создание методов испытаний на трение и износ, развитой сети банков данных испытаний, а также системы передачи этих данных для использования в производственных и учебных целях.

Как отмечалось неоднократно ранее, контакт твердых тел и трение реализуются на микроскопически малых участках реальных площадей контакта. Однако до недавнего времени практическая трибология имела дело с макроскопическими узлами трения, описанными выше. Начиная с 70-х гг. XX в. трибологи столкнулись с проблемами трения и износа на микроуровне. Это произошло в результате бурного развития компьютерной техники, потребовавшей создания устройств записи, хранения и обработки информации на магнитных носителях памяти. Хорошей иллюстрацией условий функционирования такого устройства может служить рис. 2.13. Аналогией головки, считывающей информацию с поверхностного слоя диска накопителя современного компьютера, по Бушану мог бы служить авиалайнер, летящий на высоте 0,2 мм со скоростью 900 км/ч.

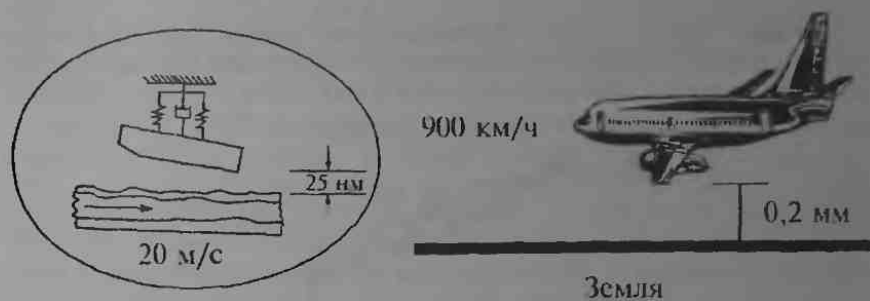


Рис. 2.13. Головка магнитного накопителя памяти, летящая над поверхностью диска, в сравнении с самолетом, летящим над Землей

Развитие техники затронуло много других областей, где контроль трения и износа в микро- и наномасштабе стал необходимостью. Это, прежде всего, прецизионные поверхности в робототехнике, медицинских приборах микрохирургии, сверхточные системы механических и электромеханических гироскопов, устройств сервомеханики и микроперемещений. Новая область трибологии, определяемая сейчас как микро- и нанотрибология, стала основой разработки нового класса приборов — *микророзлектромеханических систем (МЭМС)* и новой области микросистемных технологий. Не следует думать, что в обычной технике мы еще не пользуемся микросистемами. Один из примеров МЭМС — датчик, вызывающий при резких ударных ускорениях срабатывание подушек безопасности в автомобилях — это широко применяемое устройство. Микросистема определяется как миниатюрный прибор, сочетающий функции датчика, преобразователя сигнала и исполнительного механизма. При помощи технологии изготовления электронных микросхем можно реализовать микросистемы в масштабах тонкопленочных кремниевых изделий толщиной в несколько мик-

рометров и длиной в десятки микрометров. Примером такой системы может служить узел микропривода, показанный на рис. 2.14.



Рис. 2.14. Электронная микрофотография узла микропривода из кремния диаметром 50 мкм

Трение, смазка и износ в микросистемах реализуются на очень гладких площадках контакта, сравнимых с размерами систем, и поэтому роль адгезии и поверхностных сил в них очень велика. Требуются принципиально новые технические решения проблем трибологии — так, например, для снижения трения в системах магнитной записи используются мономолекулярные слои смазочных материалов — фторированных углеводородов. Поскольку электронные технологии получения МЭМС основаны на использовании таких материалов, как кремний, механические и трибологические характеристики которого очень низки, требуется применение специальных сверхтонких покрытий или методов модификации поверхностного слоя — ионная имплантация и т. д. В последние годы удалось изготовить МЭМС из таких материалов, как металлические сплавы и полимеры, путем сочетания электронных и гальванических технологий и при получении прототипов изделий, с последующим копированием прототипа методами литья под давлением. Примером использования такого подхода может служить планетарный редуктор с металлическими шестернями, представленный на рис. 2.15.

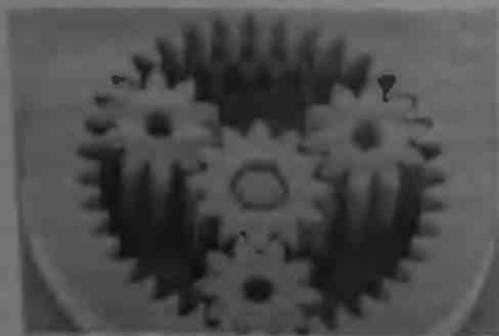


Рис. 2.15. Планетарный редуктор с миниатюрными шестернями из металла. Диаметр редуктора около 1,5 мм

Микро- и нанотрибология — это новый многообещающий раздел науки, который будет продолжать бурно развиваться в XXI веке. Это развитие базируется на таких достижениях науки, как создание сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов, прогресс электронных технологий, синтез новых материалов. Оно невозможно без использования достижений традиционной трибологии — механики контакта, теории адгезии, теории граничной смазки.

Проблема изнашивания сохранила свою актуальность при развитии техники нынешнего века — лишь масштаб процессов сместился в микро- и нанометровый диапазоны. Появление механических систем, изготовленных методами нанотехнологий, подобно микросхемам в электронике, вызвало необходимость анализа процессов изнашивания на нанометровом уровне. Попытка оценить процесс изнашивания на микроуровне была реализована с помощью атомно-силового микроскопа, в котором игла с радиусом около ста нанометров, изготовленная из алмаза, царапала поверхность кремния под нагрузкой в 0,0005 ньютона. На рис. 2.16 представлен график роста глубины

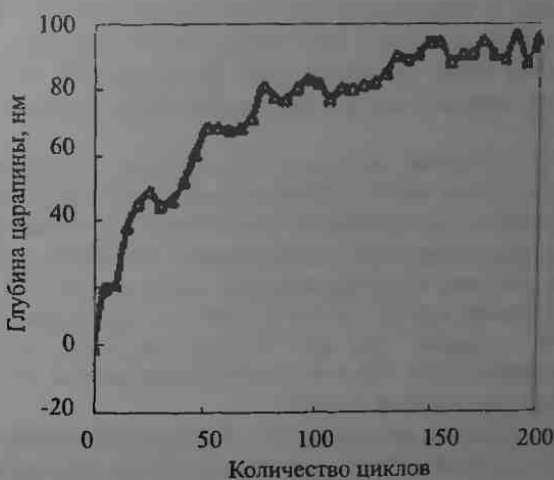


Рис. 2.16. Зависимость глубины царапины от количества проходов иглы по исследуемой поверхности

царапины в зависимости от числа проходов иглы по поверхности. Если сравнить этот график с рис. 2.6, то он очень похож на традиционную кривую обычного изнашивания на стадии приработки и нормального изнашивания за исключением флуктуаций, легко объяснимых ролью микрочастиц износа, отклоняющих иглу АСМ.

Таким образом, опыт показывает, что и в нанометровом масштабе изнашивание должно следовать общим закономерностям, характерным

для макросистем, однако роль поверхностных сил и адгезии поверхностей намого более значительна.

Человечество за тысячи лет изобрело множество способов борьбы с изнашиванием. Один из основных — применение различных смазок со времен Древнего Египта. Другой — упрочнение трущихся поверхностей — возможно, древние римляне первыми догадались подбивать подметки гвоздями с крупными шляпками, защищающими обувь от истирания.

Огромное количество методов повышения износостойкости основывается на технологиях обработки поверхности материалов — это и нанесение микрорельефа с помощью лазера, имплантация ионов таких элементов, как азот, в поверхностный слой, и, конечно же, нанесение различного рода покрытий. Современные износостойкие покрытия — это пленки толщиной от десятков нанометров до нескольких микрометров, твердость которых приближается к твердости алмаза, а коэффициент трения всего около одной сотой.

Перспективные износостойкие материалы содержат такие компоненты, как фуллерены и нанотрубки; активные разработки ведутся в области керамики с нанометровыми размерами зерен и материалов с ультрадисперсными алмазами для режущего инструмента. Материаловедам и конструкторам предстоит еще много работы как в борьбе с нежелательным износом, так и в ускорении нужного износа в обработке материалов.

На рис. 2.12 приведены механизмы разрушения материала при трении и приведена схема взаимодействия различных факторов, действующих в зависимости от масштаба рассмотрения процесса. Если проанализировать известные виды изнашивания, то можно заключить, что все они также связаны с составляющими силы трения. При этом устойчивое изнашивание определяется в основном деформацией материала при трении, в то время как адгезионное изнашивание обусловлено действием поверхностных сил в процессах разрушения материала и его переноса между трущимися телами.

Существует большое разнообразие видов изнашивания, но их более или менее удовлетворительная классификация до сих пор отсутствует. Кроме того, трение всегда происходит в определенной среде, которая оказывает влияние на тела в контакте путем химических реакций. Эти реакции изменяют скорость деформирования материала и влияют на интенсивность поверхностных взаимодействий.

### Список литературы

1. Азатов А. С. Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз, 1963.
2. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение полимеров. — М.: Наука, 1972.

3. Бюден Ф. П., Теибор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968.
4. Дерягин Б. В. Что такое трение. — М.: Изд-во АН СССР, 1952.
5. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. — Киев: Техника, 1970.
6. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1982.
7. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.
8. Матвеевский Р. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. — М.: Наука, 1971.
9. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС, 2002.
10. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Центр «Наука и техника», 1995; 2-е изд. — М.: Машиностроение, 2001.
11. Dowson D. History of Tribology. — London: Longman Group Limited, 1979.
12. Handbook of Nanotechnology / Ed. B. Bhushan. — Berlin: Springer-Verlag, 2004.

## Глава 3

# МЕХАНИКА И ФИЗИКА КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

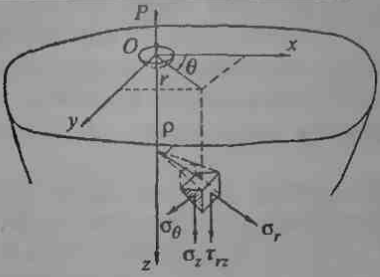
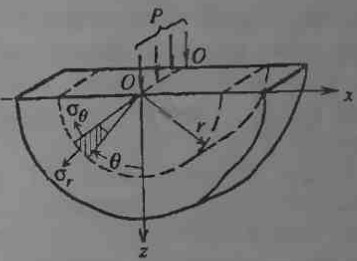
Трение — это процесс, происходящий при контактировании твердых тел. Поэтому построить адекватную модель трения или рассчитать трущееся сопряжение можно лишь на основе изучения напряженно-деформированного состояния зоны контакта, опираясь на решения контактных задач механики твердого деформированного тела. Специфика фрикционного контакта такова, что при его анализе приходится иметь дело с большой группой факторов, среди которых дискретность контакта, разнообразие типов деформирования неровностей даже в пределах одной области контакта, неоднородность свойств материалов по поверхности и глубине, изменение этих свойств в процессе трения, в частности: под влиянием фрикционного нагрева, и многие другие. Современная механика твердого тела пытается учесть перечисленные факторы при постановке и решении контактных задач, но, как правило, по отдельности. Но даже такие решения контактных задач представляют для трибологов большой интерес, формируя тот базис, на котором строятся модели трения и изнашивания. В этой связи ниже дается сводка некоторых основных результатов механики контакта, которые находят свое приложение в трибологии. Более полная информация о контактных задачах содержится в монографиях Горячевой, Демкина, Джонсона и др.

### 3.1. Контакт гладких тел

**3.1.1. Упругий контакт.** Прежде чем приступить к рассмотрению контактных задач теории упругости, полезно проанализировать напряженно-деформированное состояние упругого полупространства, нагруженного нормальной сосредоточенной силой. Ниже приведены два варианта нагружения: нагрузка равномерно распределена вдоль прямой (плоская задача теории упругости) и нагрузка приложена в точке (осесимметричная задача). Постановка этих задач, основные обозначения и расчетные формулы представлены в табл. 3.1. Конечно, эти

задачи представляют собой некоторую абстракцию реальных условий нагружения, поскольку силы действуют на области нулевой площади. Тем не менее, их формальное решение, как будет показано ниже, позволяет не только получать вполне реалистические решения при переходе к распределенным нагрузкам, но и пригодны для анализа напряженно-деформированного состояния на некотором удалении от зоны приложения сосредоточенной нагрузки.

Т а б л и ц а 3.1. Сосредоточенная нагрузка полупространства

Точечный контакт Задача Буссинеска (1885)	Номер ф-лы	Линейный контакт Задача Фламана (1892)	Номер ф-лы
			
$w(r) = \frac{1-\nu}{2\pi G} \frac{P}{r}$ $= \frac{1-\nu^2}{\pi E} \frac{P}{r}$	(3.1a) (3.16)	$w(r) = 2 \frac{1-\nu^2}{\pi E} P \ln r + C$ $= 2 \frac{1-\nu^2}{\pi E} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{1+\nu}{\pi E} P$	(3.8a) (3.85)
$u(r) = -\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E} \frac{P}{r}$	(3.2)	$u(r) = -\frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{2E} P$	(3.9)
$\sigma_r = -\frac{P}{2\pi\rho^2} \left( \frac{(1-2\nu)\rho}{\rho+z} - \frac{3r^2 z}{\rho^3} \right)$	(3.3)	$\sigma_r = -\frac{2P \cos \theta}{\pi r}$	(3.10)
$\sigma_\theta = -\frac{(1-2\nu)P}{3\pi\rho^2} \left( \frac{\rho}{\rho+z} - \frac{z}{\rho} \right)$	(3.4)	$\sigma_\theta = 0$	(3.11)
$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi\rho^2} \frac{z^3}{\rho^3}$	(3.5)	$\sigma_z = -\frac{2P \cos^3 \theta}{\pi r}$	(3.12)
$\tau_{rz} = -\frac{3P}{2\pi\rho^2} \frac{rz^2}{\rho^3}$	(3.6)	$\tau_{rz} = 0$	(3.13)
$\tau_{r\theta} = \tau_{z\theta} = 0$	(3.7)		



**Задача Буссинеска** (табл. 3.1, левый столбец). Видно, что нормальные перемещения  $w(r)$  границы полупространства (3.1a), (3.1б) имеют особенность в начале координат (бесконечно большие перемещения), что обусловлено бесконечными напряжениями в этой точке. Фактически вблизи точки приложения нагрузки материал деформируется пластически, и для физически обоснованного анализа следует вырезать полусферической поверхностью часть материала вблизи этой особенности. При удалении от нее перемещения асимптотически приближаются к недеформированной поверхности полупространства. Радиальные перемещения  $u(r)$  (3.2) направлены к началу координат и убывают как  $1/r$ .

Все напряжения в полупространстве (3.3)–(3.7) изменяются как обратный квадрат расстояния от исследуемой точки до начала координат. На площадках, параллельных свободной поверхности, отношение нормальных  $\sigma_z$  и тангенциальных  $\tau_{rz}$  напряжений равно  $z/r$ , т.е. их результирующее напряжение  $(\sigma_z^2 + \tau_{rz}^2)^{1/2} = 3Pz^2/(2\pi r^4) = 3P/(2\pi d^2)$  (здесь  $d$  — диаметр сферы, касающийся поверхности полупространства в точке  $O$ ) проходит через начало координат и постоянно для точек сферы. Однако это результирующее напряжение не является главным.

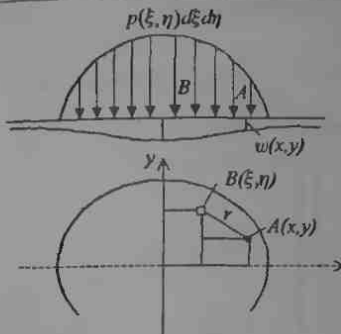
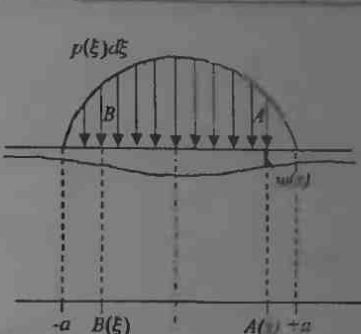
**Задача Фламана** (табл. 3.1, правый столбец). Как и в задаче Буссинеска, вертикальный прогиб  $w(r)$  деформированной поверхности (3.8a), (3.8б) имеет особенность в точке  $O$ . Другая характерная черта рассматриваемой формулы связана с наличием произвольной постоянной  $C$  (3.8a), являющейся следствием особенностей двумерной деформации упругого полупространства.

Горизонтальные перемещения  $u(r)$  границы полупространства (3.9) постоянны и направлены в сторону начала координат.

Поле напряжений (3.10)–(3.13) является чисто радиальным. Напряжение  $\sigma_r$  действует по направлению к точке  $O$  приложения нагрузки и остается постоянным вдоль любой окружности, проходящей через эту точку. Поскольку окружное напряжение  $\sigma_\theta$  равно нулю, то максимальное касательное напряжение  $\tau_{\max}$  равно  $\sigma_r/2$  и действует на площадках, наклоненных под углом  $45^\circ$  к радиальному направлению.

**Распределенная нагрузка на поверхности полупространства** (табл. 3.2). Принцип суперпозиции и результаты решения задач Буссинеска и Фламана позволяют оценить напряженно-деформированное состояние полупространства при его нагрузке, распределенной по некоторой области граничной плоскости. Область нагружения разбивается на такие элементарные участки, что приходящаяся на них нагрузка  $pds$  может рассматриваться как сосредоточенная сила. Тогда, например, нормальное перемещение  $dw$  произвольной точки  $A$ , вызванное элементарной нагрузкой  $pds$ , действующей в точке  $B$ , определяется соотношением Буссинеска (3.14б) или Фламана (3.15a). Суммирование этих элементарных перемещений по всей сфере давлений дает искомое интегральное соотношение

Т а б л и ц а 3.2. Распределенная нагрузка полупространства

Пространственная задача	Номер ф-лы	Плоская задача	Номер ф-лы
			
$ AB  = r = ((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)^{1/2}$ $dw = \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{ AB } \quad (3.14a)$ $w(x, y) = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \times$ $\times \int_S \int \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)^{1/2}} \quad (3.14b)$		$ AB  =  x - \xi $ $dw = 2 \frac{(1 - \nu^2)}{\pi E} p(\xi) d\xi \ln \frac{ AB }{r_0} \quad (3.15a)$ $w = \frac{2(1 - \nu^2)}{\pi E} \int_{-a}^a p(\xi) \ln  x - \xi  d\xi -$ $- \frac{2(1 - \nu^2)}{\pi E} P \ln r_0 \quad (3.15b)$	

между нормальным перемещением  $w$  и давлением  $p$  (3.146)–(3.156). Аналогично получаются соотношения для напряжений.

В дальнейшем нам понадобится решение уравнения (3.146) для случая, когда требуется найти такое распределение давления, которое обеспечивает постоянное нормальное перемещение,  $w = \text{const}$ , всех точек нагруженной области. Такая ситуация имеет место при внедрении в упругое полупространство кругового цилиндрического штампа с плоским гладким основанием. Оказывается, одинаковая осадка всех точек круговой нагруженной области достигается, если давление имеет следующее распределение:

$$p(r) = \frac{P_{\min}}{(1 - r^2/a^2)^{1/2}}, \quad (3.16)$$

где  $P_{\min} = P/(2\pi a^2)$ . При этом постоянное нормальное перемещение штампа  $\delta$  в пределах области контакта связано с общей нагрузкой  $P$  соотношением

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{P}{2a}. \quad (3.17)$$

Распределение давления  $p(r)$  представлено на рис. 3.1, который показывает, что на контуре площадки контакта давление должно стать

бесконечно большим. В действительности же на контуре материала начинает деформироваться пластически, а поскольку эта деформация имеет локальный характер, то она не оказывает заметного влияния на распределение давления во внутренней области круга.

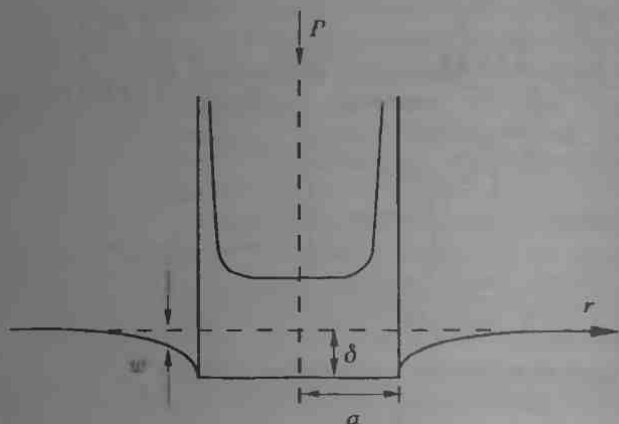


Рис. 3.1. Распределение давления под жестким круговым штампом

Теперь рассмотрим перемещения и напряжения полупространства от действия нормального герцевского давления, которое обычно развивается при контакте двух шаров и контакте двух цилиндров вдоль их образующих (табл. 3.3).

*Осесимметричная задача* (табл. 3.3). Эпюра давления представляет собой полуэллипсоид (3.18а), опирающийся на круг радиуса  $a$ . Максимальное давление связано с полной нагрузкой  $P$  и средним давлением  $p_0$  соотношениями (3.18б). Нормальное перемещение поверхностных точек полупространства при  $r \leq a$  определяется уравнением (3.19).

Если известно распределение давления на заданной области, то поле напряжений в любой точке полупространства сравнительно просто определяется методами теории упругости. Рассмотрим, как изменяются напряжения в некоторых характерных направлениях. Компоненты напряжений на поверхности  $z = 0$  (рис. 3.2, а) вычисляются по формулам (3.20)

Все они являются сжимающими в пределах области нагружения, но вблизи ее границы радиальные напряжения, характеризующие деформацию радиального волокна, становятся растягивающими, достигают своего наибольшего значения  $(1 - 2\nu)p_{\max}/3$  на границе области ( $r = a$ ) и затем, сохраняя свой положительный знак и будучи равными по абсолютной величине окружным напряжениям, они постепенно уменьшаются до нуля с увеличением  $r$ . Хотя наибольшее значение радиальных напряжений сравнительно невелико (примерно  $0,13p_{\max}$

Таблица 3.3 Напряженное состояние полупространства, нагруженного давлением Герца

Оссимметричная задача	№ формулы
$p(r) = p_{\max}(1 - r^2/a^2)^{1/2}$	(3.18a)
$p_{\max} = \frac{3P}{2\pi a^2} = \frac{3}{2} p_m$	(3.18b)
$w = \frac{(1 - \nu^2) \pi a}{E} p_{\max} \left(2 - \frac{r^2}{a^2}\right), r \leq a$	(3.19)
$ r  \leq a, z = 0,$	
$\frac{\sigma_r}{p_{\max}} = \frac{1 - 2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left(1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{3/2}\right) - \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2}$	(3.20a)
$\frac{\sigma_\theta}{p_{\max}} = -\frac{1 - 2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left(1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{3/2}\right) - \nu \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2}$	(3.20b)
$\frac{\sigma_z}{p_{\max}} = -\left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2}$	(3.20c)
$ r  > a, z = 0, \frac{\sigma_r}{p_{\max}} = \frac{\sigma_\theta}{p_{\max}} = \frac{1 - 2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2}$	(3.20d)
$\frac{\sigma_r}{p_{\max}} = \frac{\sigma_\theta}{p_{\max}} = -(1 + \nu) \left(1 - \frac{z}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{z}\right) + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{z^2}{a^2}\right)^{-1}$	(3.21a)
$\frac{\sigma_r}{p_{\max}} = -\left(1 + \frac{z^2}{a^2}\right)^{-1}, r = 0, z > 0$	(3.21b)
Плоская задача	№ формулы
$p(x) = p_{\max}(1 - x^2/a^2)^{1/2}$	(3.22a)
$p_{\max} = \frac{2P}{\pi a} = \frac{4}{\pi} p_m$	(3.22b)
$w = \frac{2(1 - \nu^2)}{\pi E} \int_{-a}^a (a^2 - x^2)^{1/2} \ln x - \xi  d\xi - \frac{2(1 - \nu^2)}{\pi E} P \ln r_0$	(3.23)
$r = 0, y = 0, \frac{\sigma_x}{p_{\max}} = -\frac{1 + 2z^2/a^2}{(1 + z^2/a^2)^{1/2}} + \frac{z}{a}$	(3.24a)
$\frac{\sigma_y}{p_{\max}} = -2\nu \left( \left(1 + \frac{z^2}{a^2}\right)^{1/2} - \frac{z}{a} \right)$	(3.24b)
$\frac{\sigma_z}{p_{\max}} = -\frac{1}{(1 + z^2/a^2)^{1/2}}$	(3.24c)
$z = 0, x = 0, \frac{\sigma_x}{p_{\max}} = \frac{\sigma_z}{p_{\max}} = -1$	(3.25a)
$\frac{\sigma_y}{p_{\max}} = -2\nu$	(3.25b)

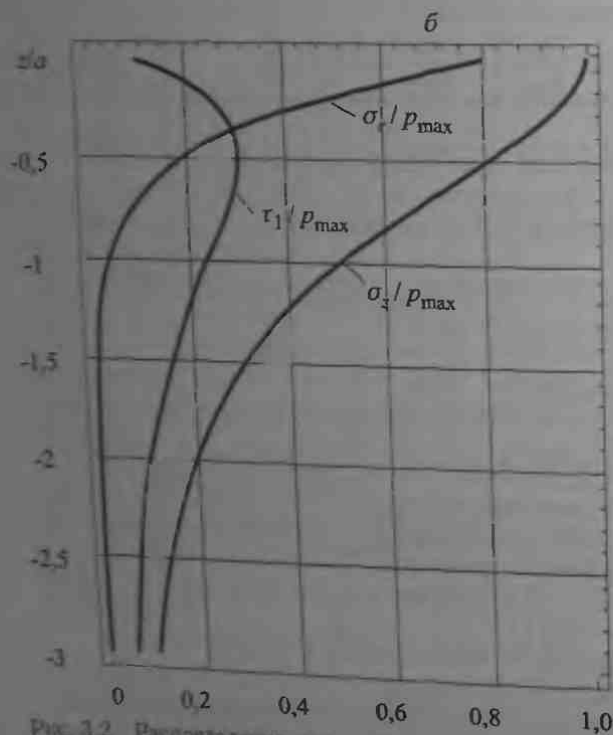
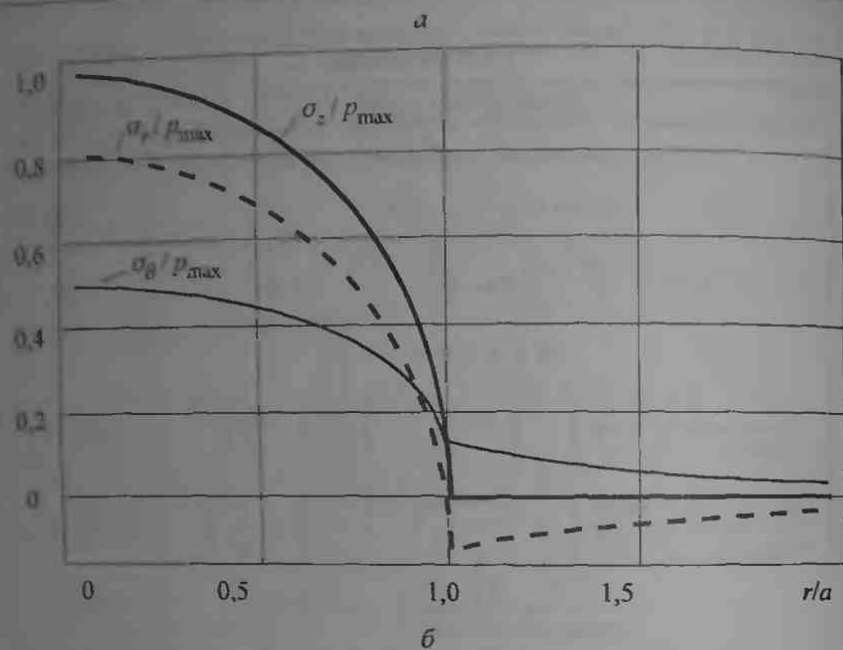


Рис. 12. Распределение относительных напряжений, вызванных герцевской нагрузкой, действующей на круговой области радиуса  $a$  на поверхности (а) и вдоль оси симметрии (б)

при  $\nu = 0,3$ ), но именно оно несет ответственность за образование кольцевых трещин при нагружении хрупких материалов. Рассматривая распределение нормальных напряжений (3.21) вдоль оси  $z$  (рис. 3.2, б) вглубь от поверхности нагружения, следует отметить, что все они убывают достаточно быстро. Таким образом, наиболее сжатым оказывается элемент поверхности в центре области нагружения, испытывающий напряжения  $\sigma_z = -p_{\max}$ ,  $\sigma_r = \sigma_\theta = -0,8p_{\max}$ . В силу симметрии напряженного состояния относительно оси  $z$  все нормальные напряжения на этой оси являются главными. Главные касательные напряжения определяются как модуль полуразности нормальных напряжений. Так,  $\tau_1 = |\sigma_z - \sigma_r|/2$  действует на площадках, наклоненных под углом  $45^\circ$  к оси  $z$ , и достигает своего максимума на некоторой глубине под поверхностью, которая, как и величина максимума, зависит от коэффициента Пуассона. При  $\nu = 0,3$  наибольшее значение  $\tau_1$  примерно равно  $0,31p_{\max}$  на глубине  $\approx 0,48a$ , в то время как на поверхности  $\tau_1(z=0, r=0) = 0,10p_{\max}$  и  $\tau_1(z=0, r=a) = 0,13p_{\max}$ . Из этого следует важный для трибологических приложений вывод о том, что пластическое течение материала должно начинаться, как правило, в подповерхностном слое нагруженного материала.

*Плоская задача* (табл. 3.3). Давление распределяется по бесконечно длинной полоске ширины  $2a$ , и его эпюра имеет вид полукругового цилиндра (3.22). Профиль деформированной поверхности описывается уравнением (3.23), содержащим постоянную, выбор которой достаточно произволен, что и объясняет большое число приближенных формул для расчета упругих деформаций в условиях плоской задачи.

Напряжения на оси  $z$  рассчитываются по формулам (3.24). Так как касательные напряжения на площадках, перпендикулярных оси  $z$ , отсутствуют, то приведенные нормальные напряжения являются главными, и максимальные касательные напряжения равны

$$\tau_1 = |\sigma_x - \sigma_z|/2 = p_{\max} \left( \frac{z}{a} - \frac{z^2/a^2}{(1+z^2/a^2)^{1/2}} \right)$$

и действуют на площадках, образующих угол  $45^\circ$  с осью  $z$ . Легко показать, что максимальное касательное напряжение  $\tau_{1\max}$  составляет  $0,304p_{\max}$  на глубине  $z = 0,786a$  (или  $z = a((\sqrt{5}-1)/2)^{1/2}$  для любителей точных, но зачастую малополезных соотношений). Изменение компонент напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau_1$  показано на рис. 3.3. На поверхности полупространства напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  совпадают по величине (формулы (3.25)) и достигают своего наибольшего значения.

*Задача Герца* (табл. 3.4). Впервые задача о контакте двух упругих тел была решена Генрихом Герцем в 1881 г. при следующих допущениях: (1) сопряженные поверхности однородные, изотропные, и их первоначальный контакт сосредоточенный, т. е. происходит в точке или по прямой линии; (2) деформации достаточно малы, чтобы можно было использовать линейную теорию упругости; (3) характерный размер об-

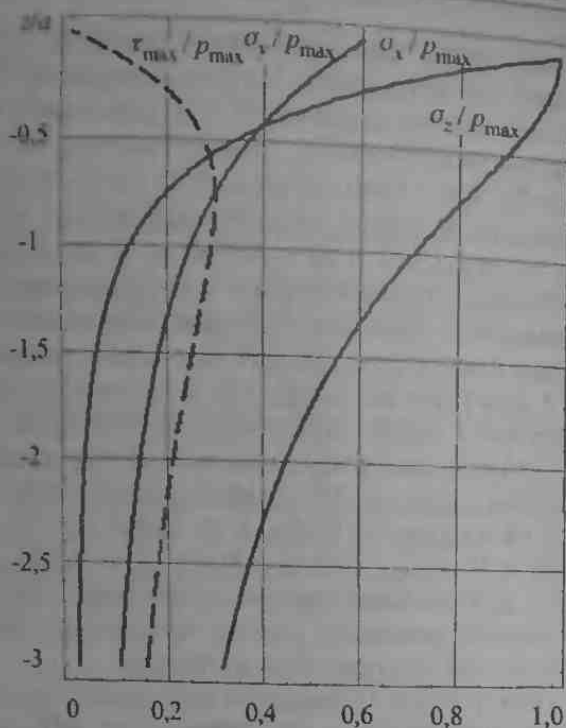


Рис. 3.3. Распределение относительных напряжений, вызванных герцевской нагрузкой, действующей по полоске шириной  $2a$  вдоль оси  $z$

ласти контакта мал по сравнению с размерами контактирующих тел, что позволяет при расчете локальных деформаций каждое тело рассматривать как упругое полупространство; (4) поверхности контактирующих тел гладкие, т. е. в зоне контакта действуют только нормальные давления (трение отсутствует).

Рассмотрим теперь, что происходит при контакте двух тел, скажем, для простоты, двух шаров с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 3.4). Первоначально они соприкасаются в точке  $O$ . Расстояние от плоскости их касания до точек  $A_1$  и  $A_2$ , находящихся на малом расстоянии  $r$  от оси  $z$ , можно представить в виде  $z_i = r^2/(2R_i)$  ( $i = 1, 2$ ), где  $r^2 = x^2 + y^2$ . Действительно, уравнение меридионального сечения шара  $(z - R)^2 + r^2 = R^2$ , откуда  $z = R - (R^2 - r^2)^{1/2} = R - R(1 - r^2/R^2)^{1/2}$ . Поскольку  $r \ll R$ , то  $(1 - r^2/R^2)^{1/2} \approx 1 - r^2/(2R^2)$ , и после элементарных преобразований получается искомая зависимость. Итак, до деформации тел, касающихся в точке  $O$ , расстояние между точками  $A_1$  и  $A_2$  равно

$$z_1 + z_2 = \frac{r^2}{2R_1} + \frac{r^2}{2R_2} = \frac{r^2}{2R}; \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

При приложении нормальной нагрузки  $P$  происходит деформация (сжатие) тел, при которой удаленные точки  $T_1$  и  $T_2$  смещаются по направлению к начальной точке касания  $O$  на расстояния  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответственно. Если бы тела могли без деформации беспрепятственно

Т а б л и ц а 3.4. Герцевский контакт сферических и цилиндрических тел

	Контакт шаров	№ ф-лы	Контакт цилиндров	№ ф-лы
Радиус (полуширина) контакта	$a = \left( \frac{3P^* R}{4E^*} \right)^{1/3}$	(3.26)	$a = \left( \frac{4PR}{\pi E^*} \right)^{1/2}$	(3.30)
Сближение	$\delta = \frac{\pi P_{\max} a^3}{2 E^*}$	(3.27a)	$\delta = \frac{2P}{\pi} \left( \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} \ln \frac{4R_1}{a} - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \ln \frac{4R_2}{a} - \frac{1}{2} \right) \right)$	(3.31)
	$= \frac{a^3}{R}$	(3.27б)		
	$= \left( \frac{9P^{*2}}{16RE^{*2}} \right)^{1/3}$	(3.27в)		
Максимальное контактное давление	$P_{\max} = \left( \frac{6P^* E^{*3}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}$	(3.28)	$P_{\max} = \left( \frac{PE^*}{\pi R} \right)^{1/2}$	(3.32)
Среднее контактное давление	$P_m = \frac{P^*}{\pi a^2}$	(3.29a)	$P_m = \frac{P}{2a}$	(3.33a)
	$= \frac{2}{3} P_{\max}$	(3.29б)	$= \frac{\pi}{4} P_{\max}$	(3.33б)

Примечания. 1. Эффективный модуль упругости  $E^*$  определяется по формуле

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

где  $E_1, \nu_1$  и  $E_2, \nu_2$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона контактирующих тел. 2. Эффективный радиус  $R$  рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2}$$

где  $R_1, R_2$  — радиусы контактирующих тел, знак плюс (+) берется при контакте выпуклых тел, а знак минус (-) при контакте шара (цилиндра) и соответствующей выгнуты — сферической (цилиндрической);  $P^*$  — нагрузка на единицу длины цилиндров.

проникать друг в друга, то их поверхности заняли бы положения, показанные пунктиром. Поскольку это не так, то происходит местное сжатие тел, в процессе которого плоскость касания в точке  $O$  остается неподвижной, а точки  $A_1$  и  $A_2$  смещаются параллельно оси  $z$  на  $w_1$  и  $w_2$ . Из геометрических соображений следует, что условием соприкосновения точек  $A_1$  и  $A_2$  является следующее равенство:

$$w_1 + w_2 = (\delta_1 + \delta_2) - (z_1 + z_2).$$

Пусть  $\delta = \delta_1 + \delta_2$  — сближение контактирующих тел, тогда последнее уравнение переписывается в виде

$$w_1 + w_2 = \delta - r^2/(2R). \quad (3.34)$$

В результате местной деформации формируется круговая площадка контакта, по которой распределяется общая нагрузка  $P$  с пока неиз-



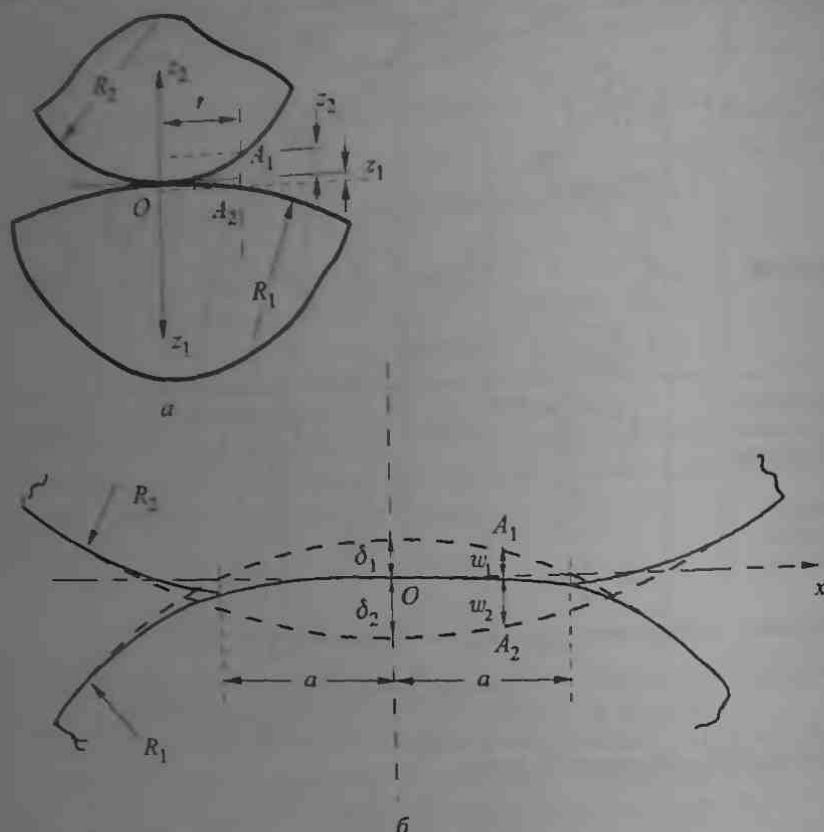


Рис. 3.4. Контакт двух шаров: а) первоначальное касание, б) после сжатия известной интенсивностью  $p(r)$ , связанные соотношением

$$P = 2\pi \int_0^a p(r)rdr. \quad (3.35)$$

Так как радиус контактного круга мал по сравнению с размерами шаров, то вблизи области контакта их можно рассматривать как полу-пространства и воспользоваться формулой (3.146). В итоге получаем следующее интегральное уравнение

$$\frac{1}{\pi} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \int_{-a}^a \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{((x-\xi)^2 + (y-\eta)^2)^{1/2}} = \delta - \frac{x^2}{2R} - \frac{y^2}{2R}.$$

Вводя обозначение

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2},$$

перепишем последнее уравнение в виде

$$\frac{1}{\pi} \frac{1}{E^*} \int_{-a}^a \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)^{1/2}} = \delta - \frac{x^2}{2R} - \frac{y^2}{2R}$$

Неизвестными в этом уравнении являются распределение контактного давления  $p(x, y)$ , радиус контакта  $a$  и сближение  $\delta$ . Герц фактически догадался, используя аналогию с электростатическим потенциалом, что контактное давление должно иметь сферическое (в общем случае эллипсоидальное) распределение:

$$p(x, y) = p_{\max} (1 - x^2/a^2 - y^2/a^2)^{1/2},$$

или в форме (3.18). Используя также соотношение (3.35) легко показать, что радиус контакта рассчитывается по формуле (3.26), а сближение — по (3.27).

Аналогичные рассуждения приводят к интегральному уравнению для расчета контакта двух цилиндров с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Его решение позволило установить, что контактное давление распределяется по полоске полушириной  $a$  в соответствии с соотношением (3.30). Что касается сближения цилиндров  $\delta$ , то относительно некоторого произведения в его определении, связанного с особенностями решения плоских задач теории упругости, уже говорилось выше. Одна из возможных формул для расчета сближения (3.31) приведена в табл. 3.4 (правый столбец), где также даны некоторые другие полезные соотношения.

**3.1.2. Пластический и упругопластический контакт.** Твердые тела проявляют свои упругие свойства до тех пор, пока возникающие в них напряжения и деформации не превосходят определенных предельных значений, достижение которых сопровождается переходом к пластическому деформированию, характерной чертой которого является появление остаточных деформаций (деформированный элемент полностью не восстанавливает свою форму). Условием такого перехода служит соотношение между напряжениями, устанавливаемое критерием текучести (пластичности). Для многих металлов хорошо выполняются два условия текучести, приблизительно эквивалентные друг другу:

Французский инженер Треска (1864), основываясь на своих опытах по выдавливанию металлов через отверстие, сделал вывод, что в состоянии текучести максимальное касательное напряжение имеет одно и то же значение во всех точках среды, равное пределу текучести при чистом сдвиге  $\tau_s$ , или половине предела текучести при простом растяжении (или сжатии)  $0,5\sigma_s$ . Аналитически этот критерий записывается в следующем виде:

$$\max \left[ \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_2|, \frac{1}{2} |\sigma_2 - \sigma_3|, \frac{1}{2} |\sigma_3 - \sigma_1| \right] = \tau_s = \frac{\sigma_s}{2},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения при сложном напряженном состоянии.

В 1913 г. Мизес предложил другой критерий, согласно которому текучесть наступает, когда второй инвариант девиатора напряжений  $J_2$  достигает некоторого критического значения для данного материала:

$$J_2 \equiv \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \tau_s^2 = \frac{1}{3} \sigma_s^2.$$

Различие между этими двумя критериями невелико, и их использование зависит лишь от степени упрощения выкладок при решении конкретной задачи.

Выше отмечалось, что при осесимметричной нагрузке полуупругости (в частности, при контакте двух шаров)  $\sigma_z, \sigma_r = \sigma_\theta$  являются главными вдоль оси симметрии и максимальное контактное напряжение, равное  $0,31 p_{\max}$ , достигается на этой же оси на глубине  $0,48a$  (при  $\nu = 0,3$ ). Тогда согласно критерию Треска,  $\tau_{1 \max} = 0,31 p_{\max} = \tau_s$ ; откуда  $p_{\max} = 3,2 \tau_s$ , и с учетом соотношения (3.28) находим нагрузку  $P_m$ , которая вызывает течение материала:

$$P_m = (3,2 \tau_s)^3 \frac{\pi^3 R^2}{6 E^*{}^2} = 169,3 \frac{R^2 \tau_s^3}{E^*{}^2}.$$

По критерию Мизеса  $(\sigma_z - \sigma_r)^2 = 3 \tau_s^2$  или  $\tau_{1 \max} = 0,31 p_{\max} = 3^{1/2} \tau_s/2$ . Отсюда

$$P_m = (2,8 \tau_s)^3 \frac{\pi^3 R^2}{6 E^*{}^2} = 113,4 \frac{R^2 \tau_s^3}{E^*{}^2}.$$

В случае контакта двух цилиндров максимальное контактное напряжение равно  $0,3 p_{\max}$  на глубине  $0,78a$ . Тогда  $p_{\max} = 3,3 \tau_s$  и, используя формулу (3.28), находим

$$P_m = (3,3 \tau_s)^2 \frac{\pi R}{E^*} = 10,9 \frac{\pi R \tau_s^2}{E^*}.$$

Для использования критерия Мизеса подставляем главные напряжения (3.24) в условие текучести и находим, что  $J_2$  принимает наибольшее значение, равное  $0,104 p_{\max}^2$  на глубине  $0,704a$  (при  $\nu = 0,3$ ). Тогда  $P_m = 3,1 \tau_s$ , и

$$P_m = (3,1 \tau_s)^2 \frac{\pi R}{E^*} = 9,6 \frac{\pi R \tau_s^2}{E^*}.$$

Из выражений для  $P_m$  видно, что увеличение эффективного радиуса кривизны и/или подбор такого материала, который сочетает высокий предел текучести с низким модулем упругости, способствуют тому, что контактная зона выдерживает большую нагрузку, не переходя в пластическое состояние.

Таким образом, пластическое течение зарождается в материале с меньшей твердостью (с меньшим пределом текучести) на некоторой

глубине под площадкой контакта при среднем контактном давлении близком к пределу текучести  $\sigma_T$ . Эта зона пластичности мала и окружена упруго деформированным материалом, так что порядок упругих и пластических деформаций одинаков. С ростом контактного давления пластическая зона занимает все больший объем. Имеет место так называемая стесненная упругопластическая стадия деформирования, которая завершается выходом пластической зоны на внешнюю поверхность. Начинается полностью пластическая (нестесненная) стадия деформирования, когда, как было показано Ишлинским, среднее давление под индентором достигает величины

$$p_m = c\sigma_T. \quad (3.36)$$

Как показали исследования, коэффициент  $c$  примерно равен 3,0 и зависит от геометрии индентора, а также трения на контактной поверхности.

Диапазон средних давлений от  $\sigma_T$  до  $3\sigma_T$  соответствует стадии стесненного упругопластического деформирования, которая сложна для анализа. Поэтому часто используется для анализа упрощенная модель с шаровым ядром (рис. 3.5), согласно которой поверхность контакта охватывается полусферическим «ядром» радиуса  $a$ . Предполагается,

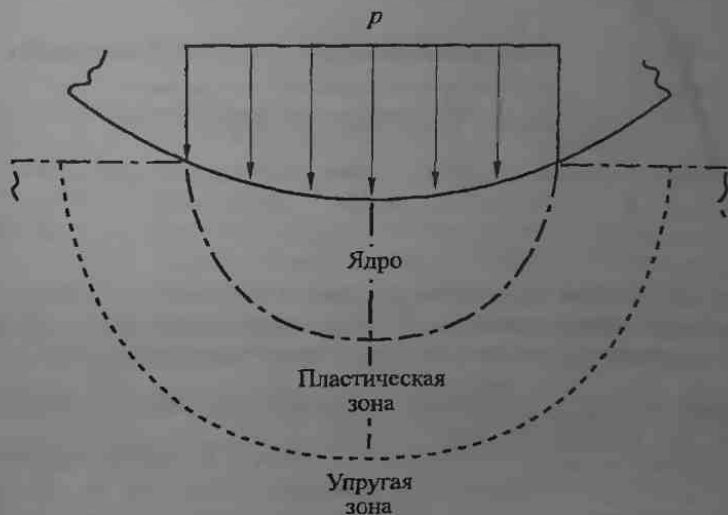


Рис. 3.5. Модель с шаровым ядром упругопластического внедрения

что внутри ядра имеет место гидростатическое напряженное состояние интенсивностью  $p_m$ . Анализ этой модели (Джонсон) показал, что для несжимаемого материала среднее давление определяется соотношением

$$\frac{p_m}{\sigma_T} \cong \frac{2}{3} \left( 1.7 + \ln \frac{1}{3} \frac{aE^*}{R\sigma_T} \right).$$

Безразмерная переменная под знаком логарифма интерпретируется как отношение деформации, вызванной индентором ( $a/R$ ), к упругой деформируемости материала ( $\sigma_y/E^*$ ). Выразим через эту переменную среднее давление (3.29) на герцевском контакте:

$$\frac{p_m}{\sigma_y} = \frac{4}{3\pi} \frac{aE^*}{R\sigma_y}$$

Учитывая, что для полной пластичности  $p_m/\sigma_y = c = \text{const}$  (3.36), можно построить единую зависимость среднего контактного давления от безразмерного параметра  $aE^*/(R\sigma_y)$  для условий чисто упругого, упругопластического и полностью пластического состояний (рис. 3.6). Видно, что состояние течения наступает при  $p_m \approx 1,1\sigma_y$ ,

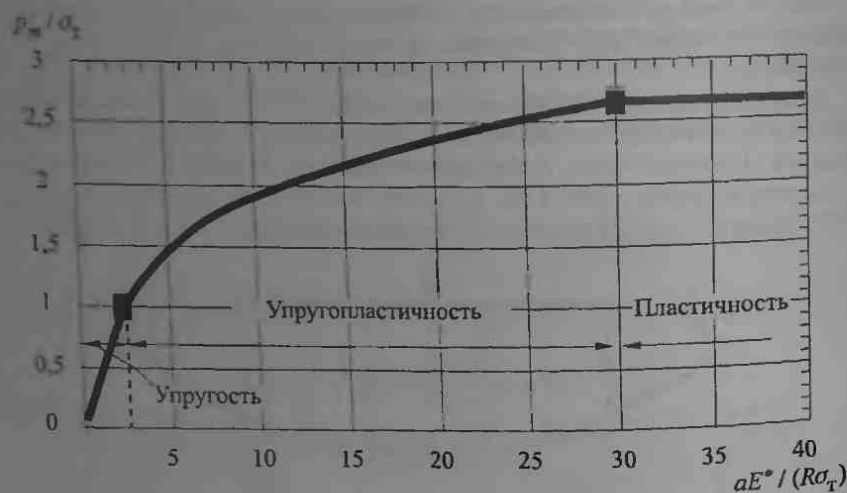


Рис. 3.6. Обобщенная зависимость среднего контактного давления  $p_m/\sigma_y$  от безразмерного радиуса контакта  $aE^*/(R\sigma_y)$  в условиях упругого, упругопластического и полностью пластического деформирования

а верхний предел для давления внедрения при полной пластичности, равный  $3\sigma_y$ , достигается при  $aE^*/(R\sigma_y) \approx 30$ .

Приведенные выше рассуждения относятся к упруго-идеально-пластическим телам с постоянным пределом текучести  $\sigma_y$  на сжатие. Однако реальные материалы, как правило, упрочняются в процессе деформирования. В этом случае часто используется эмпирический закон Майера для описания соотношения между нагрузкой  $P$ , приложенной к индентору, и диаметром отпечатка  $d$ :

$$P = gd^\theta,$$

где  $g$  и  $\theta$  — некоторые константы материала. Диаметр отпечатка связан с внедрением  $\delta$  приближенным соотношением  $d \approx (8r\delta)^{1/2}$ , где  $r$  —

радиус сферы, вдавливаемой в материал. Тогда твердость по Майеру, или среднее контактное давление, составляет  $p_m = 4P/\pi d^2 = 4gd^{\theta-2}/\pi$ . Выразим коэффициент  $g$  через максимальную твердость по Майеру  $H_{M \max}$ , которая соответствует внедрению шара до экватора, т.е. диаметру отпечатка, равному диаметру шара  $D$ :  $H_{M \max} = 4gD^{\theta-2}/\pi$ , откуда находим  $g$  и, подставляя в соотношение для  $p_m$ , получаем:

$$p_m = 2^{\theta/2-1} H_{M \max} r^{1-\theta/2} \delta^{\theta/2-1}.$$

Известно, что максимальная твердость по Майеру связана с твердостью по Бринеллю  $HB$  соотношением:

$$H_{M \max} = 2HB/k,$$

где  $k = \theta^{\theta/2}(\theta-2)^{(\theta-2)/2}(\theta-1)^{(1-\theta)}$ . Для предельно наклепанного материала, когда  $\theta \rightarrow 2$ ,  $k$  также стремится к 2, и  $H_{M \max} = HB$ .

Таким образом, для пластического контакта с упрочнением среднее контактное давление равно

$$p_m = A\delta^{\theta/2-1}, \quad (3.37a)$$

где  $A = 2^{\theta/2} HB r^{1-\theta/2}/k$ .

Контактная нагрузка связана с внедрением следующим соотношением:

$$P = \pi \cdot 2^{\theta/2+1} HB r^{2-\theta/2} \delta^{\theta/2}/k. \quad (3.37b)$$

### 3.2. Упругий контакт с адгезией

Теория Герца, изложенная выше, успешно описывает сжатие двух тел, но неявно предполагает, что при их разделении сформированный контакт не может противостоять растягивающим нормальным усилиям, т.е. отсутствует сопротивление отрыву. Однако с физической точки зрения это не совсем так. Между атомами и молекулами двух сближающихся поверхностей действуют силы притяжения и отталкивания, которые уравнивают друг друга на некотором равновесном расстоянии  $z_0$ . При расстоянии между поверхностями  $z < z_0$  они отталкиваются, а при  $z > z_0$  притягиваются. Часто такое взаимодействие поверхностей описывается уравнением Леннард-Джонса (рис. 3.7):

$$p(z) = \frac{A_H}{6\pi z_0^3} \left[ \left( \frac{z_0}{z} \right)^{12} - \left( \frac{z_0}{z} \right)^6 \right],$$

где  $A_H$  — постоянная Гамакера.

Первое слагаемое в квадратных скобках описывает притяжение взаимодействующих тел, а второе — их отталкивание. Энергия этого взаимодействия на единицу площади

$$\varphi(z) = \int_0^{\infty} p(z) dz = \frac{A_H}{12\pi z_0^2} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{z_0}{z} \right)^8 - \left( \frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$$

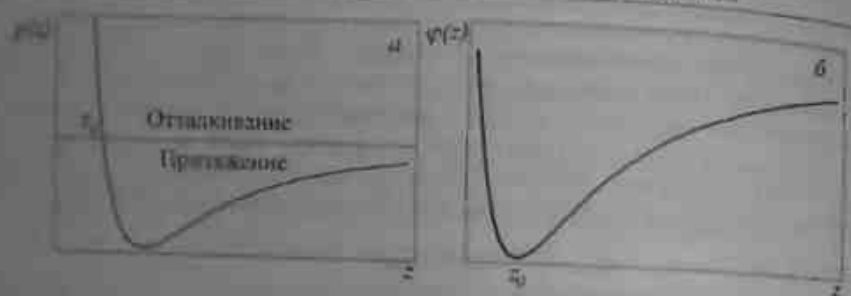


Рис. 3.7. Кривая Леннарда-Джонса (а) и зависимость энергии взаимодействия поверхностей от расстояния между ними (б)

достигает своего минимума при  $z = z_0$ :  $\varphi(z_0) = -A_H / (16\pi z_0^2)$  и определяется как удельная работа адгезии Дюпре  $\gamma$  (см. п. 1.1), т.е. как работа, которую надо затратить, чтобы полностью разделить две единичные поверхности. Закон Леннарда-Джонса теперь запишется в виде

$$p(z) = \frac{8\gamma}{3z_0} \left[ \left( \frac{z_0}{z} \right)^{13} - \left( \frac{z_0}{z} \right)^9 \right] \quad (3.38)$$

Приведенные формулы относятся, вообще говоря, к взаимодействию плоских поверхностей. Однако с их помощью можно оценить силу взаимодействия двух недеформируемых сфер с эквивалентным радиусом  $R = 1/(1/R_1 + 1/R_2)$  и зазором  $z = r^2/(2R)$ . Действительно, учитывая, что  $dz = -r dr/R$ , легко показать, что при точечном контакте искомая сила равна

$$F = \int_0^{\infty} 2\pi r p(z) dr = 2\pi R \int_0^{\infty} p(z) dz = 2\pi R \gamma \quad (3.38a)$$

Эта формула была выведена Брелли в 1932 г. Но если контактирующие тела деформируемы,  $z$  изменяют свою форму под нагрузкой, то описанный подход становится неправомерным, что побудило исследователей искать новые способы оценки роли поверхностных сил в адгезии деформируемых тел. Ниже кратко рассмотрены две основные модели адгезии твердых деформируемых тел.

**3.2.1. Модель Дерягина-Муллера-Топорова (ДМТ).** Впервые задача о законе упругих контактных деформаций на адгезию была поставлена и приближенно решена Дерягиным (1934). Дальнейшее развитие она получила в работах Дерягина, Муллера и Топорова, завершившихся созданием модели ДМТ, описывающей контакт упругой сферы с плоскостью. (1) Поверхностные силы не изменяют деформированный профиль сферы, и он остается герберовским, т.е. в дальнейшем при деформации все кривизны остаются постоянными.

заться от этой предпосылки и определять форму деформированного профиля в процессе решения интегрального уравнения Герца, содержащего также поверхностные силы; (2) силы притяжения действуют вне контактного круга, прижимая контактирующие тела друг к другу, при этом контактная область находится в условиях сжатия с распределением напряжений по Герцу (рис. 3.8). Равновесие достигается, когда деформация такова, что упругая реакция (сила упругого восстанов-

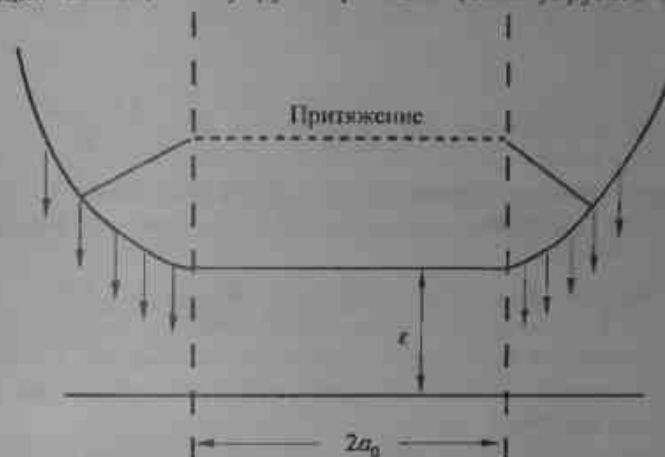


Рис. 3.8. Схема адгезионного контакта

ления сферы)  $F_s$  уравновешивает совместное действие приложенной внешней нагрузки  $P$  и сил молекулярного притяжения  $F_s$ :

$$F_s = P + F_s$$

Пусть силы притяжения следуют соотношению Леннарда-Джонса (3.38). Известно, что профиль деформированной сферы за пределами контактного круга описывается уравнением

$$z(r, a) = \frac{1}{\pi R} \left[ a (r^2 - a^2)^{1/2} - (2a^2 - r^2) \arctg(r^2/a^2 - 1)^{1/2} \right], \quad (3.39)$$

в котором следует добавить равновесное расстояние  $z_0$  (зазор в пределах площадки контакта). Тогда сила молекулярного притяжения рассчитывается прямым интегрированием:

$$F_s = 2\pi \int_a^{\infty} p(z + z_0) r dr,$$

где функция  $p$  и ее аргумент  $z$  задаются уравнениями (3.38) и (3.39) соответственно.

Вычисление этого интеграла сопряжено с определенными трудностями, но в литературе имеется ряд приближенных формул, облегчающих использование обсуждаемой модели. В частности, приведем простое соотношение Мажи между нагрузкой и сближением, полученное для условий модели ДМТ:

$$\frac{P}{P_c} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\delta}{\delta_c} \right)^{3/2} - \frac{4}{3},$$

129

$$P_c = \frac{3}{2} \pi \gamma R, \quad \delta_c = \left( \frac{P_c^2}{3K^2 R} \right)^{1/3}, \quad K = \frac{4(1-\nu^2)}{3E}.$$

Основные следствия, вытекающие из подхода ДМТ обсуждаются ниже (п. 3.2.3) при сравнительном анализе современных моделей адгезионного контакта.

**3.2.2. Модель Джонсона–Кендалла–Робертса (ДКР).** Модель ДКР (иногда ее называют моделью контактной механики) базируется на предположении о бесконечно малом радиусе действия поверхностных сил, т. е. считается, что взаимодействие происходит лишь в пределах площадки контакта.

Как и в предыдущем параграфе, рассмотрим контакт упругой сферы и жесткого полупространства. Если бы поверхностные силы отсутствовали, то формирование контакта происходило бы по Герцу, как показано на диаграмме «нагрузка  $P$  — сближение  $\delta$ » (рис. 3.9, ветвь

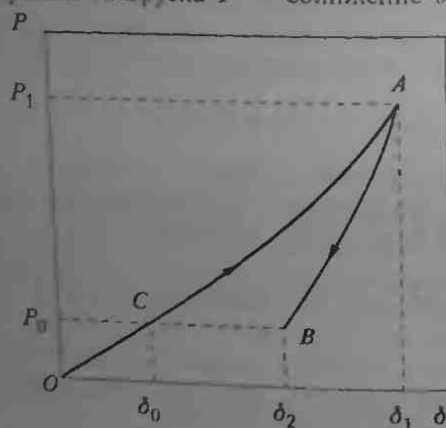


Рис. 3.9. Схема нагружения адгезионного контакта

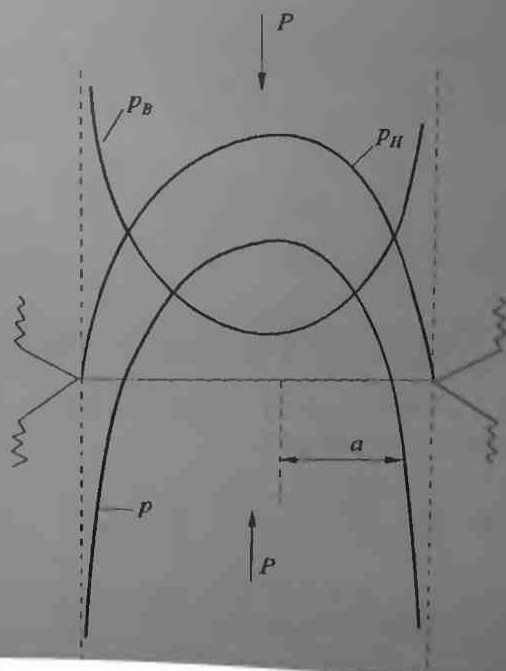
ОС). При нагрузке  $P_1$  точка  $C$  характеризует контакт с радиусом  $a_0$  и сближением  $\delta_0$  (см. формулы (3.30)–(3.31), табл. 3.4). Что произойдет, если «включаются» поверхностные силы? Следуя авторам модели, мысленно догрузим контакт, увеличив нагрузку на него до  $P_c$  (рис. 3.9,



точка  $A$ ), что приводит к увеличению контакта до  $a_1$  и сближения до  $\delta_1$ , и на этой стадии «включаются» поверхностные силы. Теперь при разгрузке контакта площадь контакта будет сохраняться неизменной за счет контактной адгезии, но сближение будет уменьшаться. Ключевым моментом в данной ситуации является то, что в силу неизменности круговой площадки контакта разгрузка происходит таким образом, как будто с полупространством взаимодействует своим круговым основанием радиуса  $a_1$  упругий цилиндрический штамп, задача Буссинеска (см. формулы (3.16)–(3.17) и рис. 3.1). Другими словами, разгрузка на величину  $P_1 - P_0$  идет по ветви  $AB$  (по Буссинеску), где состояние контактной системы в точке  $B$  определяется нагрузкой  $P_0$ , радиусом контакта  $a_1$  и сближением  $\delta_2$ . Контактная система в точке  $B$  будет находиться в равновесном состоянии при определенном сочетании приложенной  $P_0$  и кажущейся  $P_1$  нагрузок и поверхностной энергии  $\gamma$ , которое определяется далее из простых энергетических соображений.

Очевидно, что при такой интерпретации адгезионного контакта распределение контактных давлений есть сумма давлений по Герцу и Буссинеску (рис. 3.10):

$$p(r) = \frac{3P_1}{2\pi a_1^2} \left(1 - \frac{r^2}{a_1^2}\right)^{1/2} - \frac{P_1 - P_0}{2\pi a_1^2} \left(1 - \frac{r^2}{a_1^2}\right)^{-1/2} \quad (3.40)$$



Этот анализ показывает, что при разгрузке напряжения по Буссинеску являются растягивающими. Деформация  $w$  в точке  $B$  описывается соотношением (3.34), которое для данного случая записывается в следующем виде.

$$w = \delta_2 - \frac{r^2}{2R}.$$

Здесь сближение  $\delta_2$  определяется соотношением

$$\delta_2 = \delta_1 - \Delta\delta = \delta_1 - \frac{2(P_1 - P_0)}{3Ka_1},$$

где  $\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$  — эффективный контактный модуль.

Контактная система находится в равновесии, когда при фиксированном сближении ее общая энергия  $W_c$ , состоящая из энергии упругой деформации сферы  $W_e$  и энергии молекулярного взаимодействия в зоне контакта  $W_m$ , достигает минимума, т.е.  $dW_c/da_1|_{\delta=\text{const}} = 0$ . Известно, что энергия упругой деформации сферы определяется из соотношения

$$W_e = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} p(r)w(r) \cdot 2\pi r dr,$$

а энергия молекулярного взаимодействия равна  $W_m = -\pi a^2 \gamma$ . Подставляя  $p(r)$  и  $w(r)$  в соотношение для  $W_e$ , учитывая, что в рассматриваемом случае контактный радиус равен  $a_1$ , и проводя интегрирование, получаем

$$W_e = \frac{3}{4} K a_1 \left( \frac{a_1^2}{R} - \delta_2 \right) \left( \delta_2 - \frac{a_1^2}{3R} \right).$$

Общая энергия системы равна

$$W_c = W_e + W_m = \frac{3}{4} K a_1 \left( \frac{a_1^2}{R} - \delta_2 \right) \left( \delta_2 - \frac{a_1^2}{3R} \right) - \pi a_1^2 \gamma.$$

Тогда равновесие контактной системы устанавливается при следующем соотношении между ее параметрами:

$$\frac{dW_c}{da_1} = \frac{3}{4} K \left( \frac{a_1^2}{R} - \delta_2 \right)^2 - 2\pi a_1 \gamma = \frac{3}{4} K (\Delta\delta)^2 - 2\pi a_1 \gamma = 0.$$

Подставляя значение  $\Delta\delta$  из (3.2.2) в последнее выражение, получаем квадратное уравнение относительно  $P_1$ :

$$(P_1 - P_0)^2 = 6\pi P_1 R \gamma,$$

решение которого дает следующее выражение для кажущейся нагрузки:

$$P_1 = P_0 + 3\pi R\gamma + \sqrt{6\pi R P_0 \gamma + (3\pi R\gamma)^2} \quad (3.41)$$

Учитывая связь между нагрузкой  $P_1$  и радиусом контакта  $a_1$  (3.30), легко получить формулу для расчета радиуса адгезионного контакта (соответствующие индексы опущены):

$$a^3 = \frac{R}{K} \left[ P + 3\pi R\gamma + \sqrt{6\pi R P \gamma + (3\pi R\gamma)^2} \right] \quad (3.42)$$

Отсюда видно, что при отсутствии адгезии ( $\gamma = 0$ ) получается формула Герца (3.30), а если  $\gamma > 0$ , то площадь контакта всегда больше герцевской при одной и той же нормальной нагрузке  $P$ . Интересно также отметить, что при полном снятии нагрузки ( $P = 0$ ) контакт не исчезает, а остается конечным с радиусом

$$a = (6\pi R^2 \gamma / K)^{1/3}.$$

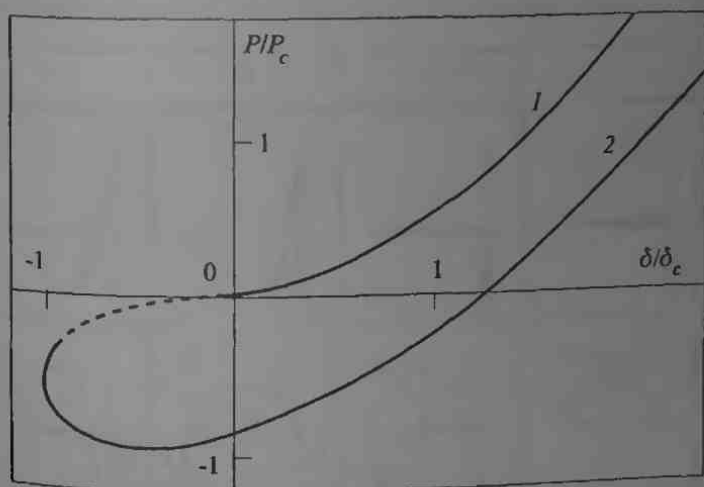


Рис. 3.11. Связь между нагрузкой и сближением сферы при ее контакте с плоской поверхностью: 1 — адгезия отсутствует (закон Герца); 2 — с учетом молекулярного сцепления в зоне контакта (модель ДКР)

Этот радиус можно уменьшить, лишь приложив растягивающую (отрицательную) нагрузку, и тогда разделение контактирующих поверхностей произойдет при наименьшей нагрузке, соответствующей обращению в нуль подкоренного выражения в (3.42):

$$P_{\text{отр}} = -\frac{3}{2}\pi R\gamma, \quad (3.42a)$$

и при ненулевой площадке контакта. Это обстоятельство является характерной чертой модели ДКР.

Часто полезным оказывается соотношение между нагрузкой и сближением, записанное в следующей безразмерной форме:

$$\bar{\delta} = \begin{cases} (3\sqrt{\bar{P}+1}-1) \left[ \frac{1}{9}(\sqrt{\bar{P}+1}+1) \right]^{1/3}, & \bar{\delta} \geq -3^{-2/3}; \\ -(3\sqrt{\bar{P}+1}+1) \left[ \frac{1}{9}(1-\sqrt{\bar{P}+1}) \right]^{1/3}, & -1 \leq \bar{\delta} \leq -3^{-2/3}. \end{cases} \quad (3.43)$$

где  $\bar{\delta} = \delta/\delta_c$ ,  $\bar{P} = P/P_c$ ,  $\delta_c = \frac{1}{3} \left( \frac{3RP_c}{K} \right)^{2/3}$ ;  $P_c = \frac{3}{2} \pi R\gamma$ .

График этой зависимости представлен на рис. 3.11.

### 3.2.3. Сравнительный анализ моделей адгезионного контакта.

Модели ДМТ и ДКР и их многочисленные модификации, в частности выше упомянутый самосогласованный подход, являющийся модификацией теории ДМТ, достаточно полно описывают контактное взаимодействие упругих тел с учетом адгезии. И это несмотря на то, что они различаются по исходным предпосылкам и некоторым результатам (рис. 3.12). Прежде всего, речь идет о роли молекулярного взаимо-

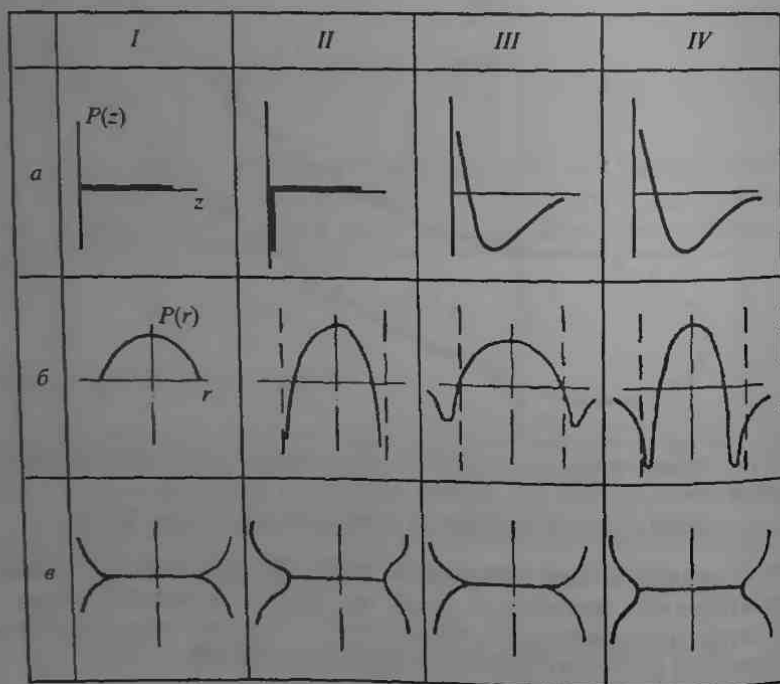


Рис. 3.12 Сравнение основных предпосылок и результатов теории деформирования упругих сфер (*I* — теория Герца; *II* — ДКР; *III* — ДМТ; *IV* — самосогласованный подход): *a*) характер изменения поверхностных сил; *b*) нормальные напряжения при сжимающей нагрузке; *в*) форма контактирующих сфер

действия в зоне контакта и вблизи нее. Если в теории ДМТ молекулярное взаимодействие моделируется потенциалом Леннарда-Джонса и распространяется на внеконтактную область, то в теории ДКР неявно постулируется абсолютно жесткое отталкивание и притяжение с бесконечно узкой потенциальной ямой, равной удельной поверхностной энергии  $\gamma$  (рис. 3.12, а). Кроме того, теории различаются эпюрами контактных нормальных напряжений: в модели ДМТ принимается герцевское распределение напряжений, тогда как модель ДКР базируется на комбинации распределений Герца и Буссинеска (рис. 3.12, б).

Здесь следует отметить, что самосогласованный подход позволяет отказаться от герцевской формы профиля контактирующих тел, поскольку он сводится к численному решению интегрального уравнения Герца (3.35), в котором учтен закон взаимодействия фаз. Это позволило найти профиль зазора и, как следствие, распределение контактных давлений, которое оказалось близким к принятому в модели ДКР.

Интересно отметить, что обсуждаемые модели прогнозируют разную форму профиля взаимодействующих сфер вблизи контакта (рис. 3.12, в). Если в модели ДМТ профиль плавно переходит в зону контакта (как и у Герца), то в модели ДКР наблюдается «шейка», т.е. касательная к профилю становится вертикальной при подходе к зоне контакта. При растяжении контактирующих тел (приложение отрицательной нагрузки) эта шейка удлиняется, и отрыв тел происходит скачком при не нулевом радиусе контакта (см. рис. 3.11). В модели же ДМТ радиус контакта при разгрузке плавно уменьшается до нуля, и отрыв происходит при точечном контакте. Сила отрыва следует уравнению Бредли (3.38а), тогда как в модели ДКР она на 25 % меньше (3.42а).

Перечисленные расхождения вызвали оживленную дискуссию в научной литературе, которая теперь представляет лишь исторический интерес. Этот научный спор был разрешен Тейбором в пользу, как это не парадоксально, обеих моделей. Тейбор предложил критерий

$$\mu_T = \left( \frac{R\gamma^2}{E^2 z_0^3} \right)^{1/3}$$

который можно трактовать как отношение упругой деформации (растяжение шейки) к радиусу действия сил адгезии. Этот критерий принимает значения от нуля до бесконечности. Анализ обеих моделей показал, что они «располагаются» на разных концах его диапазона. При больших значениях  $\mu$ , когда тела обладают малым модулем упругости, значительной поверхностной энергией и (или) большим радиусом кривизны, справедлива теория ДКР. При малых значениях критерия Тейбора  $\mu$  можно использовать модель ДМТ, в частности она применима к контакту металлических частиц микронных размеров. Пробел между этими теориями занимают их многочисленные модификации, обсуждение которых выходит за рамки краткого анализа.

### 3.3. Контакт шероховатых поверхностей

Реальные поверхности компонентов узлов трения шероховаты. Это обстоятельство имеет далеко идущие последствия для оценки их несущей способности и существенно меняет картину контактного взаимодействия по сравнению с описанной выше для гладких тел. При сближении шероховатых поверхностей под нагрузкой вначале соприкасаются, как правило, наиболее высокие неровности, подверженные действию больших локальных давлений, приводящих к значительному сжатию неровностей и вступлению в контакт новых неровностей, берущих на себя часть общей нагрузки. Процесс сближения завершается, когда в контакт вступает достаточное количество неровностей, чтобы нести приложенную нагрузку. Важным является то, что сформированный таким образом контакт, называемый фактическим, по своей площади значительно меньше (почти на два порядка), чем номинальный контакт. Однако его значение выходит за рамки интересов трибологии. Фактическая площадь контакта (ФПК) оказывается необходимой и в ряде других областей, например при оценке переходного электрического сопротивления и теплопроводности реальных сопряжений, в вопросах контактной прочности и коррозии и т. д. Однако оценить ФПК классическими методами механики твердого деформируемого тела не представляется возможным. Это побудило исследователей разрабатывать модельные представления о контакте шероховатых поверхностей. Общая схема проста и достаточно очевидна: каждая неровность на соприкасающихся поверхностях (точнее говоря, область, примыкающая к ее вершине) заменяется телом правильной геометрической формы, для которой известно решение соответствующей контактной задачи, и рассматриваются индивидуальные контакты пар неровностей. Затем эти контакты (их площадь, нагрузка или какой-либо другой параметр, связанный с пятном контакта) суммируются по всей номинальной площади контакта. При таком подходе теряется информация о взаимном влиянии неровностей при их совместном деформировании.

Для упрощения расчета ФПК конструктивным оказалось предложение Демкина ввести представление о шероховатой эквивалентной поверхности, которая как бы аккумулирует в себе шероховатость обеих соприкасающихся поверхностей и позволяет ограничиться рассмотрением контакта такой эквивалентной поверхности и идеально гладкой.

Ниже рассматриваются две наиболее распространенные модели контакта шероховатых поверхностей, идентичные в идейном плане и различающиеся лишь в деталях математического описания. При этом используется представление выступов в виде сферических сегментов одинакового радиуса. Тогда предшествующие два параграфа можно рассматривать как описание механического поведения отдельной неровности в условиях контактного нагружения. Однако следует

напомнить, что существуют и другие модельные представления отдельных выступов, например в виде стержня, клина, пирамиды, конуса и т.д., а их выбор определяется особенностями решаемой задачи.

**3.3.1. Модель Демкина.** Подход Демкина к моделированию контакта шероховатых поверхностей базируется на степенной аппроксимации относительной опорной кривой с использованием двух аппроксимирующих коэффициентов  $b$  и  $\nu_D$ , которым удалось придать определенный физический смысл:

$$\eta = b \varepsilon^{\nu_D} \quad (3.44)$$

Параметры  $b$  и  $\nu_D$  связаны с легко определяемыми параметрами шероховатости соотношениями

$$b = t_m \left( \frac{R_{\max}}{R_p} \right)^{\nu_D}, \quad \nu_D = 2t_m \frac{R_p}{R_{\max}} - 1.$$

Здесь  $t_m$  — относительная площадь сечения выступов на уровне средней линии. Для шероховатой эквивалентной поверхности предлагаются следующие соотношения:

$$b = kb_1 b_2 (R_{\max 1} + R_{\max 2}) \frac{\nu_{D1} + \nu_{D2}}{R_{\max 1}^{\nu_{D1}} R_{\max 2}^{\nu_{D2}}}, \quad \nu_D = \nu_{D1} + \nu_{D2},$$

где  $k = \frac{\Gamma(\nu_{D1} + 1)\Gamma(\nu_{D2} + 1)}{\Gamma(\nu_{D1} + \nu_{D2} + 1)}$ ,  $\Gamma(\cdot)$  — гамма-функция.

Итак, рассмотрим контакт шероховатой поверхности с идеально гладкой (рис. 3.13) и определим, как фактическая площадь контакта зависит от приложенной нагрузки.

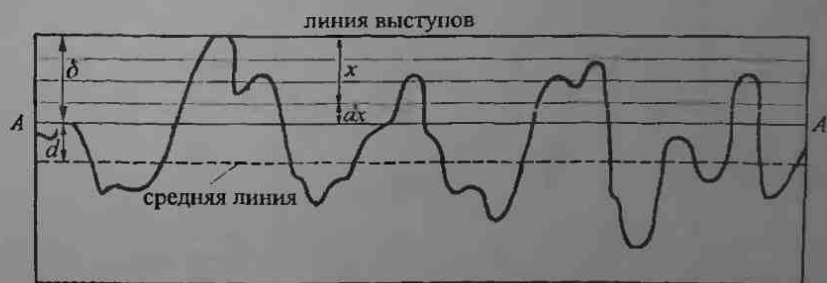


Рис. 3.13. Контакт шероховатой и гладкой поверхностей

Пусть  $\beta$  — радиус закругления единичной неровности, внедрение которой в гладкое полупространство описывается формулами, представленными в параграфе 3.1. Для удобства вновь выпишем эти формулы для упругого, пластического и пластического с упрочнением контактов (табл. 3.5).

Т а б л и ц а 3.5. Основные соотношения для единичного пятна контакта и фактической площади контакта

	Упругий контакт	Пластический контакт	Пластический с упрочнением контакта	№ Ф-лы
	(а)	(б)	(в)	
Площадь пятна контакта $\Delta A_i$	$\pi \delta_i$	$2\pi \beta \delta_i$	$2\pi \beta \delta_i$	(3.45)
Среднее давление $P_{\text{ср}}$	$\frac{4}{3\pi} E \beta^{-1/2} \delta_i^{1/2}$	$c\sigma_i$	$A\delta_i^{\theta/2-1}$	(3.46)
Нагрузка $P_i$	$\frac{4}{3} E \beta^{1/2} \delta_i^{3/2}$	$2\pi \beta c \sigma_i \delta_i$	$\delta_i^{\theta/2}$	(3.47)
Коэффициент $B$ при $P_{\text{ср}} \approx \varepsilon_i$ зависимости	$\frac{4}{3\pi} E \left( \frac{R_{\text{max}}}{\beta} \right)^{1/2}$	$c\sigma_i$	$\frac{2}{k} \text{HB} \left( \frac{R_{\text{max}}}{\beta} \right)^{\theta/2-1}$	(3.48)
Показатель степени $\omega$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{\theta}{2} - 1$	(3.49)
Фактическая площадь контакта	$\left( \frac{3\pi}{4K_3} \left( \frac{b}{2} \right)^{\frac{1}{2\nu}} \left( \frac{\beta}{R_{\text{max}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2\nu}{1+2\nu}} \left( \frac{P_c}{E} \right)^{\frac{2\nu}{1+2\nu}}$	$\frac{P_c}{\text{HB}}$	$\left( \frac{kb^{\frac{\theta-2}{2\nu}}}{2} \left( \frac{\beta}{R_{\text{max}}} \right)^{\frac{\theta-1}{2}} \right)^{\frac{2\nu}{1+2\nu}} \left( \frac{P_c}{\text{HB}} \right)^{\frac{2\nu}{1+2\nu}}$	(3.50)



Перейдем к безразмерному сближению  $\epsilon_1 = \delta_1/R_{\max}$  и запишем среднее давление на единичном пятне контакта в следующем общем виде:

$$p_{\text{ср}} = B\epsilon_1^\omega,$$

где коэффициент  $B$  и показатель степени  $\omega$  для упругого, упруго-пластического и пластического с упрочнением контактов, соответственно, даны в 4-й и 5-й строках табл. 3.5.

Тогда нагрузка, действующая на единичное пятно контакта, выразится через безразмерное сближение соотношением вида

$$P_1 = B_1\epsilon_1^{\omega+1}. \quad (3.51)$$

Здесь  $B_1 = 2\kappa_c\pi\beta R_{\max}$ , а коэффициент  $\kappa_c$ , показывающий какую часть сечения выступа на данном уровне занимает площадь контакта, принимает значение 0,5 для упругого контакта и 1 для пластического контакта (с упрочнением или без него).

Теперь сделаем оценку количества контактирующих неровностей  $n_r$  в зависимости от величины сближения  $\epsilon$ . Пусть  $n_r$  неровностей находятся в контакте и суммарная площадь сечений выступов  $A_p$  составляет согласно (3.44)  $A_p = A_c\eta = A_cb\epsilon^{\nu_d}$ . Бесконечно малое приращение сближения  $d\epsilon$  дает приращение  $A_p$  на величину

$$dA_p = A_cb\nu_d\epsilon^{\nu_d-1}d\epsilon. \quad (3.52)$$

Это приращение может произойти за счет увеличения сечения каждого пятна и/или за счет роста числа контактирующих пятен. Поскольку площадь сечения единичного выступа на уровне  $\epsilon$  равна  $\Delta A_p = 2\pi\beta R_{\max}\epsilon$ , то ее приращение при увеличении сближения на  $d\epsilon$  составит  $d(\Delta A_p) = 2\pi\beta R_{\max}d\epsilon$ , а  $n_r$  выступов обеспечивают общее приращение площади сечения на  $n_r d(\Delta A_p) = n_r 2\pi\beta R_{\max}d\epsilon$ ; с другой стороны, эта величина равна (3.52). Откуда находим, что

$$n_r = \frac{A_cb\nu}{2\pi\beta R_{\max}}\epsilon^{\nu-1}. \quad (3.53)$$

Вклад новых вершин, которые появляются в слое  $d\epsilon$ , в общую площадь сечения незначителен, так как их сближение не превышает  $d\epsilon \ll \epsilon$  (напомним,  $d\epsilon$  — бесконечно малая величина). Таким образом, соотношение (2.53) вполне пригодно для оценки числа неровностей, вступивших в контакт при сближении поверхностей на величину  $\epsilon$ .

Теперь определим общую нагрузку  $P$ , воспринимаемую всеми вступившими в контакт неровностями. Разобьем общее сближение  $\epsilon$  на  $n$  участков (слоев) толщиной  $\Delta\epsilon$  и представим, что поверхности сближаются, начиная от линии выступов, скачкообразно с малым шагом  $\Delta\epsilon$ . Если уже достигнут некоторый

уровень  $x$ ,  $0 \leq x \leq \varepsilon$ , то количество неровностей, которое вступает в контакт на очередном шаге  $\Delta x$ , определяется соотношением (3.53):

$$\Delta n_x = \frac{A_c b \nu_D (\nu_D - 1)}{2\sigma \beta R_{\max}} x^{\nu_D - 2} \Delta x. \quad (3.54)$$

После завершения сближения поверхностей эти неровности деформируются (сожмутся) на величину  $\varepsilon - x$ , и, согласно (3.51), каждая из них будет нести нагрузку  $B_1(\varepsilon - x)^{\nu+1}$ . Тогда нагрузка  $\Delta P_x$ , приходящаяся на все неровности этой группы, попавшие в слой  $\Delta x$ , составит

$$\Delta P_x = \kappa_c A_c b B \nu (\nu - 1) (\varepsilon - x)^{\nu+1} x^{\nu-2} \Delta x.$$

Полная нагрузка  $P$  есть сумма  $\Delta P_x$  по всем разбиениям  $\Delta x$  сближения  $\varepsilon$ :  $P = \sum \Delta P_x$ . Предполагая не без оснований, что при уменьшении интервала разбиения,  $\Delta x \rightarrow 0$ , возможен переход к интегралу, получаем

$$P = \kappa_c A_c b B \nu (\nu - 1) \int_0^{\varepsilon} (\varepsilon - x)^{\nu+1} x^{\nu-2} dx. \quad (3.55)$$

Интеграл в последнем выражении запишем в общем виде:

$$I(\varepsilon, \lambda, \nu_D) = \int_0^{\varepsilon} (\varepsilon - x)^{\lambda} x^{\nu_D - 2} dx.$$

После замены  $x = \varepsilon r$ , он приводится к виду

$$I(\varepsilon, \lambda, \nu_D) = \varepsilon^{\lambda + \nu_D - 1} \int_0^1 (1 - r_*)^{\lambda} r_*^{\nu_D - 2} dr_* = \varepsilon^{\lambda + \nu_D - 1} J(\lambda, \nu_D).$$

Интеграл  $J(\lambda, \nu_D)$  есть бета-функция Эйлера  $B(\nu_D - 1, \lambda + 1)$  (см. И. С. Градштейн и И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. Формула 8.380.1), которая выражается через гамма-функцию следующим образом (там же, формула 8.384.1):  $B(\nu - 1, \lambda + 1) = \Gamma(\nu_D - 1)\Gamma(\lambda + 1)/\Gamma(\nu_D + \lambda)$ . Учитывая свойство гамма-функции  $z\Gamma(z) = \Gamma(z + 1)$ , находим

$$J(\lambda, \nu_D) = \frac{\Gamma(\lambda + 1)\Gamma(\nu_D - 1)}{\Gamma(\lambda + \nu_D)}. \quad (3.56)$$

При подстановке выражения для  $J$  при  $\lambda = \omega + 1$  в формулу (3.55), окончательно получаем

$$P = \kappa_c A_c b B K_1 \varepsilon^{\omega + \nu_D}. \quad (3.57)$$

где

$$K_3 = \frac{\Gamma(2 + \omega)\Gamma(\nu + 1)}{\Gamma(\nu + \omega + 1)}$$

Отсюда определяем относительное сближение

$$\varepsilon = \left( \frac{p_c}{\kappa_c b B K_3} \right)^{\frac{2}{\nu + \omega}}$$

где  $P_c = P/A_c$ , и, подставляя его в формулу для ФПК, получаем

$$\eta = \kappa_c b \left( \frac{p_c}{\kappa_c b B K_3} \right)^{\frac{2}{\nu + \omega}} = \left( \frac{\kappa_c b}{B K_3} \right)^{\frac{\nu + \omega}{2}} p_c^{\frac{2}{\nu + \omega}} \quad (3.58)$$

Частные случаи этой формулы для рассматриваемых видов контакта с учетом соответствующих значений  $B$  и  $\omega$  представлены в табл. 3.5.

Модель Демкина позволяет рассчитывать почти все характеристики трибологического контакта, необходимые для решения трибологических задач. Кроме того, в рамках этой модели впервые удалось выявить многие особенности фактического контакта, например пропорциональность фактического контакта нагрузке, незначительное влияние нагрузки на фактическое давление и т. д., которые были подтверждены экспериментально.

**3.3.2. Модель Гринвуда–Вильямсона.** Одна из особенностей современного этапа развития механики трения связана с активным использованием методов теории вероятности для расчета контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. Последовательно и систематически такой подход реализован в модели Гринвуда–Вильямсона, которая стала исходной позицией для многочисленных работ в данном направлении. Справедливости ради следует упомянуть давнюю и, к сожалению, забытую статью В. А. Журавлева (ЖТФ. 1940. Т. 46, вып. 17), которая, по-видимому, была первой «вероятностной работой» в данной области.

Вновь вернемся к рис. 3.13. Исходные предпосылки, принятые для обсуждаемой модели, такие же, как и в модели Демкина. Считается, что известен закон распределения высот вершин неровностей  $\varphi(z)$ , например нормальный, как первоначально предполагали авторы модели. Функция распределения показывает вероятность нахождения высоты вершины  $z$  в диапазоне  $(z, z + dz)$ , или, другими словами, долю всех вершин  $N$ , находящихся на номинальной площади контакта, попадающих в указанный диапазон. Тогда число вершин, вступивших в контакт, т. е. таких, ординаты которых превышают номинальный зазор  $d$ , равно

$$n = N \int_d^{\infty} \varphi(z) dz.$$

Рассмотрим первоначально лишь упругий контакт неровностей (см. табл. 3.5). Используя соотношение для единичного пятна контакта (3.45а), имея в виду, что сближение  $\delta = z - d$ , и суммируя по всем контактирующим неровностям, находим, что среднее пятно контакта, приходящееся на одну «номинальную» неровность, имеет площадь

$$\bar{A}_1 = \int_d^{\infty} \pi \beta (z - d) \varphi(z) dz.$$

Тогда общая площадь фактического контакта будет равна

$$A_r = \pi \beta N \int_d^{\infty} (z - d) \varphi(z) dz.$$

Аналогично находится общая нагрузка с использованием формулы (3.47а):

$$P = \frac{4}{3} E \beta^{1/2} N \int_d^{\infty} (z - d)^{3/2} \varphi(z) dz.$$

Переходя к безразмерным величинам  $\zeta = z/\sigma$  и  $h = d/\sigma$  и используя поверхностную плотность неровностей  $D = N/A_n$  ( $A_n$  — номинальная площадь контакта), получаем

$$\eta = \frac{A_r}{A_n} = \pi \beta D \sigma \int_h^{\infty} (\zeta - h) \varphi^*(\zeta) d\zeta; \quad (3.59)$$

$$\bar{p} = \frac{P}{EA_n} = \frac{4}{3} \beta^{1/2} \sigma^{3/2} D \int_h^{\infty} (\zeta - h)^{3/2} \varphi^*(\zeta) d\zeta. \quad (3.60)$$

Здесь  $\varphi^*(\zeta)$  — нормированная плотность вероятности.

Интегралы, входящие в полученную систему уравнений, имеют одинаковую структуру и часто обозначаются следующим образом:

$$F_n(h) = \int_h^{\infty} (\zeta - h)^n \varphi^*(\zeta) d\zeta,$$

где показатель  $n$  может принимать не только значения 1 и 3/2, но и другие, например 0 при определении числа контактирующих неровностей или 1/2 при оценке электропроводности реального контакта. Таблицы этих интегралов для  $n = 0, 1/2, 1$  и 3/2 приведены в книге Свириденко с соавторами.

Используя обозначение  $\mu = \beta D \sigma$ , можно систему (3.59)–(3.60) записать в следующем компактном виде:

$$\eta = \pi \mu F_1(h) \eta, \quad (3.61)$$

$$\bar{p} = \frac{4}{3} \mu \left( \frac{\sigma}{\beta} \right)^{1/2} F_{3/2}(h). \quad (3.62)$$

Эта система дает зависимость ФПК от нагрузки в параметрической форме, причем общим параметром служит номинальный зазор  $h$ . Такое представление сопряжено с некоторыми трудностями анализа, которые вполне преодолимы при современном уровне вычислительной техники.

Анализ системы проводится для функции распределения Райса, которая, как отмечалось ранее, в предельных случаях переходит в распределения Релея и Гаусса. На рис. 3.14 представлена зависимость ФПК от нагрузки. Видно, что в отличие от упругого контакта глад-

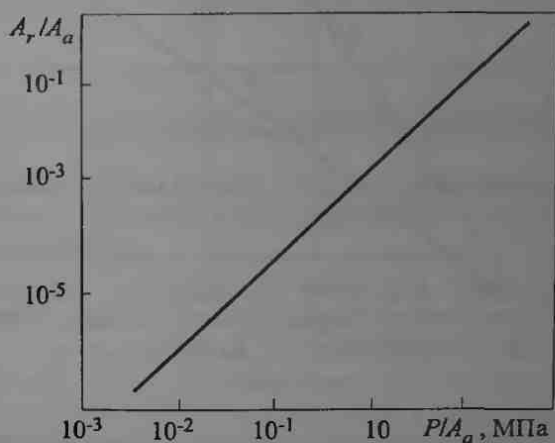


Рис. 3.14. Зависимость ФПК от нагрузки

ких тел, когда площадь контакта растет пропорционально нагрузке в степени  $2/3$ , реальный контакт прямо пропорционален нагрузке, что находится в соответствии с законом трения Амонтона–Кулона. Действительно, силы трения возникают на пятнах фактического контакта и вполне естественно считать, что полная сила трения пропорциональна их общей площади, т. е. ФПК.

Интересно отметить, что закон распределения неровностей практически не влияет на характер зависимости  $\eta \sim \bar{p}$  (рис. 3.15, а) при прочих равных условиях, но для достижения одного и того же сближения (номинального зазора) при релейевском распределении требуется гораздо более высокая нагрузка, чем при гауссовском. Параметры же шероховатости (в рамках одного распределения неровностей) существенно изменяют наклон зависимости  $\eta \sim \bar{p}$  (рис. 3.15, б)

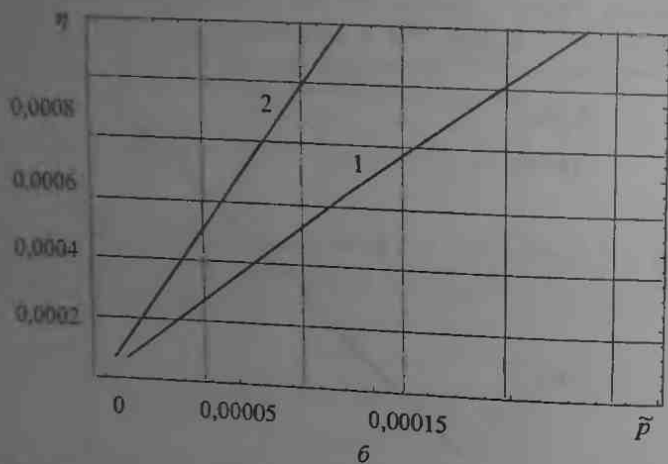
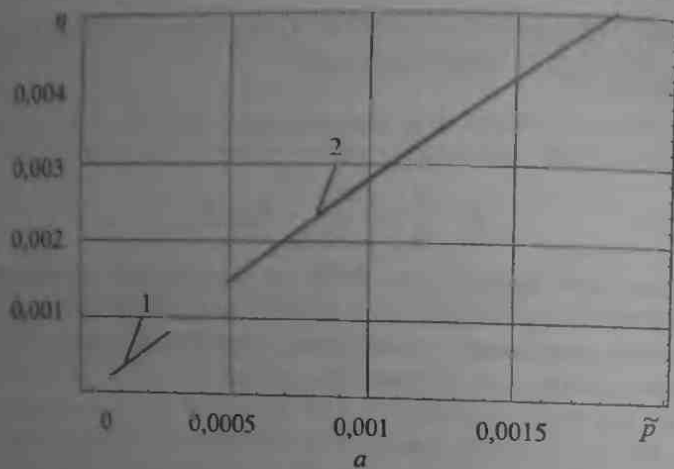


Рис. 3.13. Зависимость фактической площади контакта от безразмерной нагрузки: а) влияние характера распределения неровностей ( $\mu = 0,03$ ;  $\sigma/\beta = 0,12$ ;  $2 \leq A \leq 2,5$ ): 1 — распределение Гаусса, 2 — распределение Релея; б) влияние шероховатости: 1 —  $\sigma/\beta = 0,01$ ; 2 —  $\sigma/\beta = 0,04$

Другим следствием пропорциональности ФПК и контактного давления является постоянство среднего фактического давления  $P/A_r$ . Как показывает рис. 3.16, изменение номинальной нагрузки более чем на три порядка приводит к незначительному изменению фактического давления независимо от характера распределения высот неровностей. Это обстоятельство наводит на мысль, что величина  $H_y = 0,05E(\sigma/\beta)^{1/2}$  может рассматриваться как «уругая твердость» материала, по аналогии с твердостью пластических материалов, равной среднему давлению на контакте. Как и при пластическом контакте, ФПК при упругом деформировании неровностей определяется соотношением  $A_r = P/H_y$ .

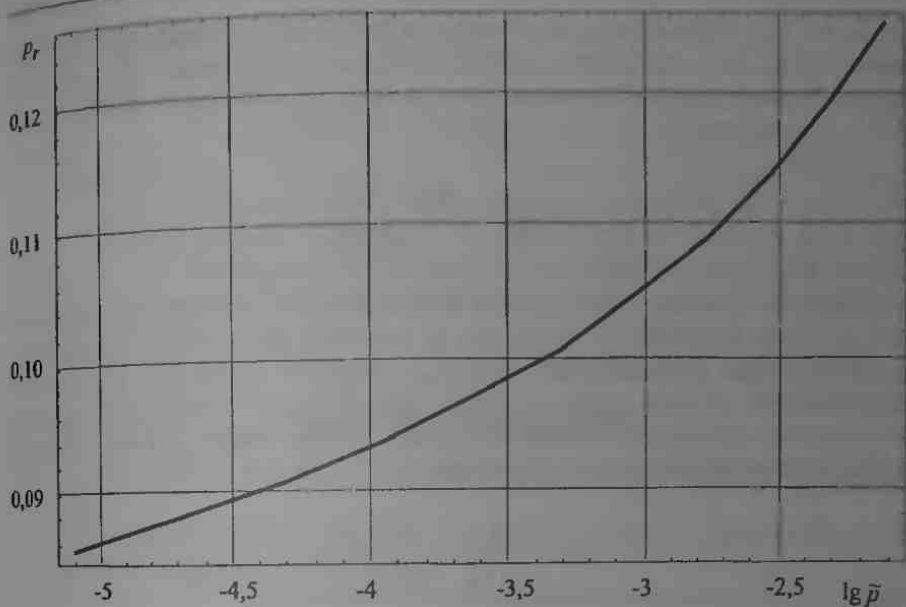


Рис. 3.16. Зависимость среднего контактного давления от нагрузки

Модель Гринвуда–Вильямсона и ее многочисленные модификации позволяют решать широкий класс инженерных задач по механике трения при контакте.

**3.3.3. Критерий перехода от упругого контакта к пластическому.** Наибольшее распространение получил критерий Вильямсона–Гринвуда, или так называемый индекс пластичности. Авторы критерия, рассматривая деформацию неровностей, полагают, что пластическое течение отдельной неровности начинается тогда, когда максимальное герцевское давление  $p_{\max}$  достигает  $0,6H$  ( $H$  — твердость наиболее мягкого из контактирующих материалов). Так как, согласно Герцу, при вдавливании шара в плоскость сближение  $\delta$  связано с максимальным давлением  $p_{\max}$  соотношением

$$\delta = \frac{\pi^2 p_{\max}^2 \beta}{4 E^2},$$

то, подставляя  $p_{\max} = 0,6H$ , находим критическое сближение  $\delta_p = 0,89\beta(H/E)^2$ . Это соотношение можно упростить, полагая численный коэффициент равным единице, что имеет определенный резон, поскольку учитывает поддерживающее влияние соседних упруго деформированных областей. В безразмерном виде критическое сближение записывается следующим образом:

$$\delta^* = \frac{\delta_p}{\sigma} = \frac{\beta}{\sigma} \left( \frac{H}{E} \right)^2.$$

Если  $h$  — безразмерный номинальный зазор контактирующих поверхностей, то неровности, высота которых превосходит  $h + \delta_p^*$ , будут деформироваться пластически и, согласно уравнению (3.59), доля ФПК, приходящаяся на эти неровности составит

$$\varepsilon = \frac{\tilde{A}_p}{\tilde{A}_r} = \frac{F_1(h + \delta_p^*)}{F_1(h)}$$

Обычно, считают, что пластическое течение начинается при  $\varepsilon = 0,02$ . При заданном  $\varepsilon$  последнее уравнение связывает сближение  $\delta_p^*$  и критический номинальный зазор  $h_{cr}$ , который позволяет рассчитать критическую номинальную нагрузку, при которой происходит переход от упругого контакта к пластическому. Удобно вместо сближения  $\delta_p^*$  использовать некоторую ее функцию

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{\delta_p^*}} = \frac{E}{H} \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}},$$

которая получила название *индекса пластичности*.

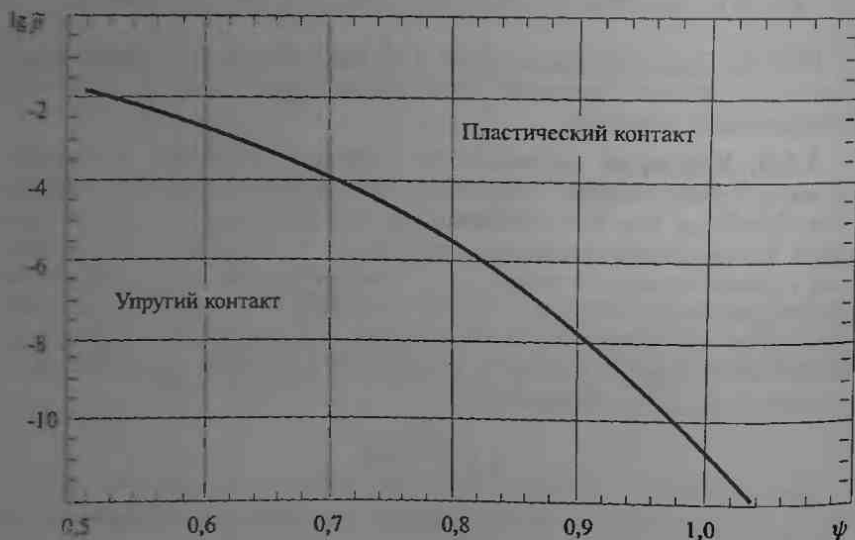


Рис. 3.17. Характер деформирования неровностей контактирующих шероховатых поверхностей в зависимости от безразмерной нагрузки  $\bar{p}$  и индекса пластичности  $\psi$

Анализ показывает, что при  $\psi < 0,6$  реализуется упругий контакт, а при  $\psi > 1,0$  — пластический контакт независимо от нагрузки, что является большим достоинством данного критерия. В промежутке меж-



ду этими крайними значениями уже нельзя пренебрегать нагрузкой. В этом случае следует воспользоваться графиком, представленным на рис. 3.17, где по оси ординат отложена безразмерная критическая нагрузка  $\tilde{p} = P/(L_r H)$ .

Для реальных поверхностей  $\psi$  изменяется, вообще говоря, от 0,1 до 100. Например, для стальных поверхностей ( $E = 210$  ГПа,  $H = 2,5$  ГПа) индекс пластичности изменяется от 0,35 до 33 в зависимости от вида обработки, причем наименьшие его значения достигаются при доводке, т. е. неровности только очень гладких поверхностей деформируются упруго.

### Список литературы

1. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука, 2001.
2. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Контактные задачи в трибологии. — М.: Машиностроение, 1988.
3. Демкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир, 1989.
5. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. — М.: Наука, 1987.
6. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ — М.: Машиностроение, 1977.
7. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
8. Свириденко А. И., Чижик С. А., Петроковец М. И. Механика дискретного фрикционного контакта. — Минск: Навука і тэхніка, 1990.
9. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975.
10. Greenwood J. A., Williamson J. B. R. Contact of nominally flat surfaces // Proc. Roy. Soc. 1966. V. A295. P. 300–319.
11. Johnson K. L., Kendall K., Roberts A. S. Surface energy and the contact of elastic solids // Proc. Roy. Soc. 1971. V. A324. P. 301–313.
12. Ling F. F. Surface mechanics. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1973.
13. Mauges D. Contact, adhesion and rupture of elastic bodies. — N. Y.: Springer, 2000.

## Глава 4

# МЕХАНИКА И ФИЗИКА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Внешнее трение (или просто трение) есть явление сопротивления перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения их поверхностей по касательным к ним (ГОСТ 27674-88). Различают *трение покоя* (трение двух контактирующих тел при микросмещениях без макросмещения) и *трение движения* (трение двух контактирующих тел, находящихся в движении друг относительно друга). В свою очередь трение движения подразделяется на трение скольжения и трение качения. *Трение скольжения* определяется как трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и/или направлению. Разновидностью трения скольжения является *трение верчения*, которое имеет место при вращательном движении одного из контактирующих тел. *Трение качения* — это трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по величине и направлению, по крайней мере, в одной точке зоны контакта. Кроме того, трение классифицируется по наличию смазки в зоне контакта. Если на поверхности трения отсутствует смазочный материал любого вида, то говорят о трении без смазочного материала. В противном случае, речь идет о трении со смазочным материалом, которое в свою очередь подразделяется на граничное трение и жидкостное трение. *Граничное трение* имеет место при наличии на трущихся поверхностях слоя жидкости со свойствами, отличающимися от объемных свойств (см. гл. 2). *Жидкостное трение* — это явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами, разделенными слоем жидкости, в котором проявляются ее объемные свойства (см. гл. 7). В настоящей главе рассматривается только трение без смазочного материала или, как раньше его называли, сухое трение.

## 4.1. Трение скольжения

Как показали многолетние и обширные исследования, существуют три фундаментальных понятия, на которых базируется описание механизма трения несмазанных поверхностей: фактическая площадь контакта; межповерхностные связи, образующиеся при формировании контакта; деформация материала внутри и вокруг зоны контакта при скольжении.

**4.1.1. Фактическая площадь контакта.** При сближении двух поверхностей 1 и 2, имеющиеся на них неровности с максимальной высотой, вступают в контакт (рис. 4.1). При возрастании нагрузки  $P$  новые пары неровностей с меньшей высотой могут вступать в контакт с образованием отдельных пятен, например  $\Delta A_{Ti}$ ,  $\Delta A_{Tj}$ .

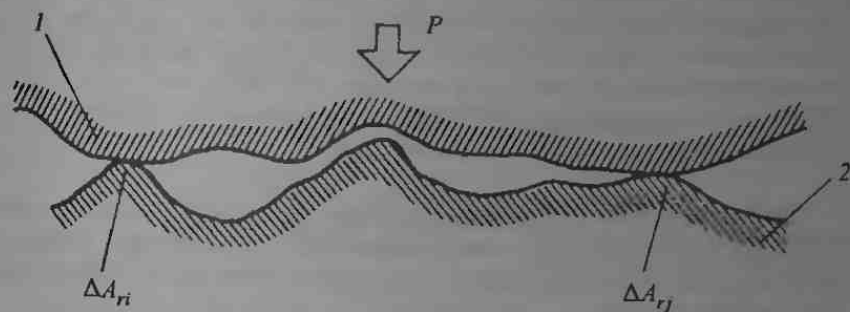


Рис. 4.1. Схема контакта шероховатых тел

Общую площадь этих пятен принято называть фактической площадью контакта (ФПК).

Аналитические методы определения ФПК, описанные в гл. 3, основаны на геометрических и механических характеристиках поверхностей. Следует помнить, что наличие на поверхностях пленок и микроскопические размеры неровностей приводят к изменениям механических свойств по сравнению с объемными свойствами материала, которые часто используются в расчетах. Кроме того, пластическое течение неровностей при скольжении возникает в условиях сложного напряженного состояния, что влияет на формирование и разрушение локальных пятен контакта. Кроме того, ФПК обычно рассчитывается для условий статического контакта, и применение полученных оценок к условиям установившегося трения, как это обычно делается, может рассматриваться как некое допущение. Более того, до сих пор не разработана приемлемая модель фактического контакта шероховатых поверхностей, скользящих друг относительно друга. Поэтому, все методы расчета ФПК дают лишь приближенные оценки.

Для измерения ФПК разработано большое количество методов, которые можно условно разделить на три группы: 1) методы, основанные на переносе энергии (по электро- и теплопроводности, по прохождению и отражению ультразвуковых волн, по нарушению полного внутреннего отражения и т. п.); 2) методы, использующие массоперенос (по переносу радиоактивных изотопов, угольной пыли, люминесцентных красок, по расходу газа или жидкости через околосредоточное пространство и т. п.); 3) методы, основанные на измерении деформаций (по сближению поверхностей).

*Экспериментальные методы определения фактической площади касания.* Специфика строения и свойств полимерных материалов определяет особенности исследования их контактно-фрикционных характеристик. В первую очередь это касается выбора метода и создания экспериментального оборудования с точки зрения достижения возможности исследования влияния времени и скорости нагружения, температуры, изменения структуры и других параметров. Поэтому при экспериментальном исследовании фактической площади касания полимерных материалов большое значение имеют вопросы анализа и усовершенствования известных методов и устройств для определения ФПК, изучения особенностей ФПК полимерных тел и сопоставления экспериментальных данных с расчетными.

**Выбор методов исследования.** Известно большое количество экспериментальных методов определения ФПК твердых тел, в основном металлов. С учетом последних данных они могут быть условно разделены на три группы:

- 1) методы, основанные на передаче и переносе энергии;
- 2) методы, использующие массоперенос;
- 3) методы, основанные на измерении деформаций (табл. 4.1).

В первую группу могут быть включены методы определения ФПК по теплопроводности и электропроводности контакта, по прохождению или отражению электромагнитных (световых) волн и механических (ультразвуковых) колебаний.

Ко второй группе можно отнести методы, основанные на переносе в результате контакта с одной поверхности на другую материала контрольного тела или специально предварительно нанесенных тонких слоев краски, люминесцирующих и содержащих радиоизотопы веществ; методы, связанные с нарушением поверхностного слоя (например, тонкой угольной пленки) в результате микросмещений контактирующих тел, а также методы, основанные на введении в контакт газообразных и жидких веществ; определение характеристик ФПК осуществляется при этом по расходу при подаче через стык под определенным давлением или по картине, зафиксированной после введения реагента в контактные зоны (например, по омеднению).

К третьей группе следует отнести расчетно-экспериментальный метод определения ФПК по сближению.

Т а б л и ц а 4.1 Экспериментальные методы определения ФПК твердых тел

Метод определения ФПК	Условия применения	Основные недостатки метода
<i>I группа. Методы, основанные на переносе энергии</i>		
По электропроводности	Применим к движущимся шероховатым, непрозрачным телам. Требуется тарировка другим методом	Низкая точность. Применим к электропроводным однородным материалам
По теплопроводности	То же	Не учитываются тепловые явления в газовой прослойке. Низкая точность
По нарушению полного внутреннего отражения (метод Мехау)	Применим к движущимся телам, одно из которых гладкое и прозрачное. Используется для изучения ФПК полимеров и эластомеров	Одно тело должно быть оптически прозрачным, дает несколько зависящие значения, не применим при шероховатости ниже $\sqrt{3}$
По отсутствию рассеяния света в точках контакта	Применим для двух прозрачных шероховатых тел, можно наблюдать движение абразивного зерна в зоне контакта	Ограничение по материалам, пригоден только для очень грубых поверхностей
По картине интерференции на контакте	Применим к неподвижным телам, одно из которых гладкое и прозрачное	Ограничение по материалам, мало разработан
По прохождению и отражению ультразвуковых волн	Применим для шероховатых, непрозрачных движущихся тел	Мало разработан
<i>II группа. Методы, основанные на массопереносе</i>		
По переносу радиоактивных изотопов	Применим для неподвижного контакта шероховатых, непрозрачных тел	Трудности тарировки, низкая точность, мало разработан
По микросмещению и переносу угольной пыли	Применим для неподвижного контакта шероховатых, непрозрачных тел	Дает несколько завышенные значения
По переносу люминесцентных красок	Применим для неподвижного контакта шероховатых, непрозрачных тел	Низкая точность вследствие неравномерности разрушения и переноса слоя краски
По расходу газа или жидкости через околоконтактное пространство	Применим для грубых шероховатых поверхностей, преимущественно для неподвижного контакта	Низкая точность, мало разработан
По фиксированной картине введенного в околоконтактное пространство вещества	Применим для неподвижного контакта шероховатых, непрозрачных поверхностей	Низкая точность для гладких поверхностей
По адгезионному переносу меди в среде глицерина	Применим для подвижного контакта	Мало разработан
<i>III группа. Методы, основанные на измерении деформаций</i>		
По сближению поверхностей	Применим для движущихся непрозрачных, шероховатых поверхностей, ФПК определяется расчетом	Косвенный метод, при измерениях нужно учитывать влияние случайных выступов

Однако до сих пор вследствие объективных недостатков или неразработанности большинство известных методов не признаны достаточно надежными, особенно для изучения характеристик движущегося контакта.

Среди перечисленных методов определения ФПК выделяется акустический (ультразвуковой) метод, дающий возможность изучать непрозрачные движущиеся тела.

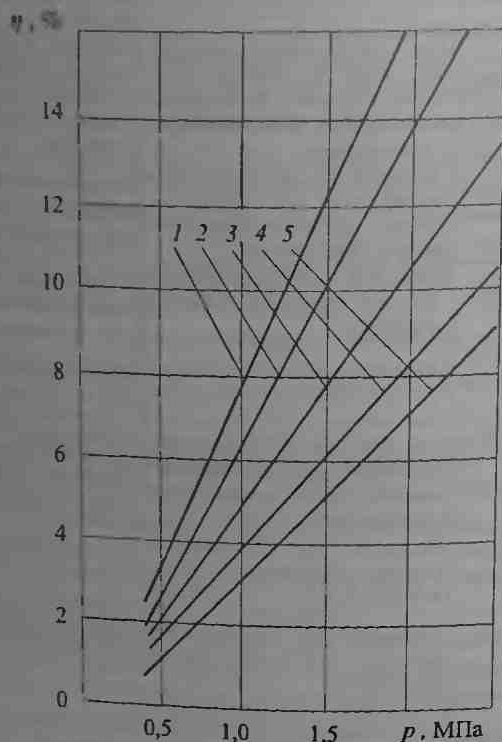


Рис. 4.2 Фактическая площадь контакта как функция нагрузки для полипропиленовых образцов: 1 —  $R_n = 0,63$  мкм; 2 — 1,25; 3 — 2,5; 4 — 5; 5 —  $R_n = 10$  мкм

ФПК полипропилена, измеренная методом Механу, представлена на рис. 4.2. Обширные экспериментальные исследования позволили установить факторы, влияющие на формирование ФПК.

Фактическая площадь контакта зависит не только от механических свойств поверхностных слоев, но и от их шероховатости. Шероховатость может изменяться при сжатии и трении. Чем более гладкой является поверхность, тем больше ФПК.

Когда ФПК сформирована, часть неровностей поверхности деформируется упруго, а другая часть испытывает пластическую деформа-

цию. В общем случае имеет место упругопластическая деформация с упрочнением. Для полимеров ФПК зависит от вязкоупругого поведения контактирующих материалов и возрастает с увеличением длительности нагружения контакта.

ФПК изменяется прямо пропорционально нагрузке в степени, показатель которой лежит в пределах от  $2/3$  до 1. Очень близкий к 1 показатель степени не означает наличие пластического контакта, так как поведение контакта определяется еще и статической геометрией контактирующих шероховатых поверхностей.

Средний диаметр единичного пятна контакта практически не зависит от приложенной нагрузки. Скорость увеличения пятна приблизительно на порядок ниже, чем скорость роста ФПК.

ФПК возрастает с увеличением радиуса кривизны неровностей и снижается с ростом предела текучести, модуля упругости и степени упрочнения материала.

В заключении следует отметить, что все экспериментальные методы измерения ФПК обладают недостатками, один из которых — неоднозначная экспериментальная интерпретация термина «фактический» контакта, т. е. имеет систематическую погрешность, которую трудно оценить. Хотя такие методы измерения ФПК, как оценка электропроводности, отражения и прохождения ультразвуковых волн и некоторые другие, в принципе применимы к движущимся поверхностям, однако отсутствует надежный метод измерения ФПК в условиях скольжения.

Тем не менее, фактическая площадь контакта остается фундаментальной характеристикой, поскольку на этой площади атомы одной поверхности находятся в пределах полей отталкивания атомов другой. Это, как отмечал Тейбор, единственный механизм, посредством которого атомы «несут нагрузку». При увеличении расстояния между атомами силы притяжения начинают превалировать. На периферии каждого пятна контакта существует кольцеобразная область, где действуют силы притяжения, ответственные за внеконтактную адгезию (см. модель ДМТ в гл. 3).

**4.1.2. Межповерхностные связи.** Поверхность твердого тела обладает некоторой избыточной энергией, которая обуславливает способность поверхностей к формированию адгезионных соединений. Под адгезией понимают процесс образования атомных (молекулярных) связей, которые могут возникнуть между контактирующими точками на сопрягаемых поверхностях. Такие связи могут образовываться как при статическом контакте, так и в условиях трения.

Известно, что очищенные поверхности металлов связываются в вакууме вследствие образования сильных адгезионных связей. Это не всегда справедливо, если поверхности контактируют в нормальных условиях. Связи могут возникнуть только между очень гладкими поверхностями при высокой нагрузке, желательны также наличие

взаимного смещения сопрягаемых поверхностей. Это условие связано с наличием адсорбированных пленок (включая естественные окислы), влаги и других веществ на поверхности твердого тела. Эти загрязнения снижают поверхностную энергию, а, следовательно, вероятность образования прочного соединения. При относительном движении контактирующих поверхностей (трение движения) может реализоваться разрушение защитных поверхностных пленок и образование прочной связи.

Таким образом, природа адгезионных (фрикционных) связей, образующихся при трении, может быть различной: от прочных металлических связей между ювенильными участками контактирующих поверхностей до слабых Ван-дер-Ваальсовых связей между адсорбированными пленками, защищающими трущиеся тела.

Процесс трения может рассматриваться как процесс непрерывного формирования и разрушения фрикционных связей, что и составляет сущность адгезионной (молекулярной) составляющей трения. При приложении касательной нагрузки эти связи подвергаются срезу. Прочность на срез адгезионной связи определяется соотношением

$$\tau_n = \tau_0 + \beta p_r, \quad (4.1)$$

где  $\tau_0$  и  $\beta$  — константы, зависящие от характера взаимодействия контактирующих поверхностей и определяемые экспериментально;  $p_r$  — давление на единичном пятне контакта. Такая зависимость прочности на срез от давления впервые была обнаружена Бриджменом в его исследованиях высоких давлений.

Таким образом, работа силы трения расходуется на разрушение межповерхностных связей. Расположение области, в которой происходит разрушение, зависит от относительной прочности связи и трущихся материалов. Если прочность межповерхностной связи меньше, чем когезия менее прочного материала, то разрушение происходит на границе раздела (рис. 4.3, а). В противном случае разрушается этот материал и происходит перенос материала (рис. 4.3, б). При определенных условиях наблюдается смешанный тип разрушения (рис. 4.3, в).

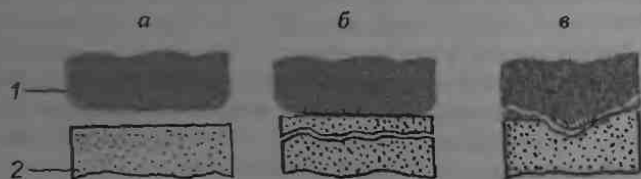


Рис. 4.3. Типы разрушения адгезионных связей, образующихся при трении: а) адгезионное разрушение; б) когезионное разрушение; в) смешанное разрушение; 1 — неровность, 2 — контртело



В общем случае на межповерхностные связи (их образование, рост и разрушение) оказывают влияние природа поверхностей, химия поверхностных явлений и напряженное состояние поверхностных слоев (условия нагружения). Межповерхностные связи вместе с продуктами их разрушения и сильно деформированными слоями, в которых локализованы деформации сдвига, получили название *третьего тела*. Этот термин подразумевает, что материал, вовлеченный в процесс трения, может обладать свойствами, кардинально отличающимися от свойств сопрягаемых материалов.

Оценка адгезионной составляющей силы трения при пластическом контакте дана в гл. 2. Ниже дается ее более строгий расчет.

В некоторых материалах (керамика, полимеры) деформация неровностей носит преимущественно упругий характер. Природа адгезионных сил связана с ионными или ковалентными связями в керамиках и Ван-дер-Ваальсовыми или водородными связями в полимерах. Тем не менее, адгезионную составляющую можно проанализировать аналогично тому, как это было сделано для металлов. Для полимеров адгезия обусловлена слабыми связями. Кроме того, для полимеров характерен перенос тонкой полимерной пленки на поверхность контртела, что играет важную роль в их трении. Так, например, коэффициент трения при трении без смазки может быть очень низким, например, 0,05 и менее для политетрафторэтилена, склонного к фрикционному переносу.

**4.1.3. Деформация при трении.** Другой источник возникновения силы трения связан с деформацией, протекающей при вступлении в контакт неровностей двух скользящих поверхностей (рис. 4.4). Деформация сопровождается диссипацией механической энергии, зависящей от типа деформации, условий скольжения, трущихся материалов, состава окружающей среды и других факторов. Рассмотрим некоторые механизмы диссипации.

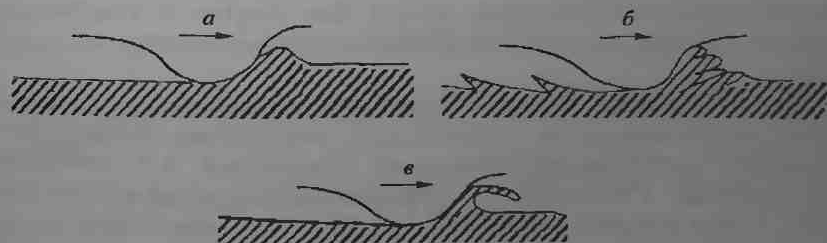


Рис. 4.4. Деформационная составляющая трения: а) пропахивание; б) пропахивание с адгезией; в) микрорезание

В модели трения скольжения Бодена-Тейбора предполагается, что неровности более твердой поверхности пропахивают более мягкую, образуя дорожку трения (п. 2.1.2). Сопротивление пропахиванию вызывает возникновение силы, дающей вклад в силу трения в часто называемой *пропахивающей составляющей силы трения*.

Отметим, что почти всегда пропахивание сопровождается адгезией (рис. 4.4, б) и при определенных условиях пропахивание может приводить к микрорезанию (рис. 4.4, в), т.е. совершается дополнительная работа, и трение возрастает.

Существуют и другие механизмы диссипации энергии при деформации. Так, при скольжении вязкоупругого полимера по твердой шероховатой поверхности диссипация энергии происходит за счет высоких гистерезисных потерь. Эта деформационная составляющая известна под названием *трения вследствие упругого гистерезиса*.

Энергия может рассеиваться также и по другим каналам диссипации, например с упругими волнами, генерируемыми на границе раздела и затухающими в объеме материала, вследствие зарождения и распространения микротрещин и т. п.

**4.1.4. Расчет коэффициента трения.** Модель трения, изложенная в п. 2.1.2, разработана Боуденом и Тейбором и часто называется адгезионно-деформационной теорией трения, хотя ее авторы избежали термина «теория». Одновременно и независимо И. В. Крагельский с учениками разработал молекулярно-механическую теорию трения. При сравнении теории трения Крагельского с аналогичной теорией Боудена-Тейбора обращает на себя внимание тот факт, что в основе обеих теорий лежит общая идея о двойственности природы трения, т.е. считается, что существуют две компоненты трения, деформация и адгезия. Различие этих теорий состоит в трактовке механизмов действия этих составляющих и степени детализации при их описании. Наиболее наглядно это проявляется при расчете параметров трения.

Положим, что в общем случае сила трения состоит из двух компонент, адгезионной (молекулярной)  $F_a$  и деформационной (механической)  $F_d$ :

$$F = F_d + F_a. \quad (4.2)$$

Сделаем оценку коэффициента трения при упругом и пластическом контактах, исходя из принципов молекулярно-механической теории трения.

**Упругий контакт.** В теории Крагельского принимается, что деформационная (механическая) составляющая обусловлена несовершенной упругостью материала деформируемых неровностей, т.е. гистерезисными потерями. Считается, что деформационная составляющая силы трения в зоне контакта единичной неровности  $F_{di}$  может быть рассчитана по формуле Боудена-Тейбора для оценки гистерезисных потерь при качении единичной сферы:

$$F_{di} = \frac{3}{16} \alpha_f \frac{a_i}{R} P_i. \quad (4.3)$$

Здесь  $\alpha_f$  — коэффициент гистерезисных потерь;  $a_i$  — радиус пятна контакта;  $P_i$  — нагрузка на неровность  $i$  означает, что данное соотношение записано для единичной сферы, моделируемой сфе-

рическим сегментом с радиусом  $R$ . Тем самым постулируется равенство деформационных (гистерезисных) потерь при качении и скольжении, что весьма близко к истине. Следует отметить, что существует и другая трактовка приведенной формулы, не связанная с качением и гистерезисом (F. F. Ling). Используя соотношения Герца (см. табл. 3.4) можно переписать (4.3) в виде

$$F_{d_i} = \frac{1}{4} \alpha_f \frac{E}{1 - \nu^2} \delta_i^2 = \frac{1}{4} \alpha_f \frac{E}{1 - \nu^2} R_{\max}^2 \varepsilon_i^2, \quad (4.4)$$

Используя процедуру, описанную в предыдущей главе (п. 3.3.1), суммируем силы деформационного трения (4.4) по всем неровностям, вступившим в контакт:

$$F_d = \int_0^{n_r} F_{d_i} dn_r.$$

Подставляя  $F_{d_i}$  (3.4) и  $dn_r$  (уравнение (3.54) из п. 3.3.1; обратите внимание, что теперь радиус закругления неровности обозначен через  $R$ ) получаем

$$F_d = K_1 K_2 \int_0^{\varepsilon} (\varepsilon - x)^2 x^{\nu_D - 2} dx = K_1 K_2 J(2, \nu_D) \varepsilon^{\nu_D + 1},$$

$$\text{где } K_1 = \frac{1}{4} \alpha_f \frac{E}{1 - \nu^2} R_{\max}^2, \quad K_2 = \frac{\kappa_c A_c b \nu_D (\nu_D - 1)}{\pi R R_{\max}}.$$

При выводе последнего соотношения использована формула (3.56), где  $\lambda = 2$ .

Нагрузка  $P$  определяется уравнением (3.57) из п. 3.3.1 и может быть записана в виде

$$P = \kappa_c A_c b B \bar{K}_3 \varepsilon^{\nu_D + 0.5},$$

$$\text{где } \bar{K}_3 = \nu_D (\nu_D - 1) J(3/2, \nu_D) \left( \frac{R_{\max}}{r} \right)^{1/2}$$

Тогда

$$f_d = \frac{F_d}{P} = \frac{K_1 K_2 J(2, \nu_D) \varepsilon^{\nu_D + 1}}{\bar{K}_3 \varepsilon^{\nu_D + 0.5}}.$$

Учитывая выражение для  $J(\lambda, \nu_D)$  (3.56) и проведя простые преобразования, получаем деформационную составляющую коэффициента трения:

$$f_d = \frac{3}{16} \alpha_f \frac{J(2, \nu_D)}{J(5/2, \nu_D)} \left( \frac{\delta}{R} \right)^{1/2} = \frac{3}{8} \alpha_f \frac{1}{k_1 \nu_D (\nu_D^2 - 1)} \left( \frac{\delta}{R} \right)^{1/2}, \quad (4.5)$$

где  $k_1 = J(5/2, \nu_D)$ .

Расчет молекулярной составляющей основан на допущении, что сдвиговая прочность молекулярных связей, возникающих на пятне фактического контакта, зависит от нормальной нагрузки, действующей на эти пятна, и описывается двучленным уравнением (4.1).

Тогда элементарная сила трения, действующая на единичном пятне контакта, может быть записана в следующем виде:

$$F_{\text{тр}} = (\tau_0 + \beta p_{\text{ри}}) \Delta A_r. \quad (4.6)$$

В качестве фактического давления на единичном контакте принимается среднее давление по Герцу:

$$p_{\text{ри}} \equiv p_{\text{ми}} = \frac{P}{\pi a^2} = \frac{4}{3\pi} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\delta}{r}\right)^{1/2}$$

Учитывая, что площадь пятна упругого контакта равна  $\Delta A_r = \pi r \delta$ , уравнение (4.6) переписывается в виде

$$F_{\text{тр}} = \pi r \left( \tau_0 \delta + \frac{4}{3\pi} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{\beta}{\sqrt{r}} \delta^{3/2} \right).$$

Суммирование по всем неровностям, вступившим в контакт, дает молекулярную компоненту силы трения:

$$\begin{aligned} F_{\text{тр}} &= \int_0^{\tau_0} F_{\text{тр}} dn_r = \\ &= \pi r K_2 \int_0^{\tau_0} \left[ \tau_0 R_{\text{max}} (\varepsilon - x) x^{\nu_D - 2} + \frac{\beta B R_{\text{max}}^{3/2}}{\sqrt{r}} (\varepsilon - x)^{3/2} x^{\nu_D - 2} \right] dx = \\ &= \pi r K_2 \left[ \tau_0 R_{\text{max}} J(1, \nu_D) \varepsilon^{\nu_D} + \frac{\beta B R_{\text{max}}^{3/2}}{\sqrt{r}} J(3/2, \nu_D) \varepsilon^{\nu_D + 0.5} \right]. \end{aligned}$$

Молекулярная компонента коэффициента трения равна

$$f_0 = \frac{F_{\text{тр}}}{N} = \frac{\pi r K_2}{K_3} \left[ \tau_0 R_{\text{max}} J(1, \nu_D) \varepsilon^{-0.5} + \frac{\beta B R_{\text{max}}^{3/2}}{\sqrt{r}} J(3/2, \nu_D) \right].$$

После упрощения это уравнение принимает вид

$$f_0 = \frac{3\pi}{4} \frac{1-\nu^2}{E} \frac{J(1, \nu_D)}{J(3/2, \nu_D)} \tau_0 \sqrt{\frac{R}{\delta}} + \beta. \quad (4.7)$$

Итак, коэффициент трения при упругом контакте, определяемый как сумма деформационной и адгезионной компонент, записывается в следующей форме:

$$f = f_d + f_0 = \frac{3\pi}{4} \frac{1-\nu^2}{E} \frac{J(1, \nu_D)}{J(3/2, \nu_D)} \tau_0 \sqrt{\frac{R}{\delta}} + \beta + \frac{3}{8} \alpha_f \frac{J(2, \nu_D)}{J(3/2, \nu_D)} \sqrt{\frac{\delta}{R}}. \quad (4.8)$$

**Пластический контакт.** При пластическом контакте неровности и контртела образуется лунка (сферический сегмент) глубиной  $\delta$  и радиусом  $a$ . При движении только половина сегмента несет нагрузку, т.е. единичное пятно контакта равно  $\Delta A_{r,i} = \pi a_i^2/2$ . Считается, что давление на пятне контакта пластически деформированного материала равно твердости НВ. Тогда нагрузка, действующая на единичном пятне, составляет:

$$P_i = \text{НВ} \pi a_i^2/2 = \text{НВ} \pi R \delta_i.$$

Здесь использовано известное геометрическое соотношение  $a_i^2 = 2R\delta_i$ , где  $R$  — радиус закругления неровности,  $\delta_i$  — глубина ее внедрения. Общая нагрузка определяется суммированием по всем неровностям, вступившим в контакт:

$$P = \int_0^{n_r} P_i dn_r = \alpha A_c \text{НВ} b \nu_D (\nu_D - 1) \int_0^\varepsilon (\varepsilon - x) x^{\nu_D - 2} dx = \alpha A_c b \text{НВ} \varepsilon^{\nu_D}.$$

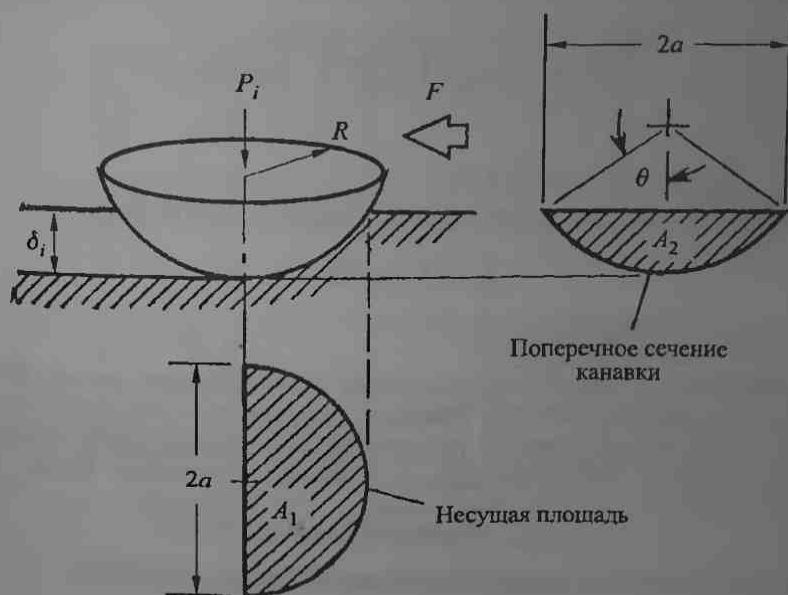


Рис. 4.5. Формирование пластического контакта

Теперь определим деформационную составляющую трения. Из рис. 4.5 следует, что площадь сечения канавки равна

$$A_2 = \frac{1}{2} R^2 (2\theta - \sin 2\theta).$$

Так как глубина внедрения  $\delta_i$  значительно меньше радиуса закругления неровности  $R$ , то угол  $\theta$  мал и можно разложить синус в степенной ряд:

$$\sin \theta \approx \theta - \frac{1}{6}\theta^3.$$

Учитывая, что  $\sin \theta \approx a/R$ , получим

$$A_2 \approx \frac{4}{3} \sqrt{2} \delta_i^{3/2} R^{1/2} = 1,88 \delta_i^{3/2} R^{1/2}.$$

Здесь уместно отметить, что строгое решение соответствующей контактной задачи теории пластичности дает коэффициент, равный 1,68. Однако, точность, приемлемая в расчетах подобного рода, позволяет принять его равным 2 (в дальнейшем обозначается  $\chi$ ).

Сила сопротивления пластическому оттеснению равна

$$F_{di} = \chi \delta_i^{3/2} R^{1/2} \text{НВ}.$$

Суммируя по всем пятнам контакта, находим

$$F_d = \int_0^{r_c} F_{di} dn_r = \kappa_c \bar{K} \left( \frac{R_{\max}}{R} \right)^{1/2} b A_c \text{НВ} \varepsilon^{\nu_d + 1/2},$$

где  $\bar{K} = \frac{1}{2\pi} \chi \nu_d (\nu_d - 1) J(3/2, \nu_d)$ .

Механическая составляющая коэффициента трения равна

$$f_d = K_4 \sqrt{\delta/R}.$$

Здесь  $K_4 = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma(5/2)\Gamma(\nu_d - 1)}{\Gamma(\nu_d + 3/2)}$ .

Аналогично находится молекулярная составляющая трения. Как и в случае упругого контакта, сдвиговая прочность молекулярных связей описывается двучленным уравнением (4.1), где реальное давление равно твердости материала НВ, а площадь единичного пятна есть  $\Delta A_i = \pi R \delta_i$ :

$$F_{oi} = (\tau_0 + \beta \text{НВ}) \pi R \delta_i.$$

Сумма этих сил дает молекулярную составляющую трения:

$$F_o = \int_0^{r_c} F_{oi} dn_r = \alpha A_c b (\tau_0 + \beta \text{НВ}) \varepsilon^{\nu_d}.$$

Тогда соответствующий коэффициент трения равен

$$f_o = \frac{\tau_0}{\text{НВ}} + \beta.$$

Окончательно общий коэффициент трения составляет

$$f = K_4 \sqrt{\frac{\delta}{R}} + \frac{\tau_0}{\text{НВ}} + \beta, \quad (4.3)$$

Полученные формулы позволяют анализировать зависимость трения от различных факторов, таких как нагрузка, шероховатость, механические характеристики и т. д.

**4.1.5. Влияние эксплуатационных факторов на трение.** Относительный вклад адгезионной и деформационной составляющих в силу трения изменяется в широком диапазоне в зависимости от свойств трущихся материалов, шероховатости поверхностей, условий работы трибосоприжения (нагрузки, скорости скольжения и температуры) и состава окружающей среды. Наиболее ярко это проявляется в зависимости коэффициента трения от нагрузки (рис. 4.6). В общем случае эта зависимость имеет минимум, который напрямую связан с переходом от упругого контакта к пластическому (при увеличении нагрузки) и связанным с этим переходом изменением относительного вклада составляющих трения.

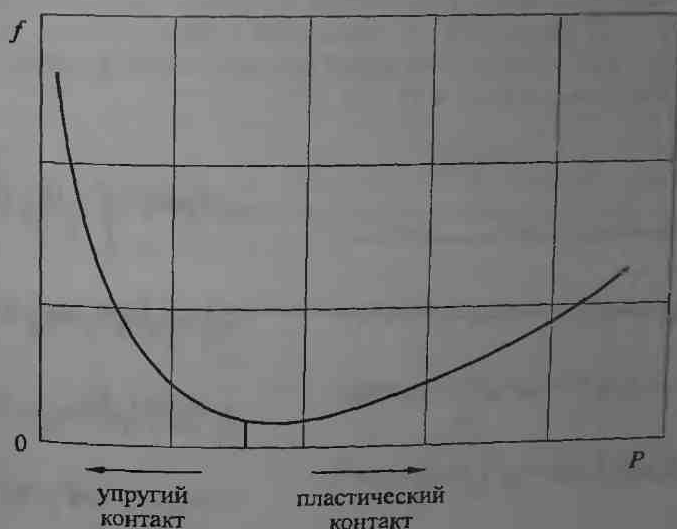


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Как обсуждалось ранее, площадь фактического контакта при упругом характере деформирования прямо пропорциональна нагрузке в степени меньше единицы, т. е. адгезионная составляющая и коэффициент трения будут уменьшаться с ростом нагрузки, так как деформационная составляющая пренебрежимо мала. Когда контакт становится пластическим, фактическая площадь контакта и адгезионная составляющая трения не зависят от нагрузки, а с ростом нагрузки уве-

ивается внедрение неровностей в поверхность контртела, в результате чего возрастает деформационная составляющая (пропахивающая составляющая) силы трения. Полный коэффициент трения возрастает. Переход от убывающей к возрастающей ветви кривой определяет положение минимума. Оно зависит от соотношения адгезионной и деформационной составляющих и смещается в сторону меньших значений  $f$  при возрастании  $f_a/f_d$ .

Следует отметить, что этот минимум выражен весьма слабо. Экспериментально получено большое количество различных зависимостей от убывающей (возрастающей) до независимой от нагрузки, поскольку и трение оказывают влияние целый ряд дополнительных факторов.

Весьма интересно, что зависимость коэффициента трения от шероховатости имеет подобный характер, так как чем меньше высота неровностей, тем больше фактическая площадь контакта, а, следовательно, адгезионная составляющая. С другой стороны, чем выше неровности, тем, как следствие, чем меньше радиус кривизны их вершин, тем больше деформационная составляющая. Здесь следует иметь в виду, что сама шероховатость изменяется в процессе трения — очень гладкая поверхность становится более шероховатой, а сильно шероховатая поверхность выглаживается. Существует концепция «равновесной шероховатости», не зависящей от начальной шероховатости: она может быть больше или меньше начальной шероховатости в зависимости от условий изнашивания (рис. 4.7).

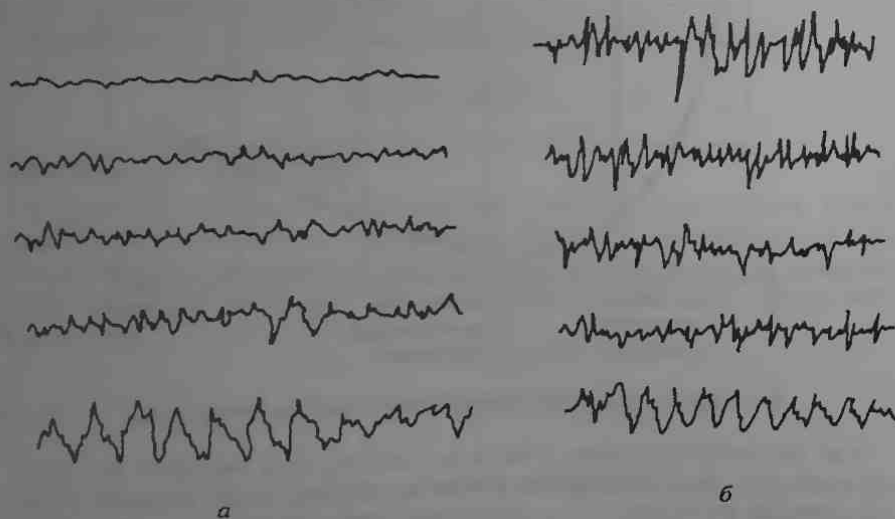


Рис. 4.7. Изменение шероховатости в процессе приработки: а) увеличение шероховатости, когда начальная шероховатость меньше равновесной; б) уменьшение шероховатости, когда начальная шероховатость больше равновесной (по Комбалуву)



Что касается зависимости трения от скорости скольжения, то это довольно сложный вопрос, так как влияние скорости часто неотделимо от влияния температуры. Однако ясно, что когда тело начинает скользить, можно зарегистрировать снижение трения (нулевой закон трения). Наоборот, трение не зависит от скорости скольжения (третий закон трения) при трении абсолютно упругого тела и практически неизменной температуре.

На практике можно установить и более сложные зависимости, поскольку с увеличением скорости скольжения скорость деформации и контактная температура возрастают. Эти факторы влияют на механические свойства трущихся материалов и, как следствие, на адгезионную и деформационную составляющие трения. Так, пластическая деформация локализуется в более тонких поверхностных слоях, способствуя снижению силы трения. Для материалов с несовершенной упругостью трение связано со скоростью, что вызывает соответствующие гистерезисные потери. В общем случае зависимость коэффициента трения от скорости проходит через максимум, который при определенных условиях может вырождаться. В последнем случае наблюдается падающая зависимость коэффициента трения от скорости.

Важная роль отводится контактной температуре. С ростом температуры снижается прочность адгезионных связей, однако контакт становится более пластическим, что приводит к возрастанию фактической площади контакта. Сочетание этих эффектов может приводить к разнообразным зависимостям трения от температуры. Весьма чувствительны к тепловому воздействию полимеры, для которых могут наблюдаться своеобразные температурные зависимости. В качестве примера рассмотрим изменение коэффициента трения полиэтилена (ПЭ) в широком диапазоне температур (рис. 4.8).

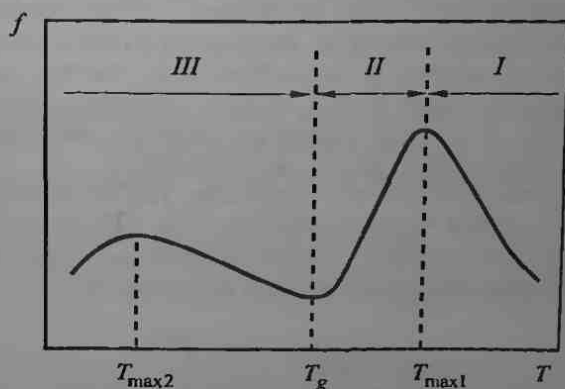


Рис. 4.8. Связь коэффициента трения полимера и температуры:  $T_g$  — температура стеклования; I — высокоэластичное состояние; II — переходное состояние; III — стеклообразное состояние (по Елькину в сб. «Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах». М., 1968)

Данные зависимости характеризуются двумя минимумами: высокотемпературным ( $T_{\max 1}$ ) и низкотемпературным ( $T_{\max 2}$ ). Первый минимум возникает, когда аморфная составляющая ПЭ находится в вязкоупругом состоянии, однако кристалличность ПЭ снижается, что приводит к уменьшению жесткости, а, следовательно, фактическая площадь контакта и коэффициент трения возрастают. При  $T > T_{\max 1}$  внешнее трение маскируется вязким течением. Второй максимум связан с максимумом гистерезисных потерь, который дает вклад в силу трения, превышающий вклад, вносимый адгезией. Дальнейшее снижение температуры ( $T < T_{\max 2}$ ) приводит к росту модуля упругости, а, следовательно, к снижению фактической площади контакта и обеих компонент силы трения (адгезионной и деформационной).

В любом случае граничные слои будут оказывать влияние на зависимость коэффициента трения от скорости скольжения и температуры.

**4.1.6. Предварительное смещение.** Трению при скольжении предшествует процесс, получивший название *предварительного смещения*. Он включает относительное микросмещение контактирующих тел, первоначально находившихся в покое под нормальной нагрузкой  $P$ , при возрастании касательной нагрузки  $F$  от нуля до некоторого критического значения  $F_0$  (*сила трения покоя*), при котором начинается макроскопическое скольжение.

Этот процесс управляет износом и долговечностью соединений с натягом, фрикционных передач (вариаторов, ленточных и других трансмиссий), узлов прецизионной техники (например, контактов магнитная головка — диск в компьютерах) и т. п. Сцепление колес с рельсами и выход из строя транспортных средств также тесно связаны с предварительным смещением.

Многочисленные эксперименты показали, что с ростом касательной силы микросмещение монотонно возрастает, однако прямая пропорциональность соблюдается только на начальном этапе процесса. Микросмещение включает обратимую и необратимую части, а его величина меньше, чем размер области сцепления (диаметр пятна контакта). Оказывается, что в условиях предварительного смещения наряду с диссипацией энергии происходит и ее накопление.

Механизм предварительного смещения удобно рассматривать на примере контакта сфера — плоскость (рис. 4.9). Пусть сфера нагружена некоторой постоянной силой  $P$ . Предполагается, что контакт упругий. Нормальное давление имеет герцевское распределение:

$$p(r) = p_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Так как из сферу действует касательная сила  $F$ , меньшая силы трения покоя  $F_0$ , на поверхности контакта возникает напряжение  $\tau(r)$  (кривая 1 на рис. 4.9). При очень сильной адгезии касательные

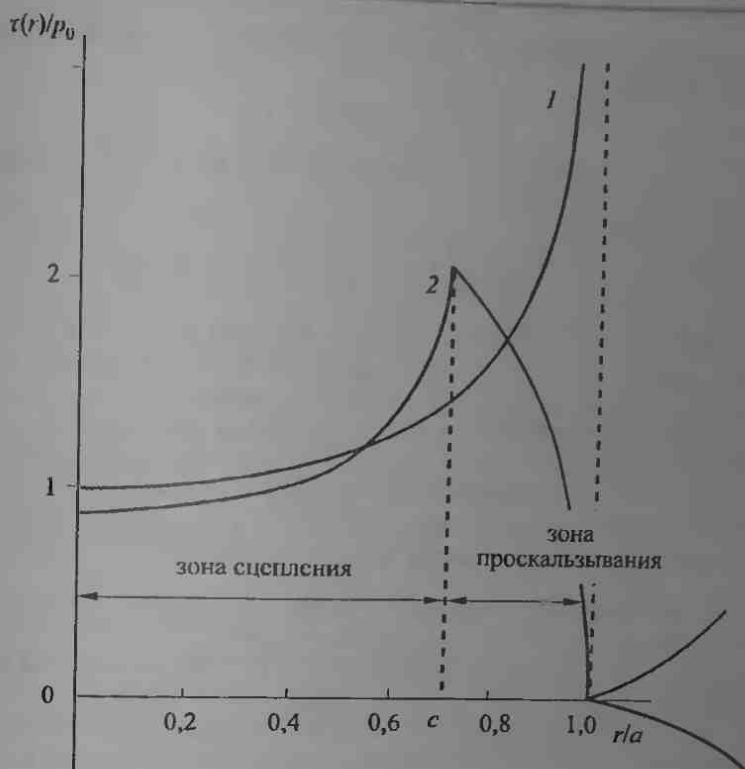


Рис. 4.9. Распределение касательных напряжений по площадке контакта: 1 — отсутствие проскальзывания; 2 — частичное проскальзывание

смещения всех точек контакта будут одинаковы, а соответствующее распределение касательного усилия будет иметь следующий вид:

$$\tau(r) = \tau_0 / (1 - r^2/a^2)^{1/2}.$$

Это уравнение показывает, что на кромке контакта усилие возрастает до бесконечности. Это требует введения бесконечно большого коэффициента трения, что нереально, или наличия некоторого микропроскальзывания.

Далее рассуждаем следующим образом. Перед самым началом скольжения, когда касательная сила стремится к своему критическому значению  $f_n P$ , касательное напряжение пропорционально нормальному давлению

$$\tau'(r) = f_n p(r).$$

Кроме того, рассматриваем дополнительное распределение касательного напряжения

$$\tau''(r) = -\frac{c}{a} f_n p_0 (1 - r^2/c^2),$$

которое действует в пределах круговой площадки  $r \leq c$ . Результирующее распределение 2

$$\tau(r) = \tau'(r) + \tau''(r)$$

показано на рис. 4.9. Радиус  $c$  соответствует пику распределения усилия  $\tau(r)$ :

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{F}{f_n P}\right)^{1/3}$$

Это означает, что площадь контакта состоит из двух зон: 1) круговая зона сцепления с радиусом  $c$ , в которой усилие меньше трения покоя, а скольжение отсутствует, и 2) кольцевая зона ( $c < r \leq a$ ), в которой происходит проскальзывание. Другими словами, при возрастании касательной силы  $F$  от нуля микропроскальзывание начинается непосредственно на краю площадки контакта, а размер зоны сцепления уменьшается вплоть до точки, когда  $F = f_n P$ . Начинается макроскольжение, а трение покоя переходит в трение скольжения.

**4.1.7. Фрикционные автоколебания.** В упругих системах трения часто имеет место возникновение механических автоколебаний. Во многих случаях такие колебания препятствуют нормальной работе механических систем, вызывая, например, резкие толчки и ощутимый дребезг при трогании автомобиля, скрежет тормозов при торможении, скачкообразное движение суппорта металлорежущего станка и т. д., как результат движения с остановками (stick-slip).

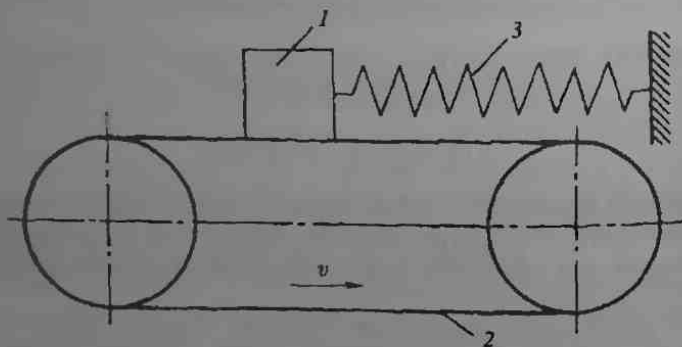


Рис. 4.10. Простая модель для изучения нестационарного трения скольжения (stick-slip)

Существует несколько причин возникновения фрикционных автоколебаний. Одна из них — это положительная разность между силами трения покоя и скольжения. Эта разность зависит от продолжительности неподвижного контакта, что можно проиллюстрировать с помощью модели, представленной на рис. 4.10.

Груз 1, связанный с пружиной 3, лежит на ленте 2. Когда лента начинает двигаться с малой постоянной скоростью, груз вначале движется вместе с ней, а постоянно возрастающая упругая сила пружины компенсируется неполной силой трения покоя до момента, когда последняя достигает полной силы трения покоя. Поскольку трение скольжения меньше статического, дальнейшее движение груза происходит с переменной скоростью при одновременном воздействии пружины и трения скольжения (стадия проскальзывания). По инерции груз проходит положение равновесия и останавливается, когда его скорость по отношению к ленте становится равной нулю. В этот момент груз сцепляется с лентой, после чего они движутся вместе и т.д. Продолжительность неподвижного контакта (сцепление) уменьшается с ростом скорости, амплитуда колебаний снижается, а их частота растет. Такого типа автоколебания часто называются механическими релаксационными колебаниями.

Другой причиной фрикционных автоколебаний может стать падающая скоростная зависимость силы трения. Пусть легкая колодка насажена на вал, вращающийся с постоянной скоростью, и соединена с двумя пружинами (аналог рис. 4.10). Если колодка движется вместе с валом за счет силы трения покоя, одна из пружин растягивается (противоположная сжимается) и ее сила упругости возрастает до тех пор, пока не уравновесит силу трения покоя. Происходит мгновенная остановка колодки, и она начинает двигаться в противоположную сторону с возрастающей скоростью. Сила трения убывает, и пружина сжимается. Противоположная пружина начинает растягиваться, стремясь остановить колодку. Когда это происходит, колодка вновь начинает двигаться в первоначальном направлении, и колебательный цикл повторяется.

Понимание механизма фрикционных автоколебаний необходимо для правильного конструирования узла трения и выбора оптимальных условий его функционирования. Например, следует иметь в виду, что рост нормальной нагрузки способствует такому скачкообразному движению. Избежать фрикционных колебаний в упругих механических системах можно путем подбора контактирующих материалов, качества поверхностей и изменением конструкции трибосистемы. При трении без смазки материалы с большим модулем упругости, большей скоростью последствия и малой скоростью релаксации оказываются менее чувствительными к скачкообразному трению (stick-slip).

## 4.2. Тепловыделение при трении

Трение — типичный диссипативный процесс, при котором происходит превращение большей части механической энергии (по имеющимся экспериментальным данным до 90–95%) в теплоту. Тепловое состояние фрикционного контакта часто является решающим фактором при оценке работоспособности узла трения. Определение температурных полей, генерируемых при трении, составляет предмет исследования

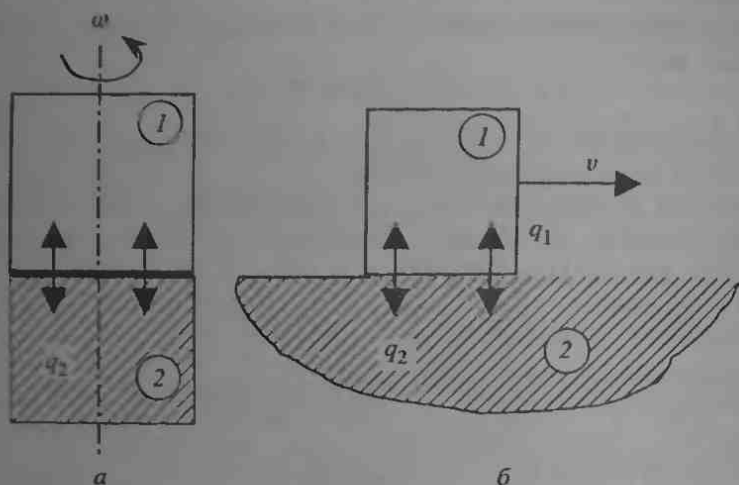


Рис. 4.11. Простые модели трибоконтакта с разными коэффициентами взаимного перекрытия: а)  $K_{вз} = 1$ ; б)  $K_{вз} \ll 1$

Таким образом, решение тепловой задачи трения сводится к решению системы уравнений (4.11) с начальными и граничными условиями (4.12)–(4.16). Такая система может быть сведена к интегральному уравнению типа Фредгольма, численное решение которого получено лишь для некоторых частных случаев. Однако полный анализ этой задачи до сих пор не проведен, и потребности трибологии удовлетворяются приближенными подходами, основные идеи которых можно найти в работах Блока и Егера.

В трибологии система уравнений (4.11) рассматривается при некоторых дополнительных допущениях, позволяющих упростить решение и получить сравнительно простые формулы, пригодные для инженерных расчетов. В частности, постулируются форма пятна контакта (теплового источника), характер распределения теплового потока на контакте и распределение теплового потока между трущимися телами. Последнее допущение является наиболее принципиальным, поскольку позволяет «расщепить» систему (4.11) на две самостоятельные задачи для каждого из контактирующих тел. Все эти вопросы были поставлены и в значительной степени решены уже в первых работах по тепловому расчету фрикционного контакта. Полученные результаты не потеряли свою актуальность и широко используются до настоящего времени. Так, как показано в приложении 2, обычно рассматриваются прямоугольный или полосовой источники с равномерным или параболическим распределением теплового потока по площади контакта. Форма источника и распределение теплового потока по контакту в ряде важных для практики ситуаций не оказывают существенного влияния на конечный результат. Так, расчеты контактной температуры (особенно средней) для квадратного источника могут применяться для

источника неправильной формы при больших скоростях скольжения (число Пекле  $Pe = lv/(2a) > 4$ ). При очень малых скоростях ( $Pe < 0,2$ ) температурное поле движущегося источника приближается к полю стационарного независимо от формы источника. Например, согласно Егеру, максимальные температуры, достигаемые на контакте при действии квадратного и кругового источников, имеющих один и тот же характерный размер  $l$ , отличаются на 12%. Что касается распределения теплового потока по площади контакта, то расчеты для ряда простых законов изменения интенсивности теплоты (постоянный, линейный, параболический) показали, что, хотя полученные распределения температур несколько отличаются по форме, их максимальные (и средние) значения очень близки. Этот вывод, по-видимому, справедлив для произвольных, но достаточно гладких законов изменения источников.

Т а б л и ц а 4.2. Основные формулы для расчета коэффициента распределения теплового потока

Характеристика контакта	Расчетные формулы	Примечания
Источник потока неподвижный, круговой равномерный, температура установившаяся (по Блоку)	$\alpha_{тп} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$	Условие равенства максимальных установившихся температур
Источник потока подвижный, круговой равномерный, температура установившаяся	$\alpha_{тп} = \frac{A(\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{(\pi/2)Pe_2}}{A(\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{(\pi/2)Pe_2} + 1}$	$vR/(4a_2) > 5$ — большая скорость, подвижный квадратный источник $T_{\max 1} = T_{\max 2}$
Источник потока неподвижный, квадратный равномерный, температура установившаяся (по Егеру)	$\alpha_{тп} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$	Условие равенства средних поверхностных температур
Источник потока подвижный, квадратный равномерный, температура установившаяся	$\alpha_{тп} = \frac{1,78(\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{(\pi/2)Pe_2}}{1,78(\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{(\pi/2)Pe_2} + 1}$	В расчете использована формула для полосового подвижного источника
Источник потока подвижный, квадратный равномерный, теплоотдача с боковой стороны подвижного контакта	$\alpha_{тп} = \frac{1,505(a_1\lambda_2\sigma)^{1/2}}{\lambda_1v^{1/2} + 1,505(a_1\lambda_2\sigma)^{1/2}}$	$Pe = Rv/(4a)$ ; $A = 1$ по Шедрову; $A = (2^{1/2} - 1)^{3/2}$ — по Блоку
Источник потока подвижный, квадратный равномерный, температура установившаяся (по Чичинадзе)	$\alpha_{тп} = \frac{\sqrt{d_r\lambda_2c_2\rho_2}}{\sqrt{L_r\lambda_1c_1\rho_1} + \sqrt{d_r\lambda_2c_2\rho_2}}$	$d_r$ — средний диаметр пятна контакта. $L_r$ — путь трения

Несколько более подробно следует остановиться на идее ввести коэффициент распределения тепловых потоков, чтобы еще до решения тепловой задачи можно было бы оценить влияние каждого

на контактирующих тел, и существенно упростить математические выкладки. Последняя цель, бесспорно, достигается, однако с физической точки зрения такой подход недостаточно корректен. Фактически приравниваются максимальные или средние поверхностные температуры соприкасающихся поверхностей. Подход такого типа следует рассматривать как математический прием, облегчающий получение простых соотношений без глубокого проникновения в суть фрикционных процессов. Достаточно отметить в качестве примера, что при скользящем контакте иногда приравниваются максимальные температуры, которые достигаются в разных точках зоны контакта (см. табл. 4.2).

Тем не менее, вычислив коэффициент распределения тепловых потоков, можно сравнительно просто рассчитать тепловые поля в каждом из трущихся тел, используя, например, решения, приведенные в приложениях 2 или 5 многочисленных монографиях по теории теплопроводности.

**4.2.2. Температура фрикционного контакта.** Важным следствием дискретности фрикционного контакта является тот факт, что кроме объемной  $T_{об}$  и поверхностной  $T_{пов}$  температур приходится иметь дело с температурой вспышки  $T_{всп}$ , которая определяется как локальное приращение температуры при фрикционном взаимодействии неровностей сопряженных поверхностей. Поскольку длительность взаимодействия неровностей, которая зависит от скорости скольжения и параметров шероховатости, мала, то соответственно и время существования температуры вспышки мало и составляет  $10^{-3}-10^{-9}$  с. Другая особенность фрикционного взаимодействия шероховатых поверхностей состоит в том, что любая неровность испытывает циклические воздействия со стороны неровностей контртела. Другими словами, неровность функционирует в условиях квазистационарного (повторно-кратковременного) режима трения. Промежуток времени между двумя последовательными контактами  $t_c$  определяется как отношение среднего расстояния между неровностями к скорости скольжения. При этом, конечная температура в конце  $(j-1)$ -го цикла  $T_{j-1}$  является начальной температурой для последующего  $j$ -го цикла.

После  $N$  циклов нагружения температура неровности составляет

$$T = 2 \frac{q}{\lambda} \left( \frac{a}{\pi} \right)^{1/2} \sum_{j=1}^N \left( \sqrt{jt_c + t} - \sqrt{jt_c + t - t_c} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_c} \right).$$

Здесь  $t_c$  — длительность контакта;  $r$  — радиус пятна контакта;  $q$  — интенсивность теплового источника.

На рис. 4.12 показано как изменяется безразмерная температура неровности с ростом числа циклов нагружения. Видно, что температура изменяется в пределах полосы, образованной монотонно возрастающими огибающими. Эта полоса несколько сужается с ростом количества циклов. Однако ее ширина, как показывают численные оценки, не может быть меньше, чем  $(t_c/t_c)^{1/2}$ .



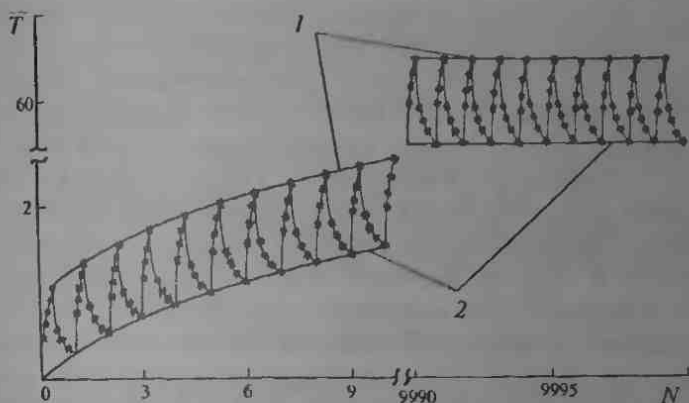


Рис. 4.12. Зависимость безразмерной температуры  $\bar{T}$  от количества циклов нагружения  $N$  единичной неровности: 1 — огнивающая максимумов температуры в пределах каждого цикла; 2 — огнивающая начальных температур для каждого цикла нагружения

Такое тепловое поведение неровностей ведет к повышению поверхностной температуры, расчет которой может проводиться по формулам, приведенным в приложении 2.

#### 4.2.3. Термическая неустойчивость фрикционного контакта.

Повышение температуры фрикционного контакта оказывает влияние на параметры трения и износа, а также вызывает дополнительные напряжения и деформации в зоне контакта. Система стремится приспособиться к новым условиям, и этот переходный процесс, называемый термической неустойчивостью, сопровождается квазипериодическими изменениями параметров трения.

Термоупругая неустойчивость может рассматриваться как результат взаимного влияния напряженного и термического состояний фрикционного контакта. Этот вид нестабильности сопровождается формированием так называемых «горячих пятен», которые испытывают повышенные тепловые и механические нагрузки. Считается, что термическое расширение и износ являются основными факторами, влияющими на термоупругую неустойчивость. Начальное превышение локального давления над номинальным давлением, вызванное, например, локальным повышением уровня поверхности, интенсифицирует фрикционный нагрев. В результате термического расширения высота таких локальных участков увеличивается, и давление на них повышается. Процесс продолжается до тех пор, пока не начинается изнашивание. Постепенно давление переносится на другие участки, которые начинают более интенсивно нагреваться. Тепловой поток через прежние пятна прекращается, и их материал испытывает термическое сжатие. В этих локальных местах могут появиться впадины, объем которых

равен объему изношенного материала. Такое поведение фрикционного контакта способствует усталостному изнашиванию пары трения.

*Неустойчивость, обусловленная температурной зависимостью коэффициента трения.* Коэффициент трения неметаллических материалов, работающих при низких температурах, практически линейно возрастает с увеличением температуры. Прирост контактной температуры должен сопровождаться увеличением коэффициента трения. При постоянной тангенциальной нагрузке скорость скольжения уменьшается. Однако в силу нелинейной зависимости трения от скорости скольжения относительные изменения коэффициента трения и скорости скольжения различны. В зависимости от соотношения между ними количество теплоты  $frv$ , генерируемой при трении, может как возрасти, так и уменьшиться. В результате, как показал точный анализ этой ситуации, изменение силы трения с температурой в определенных условиях приводит к появлению скачкообразных режимов скольжения. В зависимости от параметров пары трения контактная температура также изменяется квазипериодически.

*Неустойчивость, связанная со сменой режимов трения.* Этот вид неустойчивости близок к описанному выше, однако, относится к тяжелым режимам трения, когда следует ожидать переход от сухого трения к граничному или даже гидродинамическому. Расчеты показывают, что с ростом скорости скольжения (числа Пекле) средняя температура поверхности трения нелинейно возрастает. Это обусловлено как возрастанием генерируемой при трении теплоты, так и уменьшением количества теплоты, диффундирующей в глубь материала. В результате формируется тонкий поверхностный слой, в котором накапливается теплота. Толщина этого слоя (при больших числах Пекле) соизмерима с толщиной шероховатого слоя. При достижении слоем некоторой критической температуры (например, температуры плавления) и резком падении коэффициента трения вплоть до его гидродинамического значения может начаться переходный процесс, протекающий в условиях конкурирующего влияния двух факторов. С одной стороны, с уменьшением трения снижается тепловыделение на контакте, а с другой, с уменьшением тепловыделения возрастают вязкость поверхностного слоя и коэффициент трения (при этом возможен частичный унос теплового слоя, термический износ). Этот процесс удалось описать системой дифференциальных уравнений первой степени, которое, как показал анализ, при определенных условиях имеет периодическое решение.

*Неустойчивость, вызванная трибохимическими реакциями.* Рассматриваемый вид неустойчивости используется для саморегулирования фрикционного поведения трущихся пар. Введение в состав полимерного композита формиатов и оксалатов пластичных металлов, таких как свинец, медь, висмут, позволяет снизить тепловую напряженность узла трения. Это происходит благодаря разложению этих соединений под действием фрикционного нагрева. Разложение происходит с поглощением теплоты и выделением металла в коллоидном состоянии,

который образует на поверхности трения тонкую пленку. Последующий износ этой пленки и повышение контактной температуры приводят к повторению этого процесса до полного исчерпания введенных комплексных соединений.

Все перечисленные примеры неустойчивости показывают, как происходит самоорганизация пары трения. Кроме того, они связаны с различными видами изнашивания, в первую очередь с усталостным изнашиванием, а также с другими видами изнашивания, например с термическим изнашиванием.

### Список литературы

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз, 1963.
2. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение полимеров. — М.: Наука, 1972.
3. Бouden Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир, 1989.
5. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. — М.: Машиностроение, 1978.
6. Комбалов В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. — М.: Наука, 1983.
7. Коровчинский М. В. Основы теории термического контакта при локальном трении // Новое в теории трения. — М.: Наука, 1966. С. 98–145.
8. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. — Киев: Техника, 1970.
9. Максимов И. Л., Рахманов А. Л. Тепловая неустойчивость низкотемпературного трения // Трение и износ. 1987. Т. 8, № 4. С. 655–661.
10. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1982.
11. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977.
12. Михин Н. М. Трение в условиях пластического контакта. — М.: Наука, 1968.
13. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. — М.: Наука, 1977.
14. Мур Д. Основы и применения трибоники. — М.: Мир, 1978.
15. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
16. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001.
17. Щедров В. С. Температура на скользящем контакте // Трение и износ в машинах. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 10. С. 155–296.
18. Blok H. Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oilless lubricating conditions. — Proc. Inst. Mech. Eng. London. 1937. V. 2. P. 222–235.
19. Jaeger J. C. Moving sources of heat and the temperature at sliding surfaces. — Proc. Roy. Soc. NSW. 1942. V. 76. P. 203–224.
20. Ling F. F. Surface mechanics. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1973.

## МЕХАНИКА И ФИЗИКА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Качение определяется как относительное движение двух тел, скорости которых в пределах общей площадки контакта равны по величине и направлению. Существует два типа качения, характеризуемые величиной касательной силы, передаваемой через контакт. Если касательная сила пренебрежимо мала, используют термин *свободное качение*. Во втором случае мы имеем дело с *качением с проскальзыванием* (например, ведущие колеса транспортных средств).

Сопротивление качению называют *трением качения*. Пусть цилиндр радиусом  $R$ , покоящийся на плоской поверхности, нагружен нормальной силой  $P$  и касательной силой  $F$ , приложенными к его центру  $O$ . Для контакта жестких материалов реакции опоры (усилие  $T$  и нормальная реакция  $N$ ) (рис. 5.1, а) таковы, что цилиндр не может находиться в равновесии, так как пара сил  $T$  и  $F$  остается неуравновешенной. В действительности материалы деформируются, а их кон-

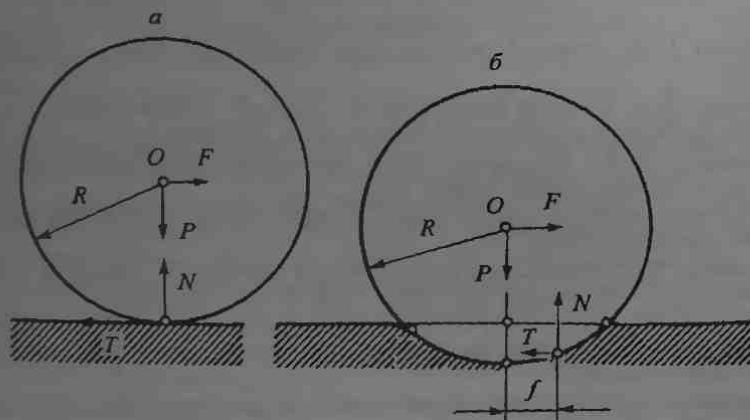


Рис. 5.1. Контакт качения жесткого цилиндра по жесткому полупространству (а), то же для деформируемых тел (б)

такт занимает конечную область. Реакция  $N$  (рис. 5.1, б) смещается в направлении качения на величину  $f$ . Уравнение равновесия таково:  $Nf = FR$ . Так как  $P = N$ , то  $FR = Pf$  и

$$f = \frac{FR}{P} \quad (5.1)$$

Здесь  $f$  — отношение опрокидывающего момента к нормальной нагрузке, называемое *коэффициентом трения качения*. Он имеет размерность длины и равен смещению реакции  $N$  в направлении качения. Наряду с этой характеристикой используется безразмерная величина  $f_r$ , которую называют *коэффициентом сопротивления качению*. Он равен отношению работы, производимой силой тяги  $F$  на единице пути, к нормальной нагрузке. Из определения  $f$ , следует, что

$$f_r = \frac{F}{P}.$$

Эти зависимости были установлены Кулоном, однако последующие эксперименты показали, что между силой трения качения  $F$  и радиусом катящегося тела  $R$  существует более сложная связь.

Коэффициент трения качения значительно меньше, чем коэффициент трения скольжения без смазки и может достигать 0,001. Этот факт хорошо известен с давних времен. Известная мудрость гласит: «круглое — кати». Примерами применения этого явления в технике являются все виды колес и катков, шариковые и роликовые подшипники.

Трение качения представляет собой сложное явление, определяемое многими факторами, среди которых упругий гистерезис, микропрокальзывание, адгезия и другие.

## 5.1. Упругий гистерезис

Когда тело начинает катиться, контртело подвергается периодическому нагружению и разгрузению. В качестве примера рассмотрим качение жесткого цилиндра по упругому полупространству. Элемент объема материала под поверхностью контакта испытывает сжатие в передней части площадки контакта; наибольшее сжатие происходит вдоль оси симметрии (рис. 5.2). На задней поверхности контакта этот элемент упруго восстанавливается. Таким образом, каждый такой элемент испытывает сжатие, во время которого производится работа, и его восстановление сопровождается выделением энергии по мере снижения давления. Если материал идеально упругий, работа деформации в точности будет равна выделившейся энергии, и в результате будет отсутствовать сопротивление качению. Однако реальные материалы характеризуются необратимостью деформаций в пределах цикла нагружения — разгрузки даже ниже предела упругости. Это проявляется в виде диссипации некоторого количества энергии, т. е. запасенная

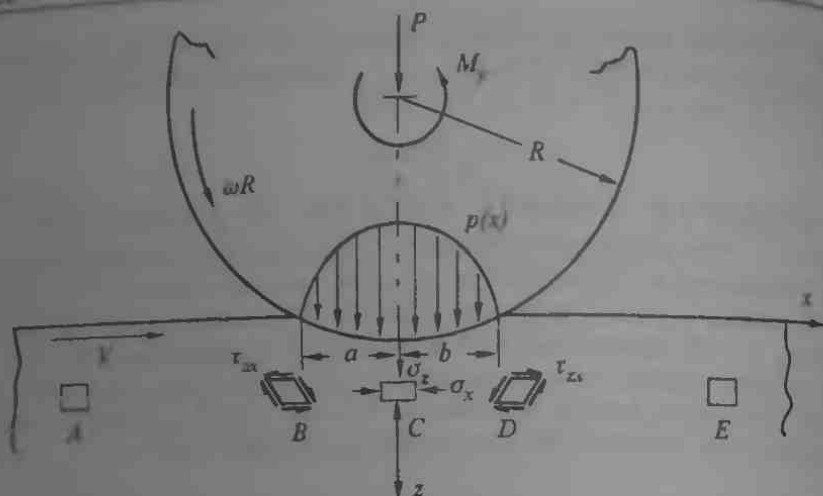


Рис 5.2 Деформация в контакте качения

материалом энергия не полностью восстанавливается. Это явление известно как *упругий гистерезис*. Упругий гистерезис определяется отношением  $\alpha$  энергии, рассеянной за цикл, к максимальной энергии упругой деформации в течение цикла. Эта величина очень мала для

металлов (обычно она не превышает 1%) и может быть значительно большей для полимеров и резин.

Влияние гистерезиса усиливается с ростом скорости качения, нагрузки (контактного напряжения) и объема упруго деформированного материала. Последнее обстоятельство проявляется даже при очень малых скоростях качения. Кроме того, гистерезис сопровождается выделением теплоты, что существенно влияет на износ.

Обычно работа, затрачиваемая на упругое деформирование поверхности, по которой катится цилиндр или шар, оценивается следующим образом. В качестве

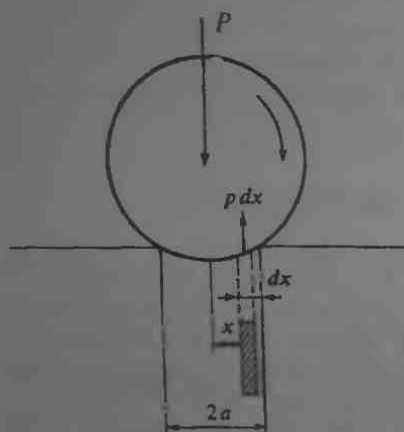


Рис 5.3 Контакт качения жесткого цилиндра по упругому телу

примера рассмотрим качение жесткого цилиндра радиуса  $R$  по плоскоформированности. Под действием нагрузки  $P$  (в данном случае погонной нагрузки) формируется полоска контакта полушириной  $a$ , давление поперек которой описывается соотношением (3.22а) (рис 5.3). Здесь заштрихован-

ная полоска единичной длины и ширины  $dx$  отстоит от оси симметрии на расстоянии  $x$ . В этом случае работа, затрачиваемая на дуге в 1 радиан на единицу пути, равна  $M/R$ , где момент  $M$  относительно центра следа для передней волны контакта вычисляется по формуле

$$M = \int_0^a xp(x)dx = \frac{2Pa}{3\pi}.$$

Тогда общая работа на единицу пути качения равна

$$\Phi = \frac{M}{R} = \frac{2}{3\pi} \frac{Pa}{R};$$

учитывая соотношение между погонной нагрузкой и полушириной полочки контакта (уравнение (3.30)) получаем следующее соотношение:

$$\Phi = \frac{P^{3/2}}{R^{1/2}} \left( \frac{16}{9\pi^3} \right)^{1/2} \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right)^{1/2},$$

где  $E$ ,  $\nu$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала полуплоскости.

Аналогичные соотношения предложены для некоторых других видов контакта:

— контакт между шаром и плоскостью:

$$\Phi = \frac{3}{16} \frac{Pa}{R} = \frac{3}{16} \left( \frac{3}{4} \right)^{1/3} \frac{P^{4/3}}{R^{2/3}} \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right)^{1/3},$$

где  $a$  — радиус площадки контакта;

— контакт между шаром и прямым желобом:

$$\Phi = \frac{3}{16} \frac{Pb}{R},$$

где  $b$  — малая полуось эллиптической площадки контакта.

Если  $\Phi$  — упругая энергия, затрачиваемая на единице пути качения, то потеря энергии на единицу пути качения равна сопротивлению качению и может быть определена как произведение  $\Phi$  и коэффициента гистерезисных потерь  $\alpha_f$ :

$$F = \alpha_f \Phi.$$

## 5.2. Микропроскальзывание

Другая составляющая сопротивления качению обусловлена проскальзыванием (трением скольжения) на границе раздела тел качения.

Доказано, что при качении цилиндров с различными упругими характеристиками имеют место два участка сцепления, разделяющие

три области проскальзывания в разных направлениях. В этой ситуации качение не является обратимым процессом, а энергия, рассеиваемая на участках проскальзывания, вызывает момент сопротивления качению  $M$  (рис. 5.4). Результаты расчета этого момента представлены

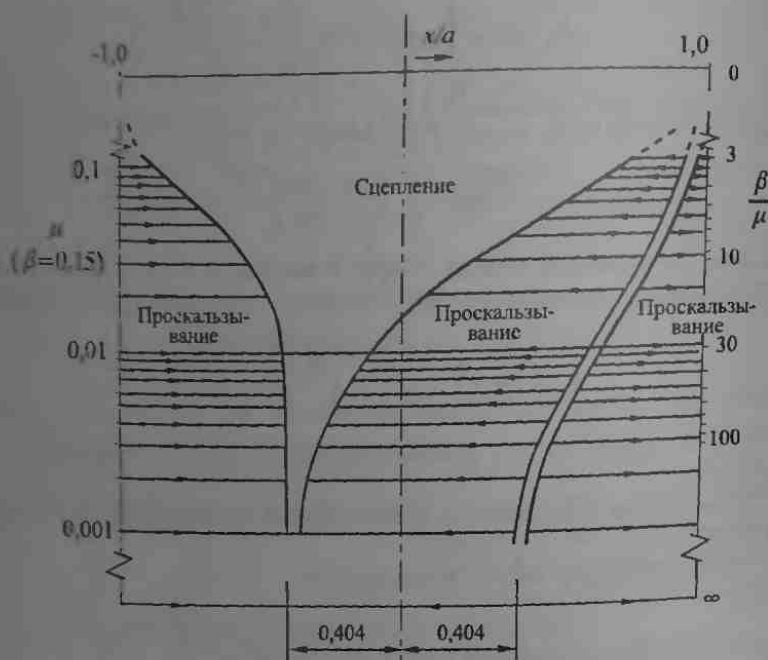


Рис. 5.4. Участки проскальзывания при качении цилиндров с различными упругими характеристиками (здесь  $\mu$  — коэффициент предельного трения, а  $\beta$  — комплексная упругая постоянная)

на рис. 5.5. Видно, что сопротивление качению низкое как при малых, так и больших значениях предельного коэффициента трения  $\mu$  (в последнем случае микропроскальзывание практически отсутствует). Следствием такого поведения является наличие максимума на кривой сопротивления качению. Этот максимум достигается при  $\mu/\beta \approx 0,2$ .

Обычно рассматривают два вида проскальзывания: проскальзывание по Рейнольдсу и по Хизкоуту (дифференциальное проскальзывание).

При качении жесткого цилиндра по жесткому полупространству путь, проходимый его центром за один оборот, равен длине развертки цилиндра. Однако в действительности материалы деформируются, а их контакт занимает некоторую область. Это обстоятельство важно для процесса качения. Например, пусть полупространство выполнено из резины. Вследствие давления на боковой поверхности цилиндра резина растягивается, а после разгрузки восстанавливает свое исходное со-



стояние. То есть, цилиндр движется по растянутой поверхности и, как следствие, расстояние, равное длине окружности, несколько превышает истинный путь. Разница в расстояниях может быть скомпенсирована относительным проскальзыванием контактирующих поверхностей. Такой процесс межповерхностного проскальзывания называют *проскальзыванием по Рейнольдсу*.

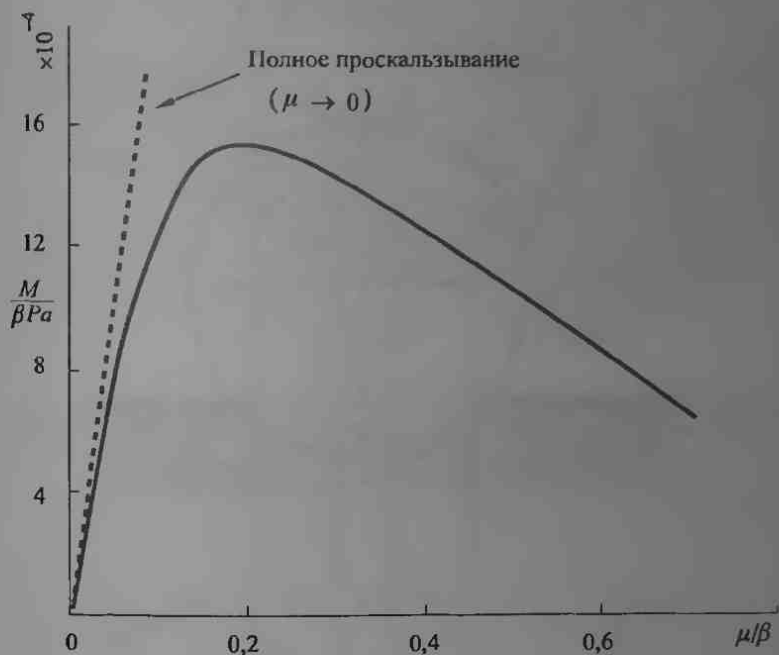


Рис. 5.5. Сопротивление качению цилиндров с различными упругими характеристиками

В общем случае проскальзывание по Рейнольдсу возникает при совместном свободном качении любых деформируемых тел. Оно зависит от относительной податливости контактирующих материалов, однако даже для материалов с одинаковыми упругими постоянными может наблюдаться такое проскальзывание, если тела имеют различную форму.

Рассмотрим качение шара по желобу (рис. 5.6 и 5.7). В этом случае область контакта имеет кривизну в плоскости, перпендикулярной направлению качения. Точки контакта находятся на различных расстояниях от оси вращения, поэтому пути, проходимые за один оборот шара в сечениях  $aa'$  и  $cc'$ , различны. Следовательно, некоторое малое число точек контакта испытывают чистое качение, а остальные точки скользят в направлении качения с различными скоростями, перемещаясь

назад в зоне I и вперед в зоне II. Чистое качение имеет место только вдоль нейтральных линий ( $bb'$  и  $dd'$ ), положение которых зависит от условий равновесия: сумма сил трения скольжения и внешних касательных сил, действующих на тело качения, должна равняться нулю. Такое проскальзывание называют *проскальзыванием по Хизкоуту*.

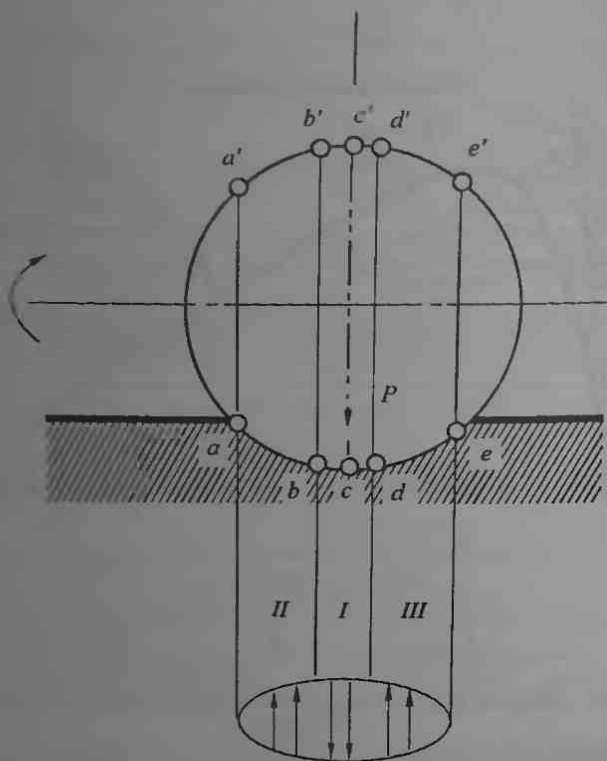


Рис. 5.6. Качение сферы по желобу (проскальзывание по Хизкоуту)

Проскальзывание играет важную роль для обеспечения устойчивости железнодорожного состава, как это следует из рис. 5.8. Пусть точка контакта считается покоящейся, тогда рельс движется относительно нее со скоростью  $V$ . Продольное проскальзывание  $\xi_T$  возникает, когда два колеса пары имеют различные окружные скорости из-за конического профиля колеса (т.е. на повороте). Такой же эффект наблюдается при ускорении или торможении колеса.

Поперечное проскальзывание наблюдается в ситуациях, когда плоскость движущегося колеса перекашивается на малый угол относительно оси рельса (рис. 5.6).

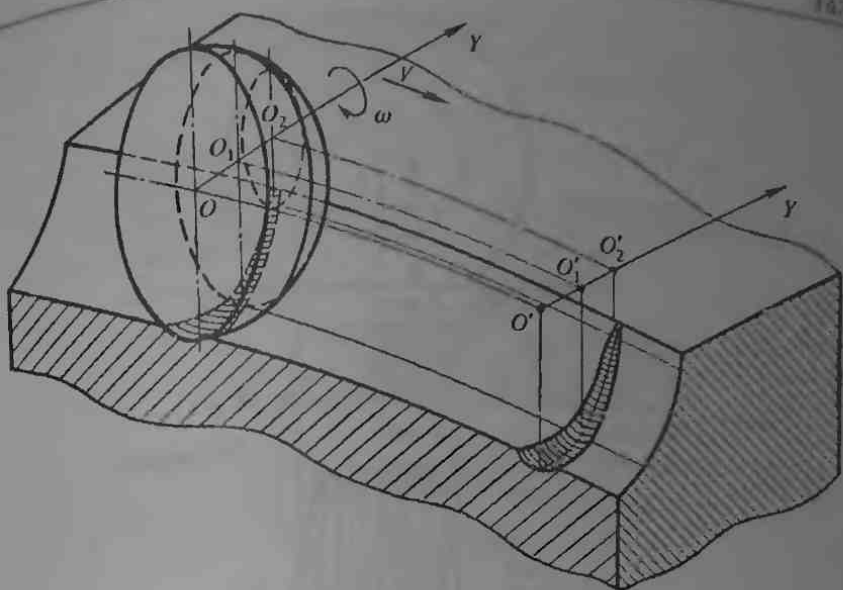


Рис. 5.7. Проскальзывание по Хизкоуту. Сечение  $O_1$  катится без проскальзывания; сечения  $O$  и  $O_2$  проскальзывают в противоположных направлениях.

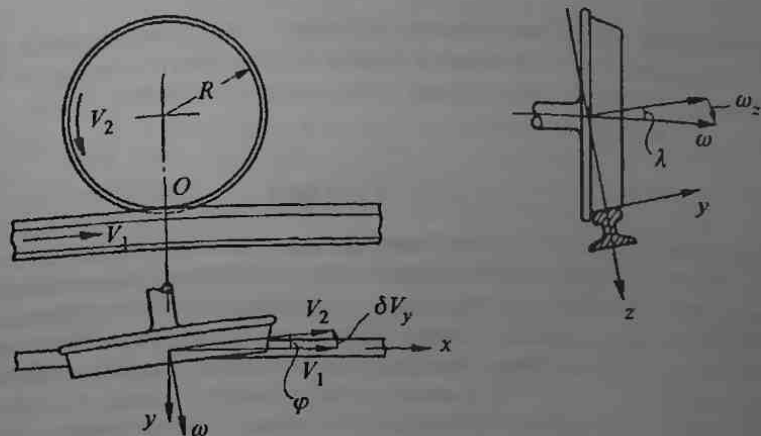


Рис. 5.8. Качение с проскальзыванием колеса по рельсу. На рисунке показано продольное относительное проскальзывание  $\xi_x = (V_2 - V_1)/V_1$ , поперечное относительное проскальзывание  $\xi_y = \delta V_y/V_1$  и параметр верчения  $\psi = \omega a b^{1/2}/V_1$

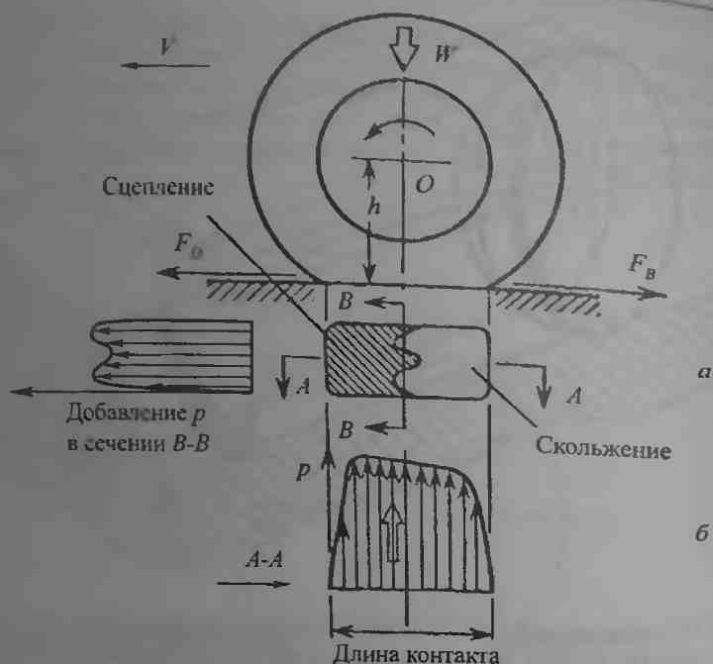


Рис. 5.9. Пятно касания (а) и распределение давления (в вертикальной плоскости) (б) при качении шины

Пневматическая шина может совершать либо качение, либо скольжение. Скольжение катящейся шины отсутствует в передней части пятна, но возникает скольжение в его задней части (рис. 5.9).

### 5.3. Адгезия

Некоторую роль в сопротивлении качению играет адгезия. Процесс качения можно рассматривать как последовательное обновление контакта в направлении движения, сопровождающееся образованием и разрывом адгезионных связей. Хотя адгезия определяется теми же силами, что и при трении скольжения, эти силы имеют особенности, относящиеся к кинематике качения. Здесь следует упомянуть две особенности, относящиеся к направлению и последовательности образования и разрыва адгезионных связей. Во-первых, связи образуются и разрушаются в направлении, нормальном к границе раздела, а не в касательном, как это происходит при скольжении. В результате этого рост площадок сцепления на поверхности раздела при качении весьма маловероятен, а связи разрушаются вследствие растяжения, а не сдви-

га, как в скользящем контакте. Во-вторых, при качении адгезионные связи разрушаются постепенно и на меньшей доле площади контакта (одна за другой) в противоположность одновременному разрыву по всей площади, происходящему при скольжении. Оба эти фактора способствуют снижению затрачиваемой энергии и обуславливают низкое трение при качении.

Адгезия при качении может также вызываться действием электростатических сил (рис. 5.10).

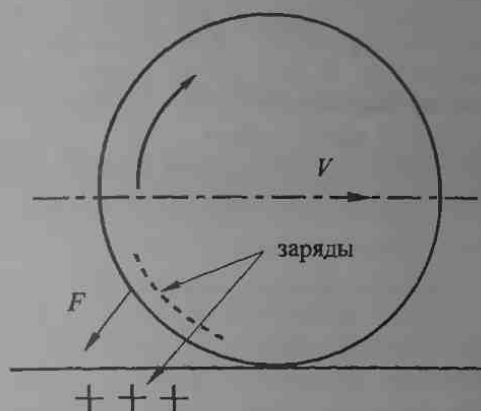


Рис. 5.10. Разделение зарядов при качении цилиндра по плоскости

Согласно теории Дерягина, при вступлении в контакт двух разных тел их поверхности приобретают электрические заряды разного знака, т.е. формируется двойной электрический слой. Для металлов эти заряды сосредоточены на «истинной» поверхности толщиной порядка монослоя, а для диэлектриков и полупроводников эта область представляет собой слой, толщина которого примерно равна дебаевской длине экранирования. Когда поверхности начинают удаляться друг от друга, возникает дополнительная электростатическая сила  $F$ , препятствующая дальнейшему увеличению зазора между сопрягаемыми поверхностями и увеличивающая момент трения. Эта сила действует до тех пор, пока не исчезнут заряды вследствие электропроводности поверхностей либо в результате разряда в зазоре. Разделение зарядов и электризация при качении часто встречаются на практике, особенно при контакте диэлектрических материалов.

Таким образом, не вызывает сомнений протекание поверхностных явлений при качении, однако их влияние на общее сопротивление качению определяется многочисленными факторами, включающими способность контактирующих материалов к образованию адгезионных соединений и условия контакта (давление, качество поверхности, объемная и локальная температуры и т.д.).

### 5.4. Пластическая деформация

Некоторая часть энергии, расходуемой на качение, идет на пластическую деформацию материалов контактирующих тел. Течение сначала возникает в точке под поверхностью трения (более подробно см. гл. 3). С ростом трения точка начала течения приближается к поверхности. Большинство узлов машин с контактом качения испытывают циклическое нагружение. Если напряжения не превышают предел упругости, то контакт качения подчиняется теории Герца, в противном случае происходит пластическое течение и возникают остаточные напряжения. При последующем нагружении на материал действуют контактные и остаточные напряжения. В результате может возникнуть явление, называемое *приспособляемостью*, т. е. устойчивое состояние материала, при котором имеет место только упругая деформация. Основная роль здесь принадлежит остаточным напряжениям, которые выполняют защитный характер и обеспечивают последующее циклическое упругое деформирование.

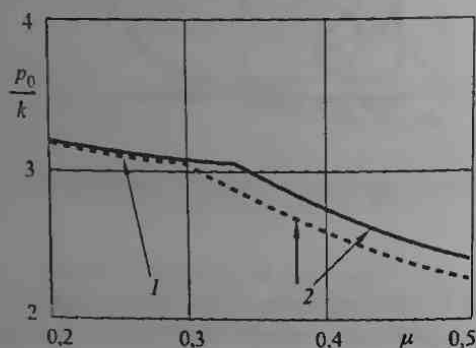


Рис. 5.11. Влияние частичного проскальзывания на начало течения и наступление приспособляемости (тангенциальная сила —  $0,2P$ ): 1 — под поверхностью; 2 — на поверхности

С ростом тангенциальной силы разница между нагрузкой, вызывающей начало течения, и нагрузкой, при которой достигается предел приспособляемости, уменьшается. На рис. 5.11 показано, как частичное проскальзывание влияет на начало течения (штриховая линия) и наступление приспособляемости (сплошная линия). Последняя величина рассчитана на основе критерия текучести Треска.

При изменении условий качения предел приспособляемости повышается и процесс приспособляемости начинается заново.

Благодаря наличию шероховатости на сопрягаемых поверхностях микропластическая деформация также происходит ниже предела приспособляемости, поскольку невозможно получить идеально подогнанные шероховатые поверхности при повторном качении.

Кроме того, надо иметь в виду следующие два факта.

Во-первых, возможно образование желоба, что увеличивает площадь контакта и уменьшает контактное давление. При дальнейшем качении ширина и глубина желоба стабилизируются, свидетельствуя о наступлении чисто упругой деформации. Однако это не гарантирует достижения приспособляемости, так как может иметь место пластический сдвиг, параллельный поверхности (ортогональный сдвиг).

Во-вторых, следует учитывать деформационное упрочнение, в результате чего нагрузка, первоначально превышающая предел приспособляемости, оказывается меньше этого предела.

### 5.5. Общее сопротивление качению

Таким образом, на трение качения влияет целый ряд факторов. Наиболее важны из них проскальзывание, упругий гистерезис, адгезия и пластическая деформация. Кроме того, следует учитывать влияние шероховатости поверхностей, смазочного материала и т. д.

Обычно сопротивление качению есть результат влияния нескольких факторов. Например, при свободном качении стального шарика по относительно гладкой несмазанной стальной плоскости адгезия и шероховатость имеют большое значение, а проскальзывание по Хизкоуту и другие факторы играют второстепенную роль. Если заменить плоскость канавкой с радиусом, близким к радиусу шарика, то трение качения при высокой нагрузке определяется гистерезисными потерями и проскальзыванием по Хизкоуту.

На практике необходимо иметь в виду следующее. Потери, связанные с микропроскальзыванием (по Рейнольдсу и Хизкоуту), характерны для большинства машин и приборов. Эти потери заметно возрастают при увеличении скорости и приводят к увеличению износа и тепловыделению. В свою очередь последнее создает неблагоприятные температурные условия для узлов машин и ограничивает скорость. Поэтому, несмотря на относительно малое сопротивление качению, вызванное микропроскальзыванием, оно может влиять на рабочие характеристики машин.

Составляющая, связанная с упругим гистерезисом, относительно мала для материалов с высокой прочностью и твердостью, например для закаленной стали, но становится существенной при увеличении нагрузки и скорости скольжения, особенно для полимеров и других материалов с малым модулем упругости. Этот эффект вызывает тепловыделение, как и при микропроскальзывании.

В некоторых случаях следует учитывать адгезию между телами качения или между телом качения и смазкой или оксидными пленками. Это взаимодействие определяется, главным образом, физическими свойствами контактирующих материалов, поведением промежуточных веществ, фактической площадью контакта и, в меньшей степени, скоростью качения. Эта составляющая, зависящая от площади факти-

ческого контакта, очень чувствительна к изменениям шероховатости и размеров площади контакта. Нагрузка влияет на адгезию через фактическую площадь контакта. Если необходимо гарантировать минимальное сопротивление качению, должно быть внимание уделено электростатическому взаимодействию, увеличивающему адгезию.

При наличии масла сопротивление качению и потери энергии определяются работой, затрачиваемой на вязкое сопротивление масла и формирование масляного клина. Этот клин в контакте качения обладает некоторой несущей способностью и при высокой нагрузке разрушается. Таким образом, затрачиваемая работа дает вклад в сопротивление качению. При наличии клина его реакция имеет составляющую, которая определяет момент, противоположный направлению качения, что также приводит к росту сопротивления качению.

Из рассмотренного ясно, что сопротивление качению, потери энергии, тепловыделение и температурный режим узла трения могут определяться многими факторами. Проблема заключается в правильном определении природы сил сопротивления качению и в предотвращении нежелательных потерь при обеспечении работоспособности машины.

В заключение отметим интересный факт кажущегося отсутствия в живой природе двигательных органов, использующих механизм качения. Однако это не совсем так, и представляет интерес идея Силина об аналогии процессов ходьбы и качения. В основе этой аналогии лежит простое наблюдение: если в колесе со спицами отбросить обод, то движение полученного тела формально является скольжением, но тело катится как обычное колесо. Недаром про кувыркающегося акробата говорят, что он «ходит колесом», т. е. его можно уподобить колесу без обода и с четырьмя спицами. Ходьба человека отличается не так уж принципиально. Правда, в этом случае мы имеем две спицы. Когда одна нога переносится вперед, то мысленно можно представить, что вторая нога делает полный оборот и реализует качение. Такое действие не является экономичным ни кинематически, ни энергетически. Поэтому природа реализовала другой способ, а именно возможность перемещения ног («спиц») друг относительно друга в определенной последовательности. Фактически, дело опять сводится к качению, правда, с дополнительными потерями на перемещение центра тяжести. Эти потери минимизируют легкоатлеты в спортивной ходьбе, стремясь удерживать центр тяжести на одном уровне и экономить силы. Еще более наглядно используют данный метод движения такие насекомые, как сороконожки.

Как показывает последний пример, да и весь предыдущий материал, физическая сущность качения требует глубоких дополнительных исследований как теоретических, так и экспериментальных. Поскольку потери на качение очень малы, то для надежного их определения требуется разработка специальных и тонких методов измерений, а в теоретическом плане нужны новые подходы, позволяющие оценить соотношение источников потерь энергии при качении в различных условиях.



## Список литературы

1. Бюден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968.
2. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука, 2001.
3. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. — М.: Наука, 1973.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир, 1989.
5. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1982.
6. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977.
7. Мур Д. Основы и применения трибоники. — М.: Мир, 1978.
8. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А. В. Челинадзе. — М.: Машиностроение, 2001.
10. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. — М.: Машиностроение, 1969.
11. Силин А. А. Трение и его роль в развитии техники. — М.: Наука, 1976.

## Глава 6

# ИЗНАШИВАНИЕ

*Изнашивание* определяется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела (ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка». Термины и определения).

*Износ* — это результат изнашивания, выражаемый в установленных единицах (длины, объема или массы). Процесс изнашивания часто описывают его интенсивностью. Не существует единого стандарта для определения интенсивности изнашивания. Используемые единицы зависят от вида изнашивания и природы трибосистемы, в которой оно происходит. *Интенсивность изнашивания* может быть определена как, например: 1) объем материала, удаленный за единицу времени, с единичного пути трения, за один оборот детали или за одно колебание тела; 2) потеря объема на единицу нормальной силы при единичном пути скольжения ( $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ), которую иногда называют *коэффициентом износа*; 3) потеря массы за единицу времени; 4) изменение определенного размера за единицу времени; 5) относительное изменение размера или объема по отношению к тем же изменениям в эталонном материале.

Величина, обратная интенсивности изнашивания, получила название *износостойкости*. Она является мерой сопротивления тела изнашиванию. Иногда рассматривается относительная износостойкость с использованием произвольных стандартов.

### 6.1. Основные механизмы изнашивания

Можно выделить три стадии изнашивания: взаимодействие поверхностей, изменения в поверхностных слоях и повреждение поверхностей. Все эти стадии взаимосвязаны и протекают на единичных пятнах контакта.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным (рис. 6.1). Механическое взаимодействие включает внедрение

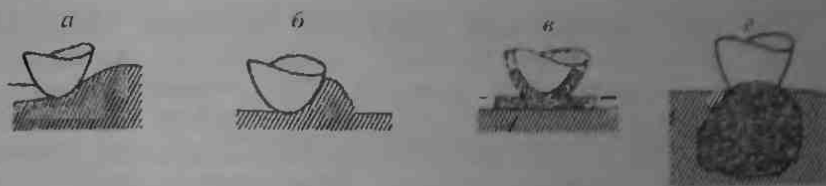


Рис. 6.1. Механическое и молекулярное взаимодействие поверхностей, приводящее к образованию частиц износа: а) внедрение неровностей; б) заделывание неровностей; в) адгезия поверхностных пленок; г) схватывание

и зацепление неровностей. При относительном перемещении поверхностей происходит упругое и пластическое отеснение материала внедрившимися неровностями (рис. 6.1, а). Зацепление неровностей приводит к их взаимному деформированию, а в предельном случае более мягкая неровность может даже срезаться (рис. 6.1, б). Молекулярное взаимодействие проявляется в адгезии пленок, покрывающих контактирующие поверхности (рис. 6.1, в), а в отдельных случаях прочность адгезионных связей столь велика, что их разрушение сопровождается глубинным вырыванием материала (рис. 6.1, г).

Изменения в поверхностных слоях возникают под действием механических напряжений, температуры и химических реакций.

Нормальные напряжения при пластическом контакте неровностей близки к твердости при индентировании более мягкого материала. Однако если поверхности очень гладкие, конформные (совпадающие по форме) или легко нагруженные, то контакт может быть упругим. Таким образом, приложенная к системе нагрузка определяет переход к пластическому течению в контакте неровностей: при достаточно малой нагрузке или конформных поверхностях изнашивание будет протекать очень медленно вследствие упругого деформирования.

Величина и положение максимума тангенциальных напряжений зависят от коэффициента трения  $f$  (см. гл. 3). При  $f$ , меньшем  $\approx 0.3$ , максимальное напряжение сдвига и связанное с ним пластическое течение находятся под поверхностью, а пластическая деформация, накопленная при каждом проходе пути трения, мала. Такие условия характерны для систем, работающих со смазочным материалом либо имеющих защитный слой. При  $f$ , больших  $\approx 0.3$ , максимальное напряжение сдвига находится на поверхности и возможно накопление значительной пластической деформации. Имеются различные механизмы изнашивания, в которых доминирует пластическое течение, включая адгезию и срез неровностей или зарождение и рост подповерхностных трещин, приводящих к образованию пластинчатых частиц износа. Другие механизмы включают развитие трещин усталости. При относительно низких скоростях скольжения и высоких нагрузках преобладают механизмы, обусловленные пластичностью: они приводят к жесткому износу.

Вследствие несовершенной структуры материала циклическое упругое деформирование вызывает выкрашивание поверхностей качения при определенных условиях. Пластическая деформация изменяет структуру поверхностного слоя. Возрастает концентрация подповерхностных и приповерхностных дислокаций, что приводит к упрочнению поверхностного слоя. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не произойдет температурная рекристаллизация, резко уменьшится концентрация дислокаций, способствуя отпуску поверхностного слоя. Наклеп и отпуск многократно повторяются, инициируя процессы изнашивания.

Локальная температура на границе контакта может значительно превышать температуру окружающей среды и также может быть повышенной в контактах неровностей за счет кратковременных «вспышек» или «горячих пятен». Прирост температуры вспышки может превышать  $1000\text{ K}$ , а увеличение стационарной температуры на границе раздела за счет диссипации работы трения может составлять более ста градусов. Такие высокотемпературные переходы могут привести к локальным фазовым превращениям: например, к образованию аустенита, который затем закаливается до мартенсита, в углеродистых и высоколегированных сталях. Эти переходы также ответственны за быстрое окисление поверхности и другие реакции между поверхностью и окружающей средой.

Оксидные пленки, образуемые на воздухе практически всеми металлами, предохраняют поверхности от схватывания. Металлические поверхности, взаимодействующие с содержащимися в смазке поверхностно-активными веществами, покрываются пленками, действующими подобно пленкам окислов.

Перечисленные выше механизмы и многие другие, не приведенные здесь, являются основой процесса изнашивания. Однако большое число механизмов и их взаимосвязь не позволяют четко классифицировать процессы изнашивания. Бесспорно лишь, что двойственность природы трения играет решающую роль в процессах изнашивания. Поэтому его виды могут быть разделены по тому вкладу, который вносят деформация и адгезия. При этом адгезионное и усталостное изнашивание занимают крайние положения, поскольку усталость обусловлена в первую очередь деформационными процессами, а адгезия играет решающую роль в адгезионном изнашивании. Естественно, что такой подход к описанию процессов трения является очень упрощенным. Фрикционное взаимодействие всегда происходит в определенной среде, которая оказывает значительное влияние на трибологические процессы, например посредством химических реакций. Такие реакции изменяют скорость деформирования и прочность адгезионных связей, но и в этой ситуации адгезия и деформация продолжают играть ведущую роль. Эти соображения легли в основу классификации видов изнашивания, представленных в табл. 6.1. Здесь следует отметить, что не только классификации, предлагаемые разными авторами, часто существенно

Таблица 6.1 Основные виды изнашивания согласно ГОСТу 27674-88

Вид изнашивания	Подвид изнашивания	Определение
Механическое		Изнашивание в результате механических воздействий
	Абразивное	Изнашивание в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц
	Гидроабразивное (газоабразивное)	Абразивное изнашивание в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа)
	Гидроэрозийное (газоэрозийное)	Изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости (газа)
	Усталостное	Изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрорегионов поверхностного слоя
	Кавитационное	Изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое давление или высокую температуру
	При фреттинге	Изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении
Адгезионное*	При заедании	Изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность
Коррозионно-механическое		Изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой
	Электроэрозионное	Эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока
Химическое*	Окислительное	Изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой
	При фреттинг-коррозии	Изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях

Примечание. Звездочкой (\*) отмечены термины, не вошедшие в стандарт.

разнятся, но и наименования и даже определения отдельных видов изнашивания могут не совпадать, особенно если сравнивать отечественную и англоязычную литературу. Поэтому ниже при рассмотрении наиболее распространенных видов изнашивания (абразивное, адгезионное, усталостное, коррозионное, эрозионное, кавитационное и фреттинг) предлагается некий терминологический компромисс.

## 6.2. Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание является одной из наиболее распространенных форм изнашивания. Можно привести много примеров абразивного изнашивания. Это основной вид повреждения машин в горной промышленности и сельском хозяйстве. Однако и в повседневной жизни мы сталкиваемся с абразивным изнашиванием, например обуви.

Ключевым моментом в абразивном изнашивании является его связь с резанием или пропахиванием поверхности твердыми частицами или неровностями. Эти режущие элементы представляют собой более твердые выступы контртела или внедренные в него частицы абразива (рис. 6.2, а), или же это свободные частицы абразива, попавшие извне в зону контакта, где они могут скользить и перекатываться (рис. 6.2, б). В первом случае происходит изнашивание закрепленными частицами,

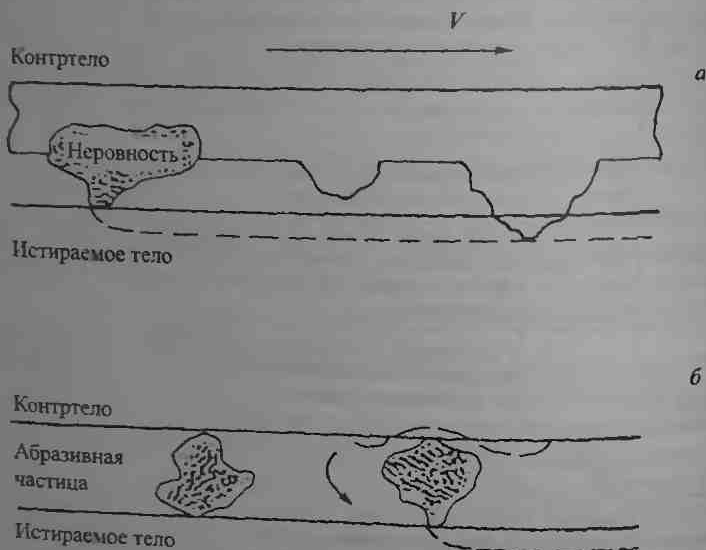


Рис. 6.2. Изнашивание закрепленным (а) и свободным (б) абразивом

во втором — изнашивание свободным абразивом (рис. 6.2). В англоязычной литературе иногда абразивное изнашивание классифицируют по силам, действующим на абразивный материал. Если силы достаточны для разрушения абразивных частиц, а рабочая поверхность подвергается интенсивному резанию и деформированию, то это изнашивание происходит при высоких напряжениях. Такая форма абразивного изнашивания встречается, например, в тяжело нагруженных подшипниках, в которых твердые частицы захвачены между сопрягаемыми поверхностями. Особый случай такого изнашивания представляет изнашивание крупным

абразивом. Этот термин применяют для обозначения изнашивания крупными твердыми агрегатами, удаляющими большие фрагменты материала с изнашиваемой поверхности. Однако случаи, в которых можно применить этот термин, неоднозначны. При относительно малом давлении на абразивные частицы или неровности частицы не разрушаются и происходит изнашивание при малых напряжениях.

При абразивном изнашивании на изношенной поверхности наблюдаются царапины, следы резания и схватывания, а частицы износа часто принимают форму тонкой стружки, подобно той, что образуется при механической обработке, но только значительно более мелкой. Большинство моделей абразивного изнашивания включают геометрическое описание неровностей, так что интенсивность изнашивания оказывается сильно зависимой от формы и угла при вершине движущихся по поверхности абразивных частиц. Многие материалы оказывают абразивное действие, а природа абразивного изнашивания в конкретной трибосистеме определяется, во многом, способом вхождения абразивных частиц в трибосистему: присутствуют ли они в исходной микроструктуре в качестве твердых фаз, попадают в систему как внешние загрязнения или являются частицами износа, образующимися при изнашивании контактирующих поверхностей.

На интенсивность изнашивания влияют твердость, форма и размеры абразивных частиц. Пусть  $H_a$  и  $H_n$  — твердости абразива и поверхности. Анализ пластической деформации в контакте между абразивом и поверхностью показывает, что существует определенное соотношение твердостей, которое является общепринятой границей между двумя видами абразивного изнашивания. При  $H_a/H_n < 1,2$  протекает *мягкое абразивное изнашивание*, в противоположность *жесткому*, имеющему место при  $H_a/H_n > 1,2$ . Интенсивность мягкого изнашивания меньше, чем жесткого, однако первое более чувствительно к величине отношения  $H_a/H_n$ . При жестком абразивном изнашивании точное значение твердости абразива не играет существенной роли.

Обширные исследования выполнены по изучению влияния размера абразива. По существу, при малом размере частиц часто наблюдается, что незначительное увеличение размера приводит к относительно существенному росту интенсивности изнашивания. Напротив, при большом размере абразивных частиц зависимость интенсивности изнашивания от их размера менее выражена. Измерить размер абразивных частиц просто, так как большинство не имеют идеальной сферической формы. Поэтому следует более четко определить, что подразумевается под «размером». Часто размер определяют путем просеивания, однако его также можно определить, используя методы микроскопии. Например, размером можно считать размер ячейки сита, через которое проходят частицы, или средний диаметр частицы, полученный при помощи компьютерного анализа изображений.

Несмотря на то, что исследователи, работающие над изучением абразивного изнашивания, признают важность формы частиц, а стан-

вартных испытаниях на износ применяется относительно мало методов для измерения и определения количественных показателей формы. В то же время, в зависимости от формы частиц интенсивность изнашивания может изменяться в десять и более раз.

Основные механизмы абразивного изнашивания напрямую связаны с пластическим течением и хрупким разрушением. Пластическое деформирование рабочей поверхности более твердыми частицами абразива приводит к образованию канавок, из которых удаляется материал. Пусть абразивные частицы моделируются пирамидами или конусами,

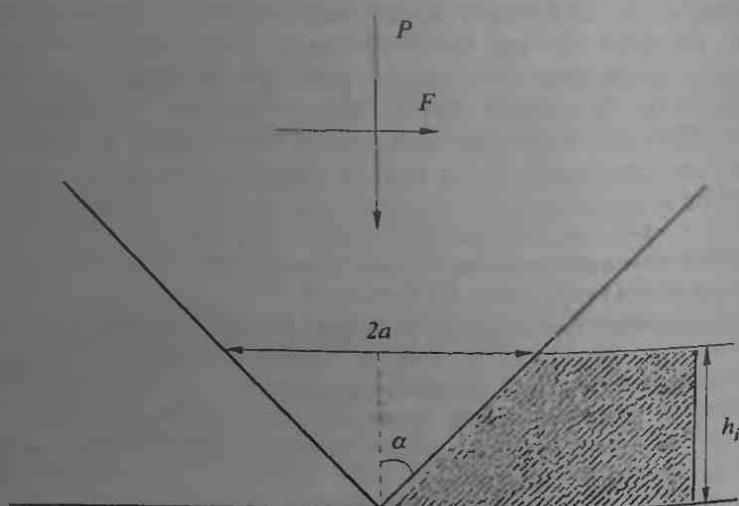


Рис. 6.3. Контакт конической абразивной частицы с поверхностью

вдавляемыми в поверхность на глубину  $h_i$  (рис. 6.3). При достаточно большом пути трения объемный износ на единицу пути скольжения  $I$  будет пропорционален сумме квадратов глубин внедрения:

$$I \sim \sum h_i^2.$$

Внешняя нагрузка  $P$  распределяется между всеми частицами так, что  $P = \sum P_i$ . Тогда в условиях пластического деформирования:

$$P_i = BH_i^2,$$

где  $H$  — твердость изнашиваемого материала,  $B$  — коэффициент пропорциональности.



Суммирование этих равенств дает

$$P = \sum P_i = VH \sum h_i^2 \sim H^2,$$

или

$$I = K \frac{P}{H}, \quad (6.1)$$

где  $K$  — безразмерный коэффициент износа, являющийся мерой «жесткости» процесса изнашивания. Характерные значения  $K$  при изнашивании металлов закрепленным абразивом находятся в пределах  $5 \cdot 10^{-3} - 50 \cdot 10^{-3}$ . При изнашивании свободным абразивом  $K$  меньше, обычно  $0,5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ .

Уравнение (6.1) является основным соотношением для абразивного изнашивания. Оно показывает, что относительная износостойкость (величина, обратная интенсивности изнашивания) прямо пропорциональна твердости при индентировании. Для чистых металлов и неметаллических твердых материалов этот вывод был подтвержден экспериментами Хрущева и Бабичева (рис. 6.4). Следует отметить, что данные для сталей лежат на прямой, не проходящей через начало координат, как это следовало бы ожидать из уравнения (6.1). Это можно объяснить тем, что коэффициент износа чувствителен к структуре стали.

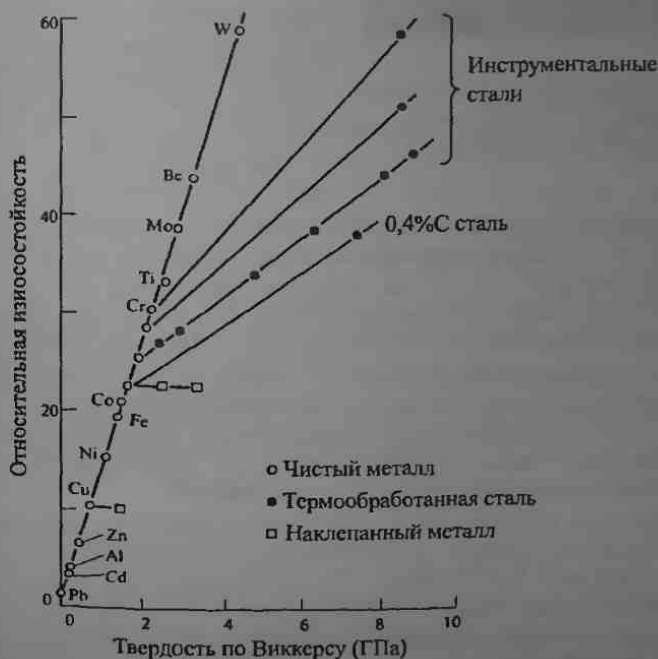


Рис. 6.4. Относительная износостойкость чистых металлов и термообработанных и наклепанных сталей в условиях изнашивания закрепленными частицами как функция твердости при индентировании

Изменением условий упрочнения и отпуска можно получить различные структуры с одинаковой твердостью. Они обладают различной износостойкостью. Кроме того, само по себе абразивное действие изменяет состояние материала за счет действия больших напряжений сдвига, температуры и скорости деформации.

Как было отмечено выше, абразивное изнашивание с пластическим течением сопровождается образованием канавок. Различают два вида деформации при действии абразивных частиц на пластичный материал. Первый вид — это пластическое оттеснение материала с образованием канавок, часто называемое пропахиванием. В этом случае перед частицей перемещается валик, а материал постоянно выдавливается в стороны, образуя вблизи пропахиваемой канавки гребни (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Поверхность после изнашивания закрепленным абразивом, на которой видны канавки

Удаление материала с поверхности не происходит. Второй вид деформации называют резанием, так как этот процесс сходен с тем, что происходит при механической обработке материала. Весь перемещаемый частицей материал удаляется в виде стружки.

При изнашивании закрепленным абразивом некоторые неровности оказывают пропахивающее действие, остальные — режущее, что зависит от двух определяющих факторов: угла атаки частицы и сдвиговой прочности на границе раздела, выражаемой как отношение

напряжения сдвига на границе раздела к пределу текучести на сдвиг пластически деформированного материала. Существует критическое значение угла атаки, при котором происходит переход от пропахивания к резанию. Значение критического угла зависит только от прочности на срез на границе раздела для абсолютно пластичного материала, а для реального материала — также от скорости деформационного упрочнения и упругих свойств материала, а именно, от отношения модуля Юнга к поверхностной твердости. Чем больше величина этого отношения, тем больше критический угол атаки. Для большинства металлов это значение лежит в пределах  $30-90^\circ$ .

Абразивное изнашивание хрупких материалов, например керамики, протекает за счет микрорастрескивания, а пластическое течение дает пренебрежимо малый вклад. В таких материалах растягивающие напряжения, возникающие при внедрении частиц абразива, вызывают распространение центральных и боковых открытых трещин. Материал удаляется благодаря хрупкому разрушению, когда близлежащие к канавкам боковые трещины пересекаются с трещинами от других канавок или выходят на поверхность.

В заключение следует отметить, что абразивное изнашивание не всегда имеет отрицательные последствия. Правильное использование абразивного действия крайне важно в процессах шлифования, полирования и доводки, при полировке оптических деталей и для резания всех видов материалов от блоков карьерных пород до компьютерных микропроцессоров.

### 6.3. Адгезионное изнашивание

*Адгезионное изнашивание* возникает как результат среза фрикционных связей. Основной причиной этого вида изнашивания является адгезионная составляющая силы трения. В процессе изнашивания происходит образование адгезионной связи, ее рост и разрушение. Отличительной чертой этого вида изнашивания является перенос материала с одной поверхности на другую, обусловленный наличием локальных связей между контактирующими поверхностями. Самой жесткой формой адгезионного изнашивания является *заедание*. Оно может быть вызвано локальной сваркой и часто сопровождается макроскопическим переносом материала и повышенной силой трения. Здесь следует обратить внимание, что термин *адгезионное изнашивание* в данном контексте не совпадает полностью с определением, приведенным в табл. 6.1, и распространен в англоязычной литературе, где иногда служит синонимом термина *изнашивание при скольжении*.

Вполне логично предположить, что адгезионное изнашивание сопровождается процессами, сопутствующими другим видам изнашивания (усталостному, абразивному и т. д.). Несмотря на то, что это имеет место для всех видов изнашивания (например, адгезия может стимулировать абразивное действие), некоторые исследователи полагают, что замена термина *адгезионное изнашивание* термином *изнашивание при скольжении* является неадекватной. По нашему мнению, это необязательно так. Во многих случаях преобладает адгезия, и можно легко наблюдать ее проявление при переносе материала. В таких случаях следует употреблять термин *адгезионное изнашивание*, а термин *изнашивание при скольжении* должен относиться к случаям, когда отсутствует ярко выраженный доминирующий процесс. Другими словами, изнашивание при скольжении означает, что протекает несколько процессов с равными вкладами, а износ является результатом их сочетания.

Эксперименты показывают, что адгезия на границе раздела возникает даже при разрыве контакта двух тел без сдвига. При удалении тел друг от друга может происходить перенос материала с тела, имеющего меньшую когезионную прочность, на другое тело. При движении одного из тел относительно поверхности другого на поверхности материала с большей когезионной прочностью образуется пленка переноса. Количество перенесенного материала определяется прочностью адгезионной связи, которая, в свою очередь, зависит от электронной структуры

сопрягаемых материалов, их совместимости (т.е. способностью образовывать твердые растворы или интерметаллические соединения друг с другом), а также кристаллической структурой и ориентацией. Кроме того, адгезия зависит от условий трения и других ранее отмеченных факторов.

Явление *фрикционного переноса* наблюдается практически для всех материалов (металлов, керамики, полимеров) и их сочетаний. Вопрос состоит в том, влияет ли каким-либо образом перенос на фрикционное поведение пары трения. Если влияет, то мы имеем дело с адгезионным изнашиванием. В этом случае последствия переноса материала могут быть существенно различными. При переносе микроскопических частиц с одной поверхности на другую интенсивность изнашивания изменяется очень незначительно. При некоторых условиях могут возникнуть ситуации, когда тонкая пленка мягкого материала переносится на твердую сопрягаемую поверхность, например бронза на сталь, свинец на сталь, сталь или алюминиевый сплав на хромовое покрытие, полимер на металл. Результаты такого переноса могут быть следующими. Если перенесенная пленка бронзы удаляется со стальной поверхности, а затем образуется заново, интенсивность изнашивания возрастает. Если пленка не удаляется, происходит трение одноименных материалов, что может привести к схватыванию. Намазывание полимера на поверхность стального вала дает резкий скачок силы трения, однако износ изменяется незначительно.

Известно, что при определенных условиях твердый материал переносится на поверхность более мягкого. Например, сталь переносится на бронзу, бронза на полимер. Перенесенные твердые частицы внедряются в мягкий материал и действуют как абразив, царапая поверхность исходного металла.

Полимеры наиболее чувствительны к фрикционному переносу при трении как по металлам, так и по полимерам. В качестве приме-

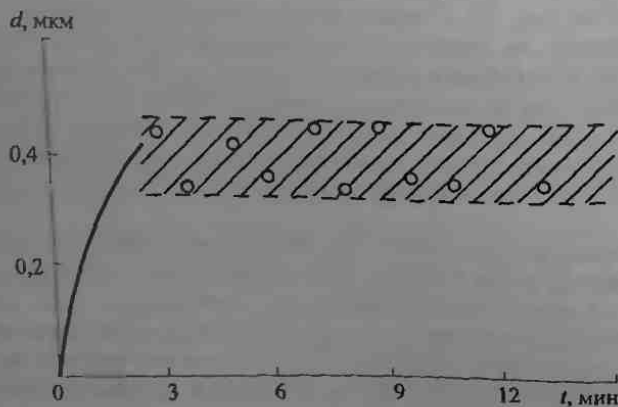


Рис. 5.5. Толщина перенесенного слоя ПТФЭ как функция продолжительности трения (нагрузка 0,05 МПа, скорость скольжения 0,35 м/с)

ра рассмотрим трение политетрафторэтилена (ПТФЭ) по полиэтилену (ПЭ). Эксперименты были выполнены на машине трения по схеме вал — частичный вкладыш (конформный контакт). Был обнаружен перенос ПТФЭ в виде хлопьев очень малого размера в начальный период трения. Толщина перенесенного слоя монотонно возрастает, а затем колеблется около некоторого среднего значения, которое, как и амплитуда колебаний, зависит от условий испытаний, в особенности от нагрузки и скорости скольжения (рис. 6.6).

Перенесенный фрагмент полимера может принимать самые разнообразные формы в зависимости от свойств полимера и условий трения

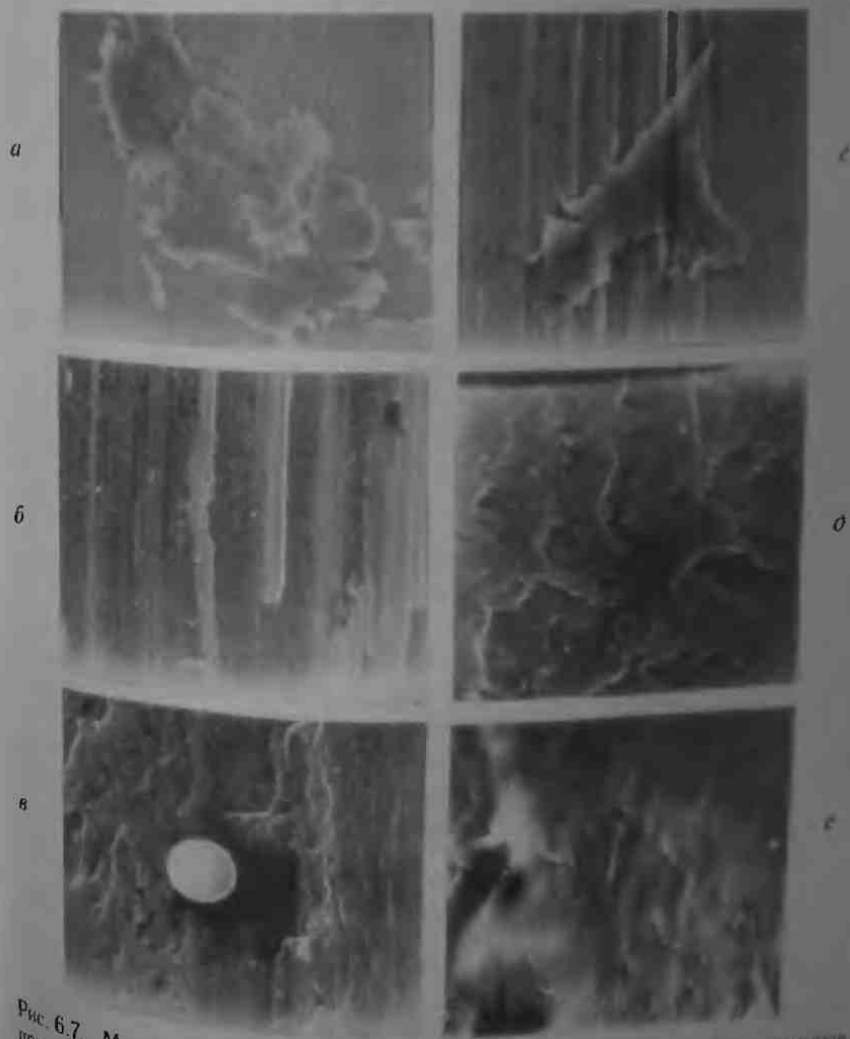


Рис. 6.7. Микрофотографии продуктов фрикционного переноса, полученные при трении полимеров по стали: а, б) полиэтилен высокой плотности; в, г, д) полиамид; е) политетрафторэтилен

(рис. 6.7). Например, на рис. 6.7, в показана частица практически идеально круглой формы. Ее происхождение, вероятно, связано с гибкостью цепных молекул полимера, тепловыми условиями на границе раздела и некоторыми другими факторами, остающимися неизвестными.

В отношении изнашивания при скольжении следует сделать два замечания. Обычно считают, что закон износа Арчарда, описанный в п. 2.2.2, относится к изнашиванию при скольжении. Однако это уравнение основано на таких общих допущениях, которые могут быть справедливыми в различных ситуациях, включая адгезионное изнашивание. Большой интерес при изучении изнашивания при скольжении представляют так называемые карты механизмов изнашивания (см. гл. 8). Эти карты строятся в двух координатах, а именно, приведенное контактное давление и приведенная скорость. На картах размещаются области, связанные с определенными видами изнашивания.

#### 6.4. Усталостное изнашивание

Известно, что усталость представляет собой изменение состояния материала, вызванное повторяющимся (циклическим) нагружением, приводящим к постепенному его разрушению. Ее характерной особенностью является накопление необратимых изменений, вызывающих образование и развитие трещин. Подобный процесс протекает и при трении, сопровождая практически все виды изнашивания. Фрикционный контакт подвергается циклическому нагружению при качении и возвратно-поступательном скольжении. Кроме того, каждая неровность поверхности трения претерпевает последовательное нагружение при столкновениях с неровностями поверхности контртела. В результате в поверхностной и подповерхностной областях возникают два изменяющихся поля напряжений с различными масштабами от диаметра номинальной площади контакта в первом случае до диаметра единичного пятна контакта во втором случае. Эти поля ответственны за усталость материала в данных областях, что приводит к зарождению и распространению трещин и образованию частиц износа. Этот процесс называют *фрикционной усталостью*. В отличие от объемной усталости, она охватывает только поверхностную и подповерхностную области. Отделение материала с поверхности твердого тела в результате фрикционной усталости называется *усталостным изнашиванием*.

Известно, что трещины усталости зарождаются в точках, где касательные напряжения или деформации растяжения максимальны. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что при контактном нагружении положение точки максимальных касательных напряжений зависит от коэффициента трения. С другой стороны, если тело испытывает совместное действие нормальных и касательных напряжений, возникают поверхностные и подповерхностные области, в которых появляется деформация растяжения. Следовательно, на поверхности и (или) под ней могут зародиться трещины.

Дефекты, являющиеся концентраторами напряжений, облегчают зарождение трещин усталости. Это царапины, впадины, следы питтинга на поверхности, дислокации, примеси, пустоты, полости и карбиды в приповерхностной области.

Как поверхностные, так и подповерхностные трещины, расширяющиеся при циклическом нагружении, постепенно растут, объединяются, пересекаются друг с другом и выходят на поверхность (рис. 6.8).



Рис. 6.8. Трещины усталости на поверхности трения (стрелкой показано направление скольжения)

После определенного числа циклов нагружения это приводит к возникновению частиц износа.

Интенсивность усталостного изнашивания определяется многочисленными факторами: физическими, механическими и химическими свойствами поверхности твердого тела, смазкой (при наличии таковой), составом окружающей среды, качеством поверхности, температурой и т. д. Например, рост усталостных трещин очень чувствителен к влажности атмосферы. По сравнению с влажным, в сухом воздухе для образования трещин требуется большее число циклов нагружения. Другими словами, чем суше воздух, тем меньше скорость распространения трещин в материале. Другой пример связан с влиянием смазочной пленки. Кроме всего прочего, этот эффект показывает, что усталостное изнашивание протекает даже в отсутствие прямого физического контакта тел. Пленка не исключает контакт, она только сглаживает неравномерность контактного давления. Несмотря на снижение силы трения при смазывании и соответствующее уменьшение растягивающих напряжений, все равно происходит усталостное изнашивание, а число циклов, необходимое для повреждения поверхности, возрастает незначительно.

Наиболее часто усталостное изнашивание встречается в контакте качения, например в зубьях шестерен, подшипниках качения, кулачковых механизмах, при взаимодействии железнодорожных колес с рель-

сама. Разрушение поверхности, характерное для качения или качения с проскальзыванием, называется *питтингом*, т. е. это образование на поверхности контакта очень маленьких углублений. Именно усталость определяет долговечность подшипников качения. Современные модели для расчета долговечности подшипников качения основаны на концепции, предполагающей, что выносливость контакта качения определяется образованием и развитием поверхностных и подповерхностных трещин, приводящих к выкрашиванию. Этот процесс описывается с применением распределения Вейбулла для образования частиц износа.

Численная оценка усталостного износа осуществляется на основе теории, разработанной Крагельским. Согласно этой теории, усталостное изнашивание рассматривается как локальный процесс циклического взаимодействия неровностей, приводящий к накоплению повреждений и последующему разрушению материала. Предполагается, что деформированный объем  $V_d$  равен объему той части неровностей, которая энедрилась в контртело. Конечно, это не совсем так, но поскольку нет альтернативного подхода, то такое предположение приемлемо, если учесть точность такого рода расчетов. С учетом уравнения опорной кривой профиля (3.44) отсюда следует, что

$$V_d = \kappa_c b A_c R_{\max} \int_0^{\frac{\varepsilon}{\nu_D + 1}} x^{\nu_D} dx = \frac{\varepsilon}{\nu_D + 1} R_{\max} A_c.$$

Если считать, что изнашиваемый объем материала равен деформируемому объему  $V_d$ , который разрушается за  $n$  циклов нагружения, то интенсивность усталостного изнашивания равна

$$I = i \frac{A_r}{A_c} = \frac{\varepsilon}{(\nu_D + 1) n d} \frac{A_r}{A_c}, \quad (6.2)$$

где  $i = \Delta V_r / (A_c d)$  — удельный износ, равный объему изношенного материала  $\Delta V_r$ , отнесенного к площади фактического контакта и пути трения  $d$ ;  $d$  — средний диаметр пятна контакта.

Число циклов до разрушения  $n$  является характеристикой материала, определяемой следующими формулами:

$$n = \begin{cases} \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^{t_y} & \text{— упругий контакт;} \\ \left( \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} \right)^{t_n} & \text{— пластический контакт,} \end{cases}$$

где  $\sigma_0$  — константа, имеющая смысл прочности при однократном нагружении;  $\sigma$  — действующее напряжение;  $\varepsilon_p$  — относительная деформация при разрыве;  $\varepsilon$  — действующее относительное удлинение;  $t_y$  и  $t_n$  — коэффициенты усталости при упругом и пластическом деформировании, которые обычно определяются экспериментально. Формула (6.2)



после подстановки входящих в нее параметров (см. гл. 3) позволяет дать качественную оценку влияния различных факторов на величину усталостного износа. В частности, в случае упругого контакта интенсивность изнашивания зависит от параметров шероховатости, механических характеристик материалов, коэффициентов трения и усталости, а также от номинального и контактного давлений. В случае пластического контакта интенсивность изнашивания зависит от пластичности материала, фрикционных свойств и коэффициента усталости.

## 6.5. Коррозионное изнашивание, фреттинг, эрозия и кавитация

Коррозия определяется как разрушение поверхности твердого тела в результате его химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Когда такое взаимодействие протекает на трущихся поверхностях и продукты этих реакций существенно влияют на фрикционное поведение пары трения, говорят, что имеет место *коррозионное изнашивание*. Строго говоря, оно не является самостоятельным видом изнашивания, однако в некоторых случаях вклад коррозионного механизма в износ оказывается столь большим, что употребление этого термина является вполне оправданным.

Иногда утверждают, что термин *коррозионное изнашивание* следует применять к интенсивному изнашиванию в агрессивной среде, а умеренный износ в относительно нормальной атмосфере должен описываться термином *окислительное изнашивание*.

Окислительное изнашивание протекает в случае, когда на поверхности трения формируется пленка окисла. Она может образовываться в результате реакции поверхности металла с кислородом воздуха или смазкой. Пленка существенно влияет на трение и износ и, в свою очередь, трение влияет на скорость окисления через передеформирование металла и высокую температуру в зоне контакта. Окисная пленка играет двойственную роль. С одной стороны, она защищает поверхности трения от интенсивного изнашивания и схватывания. В действительности процесс изнашивания сводится к разрушению пленки, которая снова восстанавливается. То есть, окисная пленка препятствует свариванию ювенильных участков поверхностей, которое происходит в вакууме. Но, с другой стороны, продукты окислительного изнашивания имеют большую твердость и вызывают абразивное изнашивание.

В процессе окислительного изнашивания одновременно протекают деформация, адсорбция и химические реакции и они являются взаимосвязанными. Деформирование активизирует тончайшие поверхностные слои, повышая их чувствительность к адсорбции, диффузии и химическим реакциям. В свою очередь, последние значительно влияют на пластическую деформацию. Образовавшийся в результате локального пластического деформирования слой содержит многочисленные

дефекты микроструктуры и области с высокой плотностью дислокаций (в металлах и керамиках). При нормальных условиях граничной смазки толщина активированного слоя составляет около 100–1000 мкм. Этот слой взаимодействует с ограниченным количеством кислорода, растворенного в смазке, и превращается в однородную оксидную пленку примерно такой же толщины, прочно связанную с основным металлом.

К основным особенностям окислительного изнашивания можно отнести следующие: отсутствие разрушения основного материала, локализация разрушения в тончайших поверхностных слоях, образующихся в процессе трения, и динамическое равновесие механических и химических процессов, ответственных за образование и разрушение оксидных пленок.

При некоторых условиях это равновесие может нарушаться, при этом наблюдаются скачки интенсивности изнашивания. В классической работе Уэлша приводится зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки, содержащая переходы от умеренного к жесткому и снова к умеренному изнашиванию (рис. 6.9). Первый переход к жесткому износу возникает, когда нагрузка достигает значения  $P_1$ . Интенсив-

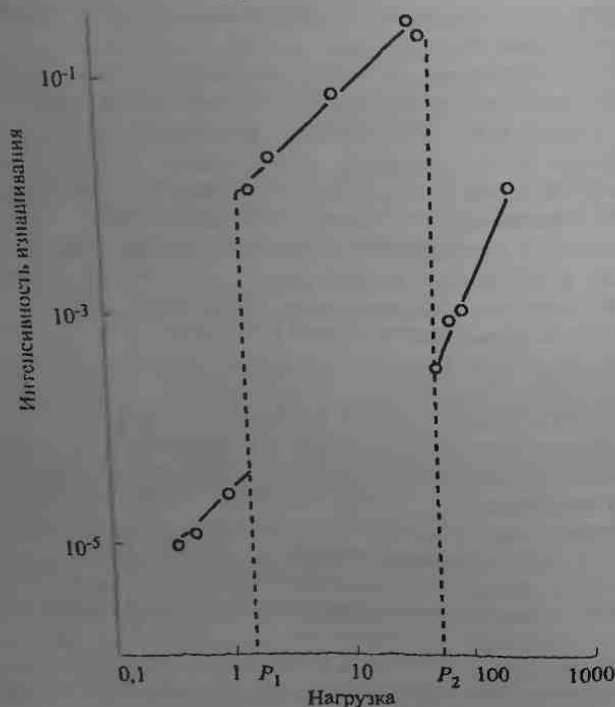


Рис. 6.9. Изменение интенсивности изнашивания с нагрузкой для пальца из не легированной стали с 0,5% углерода, скользящего по инструментальной стали при испытании на воздухе по схеме палец — кольцо (данные Уэлша)

ность изнашивания резко возрастает более чем на два порядка. Дальнейшее трение при нагрузке, меньшей  $P_2$ , сопровождается жестким изнашиванием. Однако увеличение локальной температуры приводит к превращению материала поверхностного слоя в мартенсит, который образует слой окисла. При нагрузке  $P_2$  трибосистема резко возвращается в режим умеренного изнашивания. Коррозионное изнашивание определяется многими факторами, среди которых химический состав и микроструктура контактирующих поверхностей; жесткость и пористость контактирующих поверхностей; наличие или отсутствие поверхностных трещин и границ зерен (химическое взаимодействие может усиливаться при проникновении коррозионно-активных веществ в такие дефекты поверхности); степень наклепа контактирующих поверхностей; напряженное состояние поверхности (сжимающие напряжения, как в случае наклепа металлов, могут замедлять коррозию); электрические потенциалы и протекание тока между контактирующими поверхностями; температура и давление в трибосистеме и реакционная способность среды, находящейся между контактирующими поверхностями. Например, высокие температуры активируют химические реакции, приводящие к коррозии.

Термин *фреттинг* используется для обозначения малого колебательного скольжения между поверхностями двух контактирующих тел. Амплитуда такого движения обычно составляет 1–100 мкм. Изнашивание, возникающее при таком движении, называют *фреттинг-изнашиванием*.

Фреттинг протекает между деталями, которые не предназначены для движения, например механическими соединениями, электрическими соединителями и т. п. Этот вид изнашивания обычно наблюдается при работе машин в условиях вибрации или с циклическим нагружением номинально неподвижного контакта. Фреттинг имеет важное значение, например, в атомной энергетике (крепление тепловыделяющих элементов) и авиакосмической технике (лопатки турбин, резьбовые соединения летательных аппаратов и т. д.).

Различают два вида фреттинг-изнашивания в зависимости от механических факторов и факторов, связанных с окружающей средой. Если повреждение при фреттинге вызвано циклическим нагружением, стимулирующим появление поверхностных усталостных трещин и в конечном итоге приводящим к катастрофическому разрушению, то используют термин *фреттинг-усталость*. Вид фреттинга, при котором преобладают химические реакции, получил название *фреттинг-коррозии*. Как правило, оба типа фреттинга протекают одновременно. Циклическое микроперемещение вызывает разрушение защитной (например, окисной) пленки, окрывающей поверхность металла. Обнажившийся металл легко окисляется, а продукты окисления действуют как абразив, приводя к повреждению поверхности. Рассмотрим фреттинг-усталость с применением в качестве простого примера контакта сфера — плоскость (рис. 6.10).

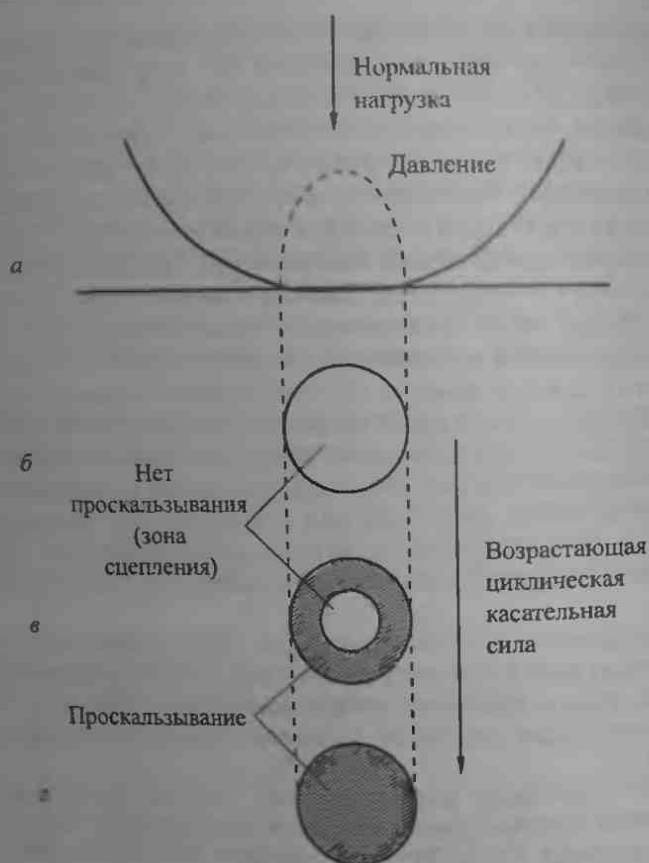


Рис. 6.10. Распределение упругого нормального напряжения под сферой, прижатой к плоскости (а). Вид площадки контакта при возрастании приложенной циклической касательной силы (б-е)

Если контакт упругий и нагружен нормальной нагрузкой, то контактное давление распределяется в соответствии с уравнением Герца с максимумом в центре круга контакта и нулевым значением на границе. Тангенциальная сила вызывает рост контактных поверхностных усилий, которые имеют минимум в центре контактной площадки и стремятся к бесконечности на ее краях. В результате вблизи краев площадки может возникнуть некоторое перемещение. То есть, зона контакта разделяется на две области: центральная область (зона сцепления), в пределах которой статическое трение превышает касательные усилия, а проскальзывание отсутствует, и кольцевая зона (заштрихованные области на рис. 6.10), в которой происходит микропроскальзывание (зона проскальзывания). Граница зон сцепления и проскальзывания сжимается с ростом касательной силы, пока площадь центральной области не станет равной нулю для некоторой критической силы. Таким

образом, можно выделить четыре различных режима поведения контакта: полное сцепление, смешанное сцепление и микропроскальзывание, макроскольжение и возвратно-поступательное скольжение (рис. 6.11).

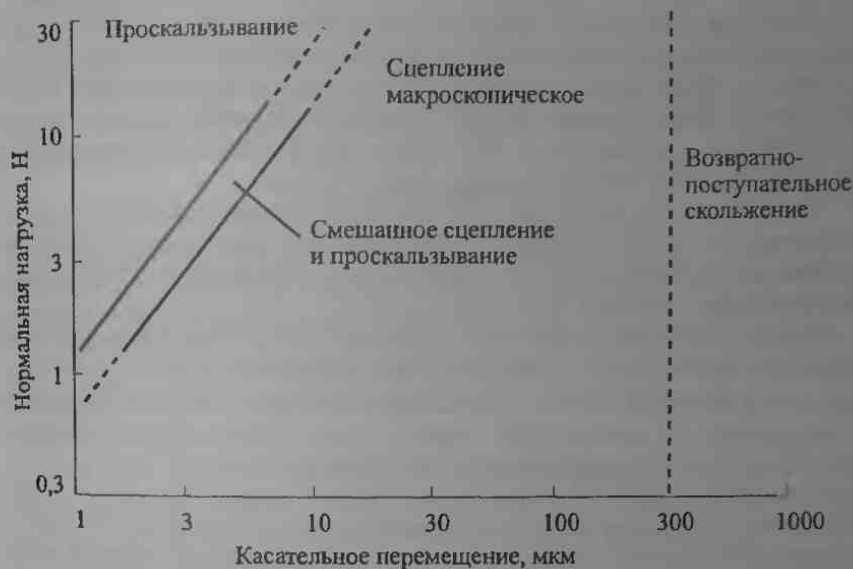


Рис. 6.11. Режимы фреттинга для неконформного контакта поверхностей из нержавеющей стали

Наиболее жестко фреттинг-усталость протекает в зоне сцепления и определяется целым рядом факторов, включая амплитуду колебаний при фреттинге. Фреттинг-усталость вызывает зарождение и последующий рост трещин. Поэтому микроструктура материалов и их свойства оказывают заметное влияние на фреттинг-износ.

Как и для других видов изнашивания, окружающая среда и температура в большой степени влияют на фреттинг, как по отдельности, так и совместно. Химическое взаимодействие становится существенным и протекает фреттинг-коррозия. На воздухе образующиеся на поверхностях оксидные пленки способны смазывать их и замедлять развитие повреждений при температурах выше температуры окружающей среды. Однако не все окислы оказывают полезное действие и их эффект зависит от материалов, толщины окисной пленки, условий в зоне контакта и окружающей среды.

Сложное взаимодействие механических и химических явлений при фреттинге наряду с большим числом факторов, определяющих скорость протекания этих явлений, затрудняют поиск эффективных способов борьбы с фреттингом. Для предотвращения или снижения износа необходимо уменьшить амплитуду микроперемещений, повысить абразивную стойкость сопрягаемых материалов и сопротивление воз-

действию коррозионной среды, применять специальные приборы для гашения колебаний и т. п.

В широком смысле слова эрозия — это процесс повреждения поверхности твердого тела за счет воздействия окружающей среды. В трибологии этот термин используется в более узком смысле — вид изнашивания движущимися потоками газов, жидкостей и твердых тел.

Эрозия определяется как постепенная потеря исходного материала с поверхности твердого тела за счет механического взаимодействия этой поверхности с жидкостью, в том числе при ударном взаимодействии каплями жидкости или частицами твердого тела.

Заметим, что благодаря широкой области применения этого термина рекомендуется его уточнение с целью обозначения соответствующего механизма или ситуации, например гидро- и газоабразивная эрозия, кавитационная эрозия и т. д.

Эрозия твердыми частицами является самой общей формой эрозийного изнашивания, происходящей в результате циклических ударов малых твердых частиц, увлекаемых потоком газа или жидкости и ударяющих по поверхности твердого тела. Механическое действие этих частиц подобно абразивному действию и включает пластическую деформацию и хрупкое разрушение. Однако между эрозией и изнашиванием свободным абразивом существует ряд различий. В первую очередь, это природа сил, действующих на частицы, и природа изнашивания поверхности. При абразивном изнашивании частицы скользят по поверхности под действием внешней приблизительно постоянной силы. При эрозии на частицу, взаимодействующую с поверхностью тела, могут действовать несколько сил различной природы (рис. 6.12).

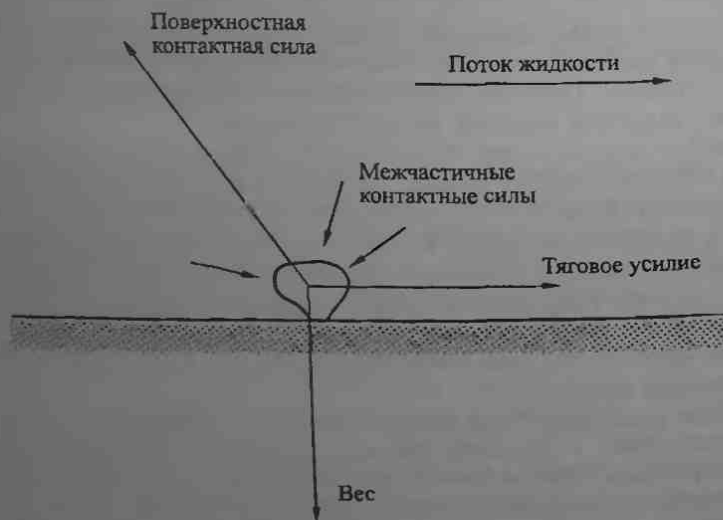


Рис. 6.12. Схема сил, действующих на частицу, движущуюся в потоке жидкости и контактирующую с твердой поверхностью

Основная сила, с которой частица действует на поверхность, связана с ее замедлением. Кроме того, интенсивность абразивного изнашивания зависит от нормальной нагрузки и пути трения, а интенсивность эрозийного изнашивания определяется количеством и массой отдельных частиц, сталкивающихся с поверхностью, и скоростью их удара. Интенсивность эрозийного изнашивания  $E$  (обычно дается в единицах массы или объема материала, удаленного с поверхности, на единицу массы воздействующих частиц) связана со скоростью  $v$  степенной зависимостью:

$$E = kv^n,$$

где  $k$  — постоянная;  $n$  — показатель экспоненты при скорости, зависящий от условий эрозии и материала. Его значение, как правило, изменяется от 2 до 2,5 для металлов и от 2,5 до 3 для керамики.

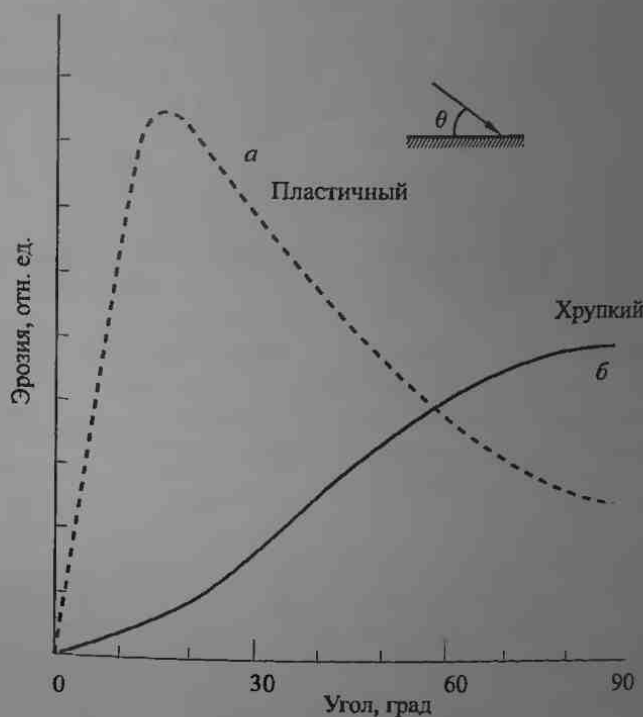


Рис. 6.13. Характерная зависимость интенсивности эрозии пластичного (а) и хрупкого (б) материалов от угла  $\theta$

Угол атаки, определяемый относительно плоскости поверхности, как показано на рис. 6.13, различным образом влияет на интенсивность эрозийного изнашивания пластичных и хрупких материалов.

Основное различие влияния угла атаки для пластичных и хрупких материалов заключается в значении угла, при котором интенсивность

эрозии максимальна. Для пластичных материалов оно приближается к  $20-30^\circ$ , а для хрупких материалов типа стекла и керамики составляет  $90^\circ$ . Для некоторых твердых и ударновязких легированных сталей значительная эрозия (от  $1/3$  до  $1/2$  от максимальной) происходит также при нормальном падении частиц.

Кроме того, на интенсивность эрозии влияют целый ряд характеристик частиц, например их форма, размеры и твердость. В этом отношении у эрозии много общего с абразивным действием, включая размерный эффект. Существует определенный размер эродирующих частиц, выше которого они оказывают малый эффект или не оказывают эффекта на интенсивность эрозии пластичных материалов.

Для того чтобы воздействие жидкости на поверхность приводило к ее повреждению, жидкость необязательно должна содержать частицы. Так, прогрессирующая потеря исходного материала с поверхности твердого тела может быть вызвана продолжительным ударным воздействием капель или струй жидкости. Этот процесс называется *жидкостной эрозией*. Она является предметом повышенного внимания при конструировании и выборе материалов для поверхностей авиационной техники, подверженных действию окружающей среды. Защитные стекла кабин и приборные окна истребителей представляют значительный интерес с точки зрения управляемого воздействия жидкостной эрозии (*дождевой эрозии*), как и лопасти пропеллеров вертолетов и лопасти вентиляторов во входных компрессорах реактивных двигателей. Жесткая эрозия протекает также на передних кромках лопаток турбин. Что касается развития эрозии пластичных материалов (мягкие металлы, полимеры) во времени, то как жидкостная, так и эрозия твердыми частицами обычно начинается с некоторого инкубационного периода, за которым следует переход к периоду потери массы со стабильной скоростью. Он сменяется окончательной стадией с меньшей скоростью потери массы. Для более хрупких материалов типа стекла и керамики инкубационный период может быть непродолжительным. Причины наличия инкубационного периода до конца не ясны. Тем не менее, определенно имеется возможность значительной пластической деформации и упрочнения поверхности пластичных материалов перед разрушением и выкрашиванием. На начальной стадии эрозионного изнашивания возможно внедрение некоторых бомбардирующих частиц, которое продолжается в течение всего процесса. Такое шаржирование может в действительности приводить к приросту массы нетто испытуемого образца в течение инкубационного периода.

Гидроабразивное изнашивание является практически очень важной формой эрозионного изнашивания (особенно в горнодобывающей и обогащательной промышленности). Это такой тип изнашивания, при котором материал подвергается воздействию высокоскоростного потока суспензии твердых частиц в жидкости (обычно в воде) с такой консистенцией, что ее еще можно перекачивать. В большинстве случаев химический эффект жидкости, который включает эрозию, дает значи-



тельный вклад в процессе повреждения поверхности. Происходит синергическое взаимодействие между эрозией и коррозией. Чтобы подчеркнуть роль химического воздействия, используют термин *эрозионная коррозия*.

Повреждение материала в результате электрического разряда часто рассматривают как вид эрозии, а именно, *электроэрозионное изнашивание*. Иллюстрация поверхности, подвергшейся такому виду изнашивания, дана на рис. 6.14, где видна зернистая поверхность, состоящая из микрократеров, а также участок оплавления (нижний правый угол).



Рис. 6.14. Характерный вид поверхности после электроэрозионного изнашивания

Кавитация — это циклическое зарождение, рост и интенсивное схлопывание в жидкости полостей или пузырьков, содержащих пар или газ (или пар и газ одновременно). *Кавитационное изнашивание* — это изнашивание, протекающее в результате кавитационного процесса.

Кавитацию обычно рассматривают как разновидность эрозии, в которой источником напряжений, приводящих к повреждению материала, являются схлопывающиеся пузырьки. Ее часто изучают совместно с эрозией каплями жидкости, так как оба процесса подобны с феноменологической точки зрения. Кавитационное изнашивание является наиболее распространенной формой изнашивания трибосистем, включающих движущиеся с большими скоростями жидкости или поверхности, быстро перемещающиеся относительно жидкости. Примерами деталей, часто подвергающихся воздействию кавитационного изнашивания, могут служить детали жидкостных насосов, трубы теплообменников, лопасти судовых гребных винтов, лопасти мешалок в процессах химической промышленности и трубопроводы. Возникновение кавитационной эрозии в трубах стимулировало применение *кавитационного туннеля*, метода испытаний в кавитационном потоке, в котором для

создания режима кавитации в трубе используются помещенные в нее конструкции или препятствия.

Основной причиной кавитации является локализованное снижение давления в жидкости, возникающее в результате относительно быстрого перемещения твердой поверхности через зону падения давления. При снижении давления образуются пузырьки пара, они растут, формируя в конечном итоге скопления пузырьков, которые при достижении критического размера схлопываются и возникают очень малые пики давления (микроструи), длительность которых составляет всего около  $10^{-10}$  с. Струи направлены к поверхности тела благодаря схлопыванию, которое возникает в контакте или вблизи поверхности обтекаемого

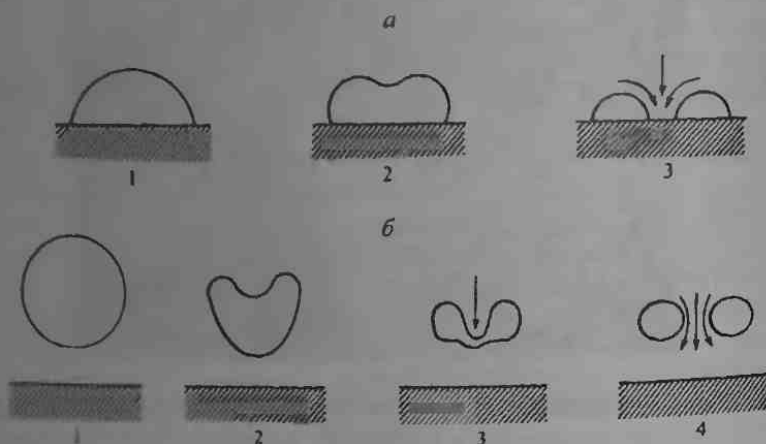


Рис. 6.15. Схлопывание полости в контакте с твердой поверхностью (а) и вблизи поверхности (б)

тела (рис. 6.15). Эти микроструи оказывают непосредственное эрозионное действие. Кроме того, сферическое схлопывание пузырьков, относительно удаленных от поверхности, вызывает появление ударных волн, которые также могут рассматриваться как причина эрозии.

Кроме механических свойств подвергающейся кавитации поверхности, к другим факторам, влияющим на кавитацию, относятся скорость жидкости и режим потока, плотность и вязкость жидкости, степень аэрирования жидкости, частота колебаний и шероховатость твердой поверхности. Таким образом, кавитация представляет собой сложное физическое явление. Ее механизмы, ответственные за повреждение и износ поверхности, до сих пор не выяснены точно.

На кавитационную эрозию часто влияет реакционная способность жидкости по отношению к материалам, на которые жидкость воздействует. Неудивительно, что возникает совместный эффект меха-

нического действия за счет схлопывания пузырьков и химического воздействия жидкости.

## 6.6. Комбинированные виды изнашивания

Перечень видов изнашивания не ограничивается приведенными выше механизмами. Следует подчеркнуть два аспекта этого вопроса. Во-первых, мы рассмотрели виды изнашивания, однако их строгая классификация, как уже отмечалось выше, отсутствует и по сей день. Причина этого в том, что изнашивание является настолько сложным процессом, включающим различные разновидности элементарных механизмов, что невозможно установить основные признаки, по которым можно было бы классифицировать изнашивание. Это, возможно, является причиной того, что в литературе описаны многочисленные другие виды и подвиды изнашивания, например изнашивание при деформировании, изнашивание отслаиванием, изнашивание при ударе, механическое изнашивание, изнашивание металлов, изнашивание при полировании, изнашивание в контакте качения, тепловое изнашивание и др. С другой стороны, в действительности почти не существует трибосистем с единственным видом изнашивания. Обычно обнаруживается, что одновременно могут действовать несколько механизмов изнашивания. Общепринято, что форма частиц износа и внешний вид изношенных поверхностей ясно указывают на вид изнашивания. Однако совместное действие адгезии, пластической деформации, усталости, отслаивания, нагрева и т. д. может привести к возникновению странных частиц яйцеобразной формы диаметром около 5 мкм, что ставит в тупик даже опытных трибологов (рис. 6.16).



Рис. 6.16. Какой вид изнашивания «снес» это яйцо?

Хотя отдельные механизмы можно усердно изучать, их взаимодействие друг с другом зависит в исключительной степени от условий работы, структурных изменений и изменений физических и химических свойств изнашиваемых поверхностей. Кроме того, несмотря на то, что даже если доминирует один процесс, по ряду причин часто возмо-

жен переход к другому. Среди таких причин изменение температуры контакта за счет фрикционного или внешнего нагрева, изменение химического состава окружающей среды, разрушение защитных покрытий, измеренное изменение рабочих параметров и возрастание колебаний за счет износа контактирующих деталей механического узла.

Тейбор отметил: «...еще долго будут безрезультатными попытки предсказать износ конкретной системы в терминах свойств материалов и условий работы». Поэтому в последние годы предпринимаются попытки рассматривать узел трения как трибосистему, поведение которой можно анализировать и прогнозировать, используя подходы «черного ящика», нейросетей или нечеткой логики. Такие подходы, в частности, весьма успешны в трибодиагностике и трибомониторинге изнашивания, о чем идет речь в гл. 6.

### Список литературы

1. Бельш В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. — Минск: Наука и техника, 1976.
2. Бонден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968.
3. Костяцкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. — Киев: Техника, 1970.
4. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1982.
5. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977.
6. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
7. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001.
8. Проников А. С. Износ и долговечность станков. — М.: Машгиз, 1957.
9. Хрущев М. М., Бабишев М. А. Исследование изнашивания металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.

## Глава 7

# ГИДРОДИНАМИКА СМАЗКИ

Применение смазочных материалов для улучшения условий трения и снижения износа имеет давнюю историю, уходящую своими корнями в глубокую древность. Но теория смазки разработана сравнительно недавно, в конце XIX века, русским ученым Петровым (1836–1920) и английскими исследователями Тауэром (1845–1904) и Рейнольдсом (1842–1912), которые считаются основоположниками гидродинамической теории смазки. Ее два основных постулата были впервые выдвинуты Петровым. Во-первых, основной характеристикой смазки, с точки зрения трения, является ее вязкость, а не плотность, как считалось до Петрова. Во-вторых, трение в смазанном подшипнике обусловлено не касанием трущихся поверхностей, а вязким сдвигом смазки, заполняющей зазор. Затем Тауэр экспериментально обнаружил наличие гидродинамического давления в смазке, разделяющей вращающийся вал и подшипник. Теоретическое описание этих экспериментальных принципов было дано Рейнольдсом, который вывел основное уравнение гидродинамической теории смазки, из которого, в частности, следовало, что расклинивающее действие смазочного слоя есть основная особенность гидродинамического трения.

### 7.1. Вязкое течение

**7.1.1. Физические соотношения.** Отличительной особенностью жидкости является то, что при приложении нагрузки она реагирует не на увеличение деформации, как это происходит в твердых телах, но на скорость деформирования. Эта особенность проявляется в жидкости, находящейся в движении. Свойство, называемое вязкостью, входит в физические соотношения, связывающих тензор напряжений ( $\sigma_{ij}$ ) и тензор скоростей деформаций ( $\dot{\epsilon}_{ij}$ ). Для ньютоновской жидкости эта зависимость является линейной и в общем случае может быть записана

следующим образом

$$\sigma_{ij} = \left[ -p + \left( \eta v - \frac{2}{3} \eta \right) \operatorname{div} \mathbf{v} \right] \delta_{ij} + 2\eta \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (7.1)$$

В декартовых координатах  $i, j \equiv x, y, z$  и скорость  $\mathbf{v}$  точки имеет проекция на оси координат  $v_x, v_y, v_z$ , тогда  $\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$ . Здесь  $\eta$  — динамическая вязкость, а  $\eta v$  — объемная (вторая) вязкость. Вязкости  $\eta$  и  $\eta v$  являются константами в том смысле, что они не зависят от движения, скорости деформации, времени и деформации. Однако, как следует из эксперимента, по крайней мере, динамическая вязкость существенно зависит от температуры и давления. Тензор напряжений можно представить как сумму двух слагаемых  $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}$ , где первый член представляет собой шаровой тензор напряжений, определяемый единственным скаляром  $p$ , представляющим собой давление в некоторой точке потока (здесь  $\delta_{ij}$  — дельта-символ Кронекера, равный 1 при  $i = j$  и 0 при  $i \neq j$ ).

В случае несжимаемой жидкости объемная вязкость не существенна и уравнение (7.1) можно упростить. Принимая во внимание соотношение между скоростями деформации и компонентами скорости точки

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z};$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right); \quad \dot{\epsilon}_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right); \quad \dot{\epsilon}_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right),$$

эти физические соотношения можно записать в следующей форме (мы ограничиваемся рассмотрением вязких напряжений):

$$\tau_{xx} = 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \tau_{yy} = 2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \tau_{zz} = 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z};$$

(7.2)

$$\tau_{xy} = \eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right); \quad \tau_{yz} = \eta \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right); \quad \tau_{xz} = \eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right).$$

Для одномерного потока система (7.2) сводится к уравнению (2.5).

Физические соотношения (7.1) или (7.2) определяются экспериментально и/или выводятся на основании некоторых термодинамических соображений.

Как отмечалось выше, вязкость смазки зависит от давления. Эта зависимость часто выражается эмпирической формулой Баруса:

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p), \quad (7.3)$$

где  $\eta_0$  — динамическая вязкость при атмосферном давлении, а  $\alpha$  — коэффициент вязкости.

Зависимость вязкости от температуры выражается следующим соотношением, предложенным Рейнольдсом:

$$\eta = \eta_0 \exp[-\beta(T - T_0)].$$

Здесь  $\eta_0$  — вязкость, измеренная при температуре  $T_0$ ;  $\beta$  — постоянная, имеющая размерность обратной температуры.

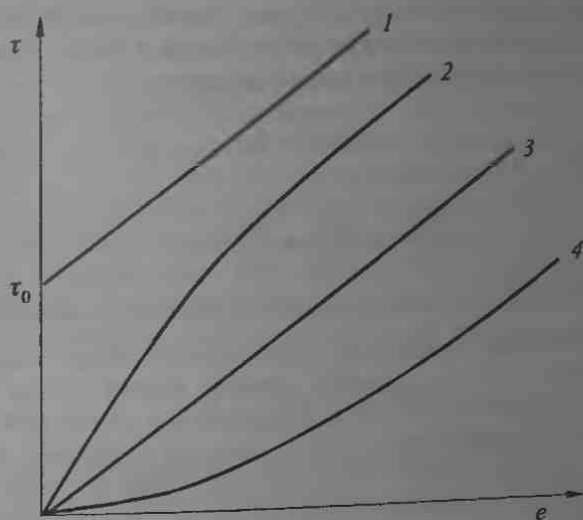


Рис. 7.1. Поведение различных жидкостей: 1 — жидкость Бингема-Шведова; 2 — псевдопластическая жидкость; 3 — ньютоновская жидкость; 4 — жидкость с дилатансией

Многие смазки, например синтетические масла и пластичные смазки, проявляют неньютоновские свойства (рис. 7.1). Их кажущаяся вязкость зависит от скорости сдвига и других факторов.

**7.1.2. Уравнение неразрывности.** Основные уравнения гидродинамики являются следствиями нескольких фундаментальных принципов. Так, можно показать, что из закона сохранения массы следует уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{v} = 0, \quad (7.4a)$$

или

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0. \quad (7.4b)$$

Здесь  $\rho$  — плотность жидкости,  $d\rho/dt$  — ее полная производная по времени. Эти уравнения справедливы в неподвижной системе координат и показывают, что изменение массы жидкости в сколь угодно малом объеме равно потоку жидкости через поверхность, ограничивающую этот

объем. Различие между эквивалентными формами уравнений (7.4а) и (7.4б) становится более наглядным для стационарного потока, когда  $dp/dt = 0$ , однако в общем случае  $dp/dt \neq 0$ , следовательно, частицы жидкости могут находиться в более разреженной зоне и распространяться по объему ( $\text{div } \mathbf{v} > 0$ ,  $dp/dt < 0$ ), либо в более сжатой зоне и стягиваться в нее ( $\text{div } \mathbf{v} < 0$ ,  $dp/dt > 0$ ).

Если среда несжимаема, т. е. всякий объем остается постоянным по величине и, следовательно, плотность частиц также остается неизменной, то уравнение неразрывности сводится к более простой форме, иногда называемой уравнением несжимаемости:

$$\text{div } \mathbf{v} = 0,$$

или

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (7.5)$$

В дальнейшем мы будем рассматривать только несжимаемые жидкости.

**7.1.3. Уравнение движения.** Применение закона сохранения импульса к малому фиксированному объему вязкой среды показывает, что изменение момента импульса этого объема равно потоку момента импульса через поверхность, ограничивающую данный объем, плюс объемные и поверхностные силы, действующие на этот объем. Это записывается как *уравнение Навье-Стокса*, которое для изовязкой несжимаемой ньютоновской жидкости имеет следующую векторную форму:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{G} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \mathbf{v},$$

где  $\mathbf{G}$  — объемная сила,  $p$  — гидродинамическое давление и  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ . В декартовых координатах это уравнение принимает следующую форму:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= G_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= G_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= G_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (7.6)$$

Система уравнений (7.5), (7.6) с неизвестными  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ,  $p$  позволяет описать движение несжимаемой изотермической жидкости. Чтобы решить эту систему, нужно определить начальные и граничные усло-



вия. Начальные условия определяют требуемые величины в начальный момент времени  $t = t_0$  для всех точек движущейся жидкости. Для стационарных потоков нет необходимости задавать начальные условия. Граничные условия определяют скорости потока на границах, а также давление на свободной поверхности жидкости и на границах раздела. Общепринято, что вязкая жидкость сцепляется с поверхностями, вдоль которых она течет. Поэтому скорость потока принимается равной нулю на неподвижной поверхности твердого тела и совпадающей по величине и направлению со скоростью движущейся поверхности твердого тела.

В качестве примера рассмотрим частный случай течения жидкости в тонком зазоре. Предполагаем, что силы инерции и компоненты скорости, нормальные к пленке жидкости, несущественны ( $dv/dt = 0$ ,  $v_y = v_z = 0$ ). Это так называемый одномерный поток. В данном случае давление одинаково по всей толщине пленки, т. е.  $p = p(x)$ . Кроме того, объемные силы принимаются равными нулю ( $G = 0$ ). Тогда из уравнения неразрывности (7.5) получим  $\partial v_x / \partial x = 0$  и, следовательно,  $\partial^2 v_x / \partial x^2 = 0$ . С учетом этого результата и сделанных допущений первое уравнение системы (7.6) записывается в виде

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} = 0.$$

Остальные два уравнения системы (7.6) превращаются в тривиальные тождества. Имея в виду, что  $\nu = \eta/\rho$ , последнее уравнение можно переписать в виде (индекс  $x$  опущен):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}. \quad (7.7)$$

или, принимая во внимание закон Ньютона (2.5), в виде

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z}. \quad (7.8)$$

Отметим, между прочим, что данное уравнение следует из простых соображений, если рассматривать равновесие элемента жидкости, показанного на рис. 7.2. Проекция сил, действующих на этот элемент (на единицу ширины в направлении оси  $y$ ), на ось  $x$  дают

$$p dz - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dz - \tau dx + \left( \tau + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \right) dx = 0.$$

Путем несложных преобразований можно показать, что это равенство дает уравнение (7.8).

Распределение скорости по толщине пленки зависит от граничных условий. Проанализируем два случая. Пусть плоскости  $A$  и  $B$  (рис. 7.3, а) движутся в направлении  $x$  со скоростями  $V_1$  и  $V_2$ , а градиент давления равен нулю. Граничные условия таковы:

$$v|_{z=0} = V_1; \quad v|_{z=h} = V_2; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0.$$

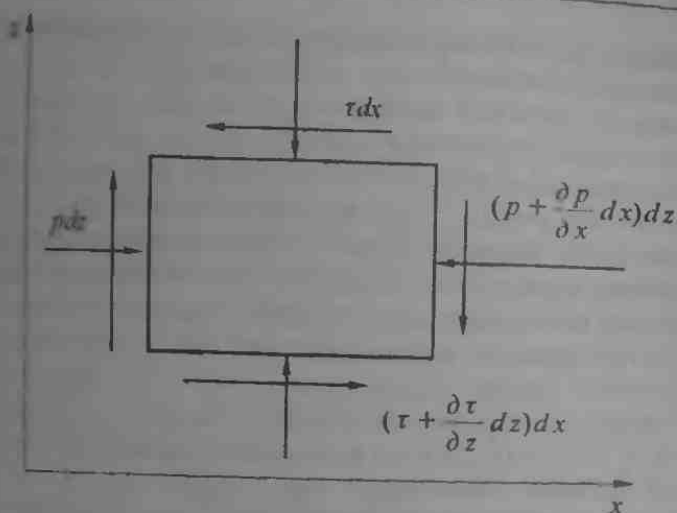


Рис. 7.2. Равновесие элемента жидкости

С учетом последнего условия уравнение (7.7) записывается как

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = 0$$

и может быть проинтегрировано:  $v = C_1 z + C_2$ , где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования, определяемые из двух первых граничных условий. В результате получаем

$$v = V_1 + (V_2 - V_1) \frac{z}{h}. \quad (7.9)$$

Это распределение скорости является линейным (рис. 7.3, а), а течение называется *течением Куэтта*.

Если поток вызван градиентом давления, а обе плоскости неподвижны (рис. 7.3, б), имеет место следующее граничное условие:

$$v'_{z=0} = v'_{z=h} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \text{const.}$$

В этом случае уравнение (7.7) переписывается в виде

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx},$$

и может быть проинтегрировано. Это дает (учитывая, что  $dp/dx$  — константа)

$$v = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} z^2 + C_3 z + C_4.$$

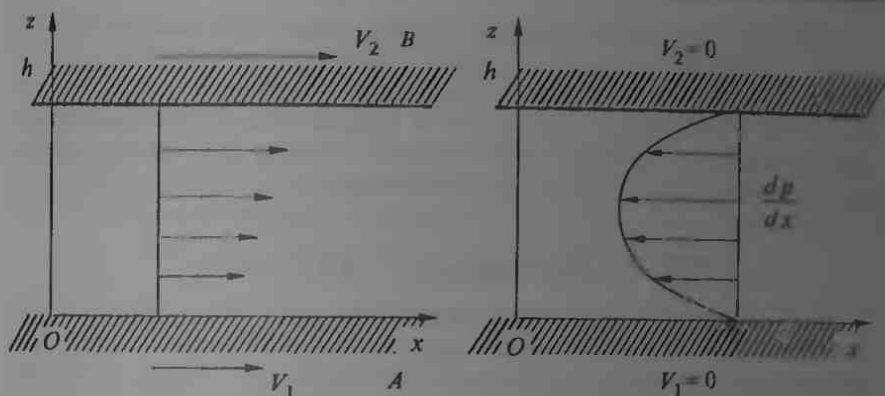


Рис. 7.3. Вязкое ламинарное течение через узкий зазор: а) течение Куэтты, б) течение Пуазейля

Постоянные интегрирования  $C_3$  и  $C_4$  определяются из двух первых граничных условий, что дает

$$v = -\frac{h^2}{2\eta} \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{dp}{dx}. \quad (7.10)$$

Это распределение скорости является параболическим (рис. 7.3, б), а течение называется *течением Пуазейля*.

В общем случае одновременно имеют место и течение Куэтты и течение Пуазейля, а результирующее распределение скорости определяется суперпозицией (7.9) и (7.10).

**7.1.4. Уравнение энергии.** Когда термические эффекты оказываются существенными, необходимо учитывать изменение температуры и вязкости смазочной пленки. Это делается с помощью уравнения энергии, вытекающего из закона сохранения энергии. Применение этого закона к выбранному малому объему несжимаемой жидкости дает

$$\rho \frac{dU}{dt} = \lambda \Delta T + \Phi + \varepsilon, \quad (7.11)$$

где  $U$  — внутренняя энергия на единицу массы,  $\lambda$  — теплопроводность,  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $\Phi$  — функция потерь,  $\varepsilon$  — приток теплоты за единицу времени в единичный объем в дополнение к теплопроводности. Функция потерь равна

$$\Phi = \eta \left[ 2 \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right].$$

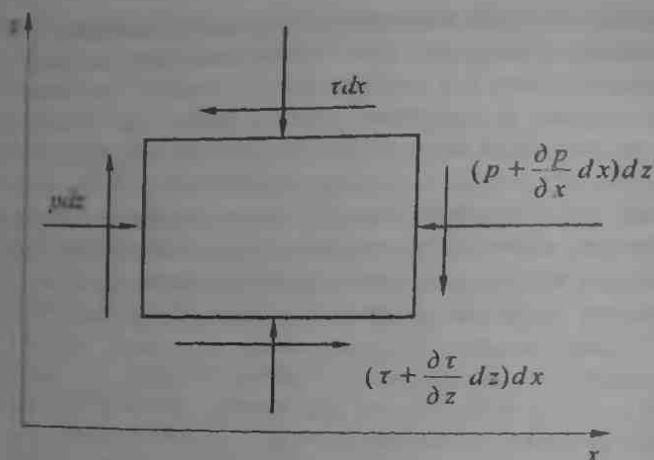


Рис. 7.2. Равновесие элемента жидкости

С учетом последнего условия уравнение (7.7) записывается как

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = 0$$

и может быть проинтегрировано:  $v = C_1 z + C_2$ , где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования, определяемые из двух первых граничных условий. В результате получаем

$$v = V_1 + (V_2 - V_1) \frac{z}{h}. \quad (7.9)$$

Это распределение скорости является линейным (рис. 7.3, а), а течение называется *течением Куэтта*.

Если поток вызван градиентом давления, а обе плоскости неподвижны (рис. 7.3, б), имеет место следующее граничное условие:

$$v|_{z=0} = v|_{z=h} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \text{const.}$$

В этом случае уравнение (7.7) переписется в виде

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx},$$

и может быть проинтегрировано. Это дает (учитывая, что  $dp/dx$  — константа)

$$v = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} z^2 + C_3 z + C_4.$$

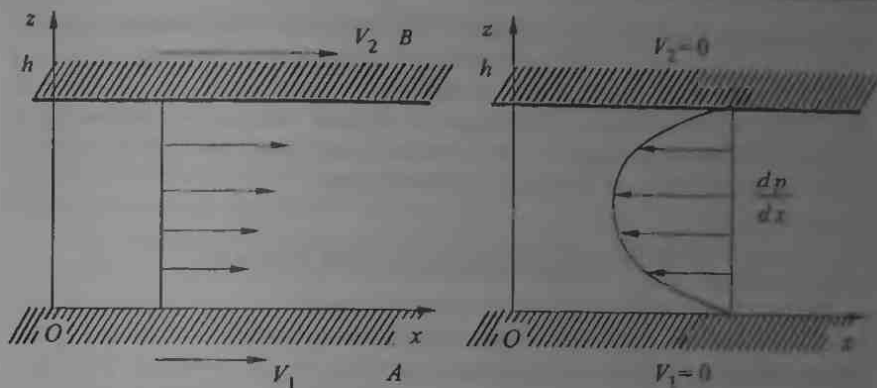


Рис. 7.3. Вязкое ламинарное течение через узкий зазор: а) течение Куэтты б) течение Пуазейля

Постоянные интегрирования  $C_3$  и  $C_4$  определяются из двух первых граничных условий, что дает

$$v = -\frac{h^2}{2\eta} \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{dp}{dx} \quad (7.10)$$

Это распределение скорости является параболическим (рис. 7.3, б), а течение называется *течением Пуазейля*.

В общем случае одновременно имеют место и течение Куэтты, и течение Пуазейля, а результирующее распределение скорости определяется суперпозицией (7.9) и (7.10).

**7.1.4. Уравнение энергии.** Когда термические эффекты оказываются существенными, необходимо учитывать изменение температуры и вязкости смазочной пленки. Это делается с помощью уравнения энергии, вытекающего из закона сохранения энергии. Применение этого закона к выбранному малому объему несжимаемой жидкости дает

$$\rho \frac{dU}{dt} = \lambda \Delta T + \Phi + \varepsilon, \quad (7.11)$$

где  $U$  — внутренняя энергия на единицу массы,  $\lambda$  — теплопроводность,  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $\Phi$  — функция потерь,  $\varepsilon$  — приток теплоты за единицу времени в единичный объем в дополнение к теплопроводности. Функция потерь равна

$$\Phi = \eta \left[ 2 \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 \right]$$

Уравнение энергии показывает, что изменение внутренней энергии некоторого заданного объема (левая часть уравнения) определяется тремя факторами: 1) потоком тепла через поверхность, ограничивающую этот объем (первое слагаемое в правой части энергетического уравнения); 2) диссипацией механической энергии (второе слагаемое) и 3) притоком тепла за счет других факторов.

## 7.2. Гидродинамическая смазка

**7.2.1. Основы гидродинамической смазки.** Неотъемлемой особенностью трения в режиме гидродинамической смазки является наличие между трущимися поверхностями смазочной пленки. Гидродинамическое давление сопротивляется нормальной нагрузке и разделяет соприкасаемые поверхности.

Рассмотрим, как начинает действовать это давление. Если жидкость втекает в зазор между двумя поверхностями, одна из которых (А) неподвижна (рис. 7.4), то слой жидкости, непосредственно приле-

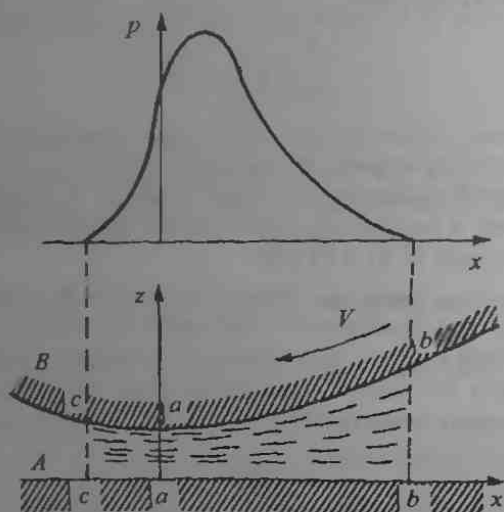


Рис. 7.4. Гидродинамическое давление в смазочной пленке

гающий к поверхности А, остается неподвижным, а прилегающий к поверхности В слой движется со скоростью  $V$  этой поверхности.

Вследствие вязкости другие слои, занимающие промежуточное положение между двумя упомянутыми слоями, вовлекаются в движение. Это обстоятельство (вязкость и сцепление жидкости с поверхностями твердых тел) является необходимым условием для возникновения гидродинамического давления, но это условие не является достаточным. Для возникновения давления необходим сужающийся зазор между

поверхностями, обеспечивающий изменение градиента скорости  $dv/dz$  и, следовательно, градиента напряжения сдвига  $dv/dz$  по длине пленки. Согласно уравнению (7.8), градиент давления также изменится по длине пленки. Так как на обоих концах смазочной пленки давление равно атмосферному, в некоторой точке оно должно достигать максимума. Таким образом, вначале давление должно расти от входа (положительный градиент давления) до достижения им максимума, а затем снижаться (отрицательный градиент). Возникающее за счет гидродинамического действия давление стремится уравновесить внешнюю нагрузку. Этот эффект известен под названием расклинивающего действия пленки и физически связан с условием непрерывности. Чтобы проиллюстрировать этот эффект, рассмотрим стационарное течение в объеме  $bbcc$  на рис. 7.4. Количество жидкости, вытекающей через сечение  $bb$ , должно быть равно количеству, вытекающему через сечение  $cc$ , чтобы сохранялся стационарный характер потока. Площади сечений  $bb$  и  $cc$  различны, а гидродинамическое давление должно возрастать, поэтому скорость потока остается постоянной. Давление затрудняет течение во входном сечении и облегчает его в выходном сечении.

Совершенно необязательно, чтобы зазор имел непрерывно изменяющийся профиль, как показано на рис. 7.4. Так, существует опора, называемая ступенькой Рэлея со скачкообразно изменяющимся профилем зазора. Интересно отметить, что Рэлей полагал ступенчатую форму зазора наилучшей по сравнению с другими конфигурациями.

Если сопрягаемые поверхности параллельны, то гидродинамическое давление не может создаваться расклинивающим действием. Однако в двух случаях давление все же возникает. Во-первых, когда жидкость, проходя через зазор, нагревается, например за счет вязкого трения, и ее плотность снижается, а объемная скорость течения должна возрастать в силу действия условия непрерывности, которое требует, чтобы массовая скорость течения была постоянной. В результате в пленке развивается гидродинамическое давление. Этот эффект называется тепловым расклиниванием. Второй случай имеет место, когда одна из поверхностей движется по направлению ко второй. Жидкость сжимается и вытекает из зазора. Вязкость стремится воспрепятствовать выдвиганию жидкости, в результате чего создается гидродинамическое давление. Этот эффект известен как сжимающее действие пленки. В реальных узлах трения одновременно могут действовать как расклинивающий, так и сжимающий эффекты.

Рассмотрим теперь, как общие закономерности, описанные выше, проявляются в опорном подшипнике (рис. 7.5). Чтобы зазор между валом и вкладышем имел переменное сечение, вал должен быть расположен эксцентрично по отношению к вкладышу. Минимальная и максимальная толщины зазора расположены на прямой, проходящей через центры вала и вкладыша  $O$  и  $O'$ . Эта линия называется линией центров. При вращении вала смазка сцепляется с его поверхностью и благодаря вязкости постоянно вовлекается в зазор, т. е. вал действует

как насос, поддерживающий циркуляцию смазки. Как отмечено выше, гидродинамическое давление возникает в смазочной пленке за счет ее расклинивающего действия.

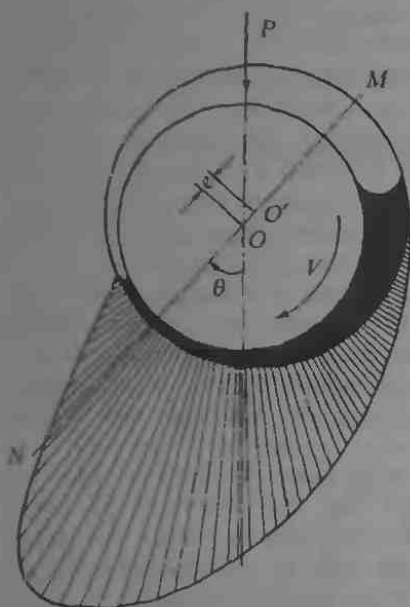


Рис. 75. Схема опорного подшипника

Однако поворот линии центров в направлении вращения показывает, что гидродинамическое давление, являющееся косвенным следствием вязкости, оказывает большее влияние на вал, чем сила трения, являющаяся прямым следствием вязкости.

Замечательно, в частности, то, что вал лежит на смазочной подушке, когда равнодействующая гидродинамического давления становится равной внешней нагрузке. Эта равнодействующая называется нагрузочной способностью. Очевидно, что чем выше вязкость и скорость вращения, тем больше нагрузочная способность. В первом случае смазка практически не может вытекать в стороны и втягивается по направлению к узкому сечению зазора. Во втором случае большее количество смазки вовлекается в зазор. Увеличение относительного зазора  $\epsilon = c/R$  оказывает противоположное действие, поскольку в большом зазоре существует противоток смазки вследствие возрастания угла клина, и гидродинамическое давление развивается в малом сечении. Чем меньше минимальная толщина пленки, тем труднее смазке вытечь из зазора. Это приводит к возрастанию нагрузочной способности. Однако существует естественный нижний предел толщины, который должен превышать сумму высот неровностей на сопрягаемых поверхностях. Обычно средняя толщина смазочной пленки имеет порядок одной ты-

ее расклинивающего действия. Увлекаемая часть пленки, т. е. та ее часть, в которой возникает избыточное давление, расположена вблизи минимума зазора, сходящаяся часть которого длиннее, чем расходящаяся. В результате линия центров поворачивается по направлению вращения, так что вертикальные компоненты давления в пленке и сила трения, действующая на вал, уравновешивают нагрузку на него. Другими словами, между линией центров и направлением приложения нагрузки существует некоторый угол давления. Этот угол является функцией внешней нагрузки, скорости вращения, зазора, вязкости и т. д. Под действием только силы трения вал должен двигаться в противоположном направлении, как если бы он катился по поверхности вкладыша.



сячной диаметра вала, в то время как максимальная и минимальная толщины пленки могут отличаться от нее в 4-5 раз.

**7.2.2. Формула Петрова.** Рассмотрим трение в режиме гидродинамической смазки. Эта задача была решена Петровым (1883), который предположил, что вал и вкладыш коаксиальны, а течение смазки подчиняется закону Куэтта. Это предельный случай, соответствующий высокоскоростному или легко нагруженному валу. Этих предположений достаточно для расчета силы трения (напомним, что они непригодны для оценки нагрузочной способности). Петров нашел точное решение задачи, используя общие уравнения гидродинамики. Мы ограничимся рассмотрением элементарных случаев.

Пусть вкладыш неподвижен, а вал вращается с окружной скоростью  $V$  ( $V = \omega R$ , где  $\omega$  — скорость вращения) (рис. 7.6). Если между валом и вкладышем имеет место ламинарное течение Куэтта, то распре-

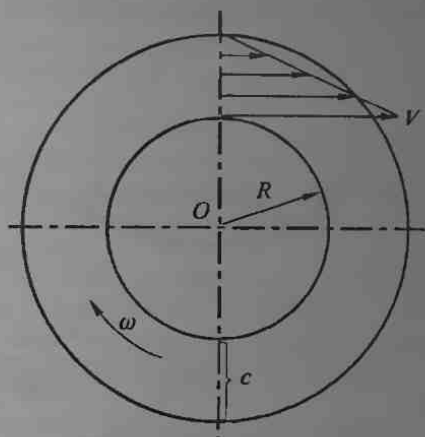


Рис. 7.6. Трение вала и вкладыша в случае их соосной установки (стрелка показывает распределение скорости жидкости)

деление скорости по толщине смазочной пленки постоянной толщины  $c$  (здесь  $c$  — зазор) является линейным. В этом случае градиент скорости равен  $V/c$  и, согласно определению вязкости, сопротивление трению на единицу площади равно

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{V}{c}.$$

Здесь  $A$  — площадь опорной поверхности. Полная сила трения равна

$$F = \eta \frac{VA}{c}. \quad (7.12)$$

Это уравнение Петрова, справедливое и в наши дни. Коэффициент трения определяется, как обычно, делением силы трения на нагруз-

ку  $W$ . Принимая во внимание, что площадь опорной поверхности равна  $A = 2\pi RL$  (здесь  $L$  — длина подшипника) и  $V = \omega R$ , можно найти, что

$$f = 2\pi\eta \frac{\omega R^2 L}{Wc}$$

Обычно используется удельная нагрузка на опорный подшипник, определяемая как нагрузка на единицу площади проекции вала  $P = W/(2RL)$ . Тогда коэффициент трения переписывается как

$$f = \pi \frac{\eta\omega}{P} \frac{R}{c} \quad (7.13)$$

Безразмерный комплекс  $\eta\omega/P$  иногда называют *числом Гумбеля*, т. е. коэффициент трения может быть представлен прямой линией (линия Петрова) (рис. 7.7). Другими словами, уравнение (7.13) показывает, что коэффициент трения прямо пропорционален вязкости  $\eta$  и скорости

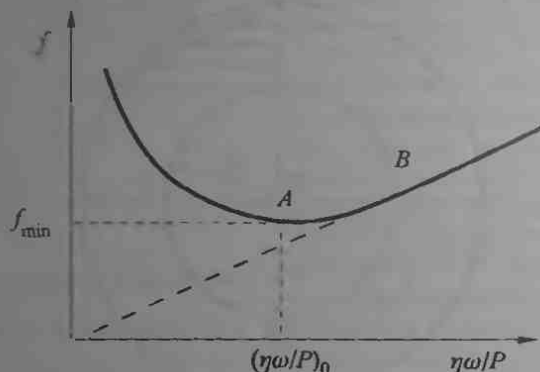


Рис. 7.7. Диаграмма трения

вала  $\omega$  и обратно пропорционален нагрузке  $P$ . На первый взгляд кажется разумным использовать смазку с наименьшей вязкостью (в общем случае, с наименьшим числом Гумбеля) для снижения трения в подшипнике. Однако это не так, поскольку при снижении вязкости возрастает эксцентриситет, а минимальный зазор между поверхностями уменьшается. Наступает момент, когда наиболее высокие неровности поверхностей вступают во взаимодействие и происходит изменение механизма трения (точка  $B$  на рис. 7.7, режим смешанной смазки).

Начиная от точки  $B$ , зависимость  $f$  отклоняется от прямой линии Петрова и при определенном значении числа Гумбеля  $(\eta\omega/P)_0$  достигает минимума. Минимальное значение коэффициента трения имеет порядок 0,001–0,005. Левее точки  $A$ , в которой достигается минимум, коэффициент трения возрастает вследствие перехода от гидродинамической и смешанной смазки к граничной смазке и, в конце концов, к сухому трению.

Основной практический вывод, следующий из рассмотренной теории, заключается в том, что существует критическое значение  $(\eta\omega/P)_c$ , обеспечивающее минимальное трение. Нагрузка  $P$  и скорость  $\omega$  обычно выбираются в соответствии с предъявляемыми требованиями, и проблема заключается только в выборе наилучшей смазки. Оптимальная вязкость определяется соотношением

$$\eta = \left(\frac{\eta\omega}{P}\right)_c \frac{P}{\omega}.$$

Это замечание имеет большое значение для смазывания опорных подшипников. Важный практический результат, извлеченный Петровым из этой теории, состоит в том, что удалось обосновать замену слишком дорогих растительных масел более дешевыми минеральными маслами.

**7.2.3. Уравнение Рейнольдса.** Многие особенности работы подшипников с жидкой смазкой можно предсказать, решая систему уравнений гидродинамики, состоящую из физических соотношений (7.2), уравнения непрерывности (7.4) или (7.5), уравнений движения (7.6) и энергетического уравнения (7.11). Однако ее решение было сложной задачей до тех пор, пока Рейнольдс не вывел из этой системы основное уравнение давления для смазочной пленки, руководствуясь некоторыми упрощенными, однако правдоподобными допущениями. Это уравнение представляет собой физическую и математическую основу гидродинамической теории смазки.

Общепринято, как делал и Рейнольдс, рассматривать ламинарное течение изовязкой, несжимаемой ньютоновской жидкости, т.е. случай постоянной вязкости. Скорость жидкости удовлетворяет уравнению непрерывности (7.5), а жидкость подчиняется закону Ньютона (7.2). Кроме того, течение является изотермическим, тогда энергетическое уравнение также удовлетворяется. Остальные допущения касаются уравнения Навье-Стокса (7.6), которое для стационарного потока ( $\partial v_x/\partial t = \partial v_y/\partial t = \partial v_z/\partial t = 0$ ) и при отсутствии объемных сил ( $G_x = G_y = G_z$ ) может быть переписано в следующей форме:

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right).$$

Члены в левых частях этих уравнений описывают силы инерции и имеют порядок величины  $\rho v^2/l$ , где  $v$  и  $l$  — характерные скорость и длина. Последние слагаемые в правых частях представляют собой вязкие силы и имеют порядок величины  $\eta v/l^2$ . Рейнольдс заметил,

что силы инерции, как правило, пренебрежимо малы по сравнению с вязкими силами, т. е. отношение  $\frac{\rho v^2 l}{\eta v} = \frac{vl}{\nu} \ll 1$ . Это отношение известно под названием числа Рейнольдса  $Re = vl/\nu$ . Допущение  $Re \ll 1$  позволяет существенно упростить уравнения Навье-Стокса, если пренебречь силами инерции:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \eta \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right).$$

Дальнейшее упрощение основано на допущении малой толщины пленки по сравнению с радиусами кривизны поверхностей тел (например, для плоского опорного подшипника это означает  $c/R \rightarrow 0$ ). Можно считать поверхности подшипника параллельными, а компонента скорости  $v_z$  по толщине пленки мала по сравнению с остальными компонентами ( $v_x, v_y$ ) и ей можно пренебречь (см. третье уравнение последней системы). Более того, благодаря сцеплению жидкости со стенками зазора, изменение скорости вдоль пленки ( $\partial v_x/\partial x, \partial v_x/\partial y, \partial v_y/\partial x, \partial v_y/\partial y$ ) происходит более медленно, чем по толщине пленки ( $\partial v_x/\partial z, \partial v_y/\partial z$ ). Другими словами, в системе уравнений Навье-Стокса остается только градиент скорости, а система сводится к

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \eta \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (7.14)$$

Эта система вместе с уравнением непрерывности (7.5) полностью определяет движение смазки. Третье уравнение системы (7.14) показывает, что градиент давления по толщине пленки пренебрежимо мал, и дает возможность проинтегрировать остальные уравнения. Полученные компоненты скорости подставляются в уравнение непрерывности, усредненное по толщине пленки. Таким образом, уравнение давления для смазочной пленки, выведенное Рейнольдсом, имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6V \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (7.15)$$

Здесь  $V$  — эффективная скорость скольжения, равная скорости движущейся поверхности подшипника при условии неподвижности другой поверхности.

Уравнение Рейнольдса часто выводят другим путем, используя условие сохранения массовой скорости потока. Пусть жидкость течет

через зазор между поверхностями  $A$  и  $B$ , как показано на рис. 7А, и поток смазки перемещается в двух направлениях  $x$  и  $y$ . Предполагают, что в направлении оси  $x$  имеет место комбинационное течение Куэтта и Пуазейля, а в направлении оси  $y$  — только течение Пуазейля, поскольку в этом направлении отсутствует движение поверхности. Согласно уравнениям (7.9) и (7.10), компоненты скорости потока равны

$$\begin{aligned} v_x &= V \left(1 - \frac{z}{h}\right) - \frac{h^2 z}{2\eta h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{\partial p}{\partial x}, \\ v_y &= -\frac{h^2 z}{2\eta h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{\partial p}{\partial y}. \end{aligned} \quad (7.16)$$

Объемные расходы смазки  $q_x$  и  $q_y$  на единицу ширины (здесь  $p = \text{const}$ ) в любом поперечном сечении пленки определяются как

$$q_x = \int_0^h v_x dz; \quad q_y = \int_0^h v_y dz.$$

Подставляя  $v_x$  и  $v_y$  из (7.16) и интегрируя, получаем

$$\begin{aligned} q_x &= \frac{1}{2} V h - \frac{1}{12} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ q_y &= -\frac{1}{12} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y}. \end{aligned}$$

Условие непрерывности требует, чтобы

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0,$$

или

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} V h - \frac{1}{12} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{1}{12} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0.$$

После перегруппировки этот результат можно записать в виде (7.15).

Аналитическое решение уравнения Рейнольдса — сложная процедура, ее можно выполнить лишь для некоторых частных случаев. Обычно это уравнение решают численно. Более подробную информацию можно извлечь из многочисленных монографий по теории смазки.

Ниже кратко обсуждается применение уравнения Рейнольдса для случая радиального подшипника.

#### 7.2.4. Уравнение Рейнольдса для радиального подшипника.

Существуют два упрощения уравнения Рейнольдса (7.15), основанные на пренебрежении изменением давления вдоль одного из двух направлений: 1) первый подход основан на допущении, что градиент давления в направлении оси  $x$  столь мал, что первым членом в левой

части уравнения (7.15) можно пренебречь; 2) другой подход подразумевает, что сдвигает в направлении оси  $y$  пренебрежимо мал, и позволяет пренебречь вторым слагаемым. Первый подход дает решение для «короткого подшипника», второй — для «длинного подшипника». Физически это означает, что мы имеем дело с бесконечно коротким подшипником (преобладает утечка с торцов подшипника) в первом случае и с бесконечно длинным подшипником (боковая утечка отсутствует) во втором случае.

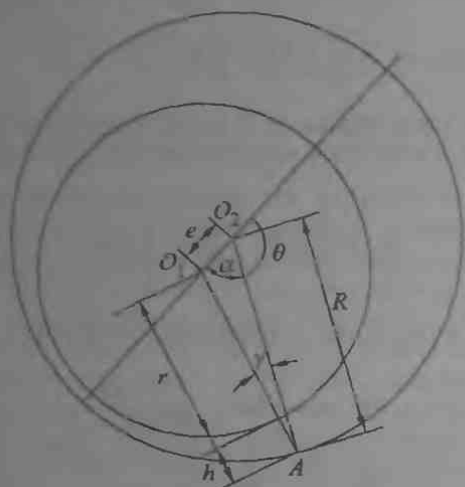


Рис. 7.6. Геометрия смазочной пленки вала и вкладыша

Прежде чем решать эти задачи, найдем толщину пленки  $h$  как функцию угловой координаты  $\theta$ . Эта координата измеряется от точки на линии центров, в которой зазор максимален (рис. 7.8). Из треугольника  $O_1O_2A$  можно найти

$$R = e \cos \alpha + (h + r) \cos \gamma.$$

Так как эксцентриситет  $e$  намного меньше радиуса подшипника  $R$  (их отношение имеет порядок 0.001), угол  $\gamma$  также мал и  $\cos \gamma \approx 1$ . Таким образом

$$h = R - r - e \cos \alpha.$$

Принимая во внимание, что  $\cos \alpha = \cos(180^\circ - \theta) = -\cos \theta$ , получаем

$$h = e \left( 1 + \frac{R}{e} \cos \theta \right).$$

Обычно  $e/c$  обозначают  $\epsilon$  и называют относительным эксцентриситетом; тогда

$$h = e(1 + \epsilon \cos \theta). \quad (7.17)$$

Теория короткого подшипника (рис. 7.9). Идея бесконечно короткого подшипника первоначально была высказана Мичеллом (1929), который доказал, что течение смазки в подшипнике конической длины в большей степени зависит от условий на торцах смазочной пленки.

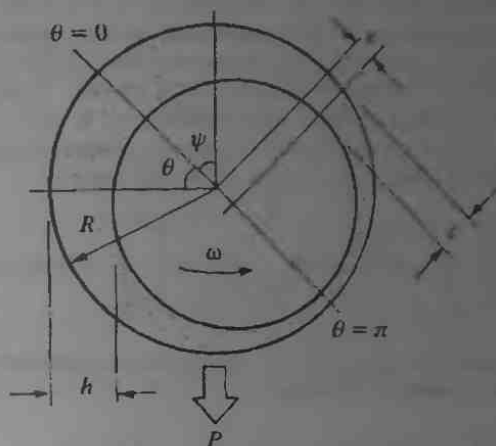


Рис. 7.9. Обозначения в системе вала и вкладыша

чем от условий на ее концах. Если это так, первый член уравнения Рейнольдса можно опустить:

$$\frac{d}{dy} \left( h^3 \frac{dp}{dy} \right) = 6\eta V \frac{dh}{dx} \quad (7.18)$$

Это уравнение дважды интегрируется:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{6\eta V}{h^3} \frac{dh}{dx} y + C_1, \quad p = \frac{3\eta V}{h^3} \frac{dh}{dx} y^2 + C_1 y + C_2,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий: 1)  $\frac{dp}{dy} = 0$  при  $y = 0$  в силу симметрии, 2)  $p = 0$  при  $y = \pm L/2$  (на концах подшипника). Из первого условия следует  $C_1 = 0$ . Второе условие позволяет найти постоянную  $C_2$ :

$$C_2 = -\frac{3V}{h^3} \frac{L^2}{4} \frac{dh}{dx}$$

и, следовательно,

$$p = -\frac{3\eta V}{h^3} \left( \frac{L^2}{4} - y^2 \right) \frac{dh}{dx}$$

Пологая  $x = R\theta$  и принимая во внимание (7.17), получаем

$$p = -\frac{3\eta V}{R\epsilon^2} \frac{\epsilon \sin \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3} \left( \frac{L^2}{4} - y^2 \right). \quad (7.19)$$

Интегрирование давления по переменным  $y$  и  $\theta$  дает нагрузочную способность подшипника. Можно определить две составляющих нагрузки, а именно, компоненту  $W_R$ , направленную вдоль линии центров, и компоненту  $W_T$ , перпендикулярную этой линии. Следует подчеркнуть, что интегрирование по  $\theta$  выполняется от 0 до  $\pi$ , пренебрегая всеми отрицательными значениями давления, вызванными кавитацией в пленке жидкости. Эти компоненты нагрузки таковы:

$$W_R = \int_0^{\pi} \int_{-L/2}^{L/2} pR \cos \theta d\theta dy, \quad W_T = \int_0^{\pi} \int_{-L/2}^{L/2} pR \sin \theta d\theta dy.$$

Подстановка давления (7.19) в эти формулы показывает, что следует определить следующие интегралы:

$$I_1 = \int_{-L/2}^{L/2} \left( \frac{L^2}{4} - y^2 \right) dy = \frac{L^3}{6}; \quad I_2 = \int_0^{\pi} \frac{\sin \theta \cos \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3} d\theta;$$

$$I_3 = \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3} d\theta.$$

Два последних интеграла  $I_2$  и  $I_3$  сводятся к табличным. Замена переменной  $x = \cos \theta$  (не путать с координатой  $x$ ) превращает  $I_2$  в

$$I_2 = - \int_{-1}^1 \frac{x dx}{(1 - \epsilon x)^3}.$$

Используя неопределенный интеграл (см. И. С. Градштейн и И. В. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. Формула 2.114(2))

$$\int \frac{x dx}{(a + bx^k)^3} = - \left( \frac{x}{b} + \frac{a}{2b^2} \right) \frac{1}{(a + bx^k)^2}$$

и положив  $a = k = 1$ ,  $b = \epsilon$ , получим

$$I_2 = - \frac{2\epsilon}{(1 - \epsilon^2)^2}.$$



Тот же справочник (формула 3.665) дает интеграл

$$\int_0^{\pi} \frac{\sin^{\mu-1} x dx}{(a + b \cos x)^{\mu}} = \frac{2^{\mu-1}}{\sqrt{(a^2 - b^2)^{\mu}}}$$

откуда следует интеграл  $I_3$  при  $\mu = 3$ ,  $a = 1$ ,  $b = \varepsilon$  и бета-функции  $B(3/2, 3/2) = \pi/8$ :

$$I_3 = \frac{\pi}{2} \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}}$$

Тогда

$$W_R = \frac{\eta V L^3}{c^2} \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon^2)^2}, \quad (7.20)$$

$$W_T = \frac{\pi \eta V L^3}{4 c^2} \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} \quad (7.21)$$

и нагрузочная способность  $W = (W_R^2 + W_T^2)^{1/2}$  равна

$$W = \frac{\pi \eta V L^3}{4 c^2} \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon^2)^2} \left[ 1 + \left( \frac{16}{\pi^2} - 1 \right) \varepsilon^2 \right]^{1/2} \quad (7.22)$$

Для нагрузки, отнесенной к площади проекции подшипника,  $P = W/LD$ , это уравнение переписывается как

$$P = \frac{\pi}{2} \eta \omega \left( \frac{r}{c} \right)^2 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} \left[ 1 + \left( \frac{16}{\pi^2} - 1 \right) \varepsilon^2 \right]^{1/2}$$

Угол давления  $\psi$ , определяющий положение минимума толщины пленки около линии действия нагрузки, рассчитывается как

$$\psi = \arctg \left( -\frac{W_T}{W_R} \right) = \arctg \left( \frac{\pi (1 - \varepsilon^2)^{1/2}}{4 \varepsilon} \right) \quad (7.23)$$

Теперь сила трения может быть рассчитана для случая, когда течение, вызванное давлением, пренебрежимо мало в направлении движения поверхности  $x$ . Пусть пространство зазора заполнено смазкой одинаковой вязкости. Принимая во внимание закон Ньютона (2.6) и соотношение (7.17), силу трения можно оценить как

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \tau R dy d\theta = \int_0^{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\eta \omega R^2}{(1 + \varepsilon \cos \theta)} dy d\theta = \frac{\eta \omega R^2 L}{c} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

Интеграл

$$I_4 = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

с помощью последовательной замены  $\theta \rightarrow \pi - \theta$  и  $\theta \rightarrow -\theta$  приводится к виду

$$I_4 = 2 \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

и рассчитывается при помощи табличных интегралов из вышеупомянутого справочника (формула 2.553(3)):

$$\int \frac{dx}{a + b \cos x} = \frac{2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{a^2 - b^2} \operatorname{tg} \frac{x}{2}}{a + b}$$

Пологая  $a = 1$  и  $b = \varepsilon$ , находим

$$I_4 = \frac{2\pi}{(1 - \varepsilon^2)^{1/2}}$$

и

$$F = \frac{\eta \omega R^2 L}{c} \frac{2\pi}{(1 - \varepsilon^2)^{1/2}} \quad (7.24)$$

Данное уравнение отличается от уравнения Петрова (7.12) дополнительным множителем  $(1 - \varepsilon^2)^{1/2}$ . Этот множитель обычно мал, если учесть влияние эксцентриситета вращающегося вала, и может быть отброшен без значительного ущерба для точности. Так, если  $\varepsilon < 0,5$ , множитель отличается от единицы менее чем на 0,14. Простое уравнение Петрова хорошо согласуется с результатами измерения трения и дает ошибку, не превышающую ошибку, вносимую допущениями о неизменной вязкости и полностью заполненном зазоре.

Коэффициент трения равен

$$f = \frac{F}{W} = 2 \frac{c}{R} \left( \frac{d}{L} \right)^2 \frac{(1 - \varepsilon^2)^2}{\varepsilon \left[ 1 + \left( \frac{16}{2\pi} - 1 \right) \varepsilon^2 \right]^{1/2}}$$

В силу основного допущения этого метода (градиент давления в направлении оси  $x$  пренебрежимо мал) окружная скорость истечения смазки легко рассчитывается из соотношения

$$q_z = \frac{1}{2} V h L \quad (7.25)$$

Тогда поток, вытекающий из боковых сторон подшипника (осевой поток), равен разности потоков через максимальное и минимальное сечения пленки, т. е.

$$q_y = \frac{1}{2} VL (h_{\max} - h_{\min}),$$

где  $h_{\max} = h(\theta = 0) = c(1 + \varepsilon)$  и  $h_{\min} = h(\theta = \pi) = c(1 - \varepsilon)$ . Следовательно,

$$q_y = VLc\varepsilon. \quad (7.26)$$

Теплота в подшипнике выделяется благодаря мощности трения  $E_{\text{тр}} = FV$ , которая с учетом (7.24) может быть записана как

$$E = \frac{\eta\omega^2 LR^3}{c} \frac{2\pi}{(1 - \varepsilon)^{1/2}}.$$

Предполагается, что выделившееся тепло поглощается смазкой и уносится с ней. Тогда повышение средней температуры  $\Delta T$  смазки можно найти из равенства

$$E_{\text{тр}} = \rho q_y C \Delta T.$$

Здесь  $C$  — удельная теплоемкость. Подстановка  $E_{\text{тр}}$  и  $q_y$  дает

$$\Delta T = 2\pi \frac{\eta\omega}{\rho C} \left(\frac{R}{c}\right)^2 \frac{1}{\varepsilon(1 - \varepsilon^2)^{1/2}}. \quad (7.27)$$

Это уравнение позволяет оценить условия охлаждения подшипника и выбрать смазку с оптимальной вязкостью.

В заключение можно сказать, что теория короткого подшипника дает приближенное аналитическое решение многих проблем смазки. Эта теория справедлива для отношения  $L/D$  вплоть до  $1/4$ , однако неприменима к ползунам, упорным подшипникам и частичным радиальным подшипникам.

**Теория длинного подшипника** (рис. 7.9). Если аксиальная утечка смазки пренебрежимо мала и подшипник рассматривается как бесконечно длинный, можно отбросить второй член уравнения Рейнгольда (7.15). Получается уравнение

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6V \frac{\partial h}{\partial x},$$

которое можно переписать в безразмерной форме при введении следующих переменных

$$\theta = x/R, \quad H = h/c, \quad \bar{p} = \frac{p}{6\eta\omega} \left(\frac{c}{R}\right)^2.$$

Тогда уравнение Рейнольдса принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( H^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \frac{dH}{d\theta}. \quad (7.28)$$

Его интегрирование дает

$$\frac{d\bar{p}}{d\theta} = \frac{H - \bar{H}}{H^3}, \quad (7.29)$$

где  $\bar{H}$  — постоянная интегрирования, имеющая смысл толщины пленки, при которой градиент давления  $dp/d\theta$  равен нулю. Принимая во внимание, что  $H = 1 + \varepsilon \cos \theta$  и  $\bar{H} = 1 + \varepsilon \cos \bar{\theta}$ , где  $\bar{\theta}$  — угол, при котором достигается  $\bar{H}$ , получаем

$$\frac{d\bar{p}}{d\theta} = \frac{1}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{1 + \varepsilon \cos \bar{\theta}}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3}.$$

После громоздких, но простых преобразований, опущенных здесь, мы приходим к следующему соотношению для давления:

$$p = \frac{\varepsilon \sin \theta (2 + \varepsilon \cos \theta)}{(2 + \varepsilon^2)(1 + \varepsilon \cos \theta)^2}. \quad (7.30)$$

При выводе этого уравнения использовались условия Зоммерфельда:  $p = 0$  при  $\theta = 0$  и  $2\pi$ . Здесь следует заметить, что существуют другие граничные условия, более реалистичные, но приводящие к сложным вычислениям. По этой причине они не обсуждаются здесь.

Постоянная интегрирования  $\bar{H}$  вычисляется по формуле

$$\bar{H} = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 + (\varepsilon^2/2)}. \quad (7.31)$$

Теперь нагрузочная способность может быть получена интегрированием уравнения (7.30). Рассмотрим две составляющие нагрузки  $W_R$  и  $W_T$ , как и для узкого подшипника. Так как давление  $p$  не изменяется в осевом направлении, т. е.  $p$  не зависит от  $y$ , эти компоненты можно рассчитать в безразмерной форме из соотношений

$$\bar{W}_R = \int_0^{2\pi} \bar{p} \cos \theta d\theta; \quad \bar{W}_T = \int_0^{2\pi} \bar{p} \sin \theta d\theta. \quad (7.32)$$

Здесь  $W_{R,T} = 6\eta VL \left(\frac{R}{c}\right)^2 \bar{W}_{R,T}$ .

Интегрирование по частям уравнения (7.32) дает

$$W_R = \bar{p} \sin \theta \Big|_0^{2\pi} - \int_0^{2\pi} \frac{d\bar{p}}{d\theta} \sin \theta d\theta; \quad W_T = \bar{p} \cos \theta \Big|_0^{2\pi} + \int_0^{2\pi} \frac{d\bar{p}}{d\theta} \cos \theta d\theta.$$

В силу граничных условий Зоммерфельда  $\bar{p} = 0$  при  $\theta = 0$  и  $2\pi$  получаем

$$\bar{W}_R = - \int_0^{2\pi} \frac{d\bar{p}}{d\theta} \sin \theta d\theta, \quad \bar{W}_T = \int_0^{2\pi} \frac{d\bar{p}}{d\theta} \cos \theta d\theta.$$

Подстановка (7.29) и (7.32) в эти уравнения и последующее интегрирование дают

$$\bar{W}_R = 0; \quad \bar{W}_T = \frac{\pi \epsilon}{(1 - \epsilon)^{1/2} (1 + \epsilon^2/2)} \quad (7.33)$$

Теперь угол давления можно определить как

$$\psi = \arctg \left( - \frac{\bar{W}_T}{\bar{W}_R} \right) = \frac{\pi}{2}.$$

Это означает, что центр вала смещается на прямой угол по отношению к линии действия нагрузки. Наблюдения показывают, что это действительно так, если справедливы условия Зоммерфельда. Выполнение этого требует наличия малого давления, которое ниже атмосферного (отрицательное давление). Тогда полная нагрузка  $W$  совпадает со своей тангенциальной составляющей и в размерной форме может быть записана как

$$W = \eta V L \left( \frac{R}{c} \right)^2 \frac{6\pi \epsilon}{(1 - \epsilon)^{1/2} (1 + \epsilon^2/2)} \quad (7.34)$$

или, используя нагрузку  $P = W/(LD)$ , как

$$\frac{P}{\eta \omega} \left( \frac{c}{R} \right)^2 = \frac{3\pi \epsilon}{(1 - \epsilon)^{1/2} (1 + \epsilon^2/2)}. \quad (7.35)$$

Левую часть этого уравнения иногда обозначают  $S_0$  и называют *числом Зоммерфельда*, которое характеризует несущую способность подшипника. Однако в литературе встречаются различные определения этого числа, и особое внимание следует уделить его определению, прежде чем использовать его.

Сила трения  $F$  определяется интегрированием напряжения сдвига по всей площади вала; так же рассматривается и поток, вызванный давлением.

Тогда

$$F = \int_0^L \int_0^{2\pi} \tau R d\theta dy,$$

где

$$\tau = \frac{1}{2} h \frac{dp}{dx} + \frac{V}{h} \eta.$$

Интегрирование дает

$$F = \frac{c\varepsilon W}{2R} \sin \psi + \frac{2\pi\eta VRL}{\varepsilon(1-\varepsilon)^{1/2}}. \quad (7.36)$$

В этом случае  $\sin \psi \approx 1$  и уравнение можно переписать в виде

$$\bar{F} = \frac{F}{\eta VL} \frac{c}{R} = \frac{4\pi(1+2\varepsilon^2)}{(2+\varepsilon^2)(1-\varepsilon)^{1/2}}. \quad (7.37)$$

Коэффициент трения равен

$$f = \frac{F}{W} = \frac{c\varepsilon}{2R} + \frac{2\pi}{(1-\varepsilon^2)^{1/2}} \frac{\eta VRL}{cW}, \quad (7.38a)$$

или

$$f \frac{R}{c} = \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{\pi}{(1-\varepsilon^2)^{1/2}} \frac{1}{So}. \quad (7.38b)$$

Следует помнить, что результаты теории длинного подшипника дают приемлемую точность для  $L > 2D$ .

### 7.3. Упругогидродинамическая смазка

В тяжело нагруженных узлах машин, работающих со смазкой в условиях точечного или линейного контактов, таких как подшипники качения и зубчатые передачи, могут возникнуть условия, при которых трение и толщина пленки между двумя телами, находящимися в относительном движении, определяются не только вязкостью смазки, но и упругими свойствами этих тел. Более того, уже нельзя пренебречь зависимостью вязкости от давления (см. уравнение (7.3)) и/или локальной температуры. Это происходит, когда деформация поверхности, вызванная большой нагрузкой, сравнима с толщиной гидродинамической пленки. В данном случае гидродинамическая теория смазки неприменима для описания поведения контакта, так как деформация поверхности в ней не рассматривается.

Упругогидродинамическая теория смазки, разработанная Эртелем и Грубиним, дает адекватное описание эффектов упругой деформации и вязкости, зависящей от давления. Эта теория находится на границе между гидродинамикой и теорией упругости и охватывает одновременно решение гидродинамической задачи о течении смазки через узкий зазор (уравнение Рейнольдса для смазки) и контактной задачи для упругих тел (уравнение Герца для твердых тел). Здесь также должна быть учтена связь вязкости и давления (например, в виде уравнение Баруса).

Например, для бесконечного цилиндра, находящегося в контакте с упругим полупространством, приходится решать уравнение Рейнольдса для длинного подшипника

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6V \frac{\partial h}{\partial x} \quad (7.39)$$

совместно с уравнением плоской контактной задачи для определения перемещения (прогиба) поверхности полуупространства (см. гл. 2)

$$w = -\frac{4}{\pi E} \int_{s_1}^{s_2} p'(s) \ln|x-s| ds. \quad (7.40)$$

Последнее уравнение определяет упругую составляющую зазора  $h$ , который в данном случае записывается в следующем виде:

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R} + w.$$

Здесь  $R$  — радиус цилиндра и  $h_0$  — толщина пленки в центре контакта.

Следует иметь в виду, что вязкость зависит от давления. В такой постановке система уравнений (7.39) и (7.40) относительно неизвестного давления  $p$  не может быть решена аналитически. Однако существует большое количество численных методов решения, которые позволяют получить важные результаты и обеспечить прогнозирование работоспособности тяжело нагруженных узлов трения.

Анализ системы уравнений и большого объема экспериментальных данных подтверждает тот факт, что упругогидродинамическое действие — это комбинированный гидродинамический и деформационный эффект. Действительно, смазка вовлекается в зазор между тяжело нагруженными телами, движущимися друг относительно друга. Как и при гидродинамической смазке, толщина пленки и давление смазки определяются расклинивающим действием. Это высокое давление ответственно за упругую деформацию сопрягаемых тел и приводит к перераспределению нагрузки на большую площадь. В зоне контакта пленка имеет почти постоянную толщину, за исключением резкого сужения вблизи выхода из зазора. Сужение обусловлено тем, что, поскольку давление распределяется почти по закону Герца и вблизи выхода из контакта резко падает, то и вязкость смазки убывает, вызывая уменьшение толщины пленки (рис. 7.10). Скорость истечения смазки резко возрастает в силу условия неразрывности течения. В результате возрастает гидродинамическое давление и возникает пик давления, иногда называемый пиком Петрусевича.

В области контакта высокое давление вызывает значительный рост вязкости смазки, ее нагрузочная способность возрастает. Высоковязкая смазка с трудом выжимается из зоны контакта через узкий зазор. Формирующаяся упругогидродинамическая смазочная пленка имеет толщину 0,1–10 мкм. Оценка толщины пленки представляет значительный интерес, так как условием успешной работы упругогидродинамического контакта является то, что толщина пленки должна быть не меньше эквивалентной шероховатости сопрягаемых поверхностей.

Рассмотрим для примера хорошо известную формулу Доусона–Хиггинсона, являющуюся аппроксимацией численного решения упругогид-

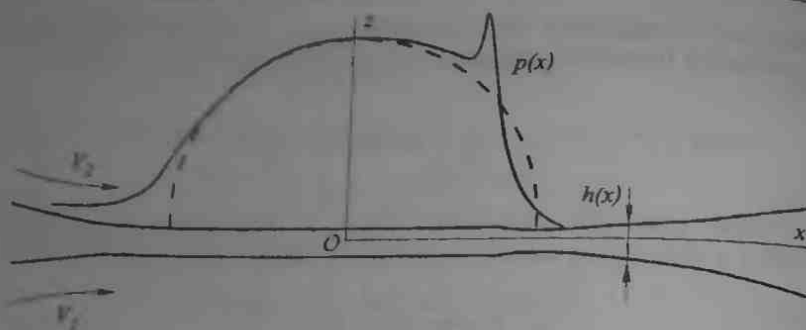


Рис. 7.10. Область контакта и давление масляной пленки в условиях упруго-гидродинамической смазки

родинамической задачи для двух цилиндров радиусов  $R_1$  и  $R_2$  (контакт по линии). Согласно этой формуле безразмерная толщина слоя смазки равна

$$H_{\min} = h_{\min}/R = 2,65V^{-0,7}J^{0,54}W^{-0,13}$$

Это уравнение связывает в безразмерной форме минимальную толщину пленки  $H_{\min}$  с тремя безразмерными параметрами, а именно, скоростным параметром  $V = \frac{\eta_0 V_c}{ER}$ , материальным параметром  $J = \alpha E$  и нагрузочным параметром  $W = \frac{W'}{ER}$ . Здесь  $R$  — эффективный радиус ( $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ );  $E$  — эффективный модуль упругости ( $\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$ );  $V_c$  — скорость вовлечения смазки ( $V_c = \frac{1}{2}(V_1 + V_2)$ );  $\eta_0$  — динамическая вязкость при атмосферном давлении и рабочей температуре;  $\alpha$  — пьезокоэффициент вязкости;  $W'$  — погонная нагрузка.

Смазка находится в очень жестких условиях, так как, например, максимальное герцевское давление может достигать 3–4 ГПа, а скорость вовлечения смазки — 10 м/с. Время прохождения зоны контакта составляет около  $10^{-4}$  с, а скорость сдвига —  $10^7$ – $10^8$  с $^{-1}$ . Теплообразование, обусловленное сдвигом, повышает температуру смазки на десятки и даже сотни градусов и увеличивает температуру сопрягаемых тел вблизи зоны контакта. В этом случае простое уравнение Баруса обычно модифицируют, включая в него вязкостно-температурный коэффициент. Основные особенности изотермического упругогидродинамического контакта остаются справедливыми. Среди них уравнение Доусона–Хиггинсона для оценки толщины пленки. Тем не менее, при расчете силы трения и энергетических потерь нельзя пренебрегать термическими эффектами. Наряду с высокими давлением и скоростью сдвига они приводят к неньютоновскому поведению смазки.

С ростом нагрузки и температуры и со снижением скорости качения шероховатость поверхности существенно влияет на трение и тепловое



состояние подшипника. Толщина пленки становится переменной, на вершинах неровностей она очень мала. Отношение толщины пленки к комбинированной шероховатости поверхностей является мерой жесткости условий работы упругогидродинамического контакта. Здесь эффективная шероховатость равна  $R_q = (R_{q1}^2 + R_{q2}^2)^{1/2}$ , где  $R_{q1}$  и  $R_{q2}$  — среднеквадратические шероховатости контактирующих поверхностей. Общеизвестно, что  $\Lambda = h_{\min}/R_q$ , равное 2 или 3, соответствует максимальной долговечности фрикционного контакта, в то время как при  $\Lambda < 1$  возможен переход к граничному трению.

Толщину пленки можно использовать как приближенный ориентир при расчете и конструировании тяжело нагруженных деталей машин, работающих со смазкой. Увеличения толщины пленки можно добиться, увеличивая вязкость и ее пьезокэффициент путем подбора смазки и улучшения условий охлаждения; увеличивая скорость качения, размеры элементов трибосопряжения и жесткость материалов, снижая контактное давление. Чем больше толщина пленки, тем выше усталостная долговечность упругогидродинамического контакта и тем меньше износ, температура смазки и энергетические потери.

Перечисленные выше закономерности гидродинамической и, главным образом, упругогидродинамической смазки играют существенную роль в работе суставов человека и животного. Обычно коэффициент трения суставов изменяется от 0,001 до 0,03, что часто не достигается даже в гидродинамических подшипниках. Конструкция сустава включает комбинацию пористого хряща на костной подложке и синовиальной жидкости с нелинейной зависимостью вязкости от давления. Более того, эта жидкость обладает свойствами жидкого кристалла в диапазоне температур, при которых существует живой организм, и способна образовывать прочный граничный смазочный слой. Поэтому трение и смазка суставов связаны не только с упругогидродинамической смазкой, но и с рядом сопутствующих механизмов, таких как граничная смазка, просачивание и сдавливание смазочной пленки между сочленяющимися пористыми хрящами. Такое сложное устройство сустава препятствует контакту костных поверхностей даже в условиях больших импульсных нагрузок — известно, что у человека эти нагрузки иногда на порядок превышают вес тела. При этом не следует забывать, что в здоровом организме суставы работают безотказно в течение всей жизни.

Исследование суставов живых существ представляет большой интерес как для создания протезов, так и для конструирования по их образу и подобию узлов трения с минимальным коэффициентом трения и большой долговечностью.

### Список литературы

1. Галахов М. А., Гусятников П. Б., Новиков А. П. Математические модели контактной гидродинамики. — М.: Наука, 1985.

2. Димитров А. Теория смазки в инженерном деле. — М.: Машгиз, 1962.
3. Кадвар Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. — М.: Машиностроение, 1976.
4. Лоренчикский М. В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. — М.: Машгиз, 1969.
5. Лавдан Д. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.
6. Мур Д. Основы и применения трибоники. — М.: Мир, 1978.
7. Петров Н. П. Гидродинамическая теория смазки. Избранные работы. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.
8. Пинкус О. Столетие теории Рейнольдса. Краткая история гидродинамической теории смазки // Проблемы трения и смазки. 1987. № 1. С. 1–20.
9. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды и А. В. Чичинадзе. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. — М.: Машиностроение, 1990.

## Глава 8

# ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗНАШИВАНИЯ

### 8.1. Испытания на трение и изнашивание и их данные

К задачам испытаний на трение и изнашивание относятся: оценка триботехнических характеристик материалов и смазок, подбор оптимальных их сочетаний для конкретных приложений, оценка триботехнических характеристик деталей, узлов и машин в целом. В соответствии с целью и условиями проведения, испытания могут быть *модельными* — в условиях лаборатории, *стендовыми* — в условиях близких к практическим и *полевыми* — в реальных условиях эксплуатации.

Лабораторные и стендовые испытания обычно выполняются *ускоренными*, чтобы сократить время начальной стадии подбора материалов и смазок. При этом моделирование должно отражать условия работы реальной трибосистемы, ее конструкцию и вид компонентов. В ускоренных испытаниях некоторые из их параметров ужесточают, наиболее часто это контактное давление, скорость или температура. Методология трибоиспытаний обобщена в работах Блау, Брауна, Будински, Евдокимова, Чихоса, Чичинадзе.

Наиболее существенные факторы для проведения эффективного моделирования:

- геометрия контактной пары;
- кинематика движения;
- вид нагружения;
- тип смазки;
- контроль окружающей трибосистему среды;
- подготовка образцов для испытаний.

Все эти факторы должны быть учтены, для того чтобы результаты испытаний были надежными, воспроизводимыми и адекватными моделируемой трибосистеме. Другое важное обстоятельство — это точность и надежность измерений фрикционных характеристик в испытаниях.

Для измерения силы или момента трения чаще всего используются различного вида динамометры — тензометрические, пружинные, маятниковые, пьезоэлектрические, индукционные и т. д. Износ определяют, измеряя потерю массы, изменение линейных размеров образцов, изменение профиля поверхности трения или размера контрольных лунок на этой поверхности, интенсивность отделения контрольных радиоактивных изотопов с продуктами износа и т. д. Температура может определяться как контактным (термопара) так и бесконтактным (пирометр) методами. Другими характеристиками, определяемыми в процессе трибонспытания, могут быть количество и размер частиц изнашивания, изменение химического состава поверхностных слоев испытываемых материалов и смазок, структурные изменения в материалах, а также морфология поверхности трения (наличие пленок перенесенного материала, трещин, пор и т. д.).

Существуют три основные группы машин для испытаний на трение и изнашивание по исходной геометрии контактной пары: точечный контакт, линейный контакт и конформный контакт (по плоскости или

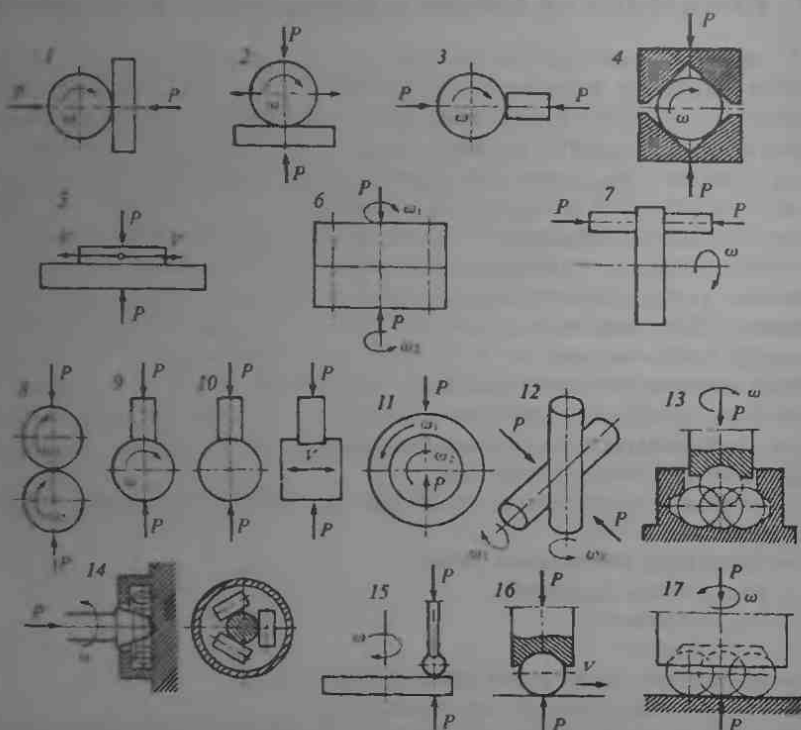


Рис. 8.1. Различные схемы испытаний на трение и износ: 1-4 — цилиндр-плоскость; 5-7 — плоскость-плоскости; 8-12 — цилиндр-цилиндр; 13 — контакт шаров; 14 — конус-цилиндр; 15-17 — шар-плоскость

криволинейной поверхности). Эти три типа могут реализоваться в огромном количестве модификаций. Часть этих вариантов реализована в испытательных машинах серийного производства разных стран, еще большее разнообразие конструкций можно найти в исследовательских лабораториях, где они приспособлены для моделирования нестандартных трибологических задач. Характерные виды контактных пар, применяемых в трибоиспытаниях, представлены на рис. 8.1.

Некоторые из испытательных машин стандартизованы в развитых индустриальных странах, как, например, четырехшариковая машина трения для оценки свойств смазочных материалов, двухроликовая машина для моделирования схватывания или машина колодка — ролик для испытаний полимерных материалов. Однако большинство типов машин, применяемых для трибоиспытаний, не стандартизовано, и это создает трудности при сравнении результатов, полученных в разных странах и даже в разных лабораториях одной страны.

## 8.2. Обработка, представление и стандартизация результатов трибоиспытаний

До настоящего времени не существует общепринятой формы представления данных испытаний на трение и износ, и в каждом центре трибологических исследований складывалась своя традиция в оформлении протоколов испытаний. Исходным материалом для них долгое время служили показания аналоговых приборов, а теперь, поскольку в основном испытательные машины сопряжены с компьютерами, цифровые данные, вводимые в память компьютера в процессе испытаний.

Одной из первых попыток формализовать данные была предложенная Чихосом в ФРГ (Приложение к стандарту ФРГ ДИН 50302) карта, рассматривающая испытываемую трибосистему в совокупности связей между ее компонентами (приложение 3.1, рис. П.3.1). Данная карта достаточно сложна для заполнения, но несомненными достоинствами ее являются наглядность и возможность рассмотрения различных зависимостей трибологических характеристик от параметров, описывающих компоненты системы и условия ее работы. Другая попытка стандартизации данных была предпринята Блау (Комитет по трибологии Американского общества испытания материалов — G2 ASTM). Он предложил форму более простого вида для общего отчета по результатам трибоиспытаний (приложение 3, табл. П.3.1).

В настоящее время принято также представлять результаты трибоиспытаний в виде карт, отражающих на плоскости различные режимы поведения трибосистемы в зависимости от нагрузочно-скоростных параметров испытаний.

Одним из давно применяемых способов такого представления являются «*pv*» карты, показывающие на плоскости как располагаются изолинии износа полимерных материалов в зависимости от контактного

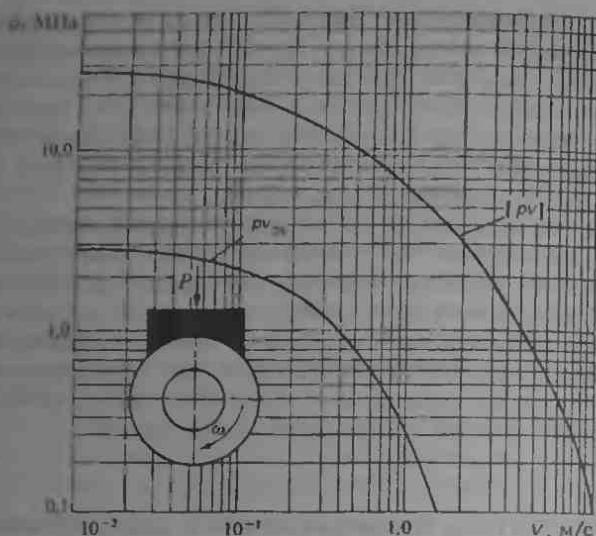


Рис. 8.2. График  $p$  и данных для композита на основе полиамида при трении по стали.  $[pv]$  — линия допустимого линейного износа;  $p$  — линия износа равного 25 мкм

давления и скорости скольжения (рис. 8.2). Такие карты удобны для конструкторов, так как показывают области допустимых в сопряжении нагрузок и скоростей, соответствующих заданному износу за заданное время работы.

Развитие данного подхода предприняли специалисты Кембриджской школы, предложившие так называемые *карты износа*. Одна из них представлена на рис 8.3.

В данном представлении использованы оси координат, по которым откладываются контактное давление и скорость, нормализованные по номинальной площади контакта, твердости, пути скольжения, плотности теплового выделения и температуропроводности. Сплошные линии разделяют области карты на зоны, соответствующие различным механизмам изнашивания и представляют собой границы критических комбинаций параметров перехода от одного вида к другому. Так, например, при очень высоких контактных давлениях происходит смятие вершиностей в контакте и полное схватывание (режим *D*). Снижение нагрузки при относительно низкой скорости скольжения изменяет режим *I* на режим *II* (интенсивное изнашивание со срезом металлических частиц на неровностях), а затем — режим *III* (нормальное изнашивание с удалением окисного слоя). Повышение скорости скольжения приводит к выделению тепла и в зависимости от условий теплообмена может инициировать окислительное изнашивание (режим *IV*) или даже

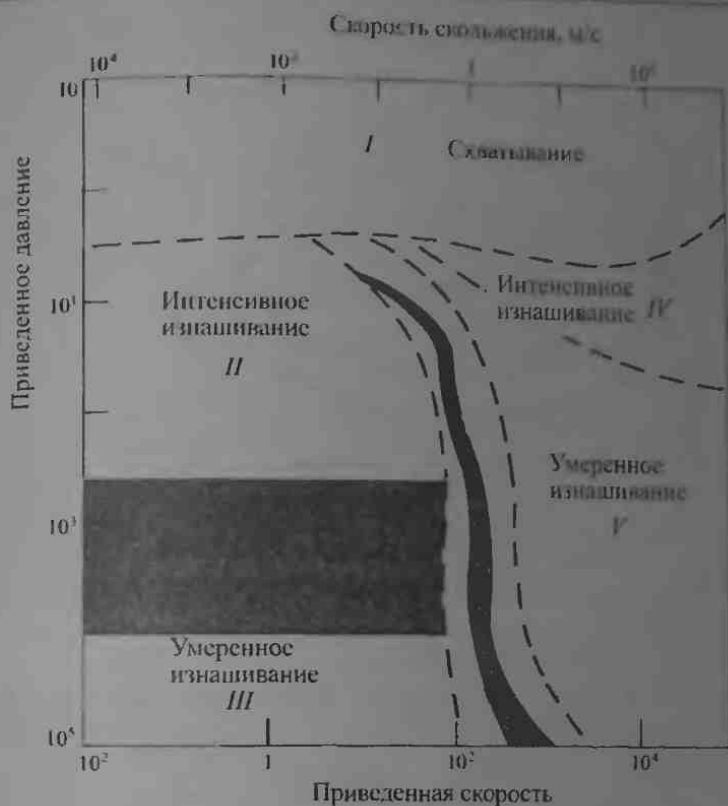


Рис. 8.3. Карта механизмов изнашивания стали по стали (S Lim, J. Brunton, and M. Ashby // *Act. Met.* 1987. V. 35. P. 1343-1348)

контактное плавление. На карте износа заштрихованы нестационарные переходные режимы, соответствующие фазовым переходам в стали при повышении температуры при трении.

Следующей ступенью обобщения данных трибоспытаний стали компьютерные базы данных, представляющие исследователю и инженеру результаты испытаний трибосистемы при различных комбинациях условий. Однако необходимым условием для формирования таких баз является наличие стандартных данных, которые одинаковы независимо от места, где они были получены. Важность соблюдения этого условия можно иллюстрировать результатами проекта VAMAS, в котором участвовала 31 организация из 7 стран мира. Согласно условиям проекта образцы для испытаний с инструкциями по их проведению и представлению данных были доставлены участникам (рис. 8.4). Эти данные приведены в табл. 8.1. Из этой таблицы видно, что даже при использовании одинаковых образцов и методики испытаний разброс результатов весьма существен.

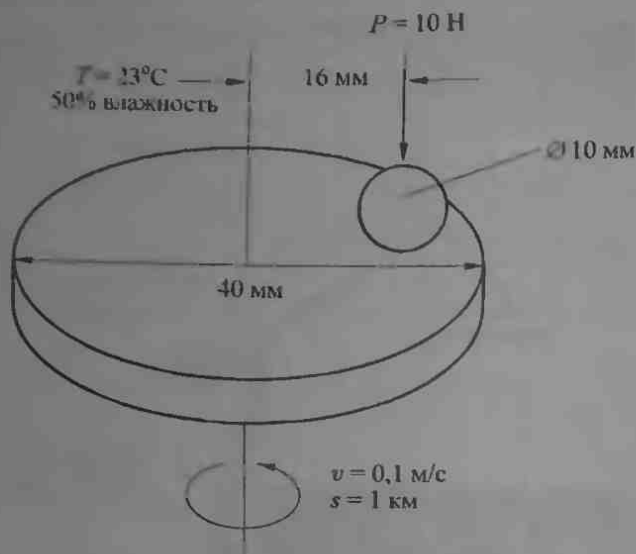


Рис. 8.4. Схема испытаний в проекте VAMAS (ASM Handbook. ASM Intl. 1992. V. 18. P. 486)

Таблица 8.1. Результаты испытаний на износ по программе VAMAS

Показатель	Набор 1 Сталь- сталь	Набор 2 Керамика- сталь	Набор 3 Сталь- керамика	Набор 4 Керамика- керамика
Коэффициент трения (a)	$0,06 \pm 0,11$	$0,76 \pm 0,14$	$0,60 \pm 0,12$	$0,41 \pm 0,08$
Количество испытаний	109	75	64	76
Количество лабораторий	26	26	23	26
Интенсивность изнашивания мкм/км (b)	$70 \pm 20$	Очень мала	$81 \pm 29$	Очень мала
Количество испытаний	47	---	29	---
Количество лабораторий	11	---	11	---
Диаметр пятна износа	$2,11 \pm 0,27$	(c)	$2,08 \pm 0,35$	$0,3 \pm 0,05$
Количество испытаний	102	---	60	56
Количество лабораторий	23	---	21	19
Ширина впадины износа	(d)	$0,64 \pm 0,13$	(d)	Не измерена
Количество испытаний	---	54	---	---
Количество лабораторий	---	19	---	---
Примечание: (a) — на пути скольжения 1000 м, (b) — на участке пути скольжения от 300 до 1000 м, (c) — перенос материала с диска на шарик, (d) — перенос материала с шарика на диск.				

Поэтому, чтобы иметь надежные и воспроизводимые данные испытаний, необходимо прежде всего решить проблему стандартизации методик испытаний, представления и обработки их данных.



Согласно Блау можно сформулировать шесть основных задач стандартизации:

- установление общепринятой базы для оценки характеристик вновь разработанных триботехнических материалов;
- создание базы данных для подбора материалов новых конструкций узлов трения;
- оценка качества и сертификация свойств материалов в различных партиях;
- создание базы данных для исследований влияния различных параметров на трибологические характеристики;
- обучение испытателей поиску самых надежных и воспроизводимых методик трибоиспытаний;
- разработка общепринятых методов обмена трибологической информацией между пользователями.

Стандарты на трибоиспытания, принятые в СССР и США, приведены в приложении 3, табл. ПЗ 2–ПЗ 4.

Анализ стандартов СССР и США показывает, что они не отражают все многообразие комбинаций материалов и условий трения и изнашивания, хотя в СССР данная работа велась более комплексно, чем в США, специальным институтом Госкомитета по стандартам. Преобладают стандарты, которые регламентируют испытания конкретных изделий. Поэтому в настоящее время остается весьма актуальной проблема унификации национальных стандартов и создание на их основе международных документов более общего вида. Международная организация по стандартизации начала такую работу в рамках Подкомитета по опорам скольжения, но она еще очень далека от завершения. Кроме того, во многих развитых странах были сделаны попытки создать базы данных по триботехническим характеристикам материалов, смазок и узлов трения.

### 8.3. Трибологические базы данных

Попытки создания баз данных (БД) в трибологии начались с середины 80-х годов. Первоначально такие базы размещались в памяти больших компьютеров, но в связи с быстрым распространением персональных компьютеров, доступных любому инженеру, базы данных стали разрабатываться в основном для ПК. Вначале БД представляли собой файлы справочных данных по свойствам материалов и узлов, но вскоре концепция БД стала строиться с учетом интеграции справочных данных с библиографическими источниками, обновляемыми периодическими бюллетенями и экспертными системами. Эта концепция может быть иллюстрирована проектом создания Трибологической информационной системы (ACTIS) в Национальном институте стандартов и технологии США. Структурная схема системы представлена на рис. 8.5. Она включает БД по свойствам материалов, составленные на основе трибоиспытаний, БД по конструкциям трибосистем, библиографические

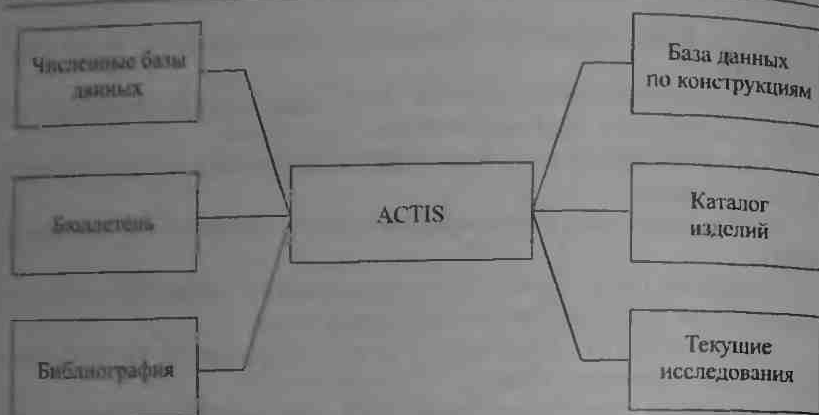


Рис. 8.8. Структура трибологической информационной системы (ACTIS) Национального института стандартов и технологий США

БД, электронный бюллетень, каталоги типовых узлов трения и перечни исследовательских проектов, разрабатываемых в области трибологии.

Проекты, подобные упомянутому выше, выполнялись и в других странах, но до сих пор интегрированных информационных систем нет, и наиболее распространены БД по триботехническим свойствам определенных материалов или конструкций трибосистем.

Одна из таких типичных БД — это база по триботехническим характеристикам полимеров и полимерных композитов — «Композит», разработанная в ИММС им. В.А.Белого НАН Беларуси. Для унификации данных в БД методика трибоиспытаний была вначале стандартизована в рамках проекта стандарта ISO TR 8285, регламентирующего геометрию и метод изготовления образцов, методику проведения испытаний и записи данных. На рис. 8.8 показаны кинематическая схема испытаний и способ изготовления полимерных образцов.

Первоначально результаты испытаний представлялись в БД в виде *re chart*, аналогичных приведенной на рис. 8.2, а затем, учитывая важность температуры контакта в поведении полимеров при трении, в БД стали заноситься данные по температуре, измеряемой термопарой вблизи поверхности металлического контртела. Полный набор данных испытаний включает: контактное давление, скорость скольжения, коэффициент трения, фактор износа, и температуру контакта. Кроме того, в БД включены данные по физико-механическим свойствам материалов, технологии их изготовления, химическому составу, а также сведения о материале контртела, его термообработке, твердости и исходной шероховатости поверхности.

Оболочка БД включает корневую часть, содержащую условия испытаний, конструктивные особенности узла трения, материалы и вид окружающей среды, средние значения параметров испытаний и расширения (подбазы) с более детальной информацией о поведении ма-

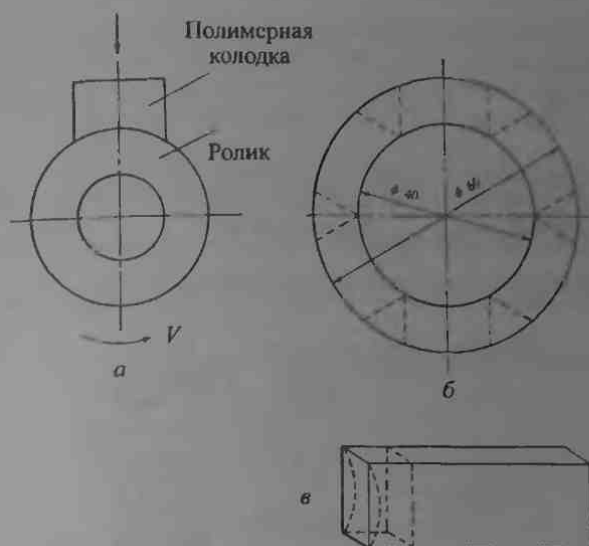


Рис. 8.6. Схема контакта колодка–ролик (а) и методы изготовления колодок (б, в) (по рекомендациям ISO/TR 828, 1993)

териалов в конкретных условиях. Подбаза, содержащая результаты триботехнических испытаний антифрикционных материалов, сконструирована таким образом, что каждая экспериментальная точка представляет собой набор параметров и характеристик ( $p, v, f, K, T$ ), к которым добавлены номер испытания и номер точки в испытании (табл. 8.2).

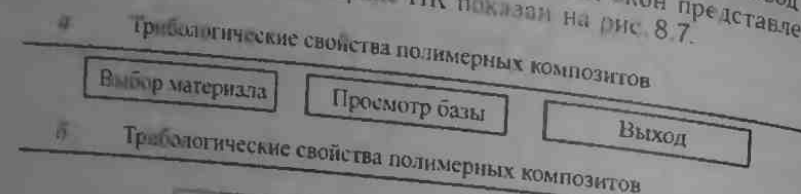
Т а б л и ц а 8.2. Структура БД по композитам

Компоненты полей и название	Примеры параметров
Номер испытания	10
Номер точки в текущем испытании	3
Давление $p$ , МПа	2,5
Скорость $v$ , м/с	0,5
Коэффициент износа $K$ , $\text{м}^2/\text{N}$	2,8
Коэффициент трения $f$	0,5
Температура $T$ , К	458

Служебный набор содержит следующие программы:

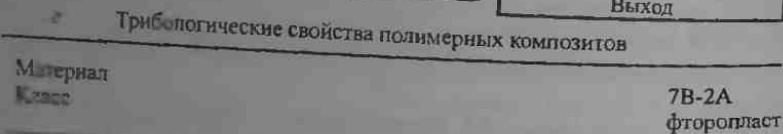
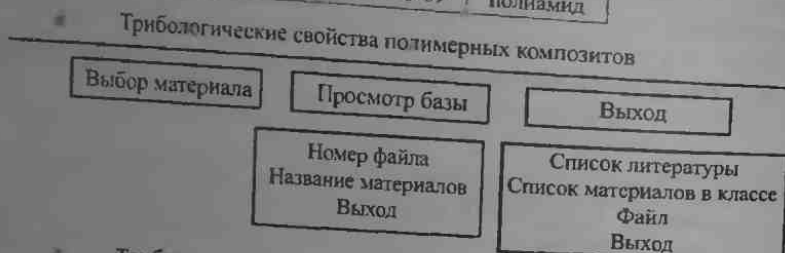
- модуль загрузки и распечатки данных подбазы;
- корневую систему БД;
- подбазу экспериментальных данных.

Работать с базой данных можно в двух режимах — пассивном (поиск материалов для заданного узла трения) и активном — ввод новой информации и изменение данных. Общий вид окон представления данных БД «Композит» на экране ПК показан на рис. 8.7.



б Трибологические свойства полимерных композитов

Просмотр базы	Название	Класс
1	7V-2A	фторопласт
2	ATM-2	полиамид
3	PA6-1-203	полиамид
4	TNK-2-G5	полиамид
5	SAM-3P	полиамид
6	PA6-210KS	полиамид
7	PA6-25-69	полиамид



Скорость	Параметр	Давление						
		0,1	0,25	0,5	1,25	2,5	5,0	10,0
0,1	K	0,54	1,72	4,59	10,10	0	0	0
	f	0,24	0,27	0,19	0,24	0,14	0,14	0,14
	Г, К	293	294	295	301	315	315	342

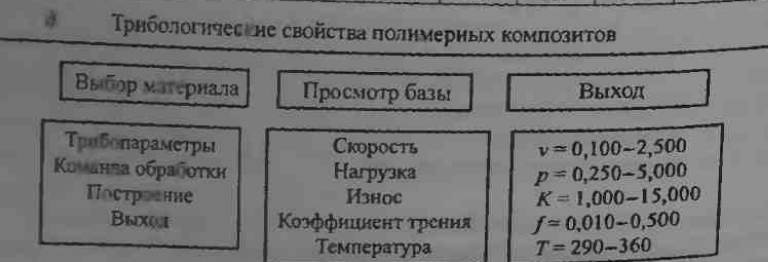


Рис. 8.7. Информация, выводимая на дисплее а) основное меню, б, в, г) прямые запросы, д) обратный запрос

Пользователь работает с БД в диалоговом режиме. В режиме поиска могут быть получены ответы на следующие прямые запросы:

- показать весь список материалов в БД (рис. 8.7, б);
- показать материалы указанного класса;
- показать свойства определенного материала (рис. 8.7, в, г).

Обратные запросы могут быть сформулированы в следующих формах:

- найти материал с указанными характеристиками в диапазоне заданных свойств;
- найти материал, удовлетворяющий комбинации свойств (рис. 8.7, д).

Данные могут быть представлены таблично или в графическом виде (рис. 8.8).

Выбор соотношений  
Материал 7В-2А

ПАРАМЕТРЫ	$p = 0,25$ МПа $v = 0,5$ м/с
Коэффициент износа, $10^{-15}$ м <sup>2</sup> /Н	17,7
Температура, $T$ (К)	299
Коэффициент трения	0,18

Выбор  $p$  (МПа)

0,10	0,25*	0,50	1,25	2,50	5,00	10,0
------	-------	------	------	------	------	------

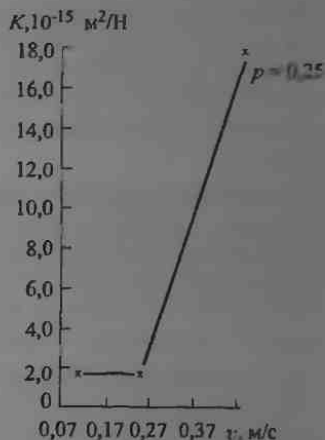


Рис. 8.8. График зависимости коэффициента изнашивания от скорости при скольжении  $p = 0,25$  МПа

Описанный выше пример характерен для многих БД и требуется их дальнейшее развитие, которое может позволить перейти к интегрированным информационным системам в трибологии, объединяющим усилия ученых, инженеров-конструкторов и материаловедов. В настоящее время новые возможности открываются в связи с информационной глобализацией и одной из инициатив такого рода является проект создания виртуального центра по испытаниям триботехнических материалов при Организации экономического развития и сотрудничества (OECD). Возможности Интернета могут стимулировать унификацию и стандартизацию испытаний в трибологии.

### 8.4. Диагностика и мониторинг изнашивания

Основной целью *трибодиагностики* является достижение возможности оценки характера работы трибосистемы в реальном времени, прогнозирования ее изнашивания и принятия необходимых мер для обеспечения безотказной длительной работы с оптимальными триботехническими характеристиками. Данная цель достигается применением средств диагностики, включающих измерение триботехнических характеристик (коэффициент трения и износ) и других характеристик системы, связанных с ее работоспособностью (например, температура, вибрация и акустическая эмиссия), а также измерение характеристик, непосредственно связанных с механизмом и видом изнашивания (число, размер, химический состав и форма частиц износа). Другой важной целью диагностики является выработка рекомендаций по выбору более совершенных конструкций, материалов и смазок на основе данных о механизмах изнашивания, протекающих процессах и видах разрушения в реальных трибосистемах. *Мониторинг* изнашивания принято определять как совокупность средств и методов непрерывного контроля характеристик трибосистемы в реальном времени, главным образом для исключения аварийных ситуаций вследствие катастрофического износа.

Понятия механизма, процесса и вида изнашивания были определены ранее в гл. 6. Рассмотрим, в какой мере диагностика и мониторинг изнашивания могут быть применимы к каждому из его видов. Поскольку непосредственным результатом изнашивания является изменение морфологии поверхности трения вследствие разрушения, а также продукты изнашивания — частицы срезанного, окисленного, выкрошенного или растворенного в окружающей среде материала, остановимся на рассмотрении средств и методов диагностики и мониторинга в применении к различным видам изнашивания.

*Абразивное* изнашивание является наиболее опасным и оно практически недопустимо в работе любого узла трения машины или механизма. Поверхность трения при абразивном изнашивании имеет характерный вид, а частицы абразивного износа — важнейший объект диагностики, так как они свидетельствуют о начале нежелательного режима работы, их состав соответствует составу одного, как правило, более мягкого компонента пары трения, а форма свидетельствует о протекании опасных процессов микрорезания на контакте.

*Адгезионное* изнашивание (также *изнашивание при заедании*) протекает как совокупность адгезионно-деформационных процессов, осложненных фрикционным переносом материала, его механическим перемешиванием и отделением частиц сложного состава и структуры. Этот вид изнашивания может характеризоваться низкой интенсивностью, если масштабы разрушения малы. В то же время, изнашивание может стать катастрофическим при заедании, когда в процесс адгезии и переноса вовлекаются макроскопические участки контакта.

Поверхность трения и частицы износа при этом виде изнашивания также являются важнейшими объектами диагностики.

*Усталостное* изнашивание характерно для большинства нормально работающих трибосистем современных машин и поэтому поверхность трения и частицы усталостного износа также несут ценную информацию и их анализ широко используется в трибодиагностике. Кроме того, при усталостном изнашивании анализу могут быть подвергнуты сечения образцов, несущие информацию об особенностях развития усталостных трещин.

*Окислительное*, а также *коррозионно-механическое изнашивание* и *фреттинг-коррозия* приводят к образованию частиц окислов и продуктов трибохимических реакций в зоне трения. Эти частицы являются важным источником загрязнения смазочного материала и поэтому играют важную роль в оценке состояния трибосистемы. Анализ поверхности дает информацию о развитии трибохимических процессов.

*Гидро- и газобразивный* виды изнашивания, а также *кавитационное* изнашивание практически не диагностируются по продуктам изнашивания, так как эти продукты уносятся жидкостью или газом, обтекающим изнашиваемый объект, и не подвергаются анализу. Поверхность же является основным источником получения информации.

Таким образом, в реальной трибосистеме, являющейся объектом диагностики и мониторинга по частицам износа, анализу подвергается сложная совокупность объектов различной природы, состава и структуры, и данный анализ требует применения комплексных средств и методов.

**8.4.1. Методы диагностики изнашивания.** Совокупность методов диагностики включает все типы микроскопического анализа, рентгеновские методы анализа состава и структуры материалов, спектрометрические и спектроскопические методы, а также другие физические и физико-химические методы (см. табл. 8.3).

Можно сформулировать несколько общих рекомендаций для того, чтобы информация, получаемая методами трибодиагностики, была достоверной:

— изучать образцы на всех стадиях изнашивания до полного разрушения, чтобы отслеживать не только тот вид изнашивания, который его вызывает, но и промежуточные процессы;

— иметь не работавшие образцы материалов пары трения и смазок для сравнения;

— исследовать оба образца пары вместе с образцами смазки, продуктами коррозии и изнашивания на образцах и в смазке;

— регистрировать отклонения режимов работы от предусмотренного режима работы (вибрации, изменения в окружающей среде и т. д.).

Анализ поверхности трения во многих случаях может обнаружить явные следы того или иного вида изнашивания, риски абразивного

Таблица 8.3. Методы диагностики изнашивания смазочных подвижных сопряжений

Метод анализа	Регистрируемые характеристики					Непрерывность контроля	Использование экспресс-приборов
	Система частот	Концентрация частиц в среде	Фракционный состав	Морфология	Общая загрязненность среды		
<b>Фильмометрические</b>							
Линейные кинофотометры	+	+	-	-	-	-	-
Анало-автоматизированная кинометрия	+	+	-	-	-	-	-
Анало-автоматизированная телеметрия	+	+	-	-	-	-	-
ИК- и УФ-метрические	-	-	-	-	+	-	-
Анализирование спектрофотометрии	-	+	-	-	+	-	+
Пленочная фотометрирование	-	-	-	-	+	-	+
Электронный метод	-	+	+	-	-	-	-
Микрометрия	-	+	+	+	-	-	-
Систематический	-	+	-	-	-	-	-
Пленочная радиометрирование	-	+	+	-	-	+	-
Флюориметрия	+	+	+	-	-	+	+
Визуальная	-	+	-	-	-	-	+
Метод оценки количества износа	-	+	-	-	-	-	-
Полупроводниковый анализ	-	+	-	-	-	-	-
Автоматизированный анализ	-	-	+	-	-	+	-
<b>Фильмо-телефильмометрические</b>							
Седиментиметрия	-	+	+	-	-	-	+
Поларография	+	+	-	-	-	-	-
Потенциметрия	-	-	-	-	+	+	+

Примечание: + — для частиц размером меньше 10 мкм; ++ — использование бихроматического метода; +++ — концентрация ферромагнитных частиц.



износа, например, или лунки эрозии, отслоения окислов, пленки frictionного переноса материала и т. д. Однако чаще всего, проявления различных видов изнашивания могут быть обнаружены вместе и судить по отдельным участкам образца о ведущем виде разрушения не представляется возможным. Анализ химического состава поверхностных слоев весьма полезен как источник информации о трибохимических процессах на контакте, нагреве, инициирующем окисление, массовом переносе материала при трении и т. д.

Анализ смазочной среды может дополнить данные анализа контактирующих тел и, кроме того, имеет важную самостоятельную ценность, так как эта среда содержит продукты изнашивания, окисления и трибохимических реакций. Такой анализ имеет особую ценность в системах с циркуляцией смазки, так как можно разместить диагностические датчики в таких местах системы, где локализованы продукты изнашивания от определенных узлов трения.

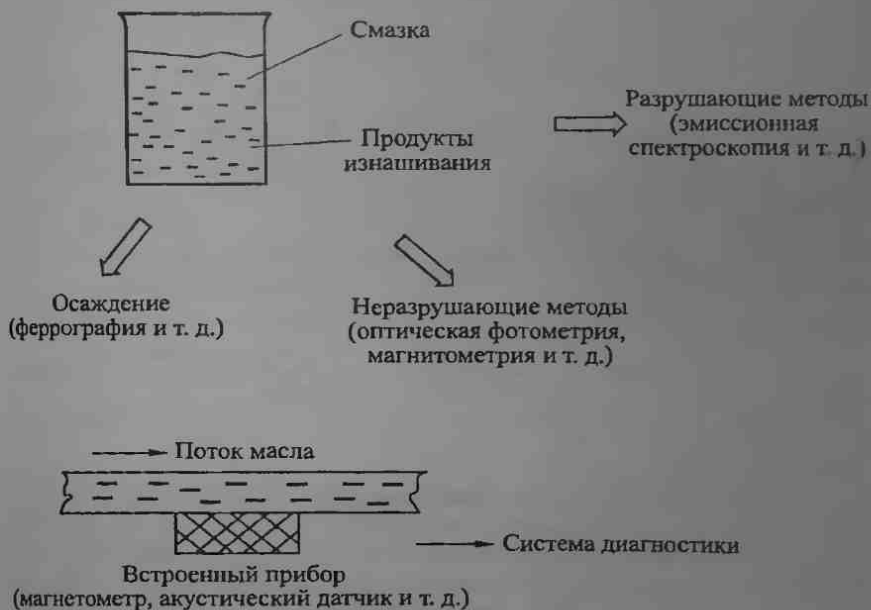


Рис. 8.9. Общая схема анализа смазки

Общая схема анализа смазочной среды представлена на рис. 8.9. а сравнение возможностей некоторых методов анализа приведено в табл. 8.3 и 8.4. Это сравнение наглядно иллюстрирует тот факт, что ни один метод анализа не обладает полной универсальностью и выбор такого метода зависит от постановки задачи диагностики.

Таблица 8.4. Устройства, реализующие методы диагностики изнашивания

Наименование устройства	Размер анализируемых частиц	Преимущества	Недостатки
Устройства анализа частиц в пробе масла			
Феррограф	0,01–100 мкм	Количественный и морфологический анализ	1. Снижение точности за счет возможного наложения частиц 2. Необходимость использования растворителей при анализе загрязненных проб 3. Относительно высокая стоимость
Присосывающая система извлечения частиц	Определяется скоростью вращения	Количественный и морфологический анализ	Для количественного анализа требуется дополнительная система измерения (счетчик частиц)
Система частиц	Не ограничивается	1. Количественный анализ 2. Простота реализации	1. Проявляется нелинейность выходного параметра в зависимости от размера частиц, содержащихся в пробе 2. Низкая информативность
Вспомогательные устройства			
Феррограф	0,1–100 мкм	Количественный анализ	1. Снижение точности за счет возможного наложения частиц 2. Относительно высокая стоимость 3. Невозможность использования в системах с сильным загрязнением масла
Устройство, анализирующее магнитным полем	Нижний предел определяется алгоритмом считывания сигнала	Высокая информативность	1. Сложность реализации 2. Большая погрешность
Датчик, основанный на анализе частиц в жидкости	> 5 мкм	Относительная простота реализации	1. Низкая информативность 2. Низкая чувствительность к мелким частицам

**8.4.2. Анализ продуктов изнашивания.** Диагностика изнашивания по его продуктам, накапливающимся в смазочной среде, стала широко применяться в трибологии с 70-х гг. XX в. Пожалуй, наибольшее влияние на бурное развитие этого направления в трибодиагностике и мониторинге оказало изобретение феррографа — прибора, позволяющего осаждать продукты изнашивания из проб смазки и затем исследовать эти осадки для установления причин разрушения контактирующих деталей трибосистемы.

Принципиальная схема феррографа приведена на рис. 8.10. В этом приборе смазочная среда стекает по стеклянному слайду с канавкой в неоднородном магнитном поле, и частицы износа, как правило, обладающие свойством намагничиваться (ферро-магнитные компоненты сталей, оксиды железа, никеля, хрома и кобальта, карбиды этих металлов), осаждаются на подложку. Затем по канавке пропускается

раствор фиксатора, и после сушки слайд готов для микроскопического или спектрометрического анализа. Поскольку намагниченность частиц зависит от их размера, крупные частицы выпадают в осадок первыми, и распределение частиц по длине подложки дает представление об их размерах (рис. 8.11). Кроме того, при прочих равных условиях ферромагнитные частицы, обладающие наиболее сильными магнитными свойствами, выпадают в осадок раньше парамагнитных, и это обстоятельство позволяет классифицировать разные участки осадка по составу. Обычно используют измерения оптической плотности

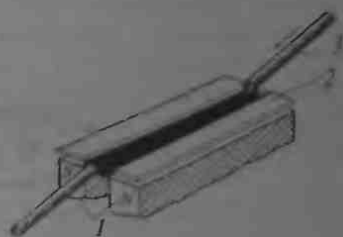


Рис. 8.10. Принципиальная схема феррографа: 1 — магнитные полюса; 2 — подложка; 3 — отработанное масло

осадка для анализа его различных участков, можно использовать различные светофильтры для разделения частиц по виду и составу, эффективно также измерение магнитных свойств осадка, чтобы разделить частицы по источнику происхождения.

За последние 30 лет феррография нашла применение в диагностике самых различных трибосистем, прежде всего в авиационной технике, нефтедобывающей промышленности и на судовом транспорте.

При этом, несмотря на широту применения, многократно отмечались недостатки, внутренне присущие методу — быстрое осаждение наиболее крупных и намагниченных частиц в плотный и трудноразделимый осадок, необходимость применения растворителей для вязких масел и смазок, трудности с идентификацией немагнитных частиц (сажа, карбонизированные осадки и т. д.), обычных для двигателей внутреннего сгорания, особенно дизельных.

Частично недостатки феррографии были устранены с изобретением вращательного осадителя частиц (RPD) в середине 80-х гг. В этом приборе (рис. 8.12) осаждение частиц происходит на вращающемся слайде, и путь осаждения увеличен в несколько раз по сравнению



Рис. 8.11. Фотография осадка ферромагнитных частиц на слайде феррографа (движение смазки по слайду сверху вниз)

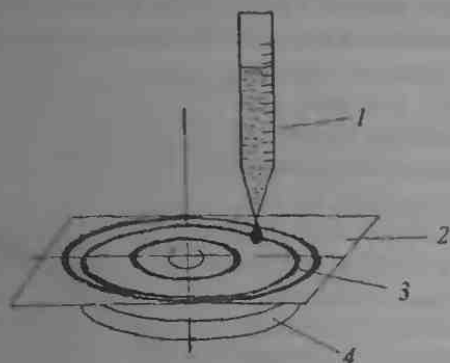


Рис. 8.12. Схема вращательного осадителя частиц: 1 — отработанное масло; 2 — вращающийся слайд; 3 — осадок; 4 — магнетометр

с феррографом. Кроме того, частицы с разной намагниченностью под действием центробежной силы осаждаются по кольцам разного радиуса и разделены в осадке. В дополнение к RPD в Трибологическом центре Суонси (Великобритания) был разработан счетчик частиц (PQ), представляющий собой магнетометр для измерения намагниченности осадка частиц и их классификации по этому показателю.

В последние годы наибольшее внимание разработчиков привлекают встроенные в трибосистему приборы для диагностики и мониторинга. Пример такого устройства показан на рис. 8.13, где приведена схема

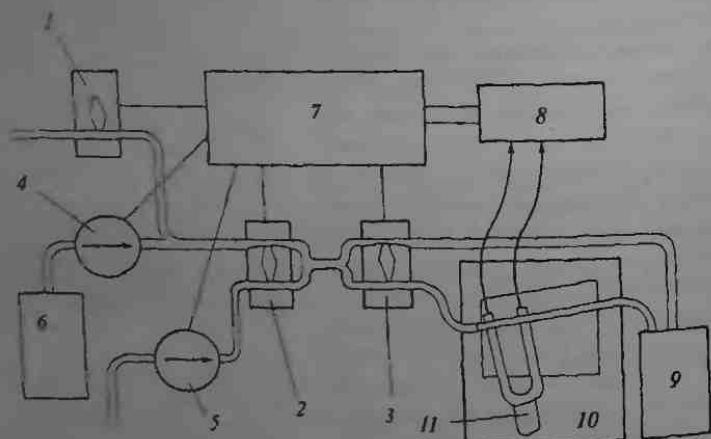


Рис. 8.13. Схема встроенного феррографа; 1, 2, 3 — клапаны; 4, 5 — мембранные насосы; 6 — растворитель; 7 — микропроцессор; 8 — датчик; 9 — емкость; 10 — феррограф; 11 — источник света (H. Iivonen and K. Aho. Int. Conf. 50 Years of Tribology. London. 1987. P. 877)

феррографа, встроенного в систему смазки узлов трения современного самолета. Этот прибор включает магнитную систему осаждения продуктов изнашивания, дифференциальную систему сравнения оптической плотности осадка в разных точках феррограммы, клапаны и мембраны, позволяющие локализовать источники частиц изнашивания. В результате анализа, близкого по времени к реальному масштабу, удается получить информацию о состоянии трибосистемы по параметрам износа и выдать сигнал предупреждения в случае появления крупных частиц изнашивания, свидетельствующих о катастрофическом развитии процесса.

За последние годы появилось много других вариантов встроенных устройств диагностики. Иллюстрацией может служить прибор, схема которого приведена на рис. 8.14.

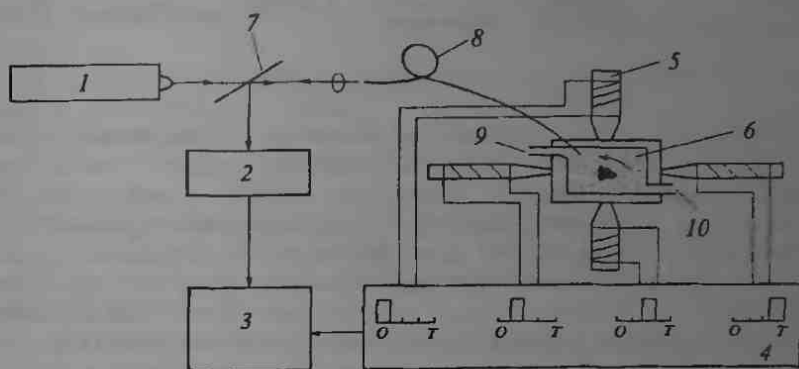


Рис. 8.14. Оптико-магнитное устройство для анализа частиц износа с вращающимся магнитным полем: 1 — гелий-неоновый лазер; 2 — преобразователь; 3 — процессор; 4 — делитель; 5 — электромагнит; 6 — ячейки; 7 — полупрозрачное зеркало; 8 — оптоволокно; 9, 10 — вход и выход масла (T. Sato et al. Wear, 1987. V. 115. P. 273)

Идея прибора состоит в том, что каждая частица износа может вызвать импульс, регистрируемый приборами при прохождении ячейки, к которой приложено поле электромагнита. Это поле вращается и импульсы, регистрируемые в анализаторе, могут быть преобразованы в параметры, связанные с размером и видом материала частицы. Следует, однако, отметить, что процедура анализа сложна и требует массы вспомогательных сведений.

Одной из простых иллюстраций идеи диагностики по накопленным продуктам изнашивания может служить прибор, схема которого представлена на рис. 8.15.

Фактически этот прибор представляет собой магнитную головку, аналогичную головке магнитофона, но сигнал, воспринимаемый ею,

возникает от частиц износа, накапливаемых при протекании смазочного материала вблизи головки и осаждаемых на ней. Аналитическая часть датчика включает мостовую схему с термисторами MR1 и MR2, регистрирующими накопление осадка частиц с ферромагнитными свойствами.

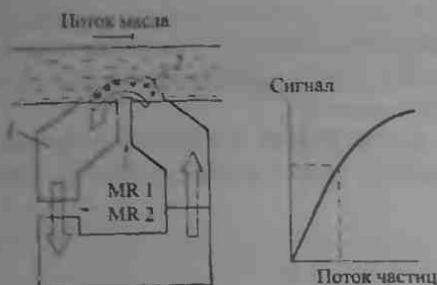


Рис. 8.15. Схема встроенного магнитного датчика: 1 — магнитная головка; 2 — осадок частиц износа; MR1, MR2 — магниторезистивные датчики (Intern. Conf. Cond. Monitoring. Ed. M. Jones. Swansea. 1984).

Инженерная мысль генерировала множество потенциально осуществимых схем трибодиагностических приборов, однако главной проблемой остается накопление экспертных знаний о механизмах изнашивания и соответствующих им морфологических признаках частиц. Следует отметить, что даже при всем несовершенстве разработанных методов конструктор может проектировать систему трибодиагностики на основе базовых предположений. Это — обнаружение частиц предельного размера, свидетельствующих о протекании катастрофического износа; превышение порога содержания того или иного элемента в смазочной среде; обнаружение частиц предельной массы и т.д.

Практической иллюстрацией применимости принципов трибодиагностики и мониторинга к реальным инженерным проблемам может служить оптико-магнитный детектор (ОМД), разработанный в ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси и Корейском институте науки и техники. Теоретическое исследование поведения ферромагнитных частиц в масле под действием магнитного поля показало, что когда ячейка с маслом, содержащим ферромагнитные частицы, помещается в магнитное поле, частицы, формируя цепочки, смещаются от оси ячейки, т.е. оптическая плотность масла изменяется под действием магнитного поля, причем это изменение пропорционально содержанию ферромагнитных частиц износа в анализируемом масле.

Встроенная система ОМД (рис. 8.16) включает датчик 1 и электронный блок 2, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 3 и блок ввода/вывода 4, при помощи которого компьютер 5 получает данные и обрабатывает их с использованием специально разработанного программного обеспечения. Тестируемое масло из емкости 7 системы смазывания подается вакуумным насосом 6 в датчик ОМД.

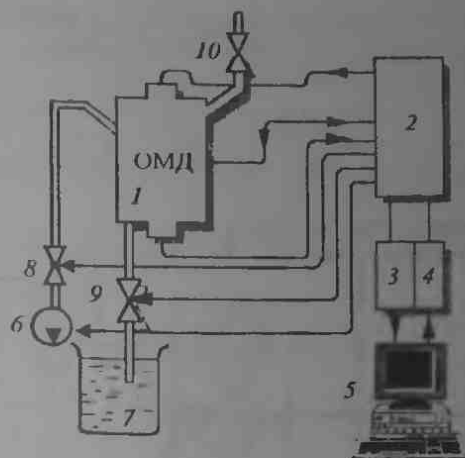


Рис. 8.16. Схема встроенной системы ОМД: 1 — датчик ОМД; 2 — электронный блок ОМД; 3 — АЦП; 4 — блок ввода/вывода, 5 — компьютер; 6 — вакуумный насос; 7 — емкость для масла, 8, 9, 10 — электромагнитные клапаны

Методика измерений включает следующие этапы:

- заполнение системы маслом — клапаны 8, 9 открываются и анализируемое масло закачивается в систему вакуумным насосом 6 из емкости 7 в датчик 1;
- вакуумирование для удаления пузырьков воздуха — клапаны 9 и 10 закрываются и масло вакуумируется при заданном давлении в течение времени, которое определяется вязкостью масла;
- анализ масла — выполняется первое измерение оптической плотности масла, затем включается магнитная система и проводится второе измерение оптической плотности;
- слив масла из системы ОМД — клапаны 9 и 10 открываются и масло сливается из системы.

Контроль состояния трибосистемы с помощью ОМД выполняется по двум показателям: показателю общей загрязненности масла и показателю износа. Показатель общей загрязненности масла ( $C$ ) оценивается по разности оптических плотностей чистого и отработанного масла. Показатель износа  $F(w)$  определяется по разности оптических плотностей отработанного масла до и после действия магнитного поля.

Результаты лабораторных испытаний показывают, что ОМД имеет линейную взаимосвязь между изменениями оптической плотности и содержанием механических частиц в масле в широких пределах концентрации.

Встроенный ОМД использовался для контроля степени износа турбокомпрессорной системы воздухообеспечения на металлургическом заводе компании POSCO (Южная Корея). Основными объектами кон-

троля были коробка передач и подшипники, так как на них приходится основная доля аварийных ситуаций из-за жестких режимов работы при повышенных динамических нагрузках. Обычно для контроля этих узлов воздушного компрессора используются датчики вибраций и температуры. Расположение датчиков показано на рис. 8.17, ОМД встроено в дополнительную линию. Вибродатчики дают информацию о смеще-

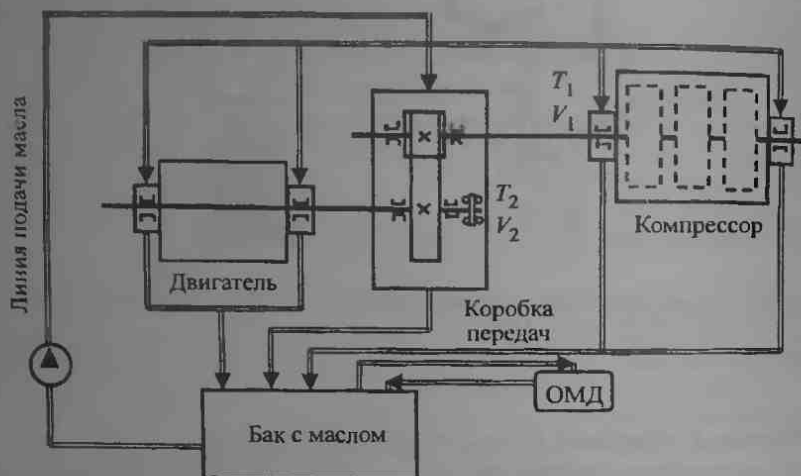


Рис. 8.17. Схема системы воздушного компрессора:  $V$ ,  $T$  — датчики вибрации и температуры

ни вала ( $\Delta$ ) привода компрессора и ускорении в коробке передач ( $G$ ) в зависимости от времени наработки до и после выхода системы из строя. Температура контролировалась на корпусе подшипника привода компрессора ( $T_1$ ) и на подшипнике коробки передач ( $T_2$ ).

Кроме того, выполнялся контроль за износом при помощи портативных устройств различных типов. Для оценки содержания ферромагнитных частиц использовались счетчик частиц — (PQ) и плазменная спектроскопия — (ICP). Содержание всех механических частиц измерялось с помощью цифрового датчика — (dCA).

На рис. 8.18 представлены результаты контроля за 30 суток. Видно, что ОМД выдает предупреждение по обоим показателям загрязнения масла и износа за 10 суток до выхода системы из строя. В табл. 8.5 сведены результаты измерений, выполненных с помощью портативных устройств. Увеличение показателя счетчика частиц и содержания железа по данным плазменной спектроскопии ясно показывает, что имело место изнашивание стальных деталей.

Одновременное увеличение содержания всех механических частиц свидетельствует о том, что изнашивание металлических деталей является основным источником появления частиц и изменения общей



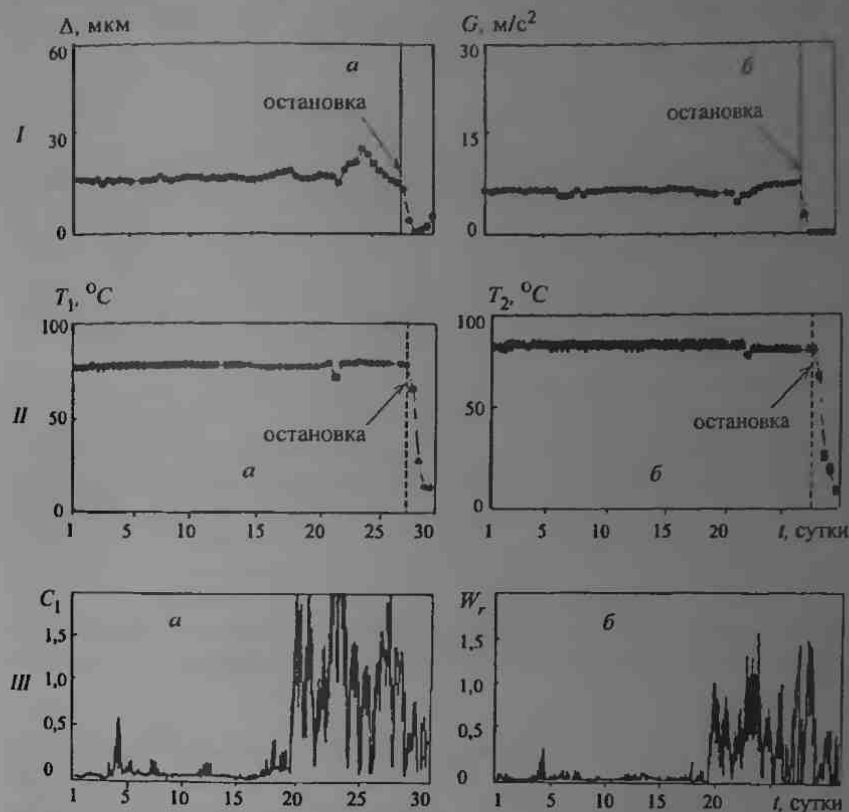


Рис. 8.18. Изменение некоторых параметров в ходе работы системы компрессора: I — смещения оси привода компрессора (а); ускорение узла коробки передач (б); II — температура осевого подшипника привода компрессора (а) и подшипника коробки передач (б); III — изменение показателей ОМД от времени работы системы компрессора: а — общий показатель загрязненности масла; б — показатель износа

загрязненности масла. Результаты измерений при помощи ОМД практически совпадают с результатами, полученными с помощью ИСР, РQ и dCA.

Эти результаты отличаются от результатов измерений вибрации и температуры. Датчики вибрации и температуры регистрируют небольшой рост выходных сигналов (ниже уровня предупреждения) незадолго до выхода системы из строя, т. е. они не дают своевременного предупреждения о нарушении режима работы компрессорной системы.

Система воздушного компрессора была отключена только тогда, когда резко возрос сигнал датчика вибрации. После отключения системы было установлено, что почти разрушилась стальная втулка,

Таблица 8.5. Сравнение результатов измерений портативных устройств и ОМД

Время наработки, сутки	ICP	PQ	dCA	ОМД	
	Регистрируемый параметр				
	Fe ( $10^{-4}$ мас. %)	PQ-индекс	Число частиц	$C_t$	$W_r$
1		9	30	0,10	0
8	1,0	6	36	0,15	0,05
22	2,3	10	72	1,30	1,00
27	30,0	90	310	2,00	1,50

которая установлена для исключения смещения конической шестерни в осевом направлении. Ремонт системы потребовал нескольких суток, в течение которых было прекращено снабжение воздухом конвертеров и печей. Этого можно было легко избежать, приняв необходимые меры на раннем этапе обнаружения крупных частиц износа. Указанный пример свидетельствует, во-первых, о перспективности раннего предупреждения катастрофического изнашивания по частицам износа, во-вторых, о том, что в промышленности для надежного контроля состояния оборудования и ответственных механизмов целесообразно применять несколько методов диагностики, чтобы взаимно компенсировались их недостатки.

**8.4.3. Мониторинг изнашивания трибосистем.** Концепция мониторинга изнашивания базируется на идее диагностики сложной системы по ключевым признакам, которые не всегда могут быть однозначно определены. Аналогичные принципы диагностики используются многие десятилетия в электротехнике при анализе сложных цепей методом «черного ящика». При этом сложность диагностируемой системы имеет вторичное значение, — главное насколько четко определены критерии диагностики — размер, цвет или форма определяемой частицы.

Можно иллюстрировать данную концепцию практическим примером центра диагностики машин, работающего в университетском колледже г. Суонси (рис. 8.19). В этом центре данные о состоянии диагностируемых машин (прежде всего механизмы нефтебуровых платформ в Северном море), анализируются методом феррографии и RPD, а затем, если вывод эксперта не определен, применяется лабораторный анализ. При этом накапливается база данных о каждом объекте диагностики, которая доступна эксперту.

Принцип построения экспертных систем применительно к трибологии и мониторингу — это еще одна новая и интересная страница в развитии трибологии, открытая в 80-х гг. XX в. Одним из первых примеров построения экспертной системы в трибологии может служить схема, предложенная Таллианом и показанная на рис. 8.20.



Рис. 8.19. Структура центра диагностики машин

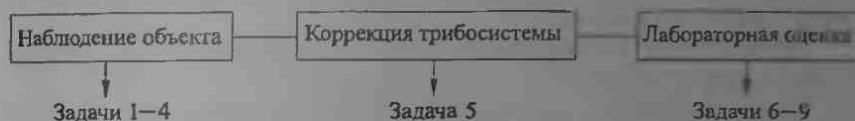


Рис. 8.20. Схема построения экспертной системы (Таллиан. Проблемы трения и смазки. 1989. Т. 111, № 2. С. 238-245)

Эта система была предназначена для мониторинга подшипников качения, но она наглядно иллюстрирует общий подход к созданию таких систем.

Таллиан разделил задачу диагностики на девять подзадач в виде следующего алгоритма:

**Задача 1.** Наблюдение объекта в нормальных условиях работы. Этот этап включает и принятие решений об изменении условий эксплуатации, переходу к задаче 2 или остановке машины.

**Задача 2.** Этап предусматривает дополнительный отбор проб и образцов в процессе эксплуатации для более точного обоснования коррективных решений.

**Задача 3.** На этом этапе предусматривается отбор проб смазки наряду с контролем характеристик трибосистемы. Затем принимаются решения либо перейти к задаче 4, либо продолжать эксплуатацию.

**Задача 4.** В случае опасных симптомов поведения трибосистемы включается этап конкретного прогнозного анализа. На этом этапе необходимо решить вопрос об остановке системы.

**Задача 5.** На этом этапе предполагается лабораторный анализ повреждений и применение всех возможных аналитических методов для обнаружения характера и вида повреждаемости компонентов узла трения. По результатам анализа принимается решение об изменении конструкции, замене материалов или условий эксплуатации.

**Задачи 6-9** относятся Таллианом к лабораторной практике.

В бывшем СНГ компьютерный подход к проблемам трибологии, включающий базы данных и экспертные системы, плодотворно развивается на основе работ Бершадского, Евельсона, Захарова.

Данными авторами предлагается компьютерная технология анализа и синтеза узлов трения, основанная на созданных базах данных (БД) в экспертных системах (ЭС). Предлагаемые БД могут быть условно разделены на следующие группы.

*Группа 1:* а) материалы (марки, химический состав, технологии); б) объемные свойства материалов (предел текучести, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и т. д.); в) экспериментальные методы и испытательное оборудование (метсидки, машины трения, образцы, показатели и т. д.); г) конструкции узлов трения (графическая БД).

*Группа 2:* а) стандарты (ISO и СНГ); б) термины и определения на русском и английском языках в области трения и износа (глоссарий).

*Группа 3:* а) трибоцентры и лаборатории; б) производители; в) потребители (заказчики).

*Группа 4:* триботехнические свойства материалов (условия, лаборатории, среда, результаты).

Группы БД строят и заполняются традиционными методами. Описываемая компьютерная технология позволяет использовать готовые БД, доступные через Интернет. То же самое относится к БД групп 2 и 3, за исключением глоссария. Базы данных группы 4 неразрывно связаны с БД группы 1.

На взгляд авторов, плодотворным подходом здесь является применение ЭС двух типов. Первый из них — «обычные», состоящие из баз знаний (БЗ), основанных на правилах (типа «если... то...»), блока-интерпретатора и интерфейсной части. Второй тип — гибридные ЭС. В них, кроме «обычных» ЭС, входят также блоки для проведения расчетов, разработанные традиционными методами программирования.

**Основные функции и режимы работы системы.** Предусмотрены три основные режима работы (и, соответственно, основные функции): ввод и анализ информации; определение характеристик заданного узла трения; оптимальное трибопроектирование. Первый режим обеспечивается гибридной ЭС. Во втором режиме работы системы ЭС в диалоге с проектировщиком назначает необходимые расчеты, извлекает из БД и БЗ нужную информацию, обращается к блоку расчетов, интерпретирует и выдает результаты. При обращении ЭС анализирует имеющуюся информацию (совокупность данных, содержащихся в запросе пользователя, и результатов поиска в БД и БЗ), оценивает степень ее полноты в смысле возможности произвести назначаемые расчеты. В случае недостаточности ЭС выдает соответствующие рекомендации по уточнению входной информации. Если же обращение к блоку расчетов происходит успешно, то выдача результатов сопровождается советами ЭС по их использованию. Третий режим — оптимальное проектирование узла трения. В ходе диалога с проектировщиком ЭС, обрабатывая вводимые запросы, помогает пользователю корректно поставить задачу

оптимального проектирования трибосистемы и решить ее. Укрупненная блок-схема работы в третьем режиме представлена на рис. 8.21.



Рис. 8.21. Схема синтеза узла трения (Евельсон и др. Трение и износ. 2000 Т. 20, № 4. С. 380-385)

Программное обеспечение, реализующее данную методологию, может использоваться как самостоятельно, так и в качестве составной части систем автоматизированного проектирования (САПР). В любом случае можно ожидать значительного повышения качества и ускорения проектирования. Можно рассчитывать также на значительные облегчения решения часто возникающих в производстве практических задач о замене материалов.

Описанные выше экспертные системы являются примером поиска новых комплексных решений в трибодиагностике и мониторинге.

### Список литературы

1. Белый А. В., Карповко Г. Д., Мышкин Н. К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. — М.: Машиностроение, 1991.
2. Браун Э. Д., Ездохимова Ю. А., Чичинадзе А. В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. — М.: Машиностроение, 1982.
3. Маркова Л. В., Мышкин Н. К. Трибодиагностика машин. — Минск: Белорусская наука, 2005.
4. Мышкин Н. К., Петриковец М. И. Трибология: Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
5. Основы трибологии / Под ред. А. В. Чичинадзе: Учебник для технических вузов. — М.: Центр «Наука и техника», 1995, 2-е изд. — М.: Машиностроение, 2001.
6. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / Под ред. В. А. Белого, К. Лудемы и Н. К. Мышкина. — М.: Машиностроение, 1993, англ. перевод. N.Y.: Allerton Press, 1994.
7. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. — М.: Мир, 1982.
8. Bfau P. J. Friction and Wear Transitions of Materials. — N.Y.: Noues Publication, 1989.
9. Hunt T. M. Handbook of Wear Debris Analysis and Particle detection in Liquids. — London: Elsevier, 1993.

## Глава 9

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Триботехнические материалы представляют собой важный класс материалов, предназначенных для работы в условиях трения и изнашивания. Их можно разделить на следующие группы: металлы и сплавы, полимеры, керамика и композиционные материалы.

Исследование и разработка эффективных триботехнических материалов являются одним из основных путей решения технических проблем, связанных со снижением потерь на трение и износ в машинах. Применение различных материалов в областях техники, являющихся в наши дни приложениями трибологии, имеет очень давнюю историю. Еще в Римской империи применялись бронзовые подшипники. В средневековой технике для подшипников скольжения, направляющих, зубчатых колес и других деталей, рассматриваемых сейчас как элементы трибосистем, широко применялись сплавы на основе железа и меди, древесина, кожа и другие материалы. Глобальное освоение морей и океанов пробудило значительный интерес к исследованию трения канатов по металлу и дереву.

Вероятно, впервые научный подход в триботриболоведении начал применяться в IX в., когда Исаак Баббит изобрел мягкие подшипниковые сплавы, которые применяются и по наше время. Развитие техники требовало появления новых эффективных материалов для трибосистем и двадцатый век продемонстрировал значительный прогресс в создании новых классов фрикционных и антифрикционных материалов.

Концепции конструирования в современной технике часто требуют, чтобы материал сочетал в себе противоречивые свойства, например, высокий коэффициент трения и низкую интенсивность изнашивания, высокую механическую прочность и значительную податливость, высокую прочность при низкой плотности и т. п. Для систем, работающих в экстремальных условиях, необходимы материалы с необычными свойствами. Триботриболоведение рассматривает узел трения как единую систему, в которой контактирующие материалы и окружающая среда (смазка) должны обладать совместимостью, обеспечивающей устой-

чивую работу с заданными характеристиками. Основы фрикционной совместимости рассмотрены в работах Буше и Чихоса, и данная концепция была успешно развита на основе использования температурных, нагрузочных, энергетических и термомеханических критериев совместимости трибосистем (Захаров, Карасик, Погодаев). По этим критериям определяются оптимальные составы систем, а затем выбираются такие сочетания материалов трущихся пар и смазок, которые обеспечивают заданные характеристики системы для конкретных условий ее работы.

Материалы, наиболее часто используемые в трибологии, представлены в табл. 9.1.

Т а б л и ц а 9.1. Материалы, используемые в трибологии

Материалы	Условия контакта							
	Скольжение		Качение		Удар	Абразивное изнашивание	Эрозия частицами	Кавитация
	Сухое	Со смазкой	Сухое	Со смазкой				
Чугуны: серый белый	x x	x	x			x x		
Легированные стали		x	x	x	x	x	x	
Нержавеющие стали		x	x	x		x		
Инструментальные стали	x	x	x	x	x	x	x	x
Жаропрочные сплавы		x		x				
Повышеннопрочные сплавы: бabbиты бронзы латуни	x x x	x x x						x
Керамика	x		x			x	x	
Керметы	x		x		x	x	x	
Полимеры: термопласты резинопласты	x x	x						
Эластомеры: Полимерные композиты	x x	x x				x	x	x
Углерод, графит, дисульфид молибдена	x					x	x	x



## 9.1. Металлы и сплавы

В наше время большинство трущихся деталей изготавливаются из металлов и сплавов на их основе. Технический прогресс может вызвать появление новых неметаллических материалов, но в обозримом будущем металлы будут оставаться основными материалами для трущихся деталей. Причина этого в том, что металлы, как правило, удовлетворяют различным эксплуатационным требованиям, предъявляемым к трущимся поверхностям, в большей степени, чем другие материалы.

К преимуществам металлов относятся относительно благоприятное сочетание прочности и пластичности, способность образовывать твердые растворы, эвтектические смеси и химические соединения с другими металлами и неметаллами. Каждая из этих фаз обладает различными свойствами и, что особенно важно, различными фрикционными характеристиками.

Физико-механические свойства металлов определяются их атомным строением и структурой. Износостойкость металлов также в большой степени зависит от их структуры и свойств отдельных микрообъемов с различными структурными составляющими. Преобладающий тип этих составляющих, их количество и морфология оказывают большое влияние на износостойкость.

*Сплавы железа*, включающие чугуны и стали, наиболее распространены в технике. Их отличительной чертой является широкий диапазон изменения твердости и прочности при изменении химического состава и структуры. Характеристики основных фаз сталей и чугунов даны в табл. 9.2.

Почти всегда твердость и износостойкость сплавов железа значительно возрастают с увеличением содержания углерода. Как видно из табл. 9.2, каждая из структурных составляющих обладает определенным набором свойств, которые нужно учитывать при рассмотрении методов обработки данного металла для различных условий трения.

*Стали* используются как антифрикционные материалы только в случае очень легких условий работы при малых контактных давлениях и скоростях скольжения. Обладая высокой твердостью и имея высокую температуру плавления, сталь плохо прирабатывается и склонна к схватыванию с сопрягаемым валом. Подшипниковые марки сталей — это сплавы железа с медью, алюминием и небольшим количеством углерода (около 32 мас. % Cu, 2,5 % Al, 0,1 % C), или стали (1,6 % C, 1 % Si) с включениями свободного графита.

Однако большое значение стали для трибологии объясняется, главным образом, ее широким применением в качестве контртела для подшипниковых материалов любых типов — от баббитов до керамики. Триботехнические свойства наиболее распространенных сталей представлены в табл. 9.3.

Таблица 9.2. Характеристики структурных составляющих сталей и чугунов и их влияние на эксплуатационные характеристики деталей трибосистем

Структурная составляющая	Характеристика	Подобная составляющая	Твердость по Виккерсу HV	Влияние структурной составляющей на износостойкость
Феррит	Твердый раствор углерода в $\alpha$ -железе	Чистое железо и феррит в углеродистой стали Легированный феррит в легированной стали	50–135 100–135	При наличии ферритовой основы сталь и чугун имеют невысокую твердость и малую износостойкость
Аустенит	Твердый раствор углерода в $\gamma$ -железе		150–220	Отличается склонностью к упрочнению при холодной пластической деформации. Сплавы с аустенитной основой, несмотря на невысокую твердость, обладают износостойкостью в условиях удара, смятия и пластической деформации
Карбиды	Химическое соединение железа с углеродом — цементит (6,67% C), при легировании — соединения железа с углеродом и легирующими элементами	Цементит Сложные карбиды в легированных сталях	1000–1150 1100–1300	В зависимости от условий образования имеют разную морфологию и дисперсность. Взаим с состав ферритно-карбидной смеси (перлита), карбиды оказывают определяющее влияние на износостойкость стали и чугуна
Перлит	Ферритно-цементитная смесь	Зернистый Пластинчатый Сорбитообразный Сорбит Троостит	160–190 190–230 230–260 250–300 300–400	С увеличением количества карбидов повышается твердость и износостойкость сплава. Сплавы с пластинчатым перлитом более износостойкие, чем с зернистым.
Мартенсит	Пересыщенный твердый раствор углерода в $\alpha$ -железе, образовавшийся в результате бездиффузионного превращения		800–900	Отличается высокой твердостью и прочностью; служит основой многих износостойких железоуглеродистых сплавов
Графит	Кристаллическая модификация углерода	Пластинчатый Хлопьевидный Шаровидный	Низкая	Графит образуется в основном в чугунах и его включения действуют как смазка

Таблица 9.3. Механические свойства и области применения сталей

Тип стали	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Твердость HV	Характерные применения
Низколегированные стали	580-1140	200	640-830	Используются там, где нужна износостойкость, прочность и ударная вязкость (валы, зубчатые колеса, ручной инструмент); стали с 1,5% Cr и 1% C применяются для изготовления подшипников качения
Нержавеющие стали: Аустенитные (Cr-Ni)	56-620	190	150-160	Применяются в случаях, когда нужна коррозионная стойкость и ударная вязкость, например для валов насосов
Полуаустенитные (Cr-Ni дисперсионно упрочняемые)	900-1825	195	170-520	Применяются там, где требуется высокая прочность, ударопрочность, хорошее соотношение задиру, умеренная коррозионная стойкость и хорошая формовкость, например в ленточных подшипниках
Мартенситные (Cr дисперсионно упрочняемые)	515-760	200	165-635	Применяются там, где требуется твердость, прочность, износостойкость и коррозионная стойкость (подшипники качения, валы, детали самолетов и турбины)
Инструментальные стали	710-2800	—	600-1000	Применяются там, где важна высокая твердость и износостойкость, малая ударная вязкость, высокая стойкость к размягчению при низкой температуре (режущий инструмент, валки, подшипники качения и валы)
Ферросплавы (суперсплавы)	1010-2800	205	830-1000	Используются при высоких температурах (высокотемпературные подшипники, валы, лопатки паровых турбин)

*Чугун* используется для подшипников и других трущихся деталей более широко, чем сталь. Антифрикционные свойства чугуна в большей степени определяются структурой графитовой составляющей. Чугун с графитом в шаровидной или в форме толстых пластинок более износостоек, чем чугун с тонкими пластинками графита. Структура антифрикционного чугуна должна содержать минимальное количество свободного феррита (менее 15%) и не должна содержать свободного цементита.

Мягкие сплавы на основе олова и свинца являются наиболее старыми подшипниковыми материалами. Первый такой сплав, разработанный Баббитом, содержал от 82 до 84% олова, от 5 до 6% меди и от 11 до 12% сурьмы. Так как этот сплав был первым антифрикционным сплавом, используемым в технике, все впоследствии разработанные сплавы на основе олова и свинца получили название баббитов. Эти сплавы также называемые белыми металлами, имеют низкую твердость (НВ 13–32), низкую температуру плавления (240–320 °С) и сильно размягчаются при повышенных температурах (НВ 9–24 при 100 °С). Они легко прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами. Вместе с тем, они имеют низкую усталостную прочность, что влияет на долговечность подшипника.

*Сплавы на основе меди*, используемые как антифрикционные материалы, представлены бронзами (с оловом и без него) и латунями. Бронзовые подшипники бывают двух видов — цельнолитые и биметаллические. Цельнолитые подшипники (вкладыши, втулки и т. п.) изготавливаются из бронз соответствующей прочности и твердости. Бронзы, используемые для этой цели, подразделяются на бронзы с высоким (до 10%) и низким (до 3%) содержанием олова. Компоненты сплава включают цинк, свинец, никель, фосфор и некоторые другие элементы.

*Алюминиевые сплавы* используются для цельнолитых деталей (втулки, подшипники, шарнирные соединения и т. д.) и для биметаллических подшипников. Последние штампуются из биметаллических (слоистых) полос или лент с алюминиевой облицовкой, соединенной со стальной основой в процессе пластического деформирования при прокатке. Цельнолитые подшипники изготавливаются из относительно прочных и твердых сплавов, а пластичные сплавы с малой твердостью применяются для биметаллических вкладышей.

*Цинковые сплавы* также давно известны как антифрикционные материалы, но они нашли ограниченное применение. Однако эти сплавы обладают некоторыми ценными свойствами, которые часто позволяют использовать их взамен бронз и баббитов. Эти сплавы, имеющие низкую температуру плавления (около 400 °С), размягчаются при нагревании в большей степени, чем бронзы и алюминиевые сплавы, и поэтому легче прирабатываются. По этой причине подшипники из цинковых сплавов вызывают меньший износ сопрягаемых валов в присутствии частиц абразива. Последние внедряются в поверхность трения подшипника, уменьшая, таким образом, повреждение вала вследствие микрорезания.

Пленки *благородных металлов и сплавов* на их основе используются в скользящих электрических контактах. Другие сплавы цветных металлов обладают высокой твердостью, прочностью при повышенных температурах и коррозионной стойкостью, поэтому они в основном применяются при высоких температурах и в агрессивных средах.

Трибологические применения подшипниковых сплавов зависят от их свойств в условиях фрикционного контакта. Наиболее важными

характеристиками сплавов являются их *усталостная прочность, допустимое контактное давление, долговечность по износу и сопротивление задиру*. Эти характеристики даны в табл. 9.6–9.8 по данным Буше.

Т а б л и ц а 9.6. Особенности схватывания и повреждений различных подшипниковых сплавов

Группа сплавов	Температура плавления, °С	Характер процесса схватывания	Характер повреждений поверхностей подшипника	Характер повреждений поверхности шлица
Сплавы на оловянной и свинцовой основе	$\leq 350$	В тонком поверхностном слое	Мелкие риски и вырывы	Перенос антифрикционного сплава без разрушений и вырывов
Сплавы на цинковой основе. Алюминиевые сплавы с мягкими структурными составляющими (олово, свинец, кадмий)	$\leq 650$	В гонком поверхностном слое и глубинное разрушение	Мелкие и крупные риски и вырывы	Риски и иногда вырывы металла
Сплавы на алюминиевой основе без мягких структурных составляющих и сплавы на медной основе	$\leq 1000$	Сопровождается глубинным разрушением металла	Риски и вырывы металла	Риски, вырывы металла и сетки термических трещин

Т а б л и ц а 9.7. Характеристики усталостной прочности различных подшипниковых сплавов

Установка	Антифрикционный материал	Усталостная прочность, МПа	Относительная усталостная прочность по сравнению с баббитом
Лабораторная машина (база 107 циклов)	Оловянный баббит	14,0	1,00
	Cu-35 Pb	26,6	1,90
	Al-6,5 Sn-1 Ni-1 Cu цельнолитой	42,3	3,05
Машина типа «Ундервуд»	Оловянный баббит	5,6–10,5	1,00
	Cu-35 Pb	10,5–17,5	1,73
	Оловянный баббит толщиной 0,1 мм	14–28	2,60
	Cu-Pb с Sn или Ag	21–28	3,02
	Алюминиевые сплавы	28–35	3,92
Машина «Viking»	Оловянный баббит (7% Sb, 8% Cu)	13,3	1,00
	Свинцовый баббит (1% Sn, 15% Sb, 1% As)	13,0	0,97
	Cu-Pb с покрытием сплавом Pb + 10% Sn толщиной 0,04 мм	28,7	2,16
	Cu-Pb с покрытием сплавом Pb-5 In толщиной 0,04 мм	28,7	2,16
	Cu-30 Pb, спеченная	23,8	1,79
	Al-20 Sn-1 Cu — биметалл на стали	32,3	2,42
	Cu-22 Pb-4 Sn, спеченная	38,5	2,90

Таблица 9.8. Относительные характеристики выносливости различных подшипниковых сплавов

Антифрикционный материал	Относительная выносливость	Минимальная рекомендуемая твердость тисек HB
Оловянный баббит	1,0	160
Свинцовый баббит	1,0	160
Свинцовистая бронза (спеченная с гальваническим покрытием свинцово-оловянным сплавом)	1,8	230
Свинцовистая бронза (спеченная) без покрытия	1,9–2,1	280
Свинцовистая бронза (спеченная) с наплавкой свинцово-оловянным сплавом	1,9–2,1	280
Алюминиево-оловянный сплав (20% Sn, 1% Cu)	2,5	200

Основная задача конструктора современной техники состоит в подборе наиболее эффективного подшипникового сплава для данного узла. Рассмотрение многочисленных возможных решений весьма трудоемко. Различные методы триботехнических испытаний и использование накопленных знаний о свойствах материалов может облегчить выбор наиболее оптимального решения, включая выбор трущихся материалов, режима смазки и условий работы.

## 9.2. Керамические материалы

Керамики представляют собой неорганические неметаллические материалы, обладающие рядом преимуществ перед металлами и сплавами в различных приложениях (табл. 9.9). Они имеют высокое отношение прочности к плотности, высокое отношение жесткости к модулю упругости, высокую прочность при повышенных температурах и коррозионную стойкость. Большинство керамик — это оксиды, карбиды, бориды, нитриды и силициды тугоплавких металлов, алюминия и некоторых других металлов. Существуют также композиционные материалы, представляющие собой включения в металлической матрице керамики (металлокерамики и керметы). К классу керамических материалов также часто относят алмаз.

Оксидные и нитридные керамики успешно используются для работы с твердыми контртелами в некоторых специальных применениях. На них можно получить превосходное качество поверхности, и по этой причине они используются в подшипниках с газовой смазкой и в высокоточных станках и приборах. Керамики могут работать при высоких температурах и радиации, поэтому их применяют в атомной промышленности.

Оксид алюминия используется для смазываемых водой упорных подшипников, насосов, перекачивающих горячую воду. Карбидные ке-

рамыки используются в подшипниках промышленных насосов для коррозионно-активных жидкостей. Их высокое сопротивление абразивному изнашиванию обеспечивает удовлетворительные эксплуатационные характеристики при работе в средах, загрязненных частицами абразива. Результаты триботехнических испытаний некоторых керамик представлены на рис. 9.1.

Т а б л и ц а 9.9. Керамики и области их применения в трибологии

Материал	Свойства и области применения
Алмаз	Превычайная твердость и очень высокая износостойкость; алмазный инструмент эффективно применяется для резания сверхсплавов, металлокерамики и керамики при высоких скоростях, для шлифования и полирования
Карбид кремния (SiC)	Высокие твердость и абразивная способность; применяют для шлифования и полирования, в качестве наполнителя для полимерных композитов для повышения износостойкости различных деталей двигателей внутреннего сгорания, например камеры сгорания, седла клапанов и т. п.
Карбид титана (TiC)	Высокие твердость и износостойкость; широко используется для изготовления износостойких деталей
Карбид вольфрама (WC)	Высокие твердость и износостойкость; применяется для твердосплавного инструмента, армирования корончатых буров при бурении горючих пород, заливатель алмаза для доводочных шлифовальных кругов и т. п.
Карбид бора (B <sub>4</sub> C)	Высокие твердость и износостойкость; применение ограничено низкими температурами
Нитрид кремния (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	Превосходное сопротивление тепловому удару; применяется для подшипников, роторов, седел клапанов, поршней и головок поршней и т. п.
Силалон (Si <sub>6-2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> N <sub>6-2</sub> )	Высокие твердость, ударная вязкость и износостойкость; применяют при обработке сплавов, которые не обрабатываются инструментами из обычных сплавов алюминия, для различных деталей двигателей внутреннего сгорания, например колец форсунок, подшипников, агрегатов турбокомпрессора, реторты, кулачковых толкателей, направляющих втулок клапанов и т. п.
Кубический нитрид бора (CBN)	Высокая твердость при высокой температуре, высокая стойкость к окислению; эффективно применяется в инструментальной для резания суперсплавов
Нитрид титана (TiN)	Высокая износостойкость и очень низкое сродство к металлам; широко применяется для изготовления режущего инструмента
Диборид титана (TiB <sub>2</sub> )	Высокие твердость и износостойкость; применяется при получении твердых сплавов для режущего и буряльного инструмента, износостойких покрытий, сопел для распыления песка
Диборид циркония (ZrB <sub>2</sub> )	Высокие термостойкость и сопротивление образованию окисления; используется в тех случаях, когда требуется высокая износостойкость при повышенных температурах, например в соплах ракет и т. п.
Дисилицид молибдена	Высокая окислительная стабильность; жаропрочные сплавы для газовой турбины, камер сгорания, двигателей и ускорителей ракет, сопла для распыления песка
Оксид алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Износостойкость и способность сопротивляться деформированию при повышенных температурах; эффективный инструмент для обработки чугуна, высокоуглеродистых сталей и термообработанных сталей при высоких скоростях
Частично стабилизированный оксид циркония (10% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 90% ZrO <sub>2</sub> )	Высокие прочность, ударная вязкость, механическая надежность, высокое сопротивление удару, абразивному изнашиванию и растрескиванию; используется в горючелюбивающей промышленности, например в бойлерах, подшипниках, лопках скреперов; при горячей экструзии меди и латуни, в сплавах, когда необходимы хорошие износостойкость и коррозионная стойкость
Плавленый кварц (SiO <sub>2</sub> )	Износостойкость и коррозионная стойкость при повышенных температурах; применяется также в качестве абразива при полировании

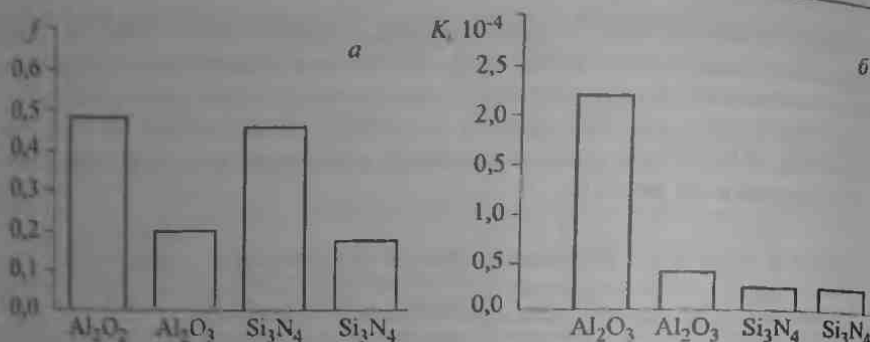


Рис 9.1. Коэффициент трения  $f$  (а) и коэффициент износа  $K$  (б) для оксидов алюминия и кремния

Применения керамик и керметов в современной технике многочисленны и растут очень быстро. Обобщенные данные о свойствах и областях применения керамик приведены в табл. 9.9.

### 9.3. Полимеры

*Полимеры*, являющиеся высокомолекулярными органическими соединениями, применяются в трибологии благодаря некоторым свойствам, которыми не обладают металлы и керамики. Среди этих свойств инертность ко многим реактивам, относительно низкая склонность к схватыванию, самосмазывающие свойства и низкий модуль упругости. Интенсивность изнашивания полимеров при сухом трении по металлам относительно мала, из них обычно легко изготовить подшипники, зубчатые колеса, уплотнения и покрытия. По общей классификации полимеры можно разделить на три класса: *термопластичные* (размягчаются или плавятся при повышенной температуре); *терморезистивные* (твердые и хрупкие, разлагаются при нагревании); *эластомеры* (резиноподобные, способные выдерживать большие обратимые упругие деформации, см. табл. 9.10).

Большинство полимеров наполняют неорганическими и волокнистыми упрочняющими наполнителями или используют в смесях с другими полимерами.

Трибология полимеров практически возникла только после второй мировой войны, после которой началось промышленное использование пластмасс. Сейчас невозможно себе представить машиностроение без применения полимерных деталей (шестерни, подшипники, направляющие и т. д.). Исследования в области трения и износа полимеров обобщены в работах Белого, Свириденка, Чичинадзе.

Термопластичные полимеры используют, главным образом, как самосмазывающиеся материалы для подшипников скольжения. Из-за плохой теплопроводности и большого коэффициента термического расширения нужно тщательно выбирать области их применения



Таблица 9.10. Типичные пластмассы, эластомеры, наполнители и армирующие компоненты, применяемые в трибологии

Термопласты	Фторуглероды	Политетрафторэтилен (ПТФЭ), фторэтиленпропилен (ФЭП), перфторалкоксид (ПФА)
	Ацетали	Гомополимер, сополимер
	Полиэтилены	Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы (СВМПЭ)
	Полиамиды	Нейлон 6, 6/6, 5/10, 5/11, 6/12
	Поликарбонат	
Высокотемпературные пластмассы	Полифениленсульфид (ПФС), полиимид-ника, полиимид, полиэфир*	
Термореактивные пластмассы		Фенольные, полиимидные, полиэфирные*, эпоксидные*
Эластомеры		Натуральные и синтетические каучуки, бутадиенстирол, изобутиленизопрен (бутьла), этиленпропилен, хлоропрен (неопрен), бутадиенакрилонитрил (Була-Н, Nitrile, NBR), полиакрилат, фторэластомер (винилэден, флуорид-тефторпропилен или Viton, перфторэластомер, фосфонитрильный фторэластомер), силикон, термопласты (полиуретаны, сополиэфир, олофины)
Наполнители и армирующие компоненты (для улучшения механических свойств и антифрикционных характеристик)	Волокна	Асбест, углерод, графит, ПТФЭ, стекло, ароматический полиамид (кевлар), полиамид (нейлон), полиэфир (Dacron, Terephene), Ornel, Dynel, и другие текстильные волокна
	Порошки	MoS <sub>2</sub> , графит, углерод, ПТФЭ, полиимид, серебро, бронза, кварц, оксид алюминия, слюда
	Жидкости	Минеральные масла, жирные кислоты, кремнийорганические жидкости

\* Эти пластмассы могут быть термопластичными или термореактивными.

с учетом предельных нагрузок и скоростей, вызывающих размягчение материала.

С этой точки зрения ПТФЭ занимает особое положение, обладая исключительной самосмазывающей способностью, высокой теплостойкостью и стойкостью в агрессивных средах. Преимущества подшипников на основе ПТФЭ обусловлены их фрикционными свойствами: низким коэффициентом трения при высокой нагрузке и низкой скорости скольжения и отсутствием stick-slip. Эти свойства позволяют использовать ПТФЭ как в смазываемых, так и в несмазываемых подшипниках.

Чистый ПТФЭ редко используется в подшипниках сухого трения вследствие высокой скорости изнашивания и низкого предела ползуче-

сти. Исключения относятся к сфере строительства: опорные подушки поддерживающие пролеты мостов, часто состоят из пластины ПТФЭ, помещенной в неглубокое чугунное гнездо для предотвращения выдавливания материала при очень больших нагрузках на опору. При этих условиях коэффициент трения равен около 0,02 и делает возможным термическое расширение и сжатие пролета без развития в его структуре чрезмерно высоких напряжений.

Термореактивные полимеры (эпоксидные смолы, фенольные смолы, силиконы, полиимиды) применяются при высоких температурах, часто в качестве матрицы для полимерных композитов.

Резины и полиуретаны часто используются для изготовления поверхностей с высоким сопротивлением абразивному изнашиванию. Другим важным триботехническим применением резин являются автомобильные шины.

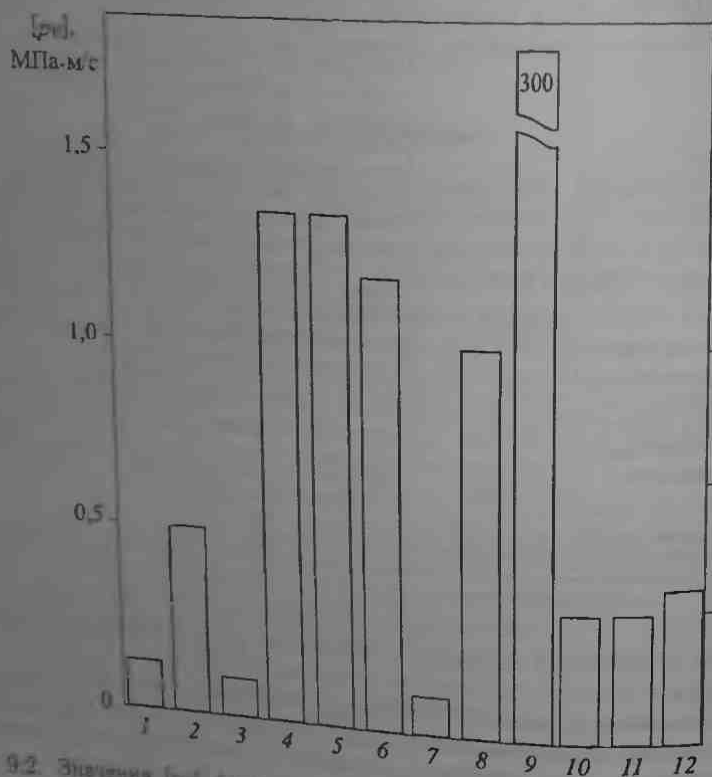


Рис. 9.2. Значения  $[\mu]$  фактора для полимеров: 1 — ацеталь; 2 — ацеталь с угольным наполнителем; 3 — капрон; 4 — капрон с угольным наполнителем; 5 — полиэтилкетон с фторопластом и угольным наполнителем; 6 — текстолит; 7 — полнирбонат; 8 — полиимид; 9 — полиимид; 10 — полиуретан с фторопластом; 11 — фторопласт с бронзовой пудрой; 12 — стеклонаполненный фторопласт.

Эксплуатационные характеристики полимеров обычно оцениваются по критерию «*р<sub>н</sub>*», значения которого для некоторых материалов представлены на рис. 9.2. Фрикционные характеристики наиболее широко применяемых полимеров приведены в табл. 9.11.

Т а б л и ц а 9 11. Антифрикционные свойства некоторых полимерных материалов (пара трения металл-полимер, без смазки)

Материал	Коэффициент трения		Относительный износ
	статический	кинетический	
Полиамиды	0,20-0,25	0,25-0,30	200
Полиформальдегид	0,15	0,20	65
Политетрафторэтилен	0,10	0,15	8
Поликарбонат	0,30	0,40	2500
Полиуретан	0,30	0,40	340
Стироакрилонитрил	0,30	0,35	3000
Пресскомпозиция на основе фенольной смолы	0,15-0,20	0,25	30

Высокий коэффициент термического расширения, малые теплопроводность и ползучесть чистых полимеров ограничивают их применение в подшипниках. Эту проблему в значительной мере можно решить, если придать полимеру форму тонкого слоя, прочно связанного с металлической подложкой. Нагрузочная способность и стабильность размеров такого подшипника высоки, поэтому могут использоваться такие же зазоры, как в обычных подшипниках. Преимущества таких подшипников по сравнению с подшипниками, выполненными из сплавов, заключаются в лучшей совместимости, более низком трении и лучшей способностью работать в условиях ограниченной подачи смазки.

Сополимер ацетата наиболее часто используется для изготовления тонких слоев на стальной основе с промежуточным слоем пористой бронзы. Такие подшипники достаточно эффективны в условиях ограниченной смазки и больших перерывов между операциями смазывания, например в сельскохозяйственных машинах.

Технология производства полимеров постоянно развивается, и каждый год появляются новые материалы. Большой прогресс достигнут в разработке композиций полимеров с другими материалами.

## 9.4. Композиционные материалы

Термин *композиционные материалы* не является четко определенным. Наиболее общим может быть следующее определение: комбинация материалов, имеющая макроскопическую границу раздела фаз. Основной материал называется матрицей, а другие фазы — наполнителями, армирующими добавками, связующими и т. п. в зависимости от их назначения. Компоненты композиционных материалов можно выбирать из любых классов материалов. Возможны многочисленные комбинации, и это обеспечивает разнообразие свойств композитов в любых их применениях, включая триботехнические.

Ниже перечислены некоторые характерные примеры:

- композиты с металлической матрицей включают сочетание металла с неорганическими (керамика) и органическими (углерод и полимеры) наполнителями или армирующими добавками;
- композиты с керамической матрицей часто содержат металлы или другие неорганические составляющие, а также углерод;
- композиты с полимерной матрицей представлены многочисленными комбинациями полимеров с металлами, углеродом, другими полимерами, древесиной и даже некоторыми жидкостями, такими как масла.

Композиционные материалы применяются во всевозможных областях, от слаботоковых электрических контактов до упорных подшипников гидравлических турбин. Прогресс современной техники чрезвычайно расширил сферу их приложения, включая космический вакуум, криогенные температуры, высокие температуры и другие жесткие условия. Требования надежности, долговечности и экологической чистоты становятся все более жесткими вследствие конкуренции, ценового фактора и экологического контроля. Одним из примеров экологического контроля является необходимость замены асбеста, являющегося очень эффективным материалом для тормозов, другими материалами, не являющимися канцерогенами. Технические требования дали толчок исследованию и разработке триботехнических материалов и привели в итоге к созданию множества новых материалов, причем наибольший прогресс достигнут в области создания композитов.

Одним из примеров современных композитов, созданных под влиянием требований авиакосмической промышленности, являются композиты на основе металлов с керамическими усами (монокристаллические нити сверхвысокой прочности, микрометровой толщины с большим отношением длины к диаметру). Наибольший интерес проявляются в системах на основе алюминия, армированного усами из сапфира и карбида кремния. Среди систем с нитями также перспективны алюминий и титан, армированные бором. Для применения в качестве износостойких материалов разработаны также композиты на металлической матрице с включениями твердых частиц керамики. Один из

примеров — композит с алюминиевой матрицей, содержащей частицы оксида алюминия или карбида кремния размером 16–142 мкм.

Керамики, имеющие ряд преимуществ перед металлами, также имеют определенные недостатки, обусловленные их хрупкостью. Радикальное изменение механизма разрушения может быть достигнуто введением волокон в керамическую матрицу. В этом случае волокна действуют как барьер для распространения трещин в композитах с металлической матрицей. Один из примеров таких композитов — углерод-углеродные композиты. Они применяются в современных авиационных тормозах, обеспечивая температурный диапазон эксплуатации до 2000°С. Другие примеры композитов с керамической матрицей — карбид кремния, армированный кремневыми волокнами, стекло, армированное стекловолокном, графитом или карбидом кремния, нитрид кремния, армированный танталовыми волокнами. Композиты с керамической матрицей, имеющие низкую плотность и высокую термостойкость, применяются для вращающихся деталей современных автомобильных и авиационных газовых турбин.

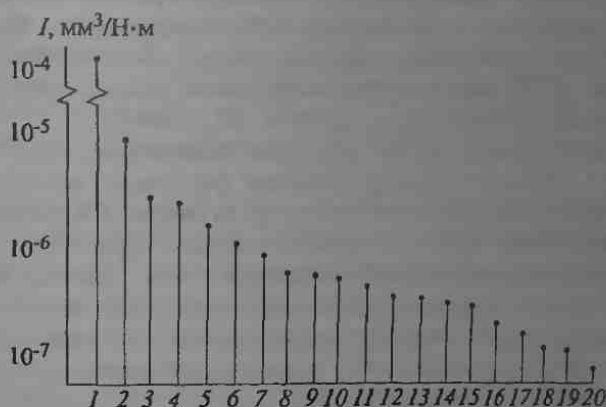


Рис. 9.3. Скорость изнашивания фторопласта с наполнителями: 1 — чистый ПТФЭ; 2 — титан; 3 — хлопьевидная бронза; 4 — нержавеющая сталь; 5 — углеволокно типа II 25 масс. %; 6 — слюда; 7 — кокс; 8 — углеволокно типа II + 10 масс. % MoS<sub>2</sub>; 9 — асбоволокно; 10 — графит; 11 — стекловолокно; 12 — углеволокно типа I 25 масс. %; 13 — полиимид, 25 масс. %; 14 — стекловолокно, 25 масс. % + MoS<sub>2</sub>, 10 масс. %; 15 — бронза; 16 — бронза + Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 17 — полифениленсульфид, 25 масс. %; 18 — бронза + графит; 19 — волокно ароматического полиамида, 25 масс. %; 20 — углеволокно типа II, 20 масс. % + медь, 20 масс. %

Практически все пластмассы используются в качестве матриц для композиционных материалов, однако в их ряду ПТФЭ занимает особое место. Рис. 9.3 является хорошей иллюстрацией того, как изменяется интенсивность изнашивания ПТФЭ в зависимости от используемого наполнителя.

Если учесть очень низкий коэффициент трения ПТФЭ и его высокую термическую и коррозионную стойкость, становится очевидным, насколько выгодным может быть его применение в узлах сухого трения. ПТФЭ является основой многих композитов. Он может служить матрицей, включающей такие наполнители, как графит или стекловолокно, либо он сам может быть наполнителем для термопластичной матрицы, например полиацетала. В распространенных материалах такого типа ПТФЭ содержится в виде хаотично ориентированных волокон в эцетальной матрице.

Наиболее популярный материал для подшипников сухого трения на основе ПТФЭ — композит со стальной подложкой со слоем пористой бронзы толщиной 0,25 мм, пропитанным смесью ПТФЭ и свинца. Согласно данным Пратта, такой композит обладает очень высокой износостойкостью при сухом трении, а его износ сосредоточен в поверхностном слое толщиной 0,025–0,05 мм. При  $[pv] = 0,5$  (МН/м<sup>2</sup>)·(м/с) скорость изнашивания такого слоя составляет 0,025 мкм/ч.

Температурный диапазон эксплуатации составляет от –200 до 280 °С, однако при более высоких температурах интенсивность изнашивания возрастает в 10 и более раз. Коэффициент трения равен 0,10–0,25 для большинства режимов трения скольжения, однако он снижается до  $\leq 0,05$  при высоких нагрузках и малых скоростях скольжения (нагрузка  $> 10$  МН/м<sup>2</sup>, скорость  $< 0,1$  м/с).

Другим типом композитов на основе полимеров, используемым в подшипниках, является термореактивная фенольная или полиэфирная смола, армированная хаотично ориентированными асбестовыми волокнами или хлопковой или асбестовой тканью. Прочность таких композитов, особенно содержащих хлопковую ткань, высока, они хорошо работают в таких тяжело нагруженных узлах, как подшипники прокатных станов. Вода — очень хорошая смазка для таких композитов, что объясняет их применение в судовых дейдвудных подшипниках, являющихся опорами гребного вала.

Безфторопластовые композиты включают другие твердые смазки, такие как графит или дисульфид молибдена, или, в некоторых случаях, микроарманы для смазочного масла. Наиболее дешевыми являются прессованные под давлением нейлоны и ацетали. Введение твердой смазки или масла снижает коэффициент трения, повышает износостойкость и обеспечивает удовлетворительные эксплуатационные характеристики при работе во многих легконагруженных узлах. Максимальное значение  $[pv]$ , при котором регистрируются приемлемые скорости изнашивания, составляет порядка 0,1 (МН/м<sup>2</sup>)·(м/с). В маслосодержащем варианте масляные карманы изолированы друг от друга, а эксплуатационные характеристики невозможно сравнить с характеристиками пропитанной маслом бронзы.

Наиболее дороги применяемые при высоких температурах полимеры, такие как полиимид. Графитонаполненный полиимид обладает хорошей термостойкостью и низкой интенсивностью изнашивания в

различных тяжелых условиях работы. Его интенсивность изнашивания относительно независима от температуры, а приемлемые эксплуатационные характеристики достигаются при  $[pv]$  до  $0,2 \text{ (МН/м}^2 \cdot \text{м/с)}$ , а иногда и при более высоких значениях.

Промежуточное по стоимости положение занимают такие термопласты, как полисульфон и полифениленсульфид, армированные произвольно ориентированными углеродными волокнами. Однако количественные данные об эксплуатации этих композитов в подшипниковых узлах пока отсутствуют.

Для перспективных применений разработаны и некоторые другие композиты с полимерной матрицей. На рис. 9.4 представлены данные испытаний десяти композитов на воздухе и в вакууме. Хорошие результаты получены для некоторых полимеров, армированных полимерными волокнами, таких как полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы с арамидными или неорганическими волокнами.

Иногда эффективное решение технических проблем не требует использования сверхпрочных компонентов для создания композита, наилучшего для данных экстремальных условий. Такого рода примером является древесно-полимерный композит на основе полимерной матрицы, наполненной частицами древесины. Такой композит имеет очень хорошую долговечность в условиях абразивного изнашивания и коррозионно-активных сред, например в соляных шахтах, где он применяется для изготовления подшипников скольжения, работающих без смазки.

Подшипники из бронзы и бронзы на стальной подложке, имеющие карманы с графитной смазкой, используются при ограниченной подаче смазки. Для условий сухого трения необходимо возможно более равномерное распределение мелкодисперсного графита в бронзовой матрице. Композиты такого типа получают методами порошковой металлургии: порошки меди, олова и графита смешивают, прессуют и спекают. Наиболее распространенный состав содержит 8 весовых процентов (26 объемных %) графита. В композит можно вводить до 40 объемных % графита, что, однако, несколько снижает его прочность и пластичность. Износостойкость при сухом трении не столь высока, как у композитов на основе ПТФЭ, однако графитизированные бронзы могут использоваться при значительно более высоких температурах, чем ПТФЭ. Они могут применяться в агрессивных средах, где допускается некоторый износ, и в некоторых устройствах для работы под водой.

Накопление знаний в области трибологии композитов создало предпосылки для создания материалов, способных приспособиваться к внешним воздействиям и обеспечивать оптимальные триботехнические характеристики. Кроме того, возможно создание композитов с резервными возможностями для предотвращения катастрофического разрушения узла трения при резких изменениях эксплуатационных параметров или окружающей среды. Одним из примеров таких материалов являются полимерные композиты с несколькими добавками, облада-

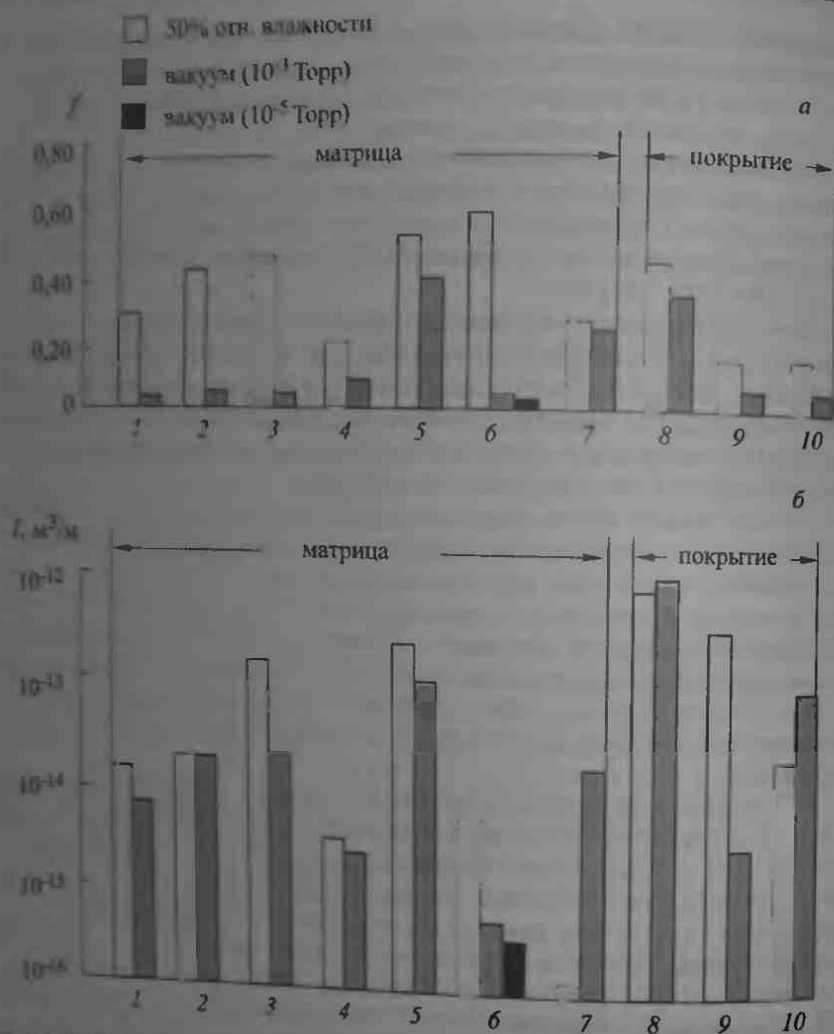


Рис. 9.4. Коэффициент трения (а) и скорость изнашивания (б) полимерных композитов для аэрокосмических приложений: 1 — полифениленсульфид + 40 масс. % графитоволокна; 2 — полиамидилд с ПТФЭ и графитом; 3 — полиимид 4 — полиимид РМЯ15 + 70% ПТФЭ; 5 — полиимид РМДА; 6 — смесь 80% РМДА/20% полиимид ВТДА; 7 — полиимид + 50% графитоволокна; 8 — полиимид ВТДА; 9 — полиимид ЗР1-4701; 10 — полиимид Р1-4701 + 5% CFx

дающим самосмазывающим действием при различных температурах (термопласты с низкой температурой плавления, терморазлагающиеся соли мягких металлов, микрокапсулы с маслом, графит и т. д.), обеспечивающих работоспособность трибосистемы на нескольких уровнях жесточения условий трения. Функциональные добавки могут размещаться на разной глубине поверхностного слоя и вступать в действие по мере его изнашивания.



## 9.5. Перспективы триботехнического материаловедения

Создание новых трибоматериалов базируется на решении взаимосвязанных задач трибологии, физической химии, теплофизики, механики и технологии получения и переработки материалов. Основным направлением в триботехническом материаловедении является разработка многофункциональных материалов, адаптированных к разнообразным условиям эксплуатации, возникающим в современной технике. Основой таких материалов могут быть как традиционные металлы и сплавы, полимеры и керамики, возможности которых далеко не исчерпаны, так и быстроразвивающиеся классы композитов на их основе.

В случае металлов и сплавов существенное улучшение трибологических характеристик за счет только легирования уже вряд ли достижимо. Однако сохраняется громадный резерв влияния на трибологические характеристики путем модифицирования структуры, что может быть реализовано при улучшении свойств межфазных границ, изменении концентрации и распределения дефектов, фазовых составляющих и т. д.

Для всех классов композитов важным является оптимизация структуры, в частности снижение размеров зерен до нанометрового уровня, регулирование кинетики структурообразования с целью обеспечения заданных триботехнических и прочностных характеристик.

В последние годы получила развитие концепция «умных» материалов, меняющих свои свойства в зависимости от внешних воздействий — нагрузки, электрических и магнитных полей, радиации и т. д.

Выбор подходящего материала для узла трения — это всегда трудоемкая работа, требующая изучения литературы и больших лабораторных исследований и испытаний. Создание баз данных и экспертных систем позволяет облегчить эту работу и сократить продолжительность проектирования узла.

### Список литературы

1. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. — Минск: Наука и техника, 1976.
2. Буше Н. А., Копытько В. В. Совместимость трущихся поверхностей. — М.: Наука, 1981.
3. Карасик И. И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. — М.: Наука, 1978.
4. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
5. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. — СПб.: АТФ, 2008.
6. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник / Под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988.

7. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды и А. В. Чичинадзе — М.: Машиностроение, Варшава. Т. 1, 1989. 400 с.; Т. 2, 1990. 420 с.; Т. 3, 1992. 730 с.
8. Справочник. Трение, изнашивание и смазка / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Аликина — М.: Машиностроение, Т. 1, 1978. Т. 2, 1979.
9. Чалос Х. Системный анализ в триботехнике. — М.: Мир, 1982.
10. Bhushan B., Gupta B. Handbook of Tribology — New-York: McGraw Hill, 1991.
11. Friction and Wear of Ceramics / Ed. by S. Jahanmir — N. Y., 1994.
12. Glaeser W. Materials for Tribology. Elsevier, 1992.

## Глава 10

### СМАЗКИ И МАСЛА

Первыми смазочными материалами (смазками) были животные жиры и растительные масла. Быстрый прогресс в области нефтехимии сделал возможным использование множества минеральных масел, которые продолжают оставаться наиболее распространенными компонентами смазок. Именно в момент перехода от смазки животными жирами к минеральным маслам на российских железных дорогах Петров заложил основы гидродинамической теории смазки. В последующем отечественные трибологи внесли большой вклад как в теорию смазочного действия, так и в создание и применение всех видов смазочных материалов (Заславский, Матвеевский, Розенберг, Сеницын, Фукс и др.). Синтетические смазки были изобретены после второй мировой войны и сейчас представлены почти всеми классами химических соединений, включая сложные эфиры, кремнийорганические и органические вещества. Синтез присадок дает возможность значительно улучшить эффективность базовых масел, поэтому конструктор может подобрать



Рис. 10.1. Влияние скорости и давления на выбор смазки

смазку, удовлетворяющую самым жестким требованиям в данной трибосистеме. Целый ряд твердых тел также обладают смазывающими свойствами: полимеры, графит, дисульфид молибдена — наиболее известные из них. Даже пленка мягкого металла, такого как золото, свинец или олово, может служить смазкой при определенных условиях.

Более того, развитие современной техники привело к появлению газовых подшипников, в которых в качестве смазки можно использовать любой неагрессивный и химически стабильный газ.

Можно привести относительно простое разделение смазок на четыре основных типа: масла, пластичные смазки (масла, загущенные некоторыми веществами, чтобы сделать их менее текучими), твердые смазки и газы. Простое правило для выбора смазки в зависимости от условий работы трисистемы предложил Лансдаун (рис. 10.1). Ниже основное внимание уделяется маслам, пластичным и твердым смазкам.

### 10.1. Смазочные масла и пластичные смазки

Смазочные масла можно классифицировать по их происхождению или области применения. Говоря о происхождении, мы отметили, что *растительные и животные жиры* использовались с древних времен, а в наши дни их применение ограничено использованием в качестве добавок к некоторым минеральным и синтетическим смазкам для улучшения смазочной способности. *Минеральные масла*, получаемые из нефти, наиболее распространены в промышленности благодаря оптимальному сочетанию свойств и стоимости. *Синтетические масла* менее распространены вследствие более высокой стоимости, однако они обеспечивают целый ряд свойств, необходимых в новых областях быстро развивающейся современной техники.

Наиболее важные области применения масел — автомобильный транспорт (двигатели и трансмиссии) и промышленное оборудование (станки, металлообработка). Наиболее важным свойством любого масла является сочетание вязкости и несущей способности при граничной смазке, однако, в зависимости от конкретных применений, нужно рассматривать и многие другие факторы: термическую и химическую стабильность, агрессивность, совместимость с трущимися материалами, теплопроводность, воспламеняемость, токсичность и т. д. Ниже мы рассмотрим эти факторы при анализе конкретных применений.

Масла, применяемые для смазки поршневых двигателей внутреннего сгорания, называются *моторными маслами*. Это смазочные материалы, содержащие *базовое масло* и синтетические *присадки*, улучшающие свойства базового масла или придающие ему требуемые новые свойства. Базовые компоненты моторных масел имеют кинематическую вязкость 3,5–22 сСт при 100°C. Содержание присадок изменяется от нескольких процентов в маслах для легконагруженных узлов до 25–30% в маслах для судовых дизелей, работающих на тяжелых, высеровосернистых топливах.

С ростом температуры вязкость масла снижается. Существуют два характерных режима работы двигателя, при которых вязкость масла достигает максимума и минимума, а именно, пуск двигателя при температуре окружающей среды и длительная работа с максимальной выходящей мощностью. Следовательно, важно знать характер зависимо-

сти вязкости от температуры в диапазоне температур, в котором масла подчиняются закону Ньютона.

Связь между кинематической вязкостью и температурой масла определяется законом Вальтера

$$\lg \lg(\nu + 0,8) = A - B \lg T,$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость, сСт,  $A$  и  $B$  — константы, зависящие от содержания углеводородов в масле.

На практике для оценки этой взаимосвязи широко используется индекс вязкости. Этот индекс рассчитывается по значениям вязкости масла при 50 и 100°C по формуле:

$$VI = 100(L - U)/(L - H),$$

где  $U$  — вязкость пробы масла в сантистоксах при 50°C,  $L$  — вязкость при 50°C масла с индексом вязкости 0, имеющего одинаковую с пробой вязкость при 100°C,  $H$  — вязкость при 50°C масла с индексом вязкости 100, имеющего одинаковую с пробой вязкость при 100°C.

Чем выше индекс вязкости, тем меньше вязкость изменяется с температурой. Кроме того, индекс вязкости сезонных масел определяет чистоту базового масла, применяемого для их изготовления. Высокий индекс вязкости всесезонных масел достигается добавлением специальных присадок (например, высокомолекулярных полимеров), увеличивающих вязкость только при высоких температурах.

Имеются различные классификации моторных масел по вязкости. Одной из наиболее употребительных является классификация Американского общества автомобильных инженеров, или система SAE. В этой системе используются значения вязкости при -18°C и 100°C. В табл. 10.1 представлены данные для моторных и трансмиссионных масел по классификации SAE (литера W — для зимних масел).

В системе SAE масла описываются одним из вышеприведенных чисел (сезонные масла, например, SAE 20W или SAE 90). Если масло удовлетворяет требованиям SAE при -18°C и 100°C, оно считается всесезонным (например, SAE 20W-50).

В табл. 10.2 сопоставляются классы вязкости масел при 40°C по классификациям SAE, AGMA (Американская ассоциация производителей зубчатых передач) и ISO (Международная организация стандартов).

Классификация ISO охватывает наиболее широкий диапазон вязкостей с шагом около 1,5 единиц.

В табл. 10.3 приведены температуры, при которых моторные масла имеют эквивалентные вязкости по классификации SAE. Рекомендуемый диапазон температур окружающей среды для различных масел приведен на рис. 10.2. На рис. 10.3 приведен пример использования данных о вязкости масла при конструировании подшипника. На этом

Таблица 10.1. Классификация масел по системе SAE

Номер по SAE	Вязкость при $-18^{\circ}\text{C}$ (сантимуаз)		Вязкость при $100^{\circ}\text{C}$ (сСт)	
	Максимальная		Минимальная	Максимальная
Моторные масла				
5W	1250		3,8	—
10W	2500		4,1	—
20W	10000		5,6	—
20			5,6	Менее 9,3
30			9,3	Менее 12,5
40			12,5	Менее 16,3
50			16,3	Менее 21,9
Трансмиссионные масла				
75	3250			Менее 25
80	21600			Менее 43
90			14	
140			25	
250			43	

Таблица 10.2. Сравнение классификаций по вязкости

Марка вязкости по ISO, мм <sup>2</sup> /с	ЧислоAGMA	Приблизительный эквивалент по SAE	
		Моторное масло	Трансмиссионное масло
22		5W	
32		10W	75W
46	1	15W	
68	2	5W-30, 20-20W	80W
100	3	10W-40, 30	85W
150	4	20W-50, 40	80W-90
220	5	50	90
320	6	60	
460	7		140
680	8		
1000	8A		250

Таблица 10.3. Температуры, при которых масла имеют эквивалентные вязкости

Класс вязкости по SAE J300	SAE 10W	SAE 20W	SAE 30	SAE 40	SAE 50
Минимальная температура холодного пуска, $^{\circ}\text{C}$	-23	-18	-13	0	+5
Максимальная температура масла в картере, $^{\circ}\text{C}$	90	110	135	150	160

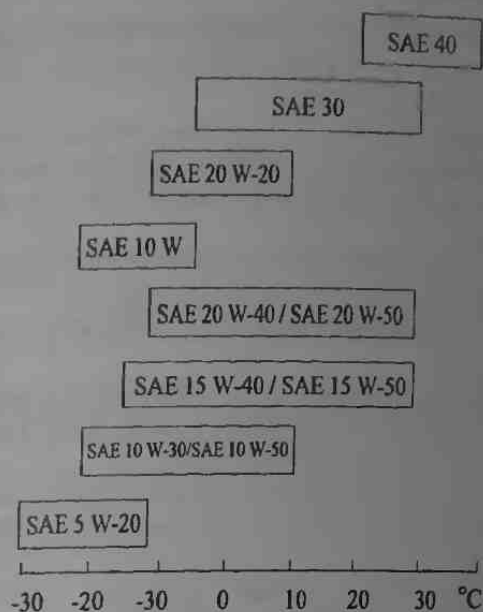


Рис. 10.2. Рекомендуемые температуры окружающей среды для масел по классификации SAE

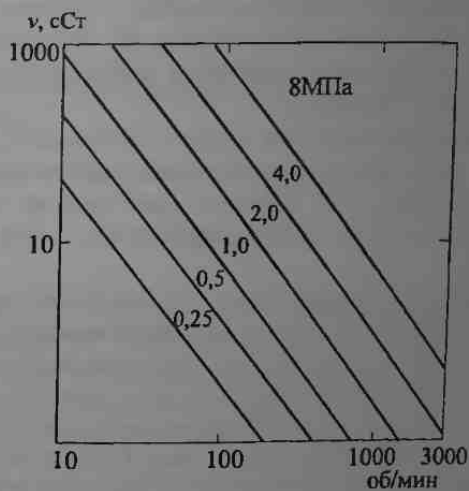


Рис. 10.3. Выбор вязкости для подшипников скольжения

рисунке показана корреляция давления, вязкости и скорости, служащая основой для выбора масла в конкретном подшипнике.

Основные свойства моторных масел, определяющие их пригодность для использования в двигателях различных типов и с различной степенью форсирования, включают:

- антинагарные свойства, т. е. способность предотвращать образование нагара на нагретых поверхностях и коксование поршневых колец;
- способность снижать износ;
- диспергирующие свойства, т. е. способность предотвращать образование низкотемпературных осадков в картере, маслопроводе, масляном фильтре и других частях двигателя при его работе с малой нагрузкой;
- антикоррозионные свойства, т. е. способность предотвращать коррозию вкладышей подшипников коленчатого вала;
- антиокислительные свойства, т. е. стойкость к окислению при высоких температурах;
- нейтрализационные свойства, т. е. способность нейтрализовать кислоты, образующиеся при окислении масла или конденсирующиеся из конечных продуктов сгорания топлива.

Промышленные сорта моторных масел с требуемыми свойствами получают изменением химического состава масел и добавлением к ним присадок.

*Трансмиссионные масла* применяются для смазывания механических и гидромеханических трансмиссий наземных транспортных средств. Характерные формы повреждения зубчатых колес и подшипников трансмиссий — выкрашивание рабочих поверхностей (питтинг), а при высоких контактных температурах — еще и задир.

Одним из эффективных способов борьбы с задиром является применение присадок для сверхвысоких давлений. Усталостную долговечность поверхностей зубьев в трансмиссиях можно увеличить, применяя масла с более высокой вязкостью.

При выборе масла по вязкости следует учитывать, что вязкость и поведение масла при низких температурах определяют возможность начала работы транспортного средства при низкой температуре без подогрева трансмиссии. Они также определяют расход топлива и легкость слива масла.

Требуемые вязкость и низкотемпературные свойства масла обуславливаются температурным режимом работы и хранения транспортного средства, конструктивными особенностями трансмиссии и отношением мощности двигателя к массе транспортного средства. Важно, чтобы кривая вязкость — температура для трансмиссионных масел, применяемых в широком температурном диапазоне, была плавной.

Одной из особенностей трансмиссий транспортных средств, особенно автомобилей, является высокое контактное давление на зубьях шестерен (до 3000 МПа) и изменяющиеся условия работы. Согласно экспериментальным данным, температура подшипников гипoidной главной передачи автомобиля может достигать 200 °С, а объемная температура масла — 150 °С. Температура в контакте зубьев может достигать значений, приведенных в табл. 10.4.

Выбор трансмиссионного масла определяется, в первую очередь, зависимостью вязкости от температуры. Простым руководств. м в этом



Таблица 10.4. Контактные температуры на зубьях шестерен автомобилей и тракторов

Машина, механизм	Передача	Контактная нагрузка, МПа	Относительная скорость скольжения профилей в расчетной точке, см/с	Температура контакта, °С
Пятитонный грузовой автомобиль	Первая	1610	25,4	110
Большегрузный автомобиль	Первая	1260	136	276
Планетарный редуктор гидромеханической передачи	Наиболее нагруженная пара	1490	136	115
	Раздаточная коробка	2130	583	330
Трактор колесный	Бортовая	870	42,5	130
	Седьмая	630	256,0	68
Трактор гусеничный	Бортовая	700	50,2	60

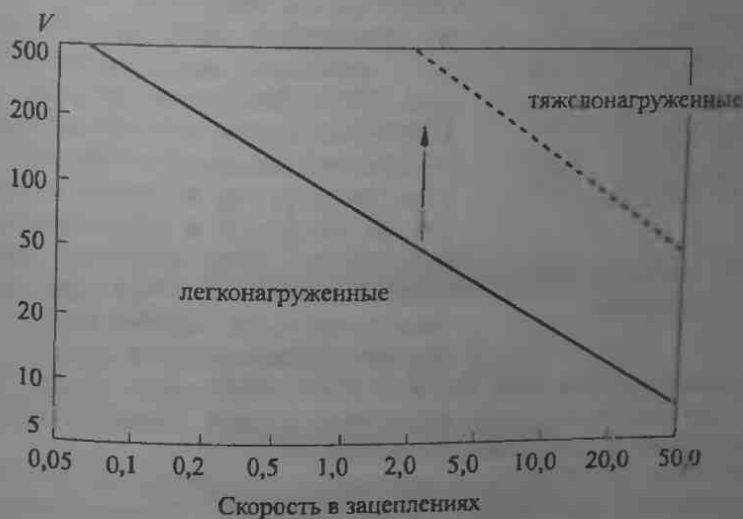


Рис. 10.4. Выбор трансмиссионных масел по вязкостно-скоростному соотношению

случае может быть рис. 10.4, при построении которого использованы данные табл. 10.4

Резкие изменения скорости автомобиля нежелательны для соблюдения условий гидродинамической смазки сопрягаемых шестерен трансмиссий. Износ, а иногда и задиры зубьев зубчатых трансмиссий при использовании обычных масел свидетельствуют о том, что режимы гидродинамической и контактно-гидродинамической смазки не обеспечиваются для таких трансмиссий. Значительного увеличения долговечности по износу зубчатых колес можно добиться, применяя антиизносные присадки и присадки для сверхвысоких давлений.

По своим свойствам *пластичные или консистентные смазки* занимают промежуточное положение между твердыми смазками и маслами. Они обычно состоят из двух компонентов: жидкой основы (минеральные, растительные, синтетические и другие масла) и *загустителя* (твердые углеводороды, различные соли высокомолекулярных жирных кислот, т. е. мыла, дисперсные силикагели и бентониты, и другие органические и неорганические вещества). Пластичные смазки также содержат присадки, улучшающие их эксплуатационные свойства. В пластичные смазки часто вводят различные *наполнители* (графит, дисульфид молибдена, порошкообразные металлы и их оксиды, слюда и т. д.).

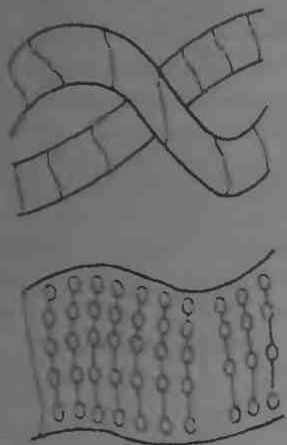


Рис. 10.5. Структура волокна загустителя

В процессе приготовления смазки загустители, в частности мыла, образуют трехмерную волокнистую структуру с ячейками, заполненными маслом (рис. 10.5). Благодаря наличию такой структуры пластичные смазки при умеренных нагрузках ведут себя как твердые тела (не текут под действием силы тяжести на наклонной и даже вертикальной поверхности). При нагрузках, превышающих прочность их структуры, пластичные смазки текут, подобно маслам. Однако при снятии нагрузки течение смазки

прекращается, и она вновь ведет себя как твердое тело. В этом состоит очень важная особенность пластичных смазок, обеспечивающая их преимущество в сравнении с маслами.

Основные из этих преимуществ — способность удерживаться в неуплотненных трибосопряжениях и работать в более широком диапазоне температур и скоростей, лучшие смазочная способность и антикоррозионные свойства, способность работать в присутствии воды и агрессивных сред и более высокая экономичность.

К недостаткам пластичных смазок можно отнести плохое охлаждающее действие, большую склонность к окислению и необходимость специальных устройств подачи к смазываемому соединению.

Знание свойств и отличительных особенностей пластичных смазок в заданных условиях работы, а также информация об особенностях конструкции подвижного сопряжения позволяют выбрать смазку для конкретного узла.

## 10.2. Присадки

Присадки к смазкам можно разделить на химически активные и неактивные. Первые способны химически взаимодействовать с металлами с образованием защитной пленки. Эти присадки разделяются на диспергирующие, моющие, противоизносные, присадки для сверхвысоких давлений, ингибиторы окисления и коррозии. Химически неактивные присадки улучшают физические свойства смазок. Они включают эмульгаторы, антиэмульгаторы, депрессанты, антивспениватели и улучшатели вязкости. При выборе присадок цель заключается не в максимальном улучшении одного из свойств масла, а в получении набора оптимальных свойств. Современные масла должны выполнять много функций, поэтому они обычно содержат многокомпонентные присадки.

Большинство присадок содержат гидрофобные углеводородные группы и поверхностно-активные группы, включающие кислород, азот, серу или фосфор. Углеводородные группы придают присадке необходимую растворимость в базовом масле, улучшая таким образом его объемные свойства. Поверхностно-активные группы обеспечивают взаимодействие с поверхностью, воздействуя таким образом на поверхность контакта трущихся тел (рис. 10.6).

*Диспергирующие присадки* служат для образования суспензии нерастворимых в масле смолистых продуктов окисления в объеме

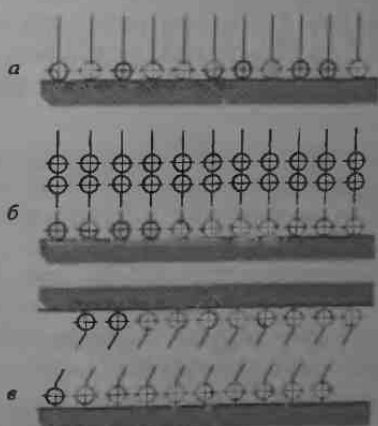


Рис. 10.6. Молекулярный слой с поверхностно-активными группами: а) монослой с активными группами; б) полимолекулярные слои; в) скольжение между монослоями

масла. Их молекулы содержат гидрофобный углеводородный радикал длиной 70–200 атомов углерода и кислород- или азотсодержащую полярную группу. К химическим соединениям, применяемым в качестве диспергирующих присадок, относятся алкенилсульфениды, сукцинаты сложных эфиров и амины с высокой молекулярной массой. Наиболее широко используемые промышленные дисперсанты — это производные полибутенилсукциновой кислоты. Более трех четвертей всего объема выпускаемых дисперсантов применяется в маслах для карбюраторных и тяжело нагруженных дизельных двигателей.

Моющие присадки применяются с той же целью, что и дисперсанты, но кроме этого они нейтрализуют кислотные продукты сгорания и окисления. Как правило, это металлические соли органических кислот. Их поверхностно-активные группы состоят из сульфонатов металлов, феноатов, карбоксилатов, салицилатов и фосфонатов. Сульфонаты, салицилаты и карбоксилаты применяются в промышленности в виде солей кальция и магния. Феноатные моющие присадки применяют в виде солей кальция. Кальциевые сульфонаты составляют около двух третей рынка моющих присадок, а феноаты — около 30%. Моющие присадки преимущественно используются в маслах для карбюраторных и дизельных двигателей, потребляющих 75% всего выпускаемого объема этих присадок.

Противозносные присадки и присадки для сверхвысоких давлений обеспечивают защиту трущихся поверхностей в условиях граничной смазки, возникающих при росте нагрузки или снижении скорости скольжения и создающих условия для контакта металл — металл и подъема температуры.

Противозносные присадки обычно действуют в условиях умеренного износа, а присадки для сверхвысоких давлений — в более тяжелых условиях. Присадки для сверхвысоких давлений требуют более высоких температур активации и применяются при высоких нагрузках. Противозносные присадки обычно используются в моторных маслах, жидкостях для автоматических трансмиссий, рулевого управления и

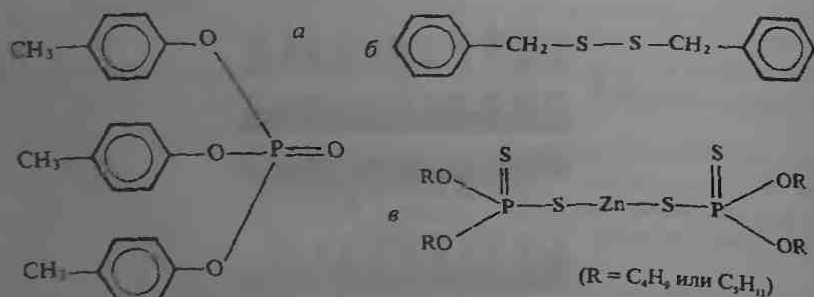


Рис. 10.7. Структура трех антизадирных/антиизносных присадок: а) трифенилфосфат; б) дибензидисульфид, в) цинкдиадкилдиднофосфат

гидравлических жидкостях для тракторов. Присадки для сверхвысоких давлений применяют в трансмиссионных маслах, жидкостях для амортизаторов и технологических жидкостях для металлообработки. Оба вида присадок содержат серу, хлор, фосфор, бор или их сочетания (рис. 10.7). При увеличении контактной температуры они реагируют с поверхностью металла, обеспечивая формирование твердой защитной пленки и снижая коэффициент трения в контакте (рис. 10.8).

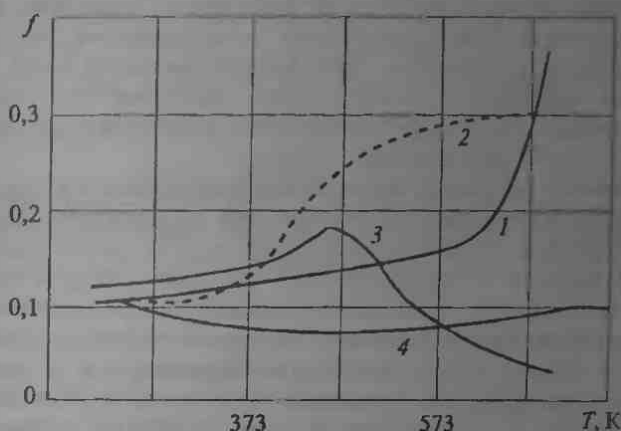


Рис. 10.8. Коэффициент трения в зависимости от температуры при испытаниях вазелинового масла в атмосфере аргона на машине палец-диск ( $v = 2,5$  м/с,  $P = 5$  Н); 1 — чистое масло; 2 — масло + присадка с 0,9% S; 3 — масло + присадка с 2,5% Cl; 4 — масло + присадка с 0,1% P

Наиболее часто применяют противоизносные присадки на основе цинксодержащих солей дитиофосфорной кислоты. Обычно они разлагаются при температуре ниже  $200^\circ\text{C}$ . Некоторые из этих присадок (противозадирные) действуют независимо от температуры, образуя защитный слой при осаждении (например, дисульфид молибдена и графит).

Основа присадок для сверхвысоких давлений — обычно алкил- и арилдисульфиды, дитиокарбаматы, хлорсодержащие углеводороды, диалкилводородные фосфиты и подобные вещества. Они разлагаются при температурах выше  $200^\circ\text{C}$ .

*Модификаторы трения* отличаются от противоизносных присадок и присадок для сверхвысоких давлений механизмом образования защитной пленки. Они содержат длинноцепные молекулы с полярными концевыми группами, обеспечивающими физическую адсорбцию на металлах. Наиболее распространены присадками такого типа являются производные жирных кислот.

*Антиоксиданты* вводятся в масло с целью предотвращения его окисления. Они используются практически во всех смазках, половину из которых составляют моторные масла для карбюраторных и ди-

тельных двигателей. Наиболее распространенными антиоксидантами являются арилалкилдитнофосфат цинка, ароматические амины, серосодержащие олефины и фенолы.

*Ингибиторы коррозии* предотвращают повреждение поверхностей металлов вследствие воздействия атмосферного кислорода и кислотных продуктов. Некоторые из этих ингибиторов нейтрализуют кислоты, другие — образуют защитные пленки на металлических поверхностях благодаря физической адсорбции или химическим реакциям. Наиболее распространенными присадками такого типа являются длинноцепные амины, основные сульфонаты, производные карбоксильной кислоты, производные тиадiazола и триазола. Они применяются в моторных и трансмиссионных маслах, технологических жидкостях для металлообработки и в пластичных смазках.

*Эмульгаторы* позволяют двум несмешивающимся жидкостям образовывать однородную смесь (эмульсию). Это важно для смазок, применяемых в некоторых отраслях. Например, вода и масло используются в металлообработке и гидравлических системах. Эмульгаторы обеспечивают необходимую стабильность эмульсий. *Деэмульгаторы* оказывают противоположное действие, подавляя образование эмульсий, например, в гидравлических жидкостях. Эмульгаторы и деэмульгаторы обладают поверхностно-активными свойствами и обычно содержат углеродную цепь и присоединенные к ней полярные группы. В качестве эмульгаторов часто применяют производные оксида полиэтилена и соли карбоновой и сульфоновой кислот. Деэмульгаторы включают сочетание блок-сополимеров оксида пропилена или этилена с глицерином, фенолформальдегидными смолами, силоксанами, полиаминами и полиолами.

*Депрессанты* — это присадки, снижающие температуру застывания смазки, что очень важно для применения ее при низких температурах. Значение температуры застывания связано с содержанием воска в масле. При низкой температуре воск выделяется в виде кристаллов, препятствующих течению масла. Депрессанты способны подавлять рост кристаллов воска, поддерживая таким образом течение масла. Типичные присадки такого типа — органические полимеры типа алкидных ароматических соединений, сложных эфиров стирола, полиметакрилатов и других смешанных углеводородных полимеров. Они применяются практически во всех типах масел, применяемых в машинах, работающих при низких температурах.

*Антипенообразователи* предотвращают пенообразование, изменяя поверхностное натяжение и облегчая отделение пузырьков воздуха из масла. Эта группа присадок представлена силиконами и полиакрилатами.

*Вязкостные присадки* важны для улучшения эффективности смазывания при высокой температуре, когда вязкость масла сильно снижается. Как правило, это органические полимеры, улучшающие смазочные характеристики маловязких масел при высокой температу-

ре, сводя к минимуму изменение вязкости с температурой. Примером распространенных присадок такого типа могут служить сополимеры олефинов, полиметакрилаты и другие полимеры. Их действие основано на свойстве полимерных цепей увеличивать объем при повышении температуры, повышая таким образом вязкость масла (рис. 10.9).



Рис. 10.9. Добавки, повышающие вязкость, и механизм загущения

Существуют и другие типы присадок для специальных целей. Это присадки, предотвращающие набухание и повреждение полимерных или резиновых уплотнений, *биоциды* (контролируют размножение бактерий в маслах), *совместители* (стабилизируют микроэмульсии) и *красители* (обеспечивают стандартный цвет).

Современные масла и пластичные смазки обычно содержат целый набор присадок. Эти присадки являются реакционно-способными веществами и поэтому могут взаимодействовать друг с другом. Задача инженера-смазчика состоит в сведении к минимуму отрицательного эффекта этого взаимодействия и в извлечении из него максимальной выгоды. Базовые масла, как правило, выбираются из минеральных масел, синтетического или частично синтетического сырья. Определенный интерес проявляется к маслам растительного и животного происхождения по причине их биodeградационной природы и экологической безопасности.

В табл. 10.5 представлен состав присадок к моторным маслам для различных областей применения.

Состав присадок для других масел и пластичных смазок в основном аналогичен, за исключением загустителей и наполнителей, вводимых в пластичные смазки (табл. 10.6).

Таблица 10.5. Состав присадок для моторных масел

Присадки	Моторные масла для карбюраторных двигателей	Моторные масла для дизельных двигателей	Моторные масла для двигателей на природном газе	Авиационные моторные масла	Моторные масла для двухтактных двигателей
Диспергирующая Моющая	×	×	×	×	×
Противокавитационная присадка для сверхвысоких давлений	×	×	×	×	×
Антиокислитель	×	×	×	×	×
Ингибитор коррозии/деактиватор металла	×	×	×	×	×
Модификатор трения	×				
Депрессант	×	×	×	×	
Антикислитель	×	×			
Вязкостная	×				×
Другие*					×

\* Силосетаны, красители, деактиваторы и эмульгаторы.

Таблица 10.6. Состав присадок для прочих масел и пластичных смазок

Присадки	Масла для автоматических трансмиссий	Трансмиссионные масла		Гидравлические жидкости		Жидкости для металлообработки	Пластичные смазки
		автомобильные	промышленные	тракторные	промышленные		
Диспергирующая Моющая	×			×	×	×	
Противокавитационная присадка для сверхвысоких давлений	×	×	×	×	×	×	×
Антиокислитель	×	×	×	×	×	×	×
Ингибитор коррозии/деактиватор металла	×	×	×	×	×	×	×
Модификатор трения	×	×	×	×		×	
Депрессант	×	×	×	×	×	×	
Антикислитель	×	×	×	×	×	×	
Вязкостная	×	×	×	×	×	×	×
Другие*	×			×	×	×	×

\* Противокавитационные присадки, силициды, буферные присадки, совместители, красители, эмульгаторы, ингибиторы ржавчины и модификаторы вязкости.



### 10.3. Твердые смазки

*Твердые смазки* — это материалы, обеспечивающие смазывание двух поверхностей, работающих в условиях сухого или граничного трения. Твердая смазка может не наноситься ни на одну из трущихся деталей (например, порошкообразные твердые смазки) или она может быть наполнителем композиционного материала или покрытия на одной из этих деталей. Высокая термостойкость, хорошая адгезия к металлам и низкая скорость испарения в вакууме делают возможным эффективное применение твердых смазок в вакууме, оптических и электронных системах. Эти смазки получили распространение в машиностроении, приборостроении и металлургии.

Слоистые твердые смазки подобны анизотропным композитам, в которых прочность межatomных связей в различных направлениях существенно различается. Наиболее важными твердыми смазками являются графит, дисульфид молибдена и политетрафторэтилен. Свойства последнего были рассмотрены в гл. 7.

*Графит* представляет собой модификацию углерода со слоистой структурой, обладающей очень хорошими смазывающими свойствами на воздухе. Он широко применяется как наполнитель для композиционных материалов, таких как композиты на основе ПТФЭ.

Существуют также различные соединения тугоплавких металлов с серой, селеном, теллуrom и другими халькогенами. Эти соединения эффективно используются как вакуумные смазки в авиакосмической промышленности, а их применение продолжает расти. Свойства твердых смазок даны в табл. 10.7. Наиболее известен из них дисульфид молибдена. Две из них обеспечивают наиболее высокие

Т а б л и ц а 10.7. Характеристики твердых слоистых смазок

Твердая смазка	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура, °C			Коэффициент трения
		окисления на воздухе	разложения в вакууме	плавления	
Графит	1,4–1,7	455	1100	3652*	0,04
BN	2,25	800–900		3000*	0,67
MoS <sub>2</sub>	4,8	400		1185	0,03
MoSe <sub>2</sub>	6,9	400		1200	0,02
WSe <sub>2</sub>	9,22	350	1400	1200	0,02
WS <sub>2</sub>	7,4	510		800	0,06
NbSe <sub>2</sub>	6,25	350		388	
CdJ <sub>2</sub>	5,7			412	
PbJ <sub>2</sub>	6,16			408, 439	0,17
BiJ <sub>3</sub>	5,7			552	0,14
Sb <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	5,67			550	
AgJ	4,64				

\*Начинается субдимаия материала.

триботехнические свойства. Это дисульфид молибдена и дисульфид вольфрама.

*Дисульфид молибдена* кристаллизуется в гексагональной системе. Атомы молибдена расположены между двумя слоями атомов серы. Расстояние между двумя ближайшими атомами молибдена и серы равно 2,41 Å, наименьшее расстояние между атомами серы в параллельных слоях составляет 3 Å.

На воздухе  $\text{MoS}_2$  окисляется до  $\text{MoO}_3$ , а S — до  $\text{SO}_2$ . Такие оксидные пленки начинают формироваться при 350 °С, при температуре выше 480 °С происходит быстрое окисление  $\text{MoS}_2$ . В вакууме  $\text{MoS}_2$  остается стабильным вплоть до 1100 °С.

Фтор интенсивно реагирует с  $\text{MoS}_2$ , хлор превращает  $\text{MoS}_2$  в  $\text{MoCl}_2$  при нагреве, в то время как бромид практически не реагирует с  $\text{MoS}_2$ .

Дисульфид молибдена очень стоек к радиации: при облучении дозой  $5 \cdot 10^9$  рад следы повреждений на его поверхности отсутствуют. Умеренный нагрев  $\text{MoS}_2$  в электропечи в отсутствие воздуха приводит к образованию  $\text{Mo}_2\text{S}_3$ . Трение на воздухе при температуре поверхности выше 400 °С приводит к частичному окислению  $\text{MoS}_2$  до  $\text{MoO}_3$ .

*Дисульфид вольфрама* кристаллизуется в гексагональной системе. Кристаллическая решетка  $\text{WS}_2$  подобна решетке  $\text{MoS}_2$ , в которой атомы молибдена заменены атомами вольфрама. Дисульфид вольфрама обладает большей термостойкостью (до 510 °С на воздухе) и сопротивлением окислению, чем дисульфид молибдена. Его нагрузочная способность в три раза превышает нагрузочную способность  $\text{MoS}_2$ .

Дисульфид вольфрама химически нейтрален, он нерастворим практически во всех средах, включая воду, масла, щелочи и почти все кислоты. Немногие химикаты, к которым он чувствителен, — это свободный газообразный фтор и горячие серная и плавиковая кислоты. Дисульфида вольфрама — нетоксичный материал и он не вызывает коррозию металлов.

Использование  $\text{WS}_2$  ограничивается его стоимостью, которая в три раза превышает стоимость дисульфида молибдена. Применение дисульфида вольфрама в качестве присадки к маслам для образования коллоидных суспензий несколько затруднительно из-за его высокой плотности ( $\rho = 7,4 \text{ т/см}^3$ ), в восемь раз превышающей плотность минеральных масел. Например, в масляной суспензии, содержащей 50% по массе графита, дисульфида молибдена и дисульфида вольфрама, объем этих компонентов будет соответственно равен 36, 15,5 и 11%.

Для использования при атмосферном давлении и температуре выше 400 °С рекомендуется дисульфид вольфрама, а при более низкой температуре более предпочтителен дисульфид молибдена как более дешевый материал. В вакууме дисульфиды вольфрама и молибдена проявляют практически одинаковые свойства и обладают смазывающей способностью до 1320 °С.

## 10.4. Направления развития смазочных материалов

Исследования в области смазок продолжают интенсивно развиваться благодаря расширению областей их применения. Современные прецизионные трибосистемы требуют применения новых подходов к смазке, а, следовательно, разработки новых смазок.

Одним из примеров таких разработок являются системы хранения информации в современных персональных компьютерах. В таких устройствах трение головки по диску при работе исключается благодаря газодинамическому эффекту, но при пусках и остановках головки существует опасность непосредственного контакта и износа. Разработаны специальные смазки, способные формировать очень тонкие защитные пленки на поверхности диска. Эти пленки должны иметь хорошую адгезию к диску, вращающемуся с очень высокой скоростью, и сохраняться на протяжении всего срока эксплуатации компьютера без повреждений. Были разработаны нетрадиционные подходы к подаче смазки на поверхность трения жесткого магнитного диска с использованием нанесения монослоя смазки на подложку из раствора с концентрацией смазки, необходимой для того, чтобы покрыть подложку одним слоем молекул. Эти покрытия продемонстрировали превосходную долговечность и антифрикционные свойства в прецизионных узлах.

Другой пример из области современных смазок — использование *жидкокристаллических присадок*, образующих на поверхности трения защитные слои мономолекулярной толщины. Подобный тип смазки характерен для суставов человека, значительно превосходящих по эффективности современные подшипники.

Еще одним современным методом обеспечения эффективной граничной смазки при долговременной работе является выполнение специальной микрорельефа поверхности, обеспечивающее предотвращение так называемого смазочного голодания. Микрорельеф может формироваться регулярно расположенными канавками или впадинами, а также специальной сотовой или квадратной текстурой поверхности.

Разработано много новых методов подачи смазки в зону фрикционного контакта, позволяющих в случае необходимости удерживать смазку в определенном месте. Некоторые из этих методов были разработаны для космической технологии, в которой отсутствие земного притяжения обуславливает необходимость удерживать смазку в рабочей области. В таких применениях успешно используются суспензии очень малых частиц магнитных материалов в силиконовом масле (магнитные жидкости). *Магнитные жидкости* обеспечивают комбинированное действие, т.е. работают и как смазки, и как уплотняющие агенты в вакуумных технологиях. Другим примером нетрадиционного смазывания в вакууме является применение смесей твердых смазок, например дисульфида молибдена с магнитными порошками. Эти смеси

могут удерживаться в контакте зубчатых колес в вакууме посредством магнитного поля, что обеспечивает эффективное смазывание контакта.

Перечень таких примеров может быть продолжен, а создание смазок продолжает оставаться перспективным направлением работы трибологов.

### Список литературы

1. *Заславский Ю. С.* Трибология смазочных материалов. — М.: Химия, 1991.
2. *Ротенберг Ю. А.* Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. — М.: Машиностроение, 1970.
3. *Сивашин В. В.* Пластичные смазки в СССР. Справочник. — М.: Химия, 1984.
4. Смазочные материалы. Антифрикционные и противозносные свойства. Методы испытаний. Справочник / Р. М. Матвеевский, В. А. Лашхи, И. А. Буинковский и др. — М.: Машиностроение, 1989.
5. Справочник. Трение и износ, смазка / Под ред. И. В. Крагальского и В. В. Аликина. — М.: Машиностроение, 1978. Т. 1, 400 с.; 1979. Т. 2, 358 с.
6. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / Под ред. В. А. Белого, К. Лудемы и Н. К. Мышкина. — М.: Машиностроение, 1993, англ. перевод. — N Y.: Allerton Press, 1994.
7. CRC Handbook of Lubrication / Ed. by E. R. Booser, CRC Press, 1992.
8. Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM Handbook. / Ed. by P. Blau, vol. 16, ASM International, 1992.
9. *Lansdown A. R.* Lubrication. A Practical Guide to Lubricant Selection. Pergamon Press, 1982.

## Глава 11

# ПОКРЫТИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Трение и изнашивание можно рассматривать как поверхностные явления, протекающие в достаточно тонких слоях контактирующих материалов. Поэтому для увеличения износостойкости и снижения трения часто модифицируют поверхностные слои деталей трибосистем. В современной трибологии термин *инженерия поверхности* определяет быстро развивающуюся область технологий воздействия на поверхность, таких как нанесение покрытий, поверхностная обработка и модификация.



Рис. 11.1. Обзорная схема методов инженерии поверхности

Покрытия являются продуктом нанесения материала на подложку. В этом случае можно получить сочетание объемных свойств подложки и поверхностных свойств нанесенного материала. Если структура

или лимический состав поверхностного слоя изменяется при помощи какого-либо метода, такой процесс называют *модификацией поверхности*. В последние годы получили распространение множество методов нанесения покрытий и обработки поверхности. Общая классификация этих методов представлена на рис. 11.1.

### 11.1. Покрытия триботехнического назначения

Исходные предпосылки для выбора метода нанесения покрытий обобщены в табл. 11.1, из которой следует, что такой выбор является сложным процессом, требующим учета условий работы покрытия, технических требований, качества поверхности и ее шероховатости.

Т а б л и ц а 11.1. Параметры процесса нанесения покрытий

Метод	Материал покрытия	Материал подложка	Температура процесса, °С	Толщина покрытия, мкм	Обработка перед нанесением	Адгезия покрытия к подложке	Примечание
Электролитический	Металлы, сплавы и композиты	Электропроводный	25-100	0,1-5000	Химическая очистка	Средняя	Процесс экономичный и быстрый
Химическое осаждение	Металлы, сплавы и композиты	Практически любой, в том числе непроводящий	25-100	0,1-50	Химическая очистка	Средняя	Процесс экономичный. Возможно нанесение покрытий на непроводящие материалы
Напыление	Большинство металлов и сплавов	Большинство металлов и сплавов	900-1400	750-3000	Механическая очистка	Очень высокая	Подложка относительно толстая ( $\geq 500$ мкм), чтобы избежать коробления
Термическое распыление	Практически любой	Практически любой	100-150	50-500	Пескоструйная обработка	От средней до высокой	То же ( $\geq 250$ мкм), чтобы избежать коробления. Шлифование, доводка после нанесения
Химическое испарение	Практически любой	Любой, выдерживающий температуру нанесения покрытия	150-2200	0,5-1000	Механическая и химическая очистка	Очень высокая	Покрытие тонкое
Физическое испарение	Практически любой	Любой, не выходящий газа	100-1600	0,02-1000	Механическая и химическая очистка	От средней до очень высокой	Покрытие тонкое

**11.1.1. Электрохимические покрытия.** Электрохимическое нанесение, или гальванизация, является одним из старых методов, широко применяемым и в наши дни для повышения износостойкости металлов. Основные материалы гальванических покрытий для нанесения из водных растворов, содержащих ионы, — цинк и никель. Хромовые покрытия триботехнического назначения имеют толщину от 10 до 500 мкм, твердость по Виккерсу до 1250, коэффициент трения при сухом трении по стали около 0,2. Никелевые покрытия мягче (твердость по Виккерсу до 400), однако они могут быть более толстыми (до нескольких миллиметров) и часто используются для восстановления изношенных деталей. Схема процесса гальванического нанесения покрытий представлена на рис. 11.2.

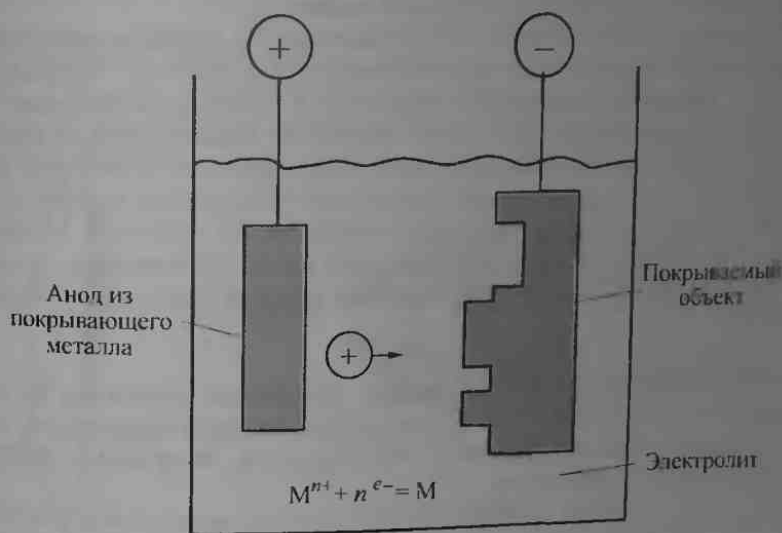


Рис. 11.2. Электролитическая ячейка для получения гальванического покрытия

Никелевые покрытия можно наносить при отсутствии внешнего электрического тока, если подложка оказывает каталитическое действие на раствор, содержащий ионы никеля и восстановители типа фосфора или бора (автокаталитическая металлизация). Восстановители входят в состав покрытия, увеличивая его твердость (до 700 по Виккерсу при использовании бора). Автокаталитическая металлизация более эффективна, чем электролитическое нанесение, и обеспечивает более равномерную толщину покрытия на деталях сложной формы.

Гальваническую и автокаталитическую металлизацию можно совместить с введением мелких частиц в покрытие в процессе его нанесения. Частицы могут быть как твердыми (оксид алюминия, алмаз, карбид кремния) для увеличения износостойкости, так и мягкими (дисульфид молибдена, ПТФЭ) для придания покрытию самосмазывающих свойств.

Недавно стал применяться еще один тип электрохимических покрытий. Это слоистый материал, полученный последовательным нанесением очень тонких слоев двух металлов, имеющих различные модули упругости. Итоговое покрытие получают нанесением множества слоев нанометровой толщины. Характерные пары металлов — Al—Cu, Ni—Cu и некоторые другие. Теория предсказывает высокое сопротивление слоистых покрытий пластическому деформированию вследствие затруднения передвижения дислокаций в тонких слоях и через их границы раздела. Простой метод получения электрохимических покрытий использует изменение силы тока или разности потенциалов в растворе комплексной соли, содержащей оба металла. Испытания таких покрытий на подшипниковой стали показали хорошие триботехнические характеристики в условиях граничной смазки.

Для превращения поверхности алюминиевого сплава в оксид алюминия может применяться электрохимический процесс, который не является процессом нанесения покрытия, а, скорее, напоминает поверхностную обработку. При такой обработке повышаются твердость и наносостоятельность. Процесс (*анодирование*) протекает в растворе серной кислоты благодаря анодной реакции на поверхности материала на основе алюминия. Покрытия имеют твердость по Виккерсу до 600 и вследствие высокой пористости допускают пропитку твердыми смазками, в результате чего получают сочетание высокой твердости и низкого трения.

**11.1.2. Наплавленные покрытия.** Покрытия, наносимые из расплавленного материала, называются наплавленными покрытиями или чашаками. Наиболее важны из них покрытия, получаемые сваркой и термическим распылением.

*Наплавка* твердым сплавом применяется для нанесения достаточно толстых покрытий (1–50 мм) на подложку, нагретую до температуры плавления наносимого материала. Этот материал подается в зону плавления либо в виде расходуемого электрода, проволоки с наполнителем, либо в виде предварительно нанесенной обмазочной массы. Для наплавки возможно использование различных методов, от ручной кислородно-ацетиленовой сварки до полностью автоматизированной дуговой сварки под флюсом и электрошлаковой наплавки.

Обычно наплавляют детали горнодобывающих и сельскохозяйственных машин, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Наиболее распространенным материалом для таких покрытий является специальная сталь (например, аустенитная марганцовистая сталь или инструментальная сталь), чугуны с высоким содержанием карбидов и твердый сплав (например, карбид вольфрама с кобальтовой связкой). Эти материалы также применяют для изготовления сплошных деталей, работающих в условиях абразивного и коррозионного изнашивания (см. гл. 9), поэтому одним из важных применений наплавки является остановление изношенных деталей. Подложкой



для покрытия обычно является сталь, поскольку она сочетает высокую температуру плавления и совместимость с наносимым материалом. Это обстоятельство ограничивает более широкое применение наплавки в эксплуатации машин.

Нанесение покрытия *термическим распылением* включает расплавление наносимого материала на некотором расстоянии от подложки с последующим его нанесением в виде мелкодисперсных капель. Подложка имеет намного меньшую температуру, благодаря чему капли застывают на ней, образуя покрытие. Термическое напыление свободно от многих недостатков метода наплавки, в первую очередь ограниченного набора материалов для подложек и покрытий. В этом методе плавление осуществляется либо при сгорании газа (пламенное распыление или детонационный метод), либо в электрическом разряде (электрическая дуга или плазма).

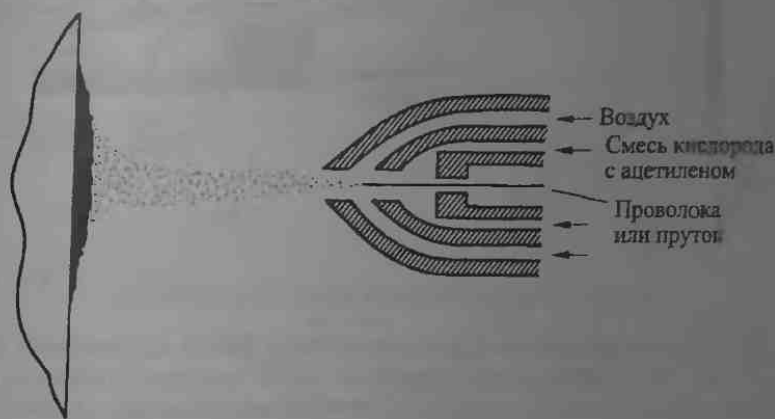


Рис. 11.3. Схема газоплазменного напыления из проволоки

Рис. 11.3 иллюстрирует схему метода *газоплазменного распыления*, в которой наносимый материал подается в пламя газа, например смеси кислорода с ацетиленом, а внешний источник воздуха ускоряет расплавленные капли. Температура пламени достигает  $3000^{\circ}\text{C}$ , капли нагреваются до температуры выше  $2000^{\circ}\text{C}$ , а их скорость при ударе о подложку составляет около  $100\text{ м/с}$ . Обычно металл подается в область пламени в виде проволоки, порошки керамики и кермет в подаются непосредственно или в виде сгораемых электродов.

*Детонационный метод* отличается от газоплазменного распыления применением периодических взрывов газовой смеси, ускоряющих расплавленные капли до скорости в  $800\text{ м/с}$ . В этом случае плотность покрытия, как правило, выше, а пористость ниже, в результате чего

покрытие получается лучшего качества, чем при газопламенном напылении.

В методе *электродугового распыления*, как и при газопламенном напылении, для переноса расплавленных частиц материала используется струя воздуха. Различие между этими методами заключается в источнике нагрева, которым в данном случае является электрическая дуга между приволочными электродами из материала покрытия. Качество покрытия близко к качеству газопламенных покрытий.

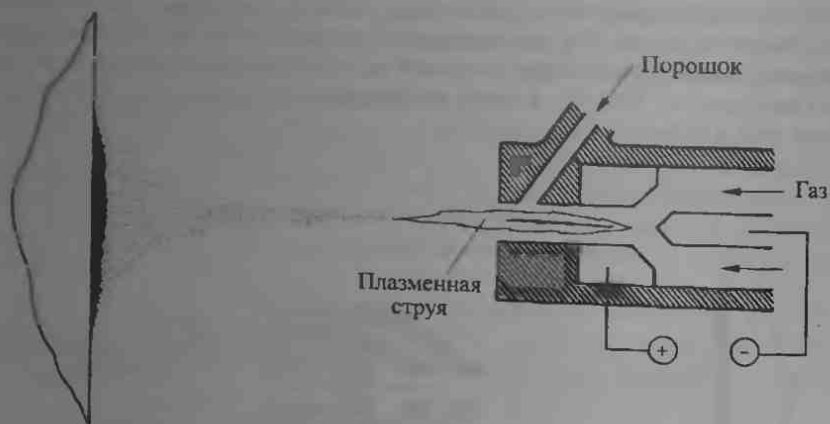


Рис. 11.4 Схема плазменной пушки для напыления

На рис. 11.4 представлена принципиальная схема *плазменного распыления*. Этот метод характеризуется более высокой температурой нагрева расплавленного материала, что обеспечивается плазменным разрядом в инертном газе (около  $15000^{\circ}\text{C}$  в аргоне). Разряд возбуждается дугой высокого напряжения. Материал покрытия подается в этом случае порошком, скорость капель расплава достигает  $500\text{ м/с}$ , чем газопламенные вследствие значительно лучшего качества, температуры, высокой скорости капель и предотвращения окисления нанесение покрытия выполняют в вакууме или на воздухе.

Плазменное распыление дает возможность использовать различные материалы для покрытий и подложек, однако нанесение покрытия требует тщательной предварительной подготовки подложки, поскольку адгезия покрытия к ней зависит от их механического зацепления. Перед напылением применяют различные методы очистки и черновой обработки поверхности (см. табл. 11.1). Для увеличения адгезии на границе раздела покрытия с подложкой на последнюю наносят подслои молибдена или никеля.

**11.1.3. Испарительные методы.** Это группа методов, в которых покрытие формируется из паровой фазы. По существу, эти методы можно разделить на методы *химического испарения (CVD)* и *физического испарения (PVD)*.

В первом процессе компоненты материала покрытия разлагаются или реагируют химически с газом или паром для нанесения покрытия на нагретую подложку. Температура в этом процессе обычно изменяется в пределах 600–1100°C, давление в камере может быть атмосферным или намного ниже атмосферного. Подложку нагревают, как правило, электрическим током, индуктивными, инфракрасными нагревателями или лазером. На рис. 11.5 представлена общая схема

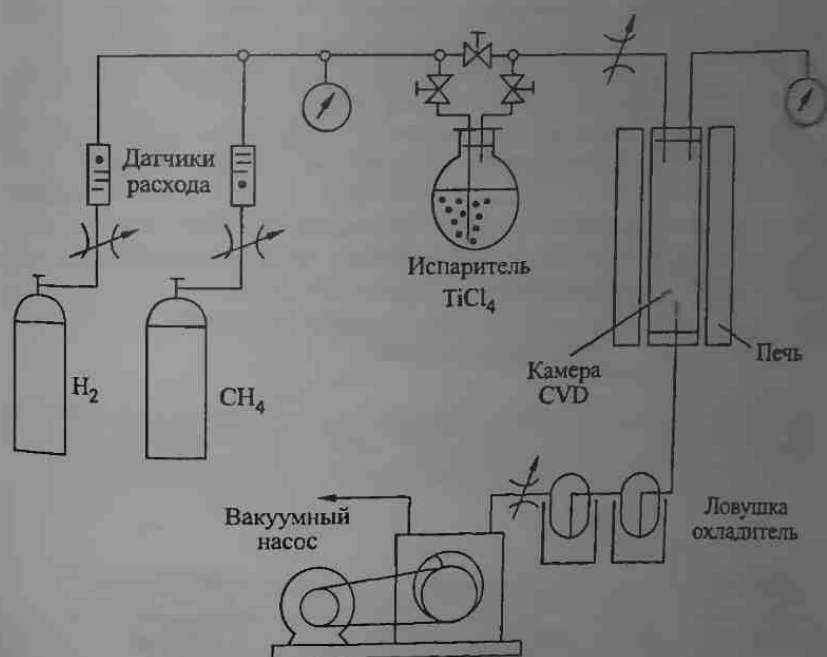
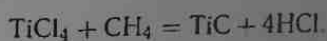


Рис. 11.5. Схема установки для напыления карбида титана методом химического вакуумного напыления

процесса при нанесении покрытия из карбида титана. В данном случае протекает следующая химическая реакция:



Набор оборудования обычно включает нагреваемый сосуд, в котором протекает химическая реакция, газовую арматуру, реакционную камеру, в которой подложка нагревается и взаимодействует с газом. Другими распространенными покрытиями, наносимыми из газовой фазы, являются металлический вольфрам и нитрид титана. Таким спосо-

бом можно также получать покрытия из оксида алюминия. Толщина покрытий обычно не превышает 10 мкм. Их структура сильно зависит от условий нанесения.

Для получения мелкозернистой структуры, имеющей лучшие триботехнические характеристики, необходимы низкие скорости нанесения покрытия, однако стоимость таких покрытий выше, чем нанесенных при высокой скорости крупнозернистых покрытий. Полученные химическим методом покрытия обычно имеют хорошую адгезию к подложке благодаря протекающей при высокой температуре диффузии на границе раздела покрытия и подложки. Другим преимуществом таких покрытий является возможность последовательного нанесения слоев разных материалов, что обеспечивает оптимальное сочетание триботехнических свойств. Один из примеров применения этого метода — покрытия на твердосплавном инструменте, включающие слой карбида титана, карбонитрида титана и нитрида титана.

Физическое испарение отличается от химического, главным образом, механизмом формирования покрытия. В данном методе этот механизм заключается в конденсации пара на подложке в условиях вакуума. Пар образуется при физическом воздействии на твердый, жидкий или газообразный источник. На рис. 11.6 представлены характерные варианты этого метода.

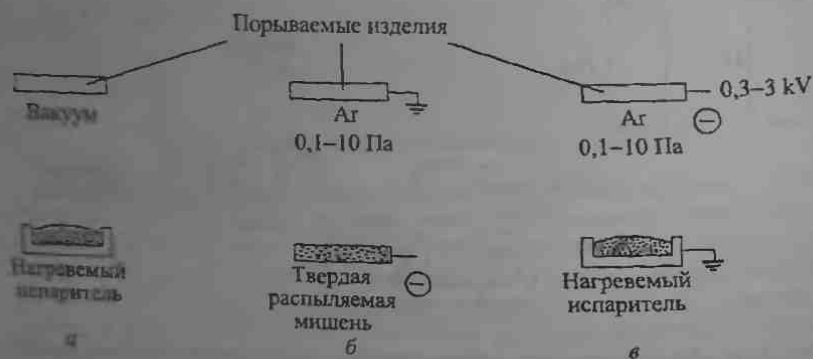


Рис. 11.6 Схемы основных методов физического вакуумного напыления: а) испарение; б) распыление; в) ионное покрытие. Все методы могут применяться с введенным реакционным газом в систему

Наиболее прост метод испарения наносимого материала из расплава (рис. 11.6, а). Таким способом наносят, как правило, лишь покрытия из металлов, однако при напуске в камеру реакционных газов можно получать композиционные покрытия. К недостаткам метода испарения можно отнести низкую адгезию покрытий к подложке вследствие малой кинетической энергии наносимых атомов.

Этот недостаток можно исключить, если использовать тлеющий разряд при низком давлении газа, например, аргона. Мишени из наносимого материала подвергаются ионной бомбардировке, атомы мишени распыляются из нее и сталкиваются с подложкой (рис. 11.5, б). Процесс контролируется изменением напряжения между мишенью и подложкой. Может применяться разряд как постоянного тока, так и переменного (*магнетронное распыление*).

В камеру также можно вводить реакционный газ (*реактивное распыление*), изменяя таким образом состав наносимого покрытия.

Другим важным типом методов PVD является *ионное осаждение* (рис. 11.6, в). В данном методе испаритель нагревает наносимый материал, атомы или молекулы которого испаряются и попадают в зону тлеющего разряда, где они ионизируются и ускоряются по направлению к подложке, к которой приложено отрицательное напряжение. В данном случае однородность покрытия и его адгезия к подложке очень высоки. Для ионного осаждения также можно использовать реакционный газ, при этом получают композиционные покрытия, например, нитрид титана.

По данным Семенова из методов ионного осаждения в странах СНГ наиболее популярен КИБ (конденсация при ионной бомбардировке). Основная область его применения — нанесение твердых покрытий на режущий инструмент из сталей и твердых сплавов. В табл. 11.2 приве-

Т а б л и ц а 11.2. Триботехнические характеристики покрытий TiN, нанесенных на сталь Р6М5 методом КИБ, при трении со смазкой M14E2 по разным материалам (линейный контакт, скорость скольжения 1,3 м/с, нагрузка 500 Н, длительность испытаний 4 ч)

Материал контртела	НМ <sub>200</sub> материала контртела, ГПа	Удельный объемный износ $I_v$ , мм <sup>3</sup> /мм		Коэффициент трения
		Контртела 10 <sup>9</sup>	Покрытия 10 <sup>11</sup>	
Медь М1	0,9	16000,0	58,0	0,11
		60,0	5,4	0,09
Техническое железо «Э»	1,6	9000,0	110,0	0,12
		140,0	80,0	0,08
Серый чугун	3,2	70,0	40,0	0,13
		2,1	3,5	0,03
Сталь 45	5,6	2100,0	17,0	0,11
		1,4	2,7	0,08
Сталь 20Х2Н4А (цементованная)	9,4	140,0	6,7	0,14
		2,8	1,3	0,03
Сталь 38ХМЮА (азотированная)	11,1	340,0	11,0	0,12
		4,9	2,0	0,05

Примечание. В числителе — значения для покрытия в исходном состоянии (после его изготовления), а в знаменателе — после полирования.

дены данные по триботехническим характеристикам покрытия из TiN на инструментальной стали Р6М5 при резании различных материалов.

Существуют методы, совмещающие особенности CVD и PVD, например *химическое нанесение в плазме*. В данном процессе применяют плазму тлеющего разряда, которая, благодаря способности образованных ею высокоэнергетических электронов стимулировать химические реакции, активирует CVD. Комбинированные методы реализуются с любым газом или паром, включая пары полимеров. В некоторых случаях применяют импульсную плазму, при которой температура подложки ниже по сравнению с непрерывным разрядом.

## 11.2. Полимерные и металлополимерные покрытия

Одним из наиболее рациональных путей использования полимеров является применение их в качестве *полимерных покрытий*. В этом случае сочетается высокая механическая прочность, присущая, например, металлам, с хорошими антифрикционными, антикоррозионными, износостойкими, электроизоляционными, декоративными и другими свойствами, характерными для современных пластмасс.

Из всего многообразия методов формирования полимерных покрытий обращают на себя внимание методы, основанные на использовании газодисперсий порошкообразных полимеров с оплавлением частиц материала на поверхности изделия. Формирование таких покрытий осуществляется в псевдооживленном слое порошка вследствие непрерывного столкновения (и оплавления) частиц с поверхностью, нагретой выше температуры плавления полимера.

Вибровихревой способ нанесения покрытий, предусматривающий одновременное действие на дисперсный материал вибрации и газа, позволяет осуществить псевдооживление почти всех полимерных материалов.

Псевдооживленный слой, создаваемый вибровихревым способом, отличается большой однородностью и отсутствием сепарации материала по размерам частиц. Переход плотного слоя в псевдооживленное состояние совершается плавно, без аномальных пиков, характерных для вихревого метода. Распределение толщины полимерного покрытия по длине образца равномерное, в то время как для вихревого и вибрационного способов достичь удовлетворительной равномерности по толщине не удается.

Для нанесения тонкослойных полимерных покрытий можно эффективно использовать электростатические силы. Электростатический метод — один из наиболее прогрессивных, позволяющих легко регулировать толщину покрытий, наносить покрытия на холодные поверхности сложной конфигурации, а также на материалы с ограниченной термостойкостью.

При покрытии тонким слоем полимера изделий, имеющих форму тел вращения, весьма эффективен способ нанесения полимерных покрытий в поле центробежных сил, обеспечивающий высокую плотность и хорошую адгезию получаемых покрытий. Способ может быть рекомендован для изготовления износостойких покрытий на крупногабаритных подшипниках диаметром до 400 мм и для восстановления изношенных подшипников.

Для нанесения полимерных покрытий из гранулированных материалов используется пневмоэкструзионный способ, сущность которого заключается в том, что термопластичный материал с помощью шнекового экструдера переводится в жидкотекучее состояние и под давлением подается к распылительной головке, где с помощью горячего газа и теплотечевого потока распыляется и наносится на изделие.

В последнее время внимание исследователей привлекают полимерные и металлополимерные материалы в виде сверхтонких пленок и покрытий.

В связи с этим были проведены работы по созданию и исследованию сверхтонких полимерных и металлополимерных покрытий при пиролизе полимеров и термической эмиссии металлов в вакууме. Получаемые покрытия, толщиной от нескольких сот ангстрем до нескольких микрометров, обладают хорошими прочностными, адгезионными, антифрикционными и диэлектрическими свойствами, которые, по-видимому, обязаны химическому взаимодействию между свободно-радиальными фрагментами полимерной цепи и атомами некоторых металлов.

Следует упомянуть и такие методы получения полимерных покрытий, как литье под давлением, создание многослойных покрытий, в которых дополнительные прослойки предназначены для повышения адгезии и прочности мозаичных покрытий, где участки полимера чередуются с зонами электролитических металлических покрытий и т. д.

К числу прогрессивных методов получения полимерных и металлополимерных покрытий относятся электрохимические методы. Интерес представляют методы электрофоретического осаждения дисперсий металлополимеров и совместного электроосаждения металлов и полимеров из их растворов.

На антифрикционные характеристики и работоспособность узлов трения с тонкослойными покрытиями большое влияние оказывают ряд факторов и особенно два параметра: структурное состояние полимера и толщина покрытия. Анализ литературных данных позволяет считать бесспорным немонотонный характер зависимости коэффициента трения от толщины полимерного и металлополимерного покрытия. Наличие оптимальной толщины покрытия обусловлено «равновесием» деформационных и тепловых процессов в слое, основан и контртеле, на которые в свою очередь оказывают влияние многочисленные технологические и эксплуатационные факторы.

Долговечность полимерных покрытий определяется их износостойкостью и зачастую оказывается пропорциональной толщине пленки.

### 11.3. Модифицирование поверхности

Существует целый ряд методов, к которым можно применить определенное модифицирование поверхности, однако их можно разделить на две основные группы: модифицирование структуры поверхностного слоя и модифицирование структуры и состава поверхностного слоя. Краткое описание этих методов дано в табл. 11.3, а их сравнительное действие на материал представлено на рис. 11.7.

Таблица 11.3. Методы обработки поверхности

Метод обработки	Обрабатываемые материалы	Легированные элементы	Температура обработки, °С	Глубина обработки, мкм	Примечание
Термическая	Сталь и железо	—	Обычно 750–1300	Обычно 250–3000	Быстрый, дешевый, допускающий автоматизацию метод. Высокая температура процесса
Механическая	Сталь и железо	—	20	100–500	Применяет только для деформационно упрочняющихся сталей
Термохимическая	Сталь и железо	C, N, B, Zn, Cr, Al, Si	Обычно 500–1300	Обычно 5–500	Быстрый, дешевый метод. Твердость выше, чем при термической обработке. Высокая температура процесса
Ионно-плазменная	Практически любые	Различные	50–200	0,01–0,5	Дорогой процесс, протекает при температуре окружающей среды. Процесс легко контролируется, обработанный слой очень тонкий

**11.3.1. Модифицирование структуры.** Модифицирование структуры поверхностного слоя можно осуществить различными путями. Наиболее простым методом, применяемым, главным образом, для сталей и некоторых других сплавов, является *деформационное упрочнение*. Сущность этого метода состоит в пластическом деформировании поверхностного слоя каким-либо инструментом или при дробеструйной обработке. Прочность пластичных материалов и их сопротивление усталости возрастают благодаря увеличению плотности дислокаций в материале и снижению их подвижности. В некоторых операциях металлообработки, таких какковка или волочение, деформационное упрочнение осуществляется одновременно с изменением формы детали.



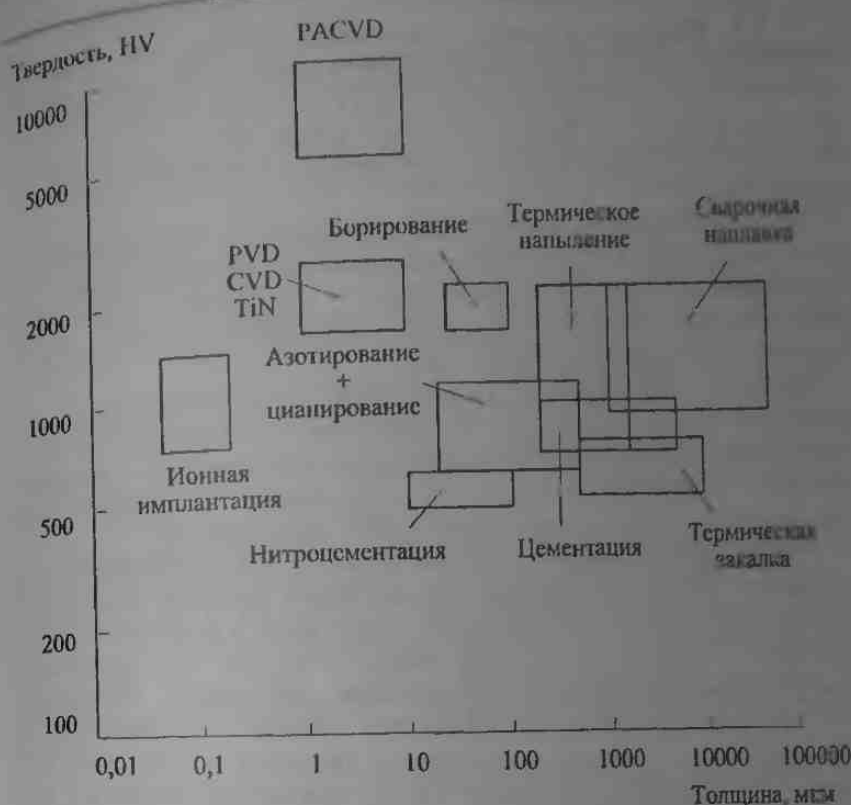


Рис. 11.7. Типичная глубина упрочненного слоя и твердость для различных методов модифицирования поверхностей на примере сталей

Другим распространенным методом модифицирования структуры является поверхностная термообработка, или *трансформационное упрочнение*. В этом методе используется свойство сплава изменять свою структуру и текстуру при воздействии нагрева и охлаждения. Сталь — наиболее яркий пример такого сплава, для которого механические свойства зависят от структурного состояния и размера зерна (см. табл. 9.1). Отличие методов поверхностного модифицирования от обычной термообработки сталей заключается в нагревании и охлаждении только поверхностного слоя. Существуют различные варианты этих методов, отличающиеся, главным образом, способом нагревания, например индукционный, пламенный нагрев, нагрев электронным или лазерным лучом. Способы охлаждения также могут быть различными: орошение жидкостью или погружение в нее. При упрочнении лазерным или электронным лучом высокая скорость охлаждения достигается без применения охлаждающего агента, поскольку продолжительность воздействия луча очень мала, и в металле протекает самоупрочнение при высокой скорости охлаждения поверхностного слоя благодаря хорошей теплопроводности металла.

**11.3.2. Модифицирование химического состава.** Улучшить антифрикционные свойства и износостойкость металлов и сплавов можно с помощью термохимической обработки (ТХО) посредством диффузионного насыщения или модифицирования поверхности металлов химически активными соединениями, вступающими в химические реакции с металлом.

Термохимическая обработка может протекать в твердых, жидких или газообразных средах. Продолжительность процесса зависит от химического состава используемой среды и температуры. Термохимическая обработка металлов подразделяется на две основные группы по особенностям и результатам процесса.

Обработка, применяемая для повышения износостойкости за счет увеличения твердости трущихся деталей. Этот тип обработки включает широко применяемые процессы *цементации, азотирования, нитроцементации, борирования* и т. д. Они используются, в первую очередь, для повышения сопротивления абразивному изнашиванию.

Обработка, применяемая, главным образом, для улучшения противозадирных свойств посредством формирования поверхностных слоев, обогащенных химически активными веществами. Такие слои предотвращают схватывание и задиры при трении. Этот тип ТХО представлен *сульфидированием, сульфоцианированием*, насыщением поверхностного слоя селеном, теллуrom, обработкой в ванне с иодидом кадмия. Эти процессы не приводят к повышению твердости поверхности либо лишь незначительно увеличивают ее. Их эффект заключается в снижении коэффициента трения и локализации задира. Данные процессы применяются для трущихся деталей, предназначенных для работы в условиях, когда возможно развитие задира, в условиях ограниченной смазки или невозможности ее подачи.

*Цементацию* применяют для низкоуглеродистых нелегированных и легированных сталей с содержанием углерода 0,08–0,3%. Содержание углерода в цементированном слое обычно составляет 0,8–1% в зависимости от марки стали. Цементированные низкоуглеродистые стали применяют для легконагруженных узлов трения, например поршневых пальцев, соединительных вилок, кулачковых валов, червяков, зубчатых колес с максимальным поперечным сечением до 25 мм. Легированные стали применяют для тех же деталей с поперечным сечением до 35 мм в средненагруженных узлах трения. Легированные стали со средней прочностью применяют для зубчатых колес до 75 мм в поперечном сечении, работающих при ударных нагрузках, высокопрочные легированные стали — для тяжелонагруженных шестерен до 120 мм в поперечном сечении.

*Азотирование* применяют для насыщения поверхностного слоя нитридами до глубины 0,25–0,7 мм и для увеличения его твердости (до 500–900 по Виккерсу). Это позволяет повысить сопротивление изнашиванию, коррозии и кавитации. С другой стороны, азотированный слой обладает повышенной хрупкостью. Он также структурно нестабилен.

при длительной выдержке при температуре 400–500 °С. Анодирование приводит к незначительному изменению размеров обрабатываемых деталей, которое можно компенсировать припуском.

**Нитроцементация и цианирование.** Преимуществом этих процессов по сравнению с газовой цементацией является более высокая скорость насыщения. Поверхностный слой становится более износостойким благодаря присутствию азота и более мелкозернистой структуре. Преимущество цианирования в соляных ваннах — более высокая скорость обработки, однако этот метод имеет значительный недостаток: применение токсичных солей требует от персонала особой осторожности. Для структуры поверхностного слоя, получаемого высокотемпературным цианированием, характерно наличие нитроцементированной зоны или нитроцементированных включений. При низкотемпературном цианировании происходит насыщение, главным образом, азотом, нитроцементированный слой очень тонкий.

**Борирование.** Твердость поверхности стали при такой обработке достигает 1400–1500 по Виккерсу, а микротвердость — 2000, что приводит к повышению износостойкости. Борирование применяют, главным образом, для легированных среднеуглеродистых сталей. Другой пример подобного процесса — **хромирование**, используемое для создания слоя карбида хрома на поверхности углеродистой или инструментальной стали.

**Сульфидирование и сульфоцианирование.** Сульфидирование в соляных ваннах нашло наиболее широкое применение благодаря простоте оборудования и относительно высокой скорости процесса. Сульфидирование дает явно выраженный противозадирный эффект, что позволяет увеличить нагрузку заедания и снижает коэффициент трения. Износостойкость возрастает в 2–5 раз. Сульфоцианирование — это процесс, при котором поверхностный слой насыщается как нитридами, так и сульфидами. Такая обработка приводит к улучшению противозадирных свойств (хотя она несколько менее эффективна, чем сульфидирование) и повышению износостойкости.

## 11.4. Направления развития методов модифицирования поверхности и нанесения покрытий

В инженерии поверхностей часто бывает трудно классифицировать однозначно некоторые методы, поскольку их характерные особенности и результаты применения основаны на сочетании физических и химических явлений. **Ионная имплантация** является одним из ярких примеров таких методов. По своему происхождению это чисто физический процесс, довольно близкий к физическому напылению, но изменяющий не только структуру поверхностного слоя, но и его химический состав. Принцип ионной имплантации заключается в ускорении ионов высоким напряжением в вакууме (энергия ионов 50–200 кэВ) и последующем

из проникновении в имплантируемую поверхность. Могут использоваться как ионы металлов (Ti, Al, Y), так и неметаллов (N, C, B). Основным преимуществом ионной имплантации по сравнению с другими методами модифицирования поверхности является возможность получения практически любых комбинаций основы с легирующими элементами, отсутствие проблем с адгезией, практически неизменные размеры обрабатываемой детали, отсутствие ограничений на температуру процесса, простота управления ионным пучком и изменения концентрация легирующего элемента в модифицируемом слое. Влияние ионной имплантации на твердость поверхностного слоя представлено на рис. 11.8. Основным недостатком данного метода является малая глубина модифицирования (как правило, менее 1 мкм) и высокая стоимость технологического оборудования.

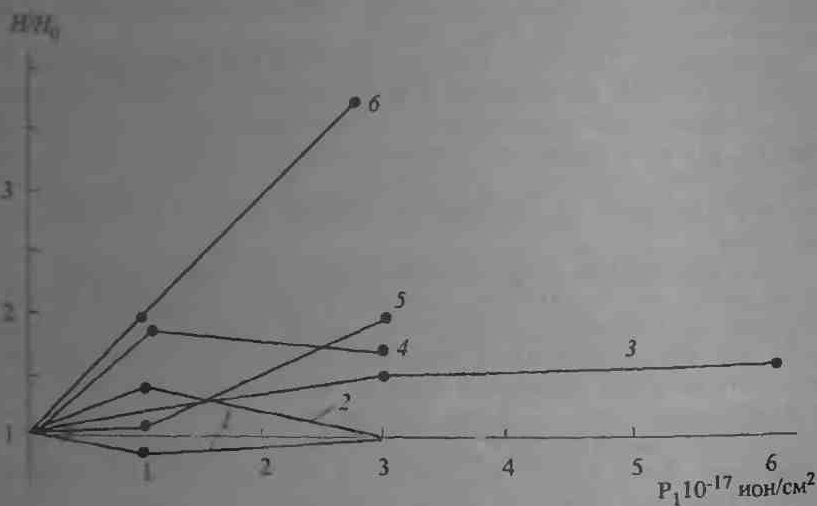


Рис. 11.8. Относительная микротвердость металлов в зависимости от дозы легирования ионами азота  $N^+$  с энергией 40 кэВ: 1 — Mo; 2 — Ni; 3 — Ti; 4 — Al; 5 — Au; 6 — слоистая система Al-Ti

В современной технологии часто используется сочетание различных методов нанесения покрытий и поверхностной обработки. Например, такое сочетание может включать нанесение покрытий химическим испарением или гальваническим способом и последующую обработку лазерным лучом или ионную имплантацию. В данном случае могут изменяться химический состав и структура покрытия, что придает поверхностному слою требуемые свойства. Один из примеров такого рода — комбинированные покрытия для скользящих электрических контактов, полученные последовательным нанесением никеля, палладия и золота на бронзовую подложку и обработкой этих слоев лучом лазера. Вследствие тепловой диффузии золото проникает из очень

тонкого поверхностного слоя в нижележащие слои, что улучшает эксплуатационные характеристики, как в отношении проводимости так и в отношении механических свойств подслоя.

Тенденция к применению комбинированных методов постоянно растет благодаря быстрому развитию технологий инженерии поверхностей на основе интенсивных исследований, финансируемых наиболее быстро развивающимися отраслями промышленности, такими как электроника, прецизионная техника и авиакосмическая промышленность. Несомненно, в скором будущем мы станем свидетелями появления новых комбинированных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхности.

### Список литературы

1. Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. — М.: Машиностроение, 1991.
2. Белый В. А., Довгяло В. А., Юркевич О. Р. Полимерные покрытия. — Минск: Наука и техника, 1976.
3. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / Под ред. В. А. Белого, К. Лудемы и Н. К. Мышкина. — М.: Машиностроение, 1993.
4. Bhushan B., Gupta B. Handbook of Tribology. — N. Y.: McGraw Hill, 1991.
5. Hutchings I. M. Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. — London—Melbourne—Auckland: Edward Arnold, 1992.

## Глава 12

### УЗЛЫ ТРЕНИЯ

#### 12.1. Подшипники скольжения

В состав практически любой механической системы входит устройство, предназначенное для передачи усилия между двумя поверхностями, движущимися друг относительно друга. Узел, называемый подшипником, обеспечивает движение в одном или двух направлениях, предотвращая его в остальных направлениях. Подшипники принято разделять на два типа по виду относительного движения: подшипники скольжения и подшипники качения.

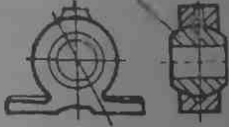

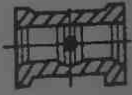

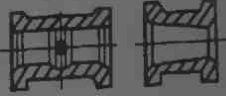




Подшипник скольжения — это опора, в которой движущиеся друг относительно друга поверхности находятся в скользящем контакте. Эти подшипники подразделяются по направлению передаваемой нагрузки. *Радиальный подшипник* воспринимает нагрузку, перпендикулярную оси вала, и удерживает ось вращающегося вала в фиксированном положении. *Упорный подшипник* несет осевую нагрузку и также допускает вращение вала. Существуют такие конструкции подшипников, которые передают как радиальную, так и осевую нагрузку (*радиально-упорные подшипники*).

**12.1.1. Конструкции подшипников скольжения.** Разработана широкая гамма конструкций подшипников скольжения. Все эти подшипники включают корпус и втулку, непосредственно контактирующую с валом (цапфой). Некоторые конструкции подшипников представлены в табл. 12.1.

Сплошной подшипник (табл. 12.1 (1)) состоит из корпуса и втулки. Втулка выполнена из антифрикционного материала и закреплена в корпусе посредством посадки с натягом или при помощи установочных винтов. Существуют различные конструкции таких подшипников. Корпус может быть выполнен как часть рамы машины, либо в виде вставки с фланцем (табл. 12.1 (2)). Установка и демонтаж сплошных подшипников в машине сопряжены с трудностями, поскольку вал можно вставить

только торцовой стороной. Зазор между втулкой и цапфой невозможно отрегулировать. Такие подшипники применяют для малоугреженных валов, вращающихся с низкими скоростями.

Т а б л и ц а 12.1. Некоторые конструкции подшипников скольжения

№ п/п	Наименование подшипника	Конструкция	
		Подшипник	Втулка
1	Неразъемный	Цилиндрическая    Сферическая 	Цилиндрическая    Сферическая 
2	Фланцевый		
3	Разъемный		
4	Наклонный		Цилиндрическая    Коническая 
5	Сегментный		
6	Самоустанавливающийся		
7	Упорный		

Разъемный подшипник (табл. 12.1 (3)) состоит из корпуса, составной втулки, крышки и крепежных болтов. Так как втулка и корпус разделены, такой подшипник удобнее собирать, он допускает регулировку зазора между втулкой и цапфой, который увеличивается вследствие износа. Для этой цели при сборке подшипника между наружной и внутренней вставками помещают тонкие регулировочные прокладки. Удалив эти прокладки при ремонте или осмотре, можно подтягивать болты, тем самым, уменьшая зазор. При повышенных нагрузках используют втулки с канавками, карманами для смазки, ориентированными по направлению вращения вала.

В наклонном подшипнике (табл. 12.1 (4)) разъем корпуса выполнен в плоскости, лежащей под углом к опорной плоскости. Такой подшипник применяют, когда реакция подшипника направлена под некоторым углом и перпендикулярна плоскости разъема.

Нормальная работа подшипника возможна, если нагрузка равномерно распределена по длине втулки. Однако если состояние между двумя подшипниками велико, прогиб вала или неточности сборки могут привести к перекосу цапф в подшипниках. Тогда на края втулок будет действовать повышенное давление, и это может вызвать заедание и разрушение втулок и цапф. Снизить влияние перекоса можно, уменьшив отношение длины втулки к ее диаметру или используя подшипник, который способен приспосабливаться к прогибу и перекосу вала. Примером таких подшипников является подшипник с качающимися подушками (табл. 12.1 (5)), в котором плавающие подушки занимают некоторое положение под углом к сопрягаемой поверхности и в соответствии с распределением гидродинамического давления. Также заслуживает внимания самоустанавливающийся подшипник со сферической посадочной поверхностью (табл. 12.1 (6)). При перекосе вала сферическая втулка может поворачиваться относительно корпуса так, что ее ось становится параллельной оси вала. В упорном подшипнике скольжения (табл. 12.1 (7)) торец вала поддерживается опорной плитой, закрепленной штифтом для предотвращения проворачивания. Для увеличения нагрузочной способности и надежности подшипника применяют самоустанавливающиеся подушки.

**12.1.2. Режимы трения подшипников скольжения.** При конструировании подшипников стремятся свести к минимуму потери на трение, так как это способствует снижению тепловыделения и износа, увеличению надежности и долговечности, а также экономии энергии. Для выполнения этого требования необходимо знать режим работы подшипника, выбрать подходящий материал для трущихся деталей, вид термообработки, шероховатость сопрягаемых поверхностей, смазку и т. д.

Различают следующие режимы трения. При трении без смазочного материала сопрягаемые поверхности контактируют своими неровностями (рис. 12.1, а).



Для режима граничного трения характерно наличие тонких адсорбированных пленок смазки (рис. 12.1, б). Толщина этих пленок сравнима с размерами молекул (сотые доли микрометра). Способность смазочного материала образовывать пленки определяется его адгезионной способностью.



Рис. 12.1 Виды трения в подшипниках скольжения

Гидродинамическая смазка (рис. 12.1, в) реализуется, когда скользящие поверхности разделены пленкой смазки, толщина которой превышает суммарную высоту неровностей трущихся поверхностей и размеры твердых частиц загрязнений в смазке. В отличие от граничных слоев, смазка ведет себя как жидкость, подчиняющаяся законам гидродинамики (см. гл. 7). Гидродинамическая смазка эффективна, так как износ рабочих поверхностей практически отсутствует, а коэффициент трения очень мал и составляет 0,01–0,001.

На практике подшипники скольжения часто работают в режиме, когда имеет место сухое трение и граничная или смешанная смазка (рис. 12.1). То есть, трение обусловлено непосредственным контактом неровностей на некоторой части рабочих поверхностей и присутствием граничных пленок на остальной части, в первом случае, и действием как гидродинамических, так и граничных слоев, во втором случае.

Режим гидродинамической смазки возникает, только если необходимая толщина пленки  $h_{\min}$  обеспечивается гидростатическим (непрерывной подачей смазки насосом) или гидродинамическим (в результате вовлечения смазки в клиновидный зазор движущейся поверхностью) способами (рис. 12.2).

Определенные преимущества имеют гидростатические подшипники, предназначенные для работы в режиме гидростатической смазки, подаваемой в зазор под внешним давлением. В этом случае режим жидкостной смазки реализуется при любой форме зазора и любой

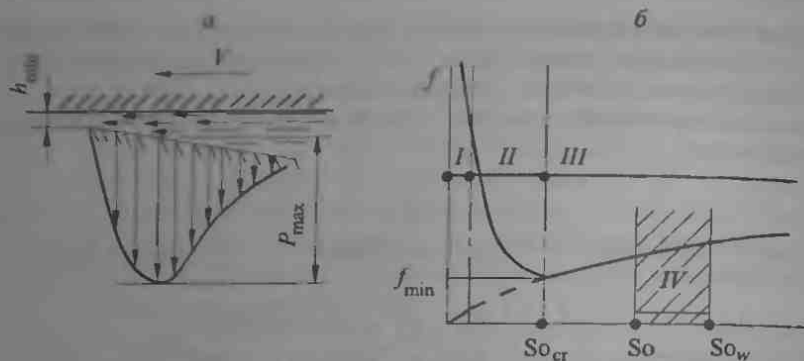


Рис 12.2. Влияние числа Зоммерфельда  $So$  на коэффициент трения (кривая Герси-Штрибека): а) распределение давления; б) коэффициент трения при различных условиях смазывания

скорости относительного скольжения, даже для неподвижных поверхностей. В связи с этим гидростатические подшипники могут применяться при высоких нагрузках и низких скоростях скольжения или для разгрузки тяжело нагруженных подшипников в моменты пуска и останова. Малое сопротивление скольжению и его равномерность при различных скоростях скольжения, характерные для гидростатических подшипников, позволяют добиться высокой точности позиционирования, что важно для прецизионных машин, приборов и т. п. К недостаткам таких подшипников можно отнести трудность поддержания необходимой «жесткости» смазочной пленки при изменении нагрузки и необходимость применения дополнительного устройства для непрерывной подачи смазки под высоким давлением. Такое устройство снижает надежность гидростатических подшипников, поскольку при прекращении подачи смазки они неизбежно прекращают работу.

Гидродинамические подшипники применяются более широко, хотя для них может потребоваться более сложная (клиновидная) и точная геометрия зазора и они не гарантируют поддержание жидкостного режима смазки при ускорении и замедлении с малыми относительными скоростями.

Изменение коэффициента трения и переход к условиям гидродинамической смазки графически описываются кривой Герси-Штрибека (рис 12.2), представляющей собой коэффициент трения  $f$  как функцию безразмерного числа Зоммерфельда  $So = \eta\omega / (2r\psi^2)$  (число Зоммерфельда, обратно пропорционально коэффициенту нагруженности подшипника). Здесь  $\eta$  — вязкость,  $\omega$  — угловая скорость цапфы,  $\psi$  — относительный зазор,  $r$  — нагрузка на единицу площади проекции ( $r = P/(dl)$ , где  $d$  и  $l$  — диаметр и длина цапфы;  $P$  — нагрузка). Краткий анализ этой кривой дан в гл. 2 (п. 2.3.2). Здесь же следует отметить следующее.

В зоне I с малым числом Зоммерфельда возможен непосредственный контакт трущихся тел, и коэффициент трения может достигать 0,2-0,3. В зоне II возрастает роль гидродинамического эффекта, осуществляется смешанная смазка, и коэффициент трения падает до значений 0,05-0,1. Зона III характеризуется минимальным коэффициентом трения,  $f \approx 0,01-0,001$ , поскольку подшипник работает в режиме гидродинамической смазки. При дальнейшем увеличении числа Зоммерфельда ( $S_o > S_{o_{cr}}$ ) коэффициент трения несколько возрастает, но режим гидродинамической смазки продолжает поддерживаться и даже становится более стабильным при изменениях нагрузки и скорости (зона IV).

Для подшипников, работающих в условиях сухого трения или граничной смазки, когда может возникать непосредственный контакт поверхностей, велик риск повреждения поверхностей. На практике часто встречаются следующие виды повреждений:

— абразивное изнашивание, вызванное наличием загрязнений в смазке и попаданием продуктов износа, песчинок и т. п. на рабочие поверхности;

— схватывание в точках, где разрушается смазочная пленка и возникает высокое локальное давление и температура. В свою очередь, повышение температуры приводит к снижению нагрузочной способности смазочной пленки, вызывает термические деформации и при малой величине зазора приводит к полной остановке вала или выплавлению втулки;

— пластическое деформирование и намазывание сильно деформированного материала тонким слоем на обе поверхности. Такое явление наблюдается в тяжело нагруженных низкоскоростных подшипниках, работающих в условиях сухого трения;

— усталостное изнашивание и отделение частиц износа при циклической и ударной нагрузке.

Все перечисленные виды повреждения связаны с разрушением жидкостных и граничных пленок и могут также возникать в гидродинамических подшипниках при пусках и остановках.

**12.1.3. Прогнозирование эксплуатационных свойств подшипников скольжения.** *Подшипники сухого трения.* Аналитический расчет подшипников скольжения весьма затруднителен, так как невозможно учесть все многообразие факторов, влияющих на их эксплуатационные характеристики. Применяют приближенный расчет, использующий следующие два критерия, основанные на многолетнем опыте эксплуатации подшипников.

Прочностной критерий предназначен для оценки нагрузочной способности подшипника. Критерий обычно применяют к втулке или антифрикционному покрытию на ней, так как цапфа обычно выполнена из более прочного материала. На практике в качестве меры прочности принимают удельную или погонную нагрузку  $P$ , а критерий прочности

записывается в виде

$$p = \frac{P}{ld} \leq [p], \quad (12.1)$$

где  $[p]$  — допустимое удельное давление, определяемое экспериментально для различных материалов. Наибольшее распространение в качестве критерия получил  $pv$  фактор (нагрузочно-скоростной параметр), который в некоторой степени определяет тепловыделение в подшипнике, его износ и опасность заедания. При вращении цапфы работа сил трения превращается в теплоту, которая отводится от трущихся поверхностей в окружающую среду. Интенсивность тепловыделения равна

$$q = f pv.$$

Если положить коэффициент трения постоянным, интенсивность тепловыделения будет определяться произведением  $pv$ . Нормальный режим трения реализуется при следующем условии:

$$pv \leq [pv], \quad (12.2)$$

где  $[pv]$  — допустимое значение нагрузочно-скоростного параметра, определяемое экспериментально. Обычно значения  $[p]$  и  $[pv]$  табулированы в справочниках.

Как следует из простой теории износа (см. п. 2.2.2), износ на единицу пути трения равен

$$I = K \frac{P}{H}.$$

Пусть путь трения  $S = vt$ ,  $A$  — площадь контакта. Тогда интенсивность линейного изнашивания равна  $I_h = IS/A = KPvt/(AH)$ , а интенсивность изнашивания за единицу времени является функцией  $pv$ :

$$I'_h = \frac{I_h}{t} = kpv.$$

где  $k = K/H$ . То есть, фактор  $pv$  можно использовать как критерий при выборе нагрузки для подшипников сухого трения. Это позволяет подобрать подшипниковые материалы, пригодные для надежной работы.

*Подшипники с жидкостной смазкой.* Ранее показано (см. п. 7.2.4), что существуют аналитические методы расчета гидродинамических подшипников скольжения для случаев, когда относительная длина подшипника  $l/d$  больше двух (теория длинного подшипника) или меньше одной четвертой (теория короткого подшипника). Часто это отношение изменяется от 0,25 до 2. Тогда должно быть найдено численное решение для опорного подшипника. Решения такого вида представляются в виде таблиц и графиков в специализированных справочниках и монографиях. Кроме того, разработаны приближенные методы. Ниже описывается одна из упрощенных методик.

Первоначально жидкостный подшипник проектируют по критериям  $p$  и  $p_v$ , подобно подшипнику сухого трения. Затем учитывают гидродинамическое поведение подшипника. Делают это следующим образом. Задают относительный зазор  $c/r$ . Для цапфы диаметром  $d \leq 100$  мм он выбирается равным 0,001–0,003. При этом зазор тем больше, чем больше скорость скольжения, меньше удельное давление, больше относительная длина подшипника и тверже материал подшипника.

Затем выбирают допустимую температуру смазочной пленки  $[T]$ , тип смазочного материала и определяют динамическую вязкость последнего. Как правило, допустимая температура составляет  $[T] \leq 60-75^\circ\text{C}$ . Динамическую вязкость при заданной температуре находят из справочных графиков, один из которых представлен на рис. 12.3.

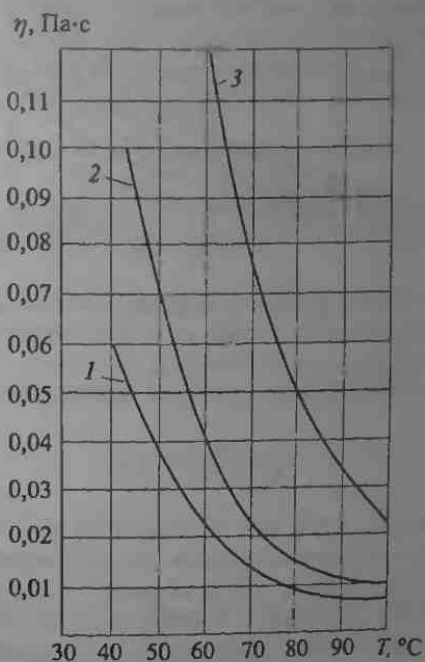


Рис. 12.3. Влияние температуры на динамическую вязкость некоторых масел: 1 — масло индустриальное, 2 — моторное масло, 3 — дизельное масло

Нагрузочная способность рассчитывается по формуле

$$S = \frac{P}{\eta \omega} \left( \frac{c}{r} \right)^2 \quad (12.3)$$

Используя графики на рис. 12.4, определяют эксцентриситет  $\varepsilon$ . Затем рассчитывают минимальную толщину пленки:

$$h_{\min} = (1 - \varepsilon) \left( \frac{c}{r} \right) r \quad (12.4)$$

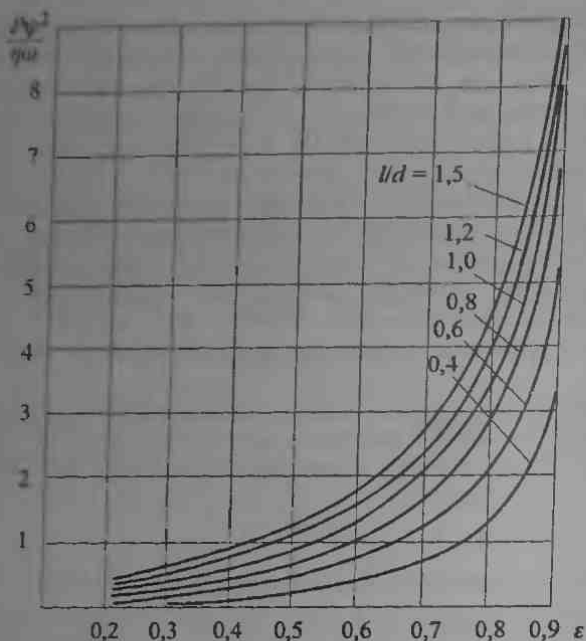


Рис. 12.4. Зависимость коэффициента нагруженности подшипника от относительного эксцентриситета для разных относительных длин цапфы

После этого выполняют проверку режима жидкостного трения по формуле

$$k = \frac{h_{\min}}{R_{zj} + R_{zb}} \geq [k], \quad (12.5)$$

где  $k$  — фактор надежности для жидкостного трения в подшипнике,  $[k]$  — его допустимое значение,  $R_{zj}$  и  $R_{zb}$  — шероховатости поверхностей цапфы и подшипника соответственно. При  $v > 0,5$  м/с рекомендуется, чтобы  $[k]$  составляло больше двух, в других случаях  $[k]$  может быть несколько ниже этого значения, так как в этом случае контакт неровностей не приводит к значительному нагреву и износу подшипника.

Расчет теплового режима выполняется с применением уравнения теплового баланса, т. е. количество теплоты  $Q$ , выделившееся за счет трения, приравнивается количеству теплоты, идущему в корпус и вал ( $Q_1$ ) и уносимому смазкой ( $Q_2$ ). Уравнение баланса записывается в виде

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Выделяющееся при трении тепло рассчитывается как

$$Q = fPv.$$

Количество теплоты, уносимое валом, как правило, мало, и под  $Q_1$  обычно понимают количество теплоты, рассеиваемое корпусом. Это количество теплоты определяют из уравнения

$$Q_1 = \alpha A(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи (ориентировочно, берется равным 9,3–16,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К) в отсутствие вынужденной конвекции);  $A$  — площадь наружной поверхности подшипника;  $T_{\text{out}}$  и  $T_{\text{in}}$  — температура масла на входе в зазор и на выходе из него.

Количество теплоты, уносимое маслом, рассчитывается как

$$Q_2 = c\rho m(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}),$$

где  $c$  — удельная теплоемкость масла (для минеральных масел  $c \approx 2000$  Дж/(кг·К));  $\rho$  — плотность масла ( $\rho \approx 900$  кг/м<sup>3</sup> для нефтяных масел);  $m$  — расход масла через подшипник в единицу времени.

Среднюю температуру масла в зоне контакта можно принять равной

$$T = T_{\text{in}} + 0,5(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}).$$

Она не должна превышать допустимую температуру  $[T]$ . Учитывая это условие и подставляя  $Q$ ,  $Q_1$  и  $Q_2$  в уравнение теплового баланса, получим

$$T = T_{\text{in}} + 0,5 \frac{fPv}{c\rho m + \alpha A} \leq [T]. \quad (12.6)$$

Коэффициент трения  $f$  определяют из графиков, представленных на рис. 12.5, а расход масла — с помощью рис. 12.6.

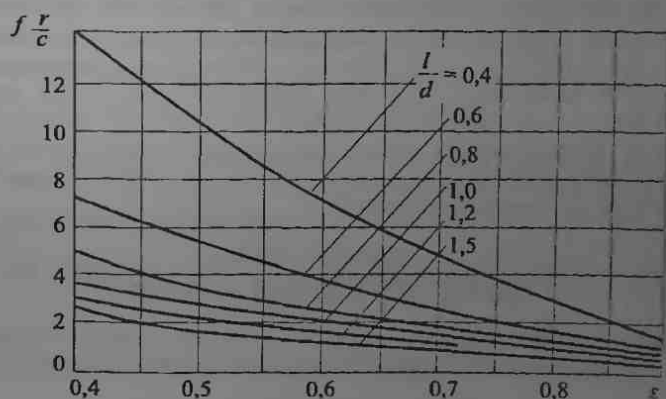


Рис. 12.5. Зависимость коэффициента трения от относительного эксцентриситета для разных относительных длин цапфы

Если одно из вышеуказанных условий не выполняется, необходимо изменить геометрические параметры подшипника либо выбрать другое

масло с большей динамической вязкостью, изменить шероховатость поверхностей или использовать комбинацию этих методов.

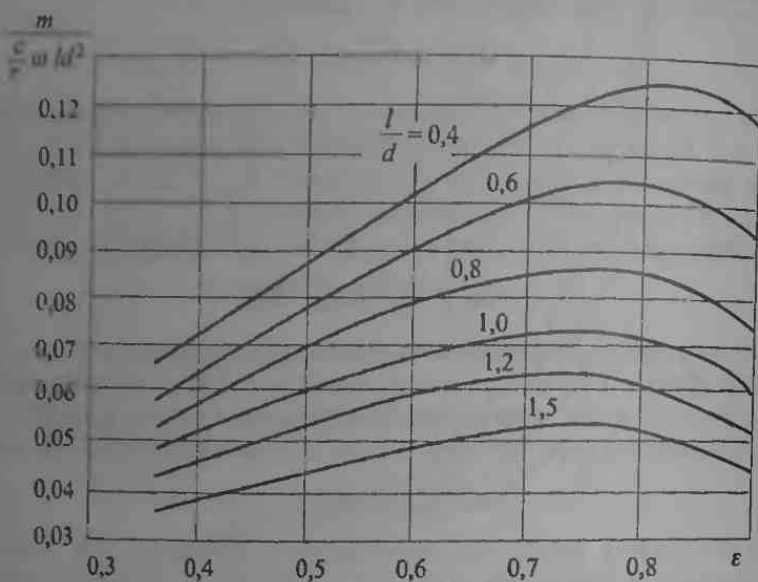


Рис. 12.6. Влияние эксцентриситета  $\epsilon$  на безразмерный расход смазки  $m/(\omega d^2 (c/r))$

**Пример.** Пусть необходимо рассчитать гидродинамический подшипник скольжения. Условия задачи следующие: диаметр цапфы  $d = 60$  мм, нагрузка на подшипник  $P = 12$  кН, угловая скорость вала  $n = 900$  об/мин. Предполагается, что втулка подшипника выполнена из бронзы ( $[p] = 3$  МПа,  $[pv] = 10$  МПа·м/с). Шероховатости сопрягаемых поверхностей равны:  $R_{z\gamma} = 1,6$  мкм для вала и  $R_{zb} = 3,2$  мкм для подшипника.

**Расчет.** Относительная длина подшипника принимается равной  $l/d = 1,2$ , тогда длина цапфы равна  $l = 1,2d = 1,2 \cdot 60 = 72$  мм. Удельная нагрузка на подшипник равна

$$p = \frac{P}{ld} = \frac{12 \cdot 10^3}{72 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3}} = 2,8 \text{ МПа,}$$

что вполне реально, так как  $p < [p]$ .

Скорость скольжения (окружная скорость цапфы) равна

$$u = \frac{\pi n d}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 900 \cdot 60}{60 \cdot 1000} = 3 \text{ м/с.}$$

Произведение  $pv$  равно

$$pv = 2,8 \cdot 3 = 8,4 \text{ МПа} \cdot \text{м/с} < [pv].$$



Относительный зазор принят равным 0,001. Выбираем индустриальное масло с температурой в рабочей зоне  $T = 68^\circ\text{C}$  (удельная теплоемкость  $c = 2000$  Дж/(кг·К), плотность  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>). В соответствии с рис. 12.3, динамическая вязкость масла равна  $\eta = 0,016$  Па·с. Используя уравнение (12.3), рассчитываем нагрузочную способность:

$$S = \frac{\rho}{\eta\omega} \left(\frac{c}{r}\right)^2 = \frac{2,8 \cdot 10^6}{0,016 \cdot 100} \cdot 0,001^2 = 1,75,$$

где  $\omega = \pi n/30 = 960\pi/30 = 100$  с<sup>-1</sup>.

Эксцентриситет определяем из графиков на рис. 12.4,  $\varepsilon = 0,64$ . По уравнению (12.4) рассчитываем минимальную толщину пленки

$$h_{\min} = (1 - \varepsilon) \left(\frac{c}{r}\right) \frac{d}{2} = (1 - 0,64) \cdot 0,001 \cdot 30 = 0,0108 \text{ мм} = 10,8 \text{ мкм}.$$

Проверим теперь режим жидкостной смазки с помощью условия (12.5)

$$k = \frac{h_{\min}}{R_{zj} + R_{zb}} = \frac{10,8}{1,6 + 3,2} = 2,26 > [k] = 2.$$

Следовательно, выполняется условие жидкостного режима смазки.

Пусть температура масла на входе в зазор равна  $T_{\text{in}} = 40^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 16,3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), площадь наружной поверхности подшипника  $A = 0,035$  м<sup>2</sup>. Учитывая, что  $\varepsilon = 0,64$  и  $l/d = 1,2$ , и используя соответствующую кривую на рис. 12.5, находим, что  $f/(c/r) = 1,8$  и, следовательно, коэффициент трения  $f = 1,8(c/r) = 1,8 \cdot 0,001 = 0,0018$ . Рис. 12.6 позволяет определить расход масла, протекающего через подшипник за 1 с:  $m/(\omega l d^2 \frac{c}{r}) = 0,05$  и, следовательно,

$$m = 0,05 \omega l d^2 \frac{c}{r} = 0,05 \cdot 100 \cdot 0,072 \cdot 0,06^2 \cdot 0,001 = \\ = 13 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с} = 1,3 \text{ см}^3/\text{с}.$$

Тогда условие (12.6) дает

$$T = 40 + 0,5 \frac{12000 \cdot 0,0018 \cdot 3}{2000 \cdot 900 \cdot 13 \cdot 10^{-7} + 16,3 \cdot 0,035} = 51^\circ\text{C} < [T] = 68^\circ\text{C}.$$

Таким образом, условие теплового режима полностью удовлетворяется, даже при отсутствии дополнительного воздушного охлаждения.

## 12.2. Подшипники качения

Подшипники качения — это опоры вращающихся или качающихся деталей, использующие элементы качения (шарики или ролики) и работающие в условиях трения качения. Такие подшипники обладают

рядом преимуществ по сравнению с подшипником скольжения: малый момент трения, а том числе и при пуске; малый расход смазки; компактность и низкая стоимость; простота эксплуатации. Эти особенности открывают большие возможности для применения подшипников качения, которые можно отнести к наиболее распространенным деталям машин.

Подшипники качения имеют и некоторые недостатки, а именно, малую долговечность при повышенных нагрузках и угловых скоростях, ограниченное сопротивление ударным и динамическим нагрузкам; большой разброс по долговечности подшипников в одной партии; высокую стоимость при мелкосерийном производстве отдельных типов подшипников.

**12.2.1. Конструкции подшипников качения.** В большинстве случаев подшипник качения (рис. 12.7) состоит из двух колец (внутреннего и наружного), тел качения (шариков или роликов) и обоймы, также называемой сепаратором. Иногда одно или оба кольца могут

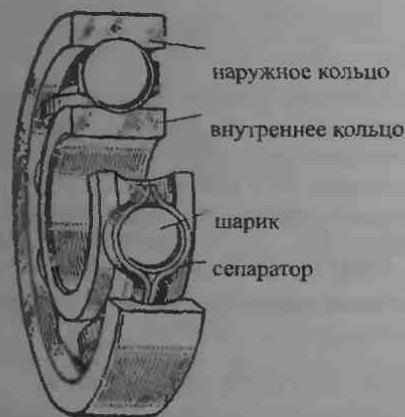


Рис. 12.7. Общий вид подшипника качения

отсутствовать, при этом габаритные размеры подшипника уменьшаются. В некоторых случаях отсутствует обойма. Обойма отделяет тела качения друг от друга, а тела качения, помещенные в ячейки обоймы, разделяют наружное и внутреннее кольца. Тела качения катятся по рабочей дорожке, называемой дорожкой качения (внутренняя и наружная дорожки).

Подшипники качения классифицируются по направлению приложенной нагрузки, форме тел качения, числу рядов тел качения в одной паре колец и некоторым конструктивным особенностям.

Если нагрузка на подшипник  $P$  перпендикулярна оси вращения колец, она называется радиальной, а подшипник, несущий такую на-

грузку, называется радиальным подшипником. Ось вращения тела качения параллельна оси вращения колец (рис. 12.8, а). Если нагрузка приложена под углом к оси вращения колец, ее можно разложить на

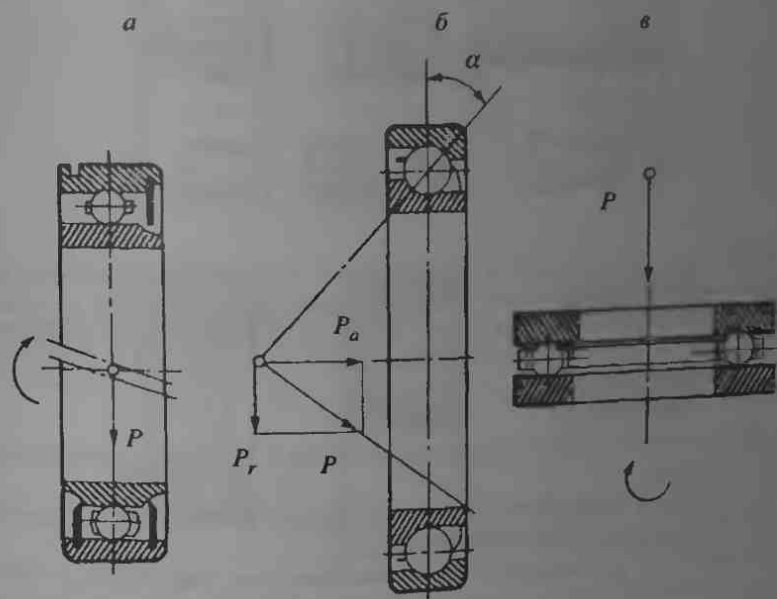


Рис. 12.8. Схема приложения нагрузки в подшипниках качения

радиальную  $P_r$  и осевую  $P_a$  составляющие. Для поддержания такой нагрузки применяют подшипники, у которых оси вращения подшипника и колец пересекаются под углом контакта  $\alpha$  (рис. 12.8, б). Нагрузка, направленная вдоль оси вращения колец, называется осевой, а несущий такую нагрузку подшипник — упорным. Ось вращения тел качения перпендикулярна оси вращения колец (рис. 12.8, в). Такая классификация подшипников является достаточно условной, так как, например, некоторые типы радиальных подшипников пригодны для работы в условиях осевой нагрузки. В этом случае угол контакта превышает  $0^\circ$  при приложении осевой нагрузки.

Подшипники качения также различаются по геометрической форме тел качения, шарики или ролики, поэтому соответственно выделяются шариковые и роликовые подшипники. Последние разделяются на несколько групп в соответствии с формой тел качения (рис. 12.9).

Подшипники качения конструируются в вариантах с одним, двумя или более рядами тел качения внутри одной пары колец и называются одно-, двух- и многорядными подшипниками соответственно.

По конструктивному и эксплуатационному признаку подшипники подразделяются на самоустанавливающиеся и самоустанавливающиеся.

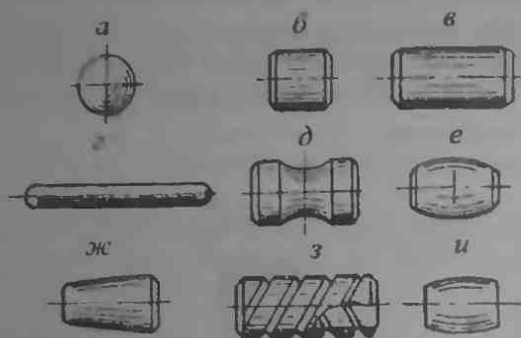


Рис. 12.9. Типы тел качения в подшипниках: а) шарик; б, в) короткий и длинный ролики; г) игольчатый ролик; д) цилиндрический ролик с шейкой; е) бочкообразный ролик; ж) конический ролик; з) витой ролик; и) сферический ролик

еся. Последние способны приспосабливаться к нагрузке, компенсируя перекосы валов.

Конструкции подшипников качения весьма разнообразны. Некоторые из них кратко рассмотрены ниже.

*Однорядный радиальный шарикоподшипник* (рис. 12.10, а) несет преимущественно радиальную нагрузку, однако он также может нести небольшую осевую нагрузку, которая не может превышать 70% от запаса радиальной нагрузки, равной разнице между допустимой и действующей радиальными нагрузками. Такие подшипники нашли широкое применение в машиностроении благодаря их компактности, достаточной нагрузочной способности и долговечности, способности нести осевую нагрузку и относительно невысокой стоимости.

*Двухрядный самоустанавливающийся шарикоподшипник* (рис. 12.10, б) отличается тем, что шарики разделены и наружная дорожка качения выполнена как часть сферической поверхности. Этот подшипник предназначен, главным образом, для радиальной нагрузки при значительном перекосе вала (до 2–3°), однако он также может нести осевую нагрузку, равную 20% неиспользованной радиальной нагрузки. Эти подшипники применяют в узлах с перекосами валов или с несоосными посадочными гнездами для подшипников.

*Однорядный и двойной упорные шарикоподшипники* (рис. 12.10, в, г) несут только осевую нагрузку. Однорядный подшипник используют для однонаправленной нагрузки, а двухрядный применяют в случаях, когда нагрузка действует в обоих направлениях. Применение таких подшипников ограничено диапазоном умеренных скоростей. Увеличение скорости скольжения оказывает негативный эффект на эксплуатационные характеристики подшипника вследствие действия центробежных сил.

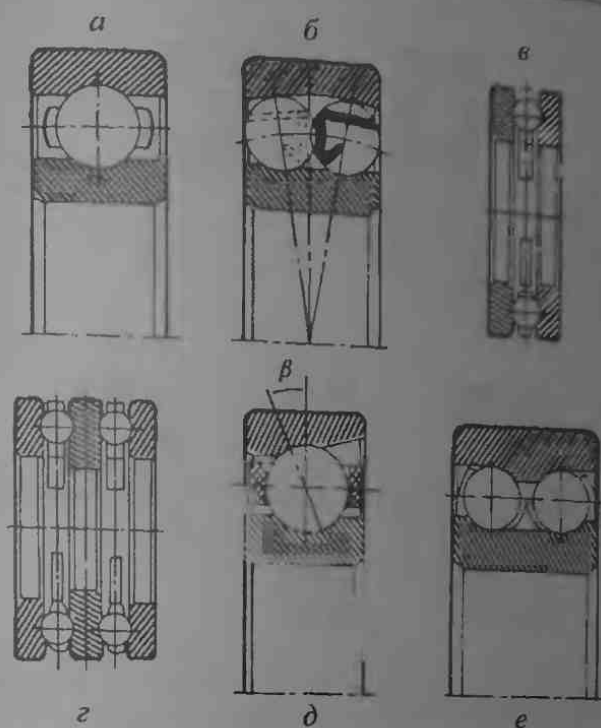


Рис. 12.10. Типичные конструкции шариковых подшипников качения: а) однорядный радиальный; б) радиальный сферический двухрядный; в) упорный однорядный; г) упорный двойной; д) радиально-упорный однорядный; е) радиально-упорный двухрядный

Однорядный радиально-упорный шарикоподшипник (рис. 12.10, д) сконструирован так, что при нулевой нагрузке линия, проходящая через пятна контакта шариков с внутренней и наружной дорожками качения, образует с нормалью к оси подшипника некоторый угол  $\beta$ , называемый углом контакта. Его значение изменяется в пределах 15–40°. Благодаря такой конструкции подшипник может одновременно нести радиальную и осевую нагрузки. Такие подшипники иногда применяют в случае только осевой нагрузки (например, при высокой угловой скорости вала). Иногда такие подшипники монтируют парно (спаренная установка тыльными и фронтальными торцами). Первая из них дает высокую жесткость вала, для второй характерна лучшая способность к самоустановке. Установленные друг за другом такие шарикоподшипники обеспечивают повышенную нагрузочную способность.

Двухрядный упорный шарикоподшипник (рис. 12.10, е) может нести значительную осевую, радиальную и комбинированную нагрузки при высоких требованиях к жесткости подшипника.

Рассмотрим теперь роликовые подшипники (рис. 12.11)

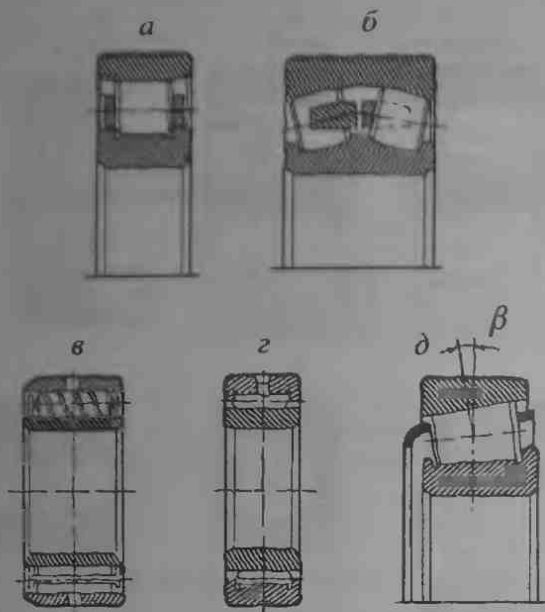


Рис. 12.11 Типичные конструкции роликовых подшипников качения: а) радиальный с короткими цилиндрическими роликами; б) радиальный цилиндрический двухрядный; в) с витыми роликами; з) игольчатый; д) конический однорядный

*Цилиндрические роликовые подшипники* (рис. 12.11, а) сконструированы для очень высоких радиальных нагрузок и работы при высоких скоростях скольжения. Их нагрузочная способность примерно в 1,7 раза выше, чем у однорядного шарикоподшипника. Цилиндрические роликовые подшипники чувствительны к перекосам вала.

*Двухрядный подшипник со сферическими роликами* (12.11, б) имеет два ряда разделенных бочкообразных роликов. Наружная дорожка качения имеет сферическую форму, что придает такому подшипнику возможность самоустанавливаться. Эти подшипники применяют в тех же случаях, что и двухрядный самоустанавливающийся шарикоподшипник, однако роликовый подшипник способен нести большую радиальную нагрузку. Кроме того, подшипник со сферическими роликами может нести осевую нагрузку до 20% от резерва радиальной нагрузки.

*Подшипник с витыми роликами* (рис. 12.11, в) предназначен для применения в условиях ударных нагрузок, которые он гасит за счет упругой податливости роликов. Преимущество такого подшипника заключается в том, что его ролики, благодаря своей конструкции, предохраняют подшипник от повреждения при ударах и неточной установке. Ролики изготавливаются навивкой из прямоугольной ленты.

В *радиальном игольчатом подшипнике* (рис. 12.11, з) ролики имеют форму вытянутых цилиндров малого диаметра с большим отно-

шением длины к диаметру. Подшипник способен нести умеренную радиальную нагрузку при средних скоростях скольжения.

*Однорядный подшипник с коническими роликами* (рис. 12.11, б) может нести одновременно значительные радиальную и осевую нагрузки. Его ролики имеют форму усеченного конуса обычно с фасками на торцах. Поверхности наружной и внутренней дорожек качения имеют коническую форму. Наружное кольцо называют крышкой, а внутреннее — конусом. Подшипники с коническими роликами чувствительны к перекосу. Так как между торцами роликов и направляющим фланцем реализуется скользящий контакт, может выделяться значительное количество тепла. Поэтому такой подшипник может работать при высокой скорости только со смазочной системой, обеспечивающей отвод тепла.

### 12.2.2. Долговечность и надежность подшипников качения.

Ниже рассматривается метод выбора подшипника качения по нагрузочным характеристикам и долговечности. Как правило, при выборе подшипника пользуются каталогами производителей или справочниками, а также стандартными общепринятыми методами расчета, например рекомендациями Международной организации по стандартам (ISO).

Под *долговечностью подшипника* понимают число оборотов (или время работы в часах), совершаемых одним из двух колец по отношению к другому при заданной нагрузке до появления первых признаков усталости материала одного из колец или тел качения. Под *надежностью* срока службы группы одинаковых подшипников, работавших в одинаковых условиях, понимают долю подшипников, достигших или превысивших заданный срок службы.

Долговечность  $t$  подшипника (в часах) является случайной величиной, описываемой плотностью вероятности  $f(t)$ . Тогда, как следует из теории вероятностей, вероятность безотказной работы равна

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - F(t),$$

или

$$F(t) = 1 - P(t),$$

где  $F(t)$  — вероятность разрушения, которая обычно адекватно аппроксимируется распределением Вейбулла. На рис. 12.12 представлена усталостная долговечность как функция вероятности срока службы. Отличительной особенностью этой зависимости, которая подтверждается многочисленными испытаниями различных подшипников, является то, что 90% из испытанной партии ( $P(t) = 0,9$ ) выдерживают работу при заданной нагрузке. Эту величину принимают за *базовую номинальную долговечность*. Следовательно, номинальная долговечность подшипника или группы одинаковых подшипников — это их долговечность с надежностью 90%. Эту долговечность обычно обозначают

$L_{10}$  или  $B_{10}$ , где индекс 10 — это разность между 100% и данной (в рассматриваемом случае 90%) надежностью.

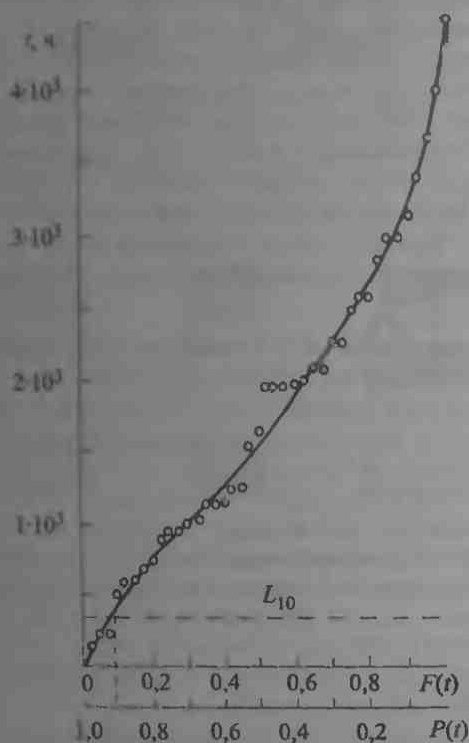


Рис. 12.12. Результаты усталостных испытаний подшипников качения

При уменьшении нагрузки долговечность подшипника возрастает и, наоборот, при увеличении нагрузки снижается. Экспериментально установлена следующая зависимость между нагрузкой  $P$  и ресурсом  $L$  — суммарным числом миллионов оборотов до появления признаков усталости:

$$L = (C/P)^p \cdot 10^6, \quad (12.7)$$

где  $p = 3$  для шарикоподшипников и  $p = 10/3$  для цилиндрических и конических роликоподшипников,  $P$  — нагрузка (в Н),  $C$  — базовая динамическая грузоподъемность, определяемая как нагрузка, которую может выдержать подшипник в течение  $10^6$  оборотов.

Базовая динамическая грузоподъемность рассчитывается по формулам, рекомендованным ISO:

$$C = \begin{cases} b_m f_c (\cos \alpha)^{0.7} z^{2/3} D_W^{1.8}, & D_W \leq 25,4 \text{ мм}, \\ 3,647 b_m (\cos \alpha)^{0.7} z^{2/3} D_W^{1.4}, & D_W > 25,4 \text{ мм} \end{cases} \quad (12.8a)$$



для радиального и радиально-упорного шарикоподшипников;

$$C_r = b_m f_c (i L_{We} \cos \alpha)^{7/9} z^{3/4} D_{We}^{29/27} \quad (12.8a)$$

для радиального и радиально-упорного роликоподшипников;

$$C_a = \begin{cases} b_m f_c z^{2/3} D_W^{1,8}, & D_W \leq 25,4 \text{ мм} \\ 3,647 b_m z^{2/3} D_W^{1,8}, & D_W > 25,4 \text{ мм} \end{cases} \quad (12.8a)$$

для упорного однорядного одинарного и двойного шарикоподшипника с углом контакта  $\alpha = 90^\circ$ ;

$$C_a = \begin{cases} b_m f_c z^{2/3} D_W^{1,8} (\cos \alpha)^{0,7} z^{2/3} D_W^{1,8} \operatorname{tg} \alpha, & D_W \leq 25,4 \text{ мм} \\ 3,647 b_m f_c (\cos \alpha)^{0,7} z^{2/3} D_W^{1,8} \operatorname{tg} \alpha, & D_W > 25,4 \text{ мм} \end{cases} \quad (12.8r)$$

для упорного шарикоподшипника с углом контакта  $\alpha \neq 90^\circ$ ;

$$C_a = \begin{cases} b_m f_c L_{We}^{7/9} z^{3/4} D_{We}^{29/27}, & \alpha = 90^\circ \\ b_m f_c (L_{We} \cos \alpha)^{7/9} z^{3/4} D_{We}^{29/27}, & \alpha \neq 90^\circ \end{cases} \quad (12.8a)$$

для упорного однорядного одинарного и двойного роликоподшипников.

В этих уравнениях базовые динамические грузоподъемности  $C_r$  и  $C_a$  измеряются в ньютонах (Н);  $D_W$  и  $D_{We}$  — диаметры шариков и роликов (в мм);  $L_{We}$  — эффективная длина ролика (в мм);  $z$  — число шариков или роликов в одном ряду;  $i$  — число рядов шариков;  $\alpha$  — номинальный угол контакта (в градусах). Множители  $b_m$  и  $f_c$  устанавливаются ISO. Первый из них используют для обычных, широко применяемых материалов и стандартного качества обработки. Его величины зависят от типа и конструкции подшипника (табл. 12.2). Второй множитель изменяется в зависимости от состава материала, геометрии деталей подшипника и точности их изготовления. Эти величины рассчитываются по формулам или выбираются из таблиц, представленных в справочниках.

Для увеличения фактического срока службы подшипников улучшают их качество, совершенствуя материалы и смазки, а также методы изготовления.

Т а б л и ц а 12.2. Коэффициент  $b_m$  для подшипников качения

Тип подшипника	$b_m$
<i>Шарикоподшипники:</i>	
Радиальный/радиально-упорный/упорный	1,3
Радиальный с канавкой для комплектования шариками	1,1
<i>Роликоподшипники:</i>	
Сферический/упорно-радиальный сферический	1,15
Цилиндрический/конический/упорный конический	1,1
Упорный цилиндрический/упорный игольчатый	1,0

Входящая в уравнение (12.7) нагрузка является эквивалентной динамической нагрузкой ( $P$ ): она определяется как постоянная нагрузка  $P$ , приложенная к подшипнику, которая может привести к той же усталостной долговечности, что и фактически приложенная нагрузка (изменяющая во времени свою величину и направление). Уравнение для расчета  $P$  выведено для случая совместно действующих радиальной  $P_r$  и осевой  $P_a$  нагрузок:

$$P = X P_r + Y P_a.$$

Множители  $X$  и  $Y$  для различных типов подшипников представлены в таблицах (см., например, справочник ASM).

**12.2.3. Трение в подшипниках качения.** В подшипниках качения реализуются два вида трения, а именно, трение качения и трение скольжения. Механизмы этих видов трения были рассмотрены выше в гл. 4 и 5. Напомним, что трение качения обычно связывают с упругим гистерезисом, адгезией, пластической деформацией, и микропроскальзыванием (проскальзывание по Рейнольдсу и по Хизкоуту). Трение качения значительно меньше трения скольжения, поэтому основные потери энергии определяются трением скольжения в контакте тело качения — дорожка качения вследствие деформации контактирующих поверхностей.

Все элементы подшипника контактируют с корпусом в большей или меньшей степени. Трение скольжения и его значительный разброс могут быть обусловлены допустимыми погрешностями изготовления дорожек качения, изменениями размеров тел качения, возрастающим радиальным зазором между телами качения и ячейками сепаратора, загрязнением смазки. В роликоподшипниках трение скольжения между торцами роликов и направляющими внутренним и (или) наружным кольцевыми фланцами зависит от скорости вращения роликов относительно их собственной оси и относительных скоростей вращения роликов вокруг кольца. Контактные уплотнения могут увеличивать потери на трение в несколько раз вследствие скольжения между кромками уплотнения и сопрягаемыми поверхностями. Гидродинамическая пленка также влияет на трение. В контакте содержится небольшое количество смазки, и выталкиваемая смазка замедляет относительное движение тел, что приводит к росту внутреннего трения. С другой стороны, между телами качения и внутренней дорожкой качения может возникать макроскопическое проскальзывание (также называемое пробуксовкой), если подшипник переполнен смазкой.

Таким образом, общие потери на трение включают разные компоненты, сложным образом зависящие от условий работы и конструктивных особенностей подшипника. С определенностью можно лишь утверждать, что трение, главным образом, определяется нагрузкой, типом подшипника, смазки и скоростью вращения.

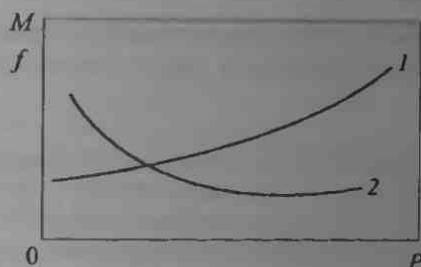


Рис. 12.13. Общий вид зависимости момента трения  $M$  (1) и приведенного коэффициента трения  $f$  (2) от нагрузки  $P$ , действующей на подшипник качения

Момент трения является мерой потерь на трение в подшипнике качения, а усредненное сопротивление качению описывается приведенным коэффициентом трения. На рис. 12.13 показано, как момент трения и приведенный коэффициент трения изменяются с нагрузкой. Из рисунка ясно, что момент трения является возрастающей функцией нагрузки, а приведенный коэффициент трения имеет наибольшее значение при малой нагрузке, а при ее возрастании снижается, стремясь к некоторому устойчивому значению. Такая зависимость объясняется тем, что толщина пленки и вязкость смазки снижаются с ростом нагрузки, а, следовательно, и температуры. Кроме того, повышенная нагрузка может вызвать разрушение смазочной пленки с последующим увеличением момента трения. Начинается изнашивание рабочих поверхностей. При трогании подшипника необходимо преодолеть сухое трение между контактирующими поверхностями. В результате начальный момент трения примерно на 60% выше, чем при работе подшипника. Для приближенной оценки момента трения на основе экспериментальных данных производители дают средние значения при-

Т а б л и ц а 12.3. Приведенный коэффициент трения

Тип подшипника	$f_{гр}$
<i>Шарикоподшипники:</i>	
Радиальный однорядный	0,0015–0,0030
Сферический двухрядный радиальный	0,0015–0,0020
Радиально-упорный	0,0020–0,0030
Упорный	0,0030
<i>Роликоподшипники:</i>	
Радиальный цилиндрический	0,0012–0,0020
Радиальный игольчатый	0,0020–0,0040
Бессепараторный радиальный игольчатый	0,0030–0,0080
Сферический двухрядный радиальный	0,0020–0,0040
Упорный конический	0,0020–0,0080
Упорный сферический	0,0030
Упорный цилиндрический	0,0050

веденного коэффициента трения  $f_{\text{ср}}$ , которые представлены в табл. 12.3. Для комбинированного нагружения следует принимать более высокие значения  $f_{\text{ср}}$ .

**12.2.4. Износ подшипников качения.** Разрушение подшипников качения определяется в значительной степени усталостью материала, возникающей в результате циклического механического нагружения при качении одного тела по другому. Усталостное разрушение подшипниковых материалов хорошо изучено. Этот процесс можно рассматривать как накопление дислокаций в результате повторного воздействия напряжений на микроструктуру поверхностного слоя. Слияние дислокаций приводит к зарождению микротрещин в области максимального герцевского напряжения или неоднородности микроструктуры (например, на границах зерен или границах включения — матрица). Последующее нагружение способствует росту подповерхностных микротрещин. Эти трещины сливаются и образуют трещину критического размера. Такой процесс может привести к катастрофическому разрушению детали или образованию частиц износа при достижении трещиной поверхности тела. Изучение усталости при качении является основой для оценки долговечности подшипников (см. уравнение (12.7)). Достижения сталелитейной промышленности привели к появлению подшипниковых сталей столь высокого качества, что теперь долговечность подшипников определяется в большей степени износом при качении, чем контактной усталостью. Изнашивание при качении может быть обусловлено дефектами финишной обработки поверхностей деталей, загрязнением абразивными частицами или продуктами износа, веточесстами монтажа, неправильной эксплуатацией и недостаточной смазкой. Это приводит к изменениям напряженного состояния и деформациям в подшипниках, увеличению доли динамической составляющей нагрузки и интенсифицирует усталость и термические напряжения.

Смазка играет важную роль в процессах изнашивания. Толщина смазочной пленки должна превышать суммарную шероховатость тел качения и дорожек качения. В противном случае реализуется режим смешанной смазки. В областях, где происходит микропроскальзывание, максимальные касательные напряжения выходят на поверхность. При возрастании коэффициента трения возрастает тепловыделение за счет трения и интенсифицируется изнашивание. Рабочие поверхности колес и тел качения испытывают абразивный и адгезионный износ. Абразивное изнашивание вызывается загрязнением смазки продуктами износа, частицами пыли или других посторонних веществ. Адгезионное изнашивание обусловлено процессом образования межатомных связей, протекающим на сопряженных поверхностях между находящимися в контакте точками. Осуществляется контакт чистых участков металла и поверхностный слой испытывают настолько сильную пластическую деформацию, что происходит локальная сварка. Этот процесс, называемый схватыванием, приводит к вырыву материала с одной поверхно-

сти на другую и повышенному трению. Более жесткая форма стачивания называется наволакиванием и может сопровождаться изданием подшипника и его разрушением. В этом случае необходимо добавить смазку или улучшить условия смазывания.

Однако следует помнить, что обильная подача смазки не исключает износа подшипника. При этом большую роль играют загрязнения, например продукты износа, коррозии, атмосферная пыль, продукты разложения базового масла и (или) присадок и т. п. Твердые частицы способствуют изнашиванию свободным абразивом, в результате чего в контакте тела качения и дорожки возникают местные перегрузки. Это вызывает пластическую деформацию и повреждение поверхности. Если загрязнения включают значительное количество крупных частиц, протекает интенсивное абразивное изнашивание, зазоры расширяются, первоначальная геометрия контакта искажается. Попадание загрязнений в смазку возможно вследствие плохой работы уплотнений, при замене смазки и (или) в процессе изнашивания.

Если защитная пленка отсутствует или смазка содержит реакционно-способные вещества, например продукты разложения базового масла и присадок, конденсированную воду и т. п., может происходить коррозия. Наиболее интенсивно она протекает во впадинах шероховатых поверхностей. Ее разрушающее действие проникает от поверхности в глубь материала, вызывая отделение продуктов коррозии, образование новых шероховатых поверхностей с более развитым рельефом. Более интенсивно коррозия протекает при изменении режима работы подшипника, так как в период остановки охлаждение поверхностей способствует конденсации жидкостей из атмосферы. Циклический характер этого процесса приводит к увеличению содержания воды в смазке. В этих ситуациях эффективными являются выбор соответствующих уплотнений, своевременная замена смазки.

Если неподвижный подшипник нагружен и испытывает колебания, может происходить фреттинг-износ в виде фреттинг-усталости и фреттинг-коррозии. Фреттинг-коррозия проявляется в виде отпечатков тел качения на дорожках качения. Эти отпечатки выглядят как следы постоянного пластического вдавливания. По этой причине данное явление получило название *ложного бринеллирования*, хотя ему можно дать и более точное название, например фреттинг дорожек качения. Сопротивление ложному бринеллированию значительно возрастает, если дорожки качения фосфатированы или хромированы.

### 12.3. Зубчатые передачи

Зубчатая передача представляет собой узел машины, состоящий из двух или более шестерен и передающий движение и энергию посредством последовательного зацепления зубьев. В данном случае шестерня — деталь машины с зубьями. Из двух контактирующих шестерен меньшая называется шестерней, а большая — килесом.

Зубчатые передачи используются как в прецизионной технике, где нагрузка на зубья может составлять тысячные доли ньютона, а размер шестерен измеряется долями миллиметра, так и в мощных и тяжелых машинах (например, в поворотных механизмах кранов и печей), где передаваемая мощность достигает десятков мегаватт, а размеры шестерен — десяти и более метров.

Широкое применение зубчатых передач обусловлено их преимуществами перед другими видами передаточных механизмов. Зубчатые пары могут работать в широком диапазоне условий с окружными скоростями до 150 м/с и более. Они могут передавать движение между валами, произвольно ориентированными в пространстве с постоянным передаточным числом. Зубчатые пары отличаются высоким коэффициентом полезного действия (до 99%), надежностью и долговечностью, а также относительно малыми размерами и простотой эксплуатации.

К недостаткам зубчатых передач можно отнести: сложность изготовления прецизионных зубчатых пар; вибрации и шум при неправильном изготовлении и монтаже; передаточное число не может принимать произвольные значения, так как число зубьев всегда целое; отсутствует самозащита от перегрузок, в отличие от фрикционных передач. Усовершенствование конструкций зубчатых передач, методов их расчета и изготовления позволяют преодолеть эти трудности и улучшить эксплуатационные характеристики передач.

**12.3.1. Типы зубчатых передач.** Конструкции зубчатых передач разнообразны (рис. 12.14). Их можно классифицировать по различным признакам, включая расположение валов, форму шестерен, форму и расположение зубьев на поверхности шестерни.

Зубчатые пары работают на параллельных (рис. 12.14, а–г), пересекающихся (рис. 12.14, д–ж) или непараллельных и непересекающихся (рис. 12.14, з–и, л) валах. По форме шестерен зубчатые пары делятся на цилиндрические (рис. 12.14, а–г, з, л), конические (рис. 12.14, д–ж, и), и прочие. Шестерни могут иметь прямые (рис. 12.14, а, б, д), винтовые (рис. 12.14, я, е, з, и), шевронные (рис. 12.14, г) или криволинейные (рис. 12.14, ж) зубья. Цилиндрические зубчатые пары можно подразделить на прямозубые передачи (рис. 12.14, а, б), винтовые (рис. 12.14, я), шевронные (рис. 12.14, г), спиральные со скрещенными осями (рис. 12.14, з), состоящие из двух цилиндрических спиральных шестерен со скрещенными осями, и червячные (рис. 12.14, л), включающие цилиндрический червяк и сопряженную шестерню. Конические зубчатые пары бывают различных типов: с прямозубыми коническими шестернями (рис. 12.14, д), косозубыми коническими шестернями (рис. 12.14, е), спиральными коническими шестернями (рис. 12.14, ж) и типoidalное зацепление (рис. 12.14, и), отличающееся от конического зацепления тем, что оно работает в непересекающихся осях. По взаимному расположению зубчатых колес зубчатые пары разделяются на пары с внешним зацеплением (рис. 12.14, а) и с внутренним зацепле-

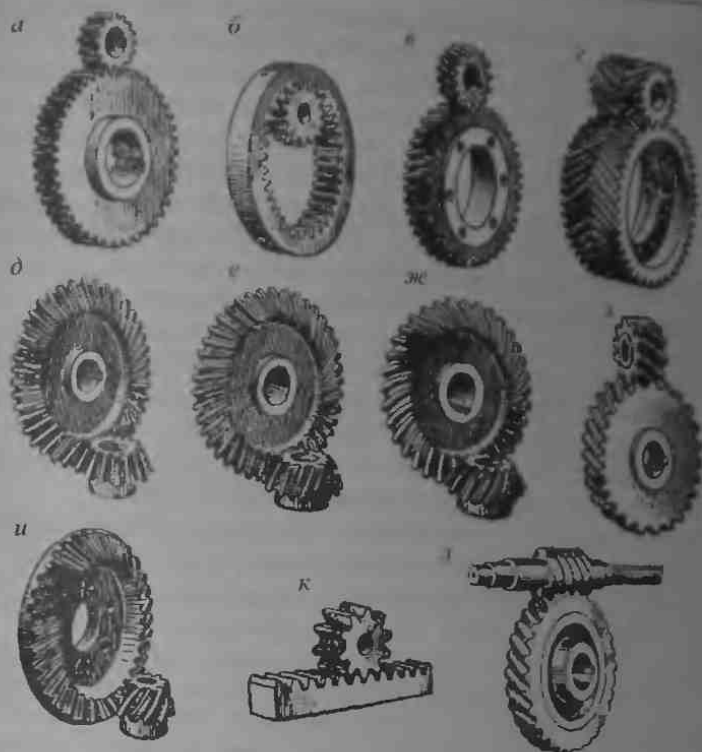


Рис. 12.14. Типы зубчатых передач: а) прямозубая с внешним зацеплением; б) прямозубая с внутренним зацеплением; в) косозубая цилиндрическая; г) шевронная; д) коническая прямозубая; е) коническая косозубая; ж) коническая с криволинейными зубьями; з) винтовая; и) гипоидная; к) реечная; л) червячная

нием (рис. 12.14, б). В последнем случае зубчатые колеса вращаются в одном направлении.

Если диаметр и число зубьев шестерни, находящейся в зацеплении, неограниченно увеличивать, то шестерня превращается в рейку. Зацепление, включающее рейку и шестерню (рис. 12.14, к), называется реечной передачей и служит для преобразования вращательного движения шестерни в возвратно-поступательное движение рейки, и наоборот.

Зубчатые пары конструируются не только как одиночные, но и как многоступенчатые в зависимости от требуемого передаточного числа. В наше время растет применение сложных конструкций зубчатых пар, включая планетарные (эпициклические) зубчатые пары с движущимися в пространстве геометрическими осями и волновые приводы, включающие гибкий венец вместо одной из шестерен.

Наиболее часто зубчатые пары помещают в эл.итом корпусе, что обеспечивает высокую точность сборки. Только крупные низкоскоростные

ростные передачи, например применяемые в цементных дробилках, приводах антенн и т. п., конструируют в открытом варианте.

Цилиндрические зубчатые пары получили наибольшее распространение благодаря простоте их изготовления и сборки. Конические зубчатые пары применяют там, где необходима передача движения между пересекающимися валами. Обычно цилиндрические и прямозубые конические передачи работают при низких (до 3 м/с) и умеренных (3–15 м/с) окружных скоростях. Цилиндрические прямозубые передачи допускают возможность перемещения шестерен в осевом направлении (коробки передач). Цилиндрические спиральные, косозубые конические и спиральные конические передачи надежно работают при умеренных и высоких (больше 15 м/с) скоростях. Шевронные передачи обычно применяют при высоких нагрузках и тяжелых условиях работы, а также при средних и высоких скоростях. В них отсутствует осевая нагрузка на валы и подшипники, тогда как во всех типах конических зубчатых пар действуют значительные осевые нагрузки.

Зубчатые передачи с внутренним зацеплением более компактны, чем передачи с внешним зацеплением, однако их изготовление и сборка более сложны. Спиральные передачи со скрещенными осями и гипоидные передачи работают более плавно по сравнению с другими типами цилиндрических и конических передачи, однако их коэффициент полезного действия ниже, а зубья подвержены более интенсивному износу вследствие повышенного проскальзывания. Основным недостатком спиральных передачи со скрещенными осями является ограничение нагрузки, обусловленное точечным контактом зубьев. Для гипоидных передач характерна повышенная нагрузочная способность (линейный контакт зубьев), они используются более широко, чем спиральные передачи со скрещенными осями.

Наиболее часто профиль зуба описывается эвольвентой, а соответствующая зубчатая пара называется эвольвентной. Основные параметры зуба стандартизованы, при этом используется исходный контур, определяющий угол давления и пропорции зуба.

**12.3.2. Трение, износ и усталость зубчатых колес.** Долговечность зубчатых передач существенно зависит от износа и усталости зубьев шестерен, которые, в свою очередь, тесно связаны с трением сопряженных поверхностей зубьев. Трение в зубчатых передачах отличается некоторыми особенностями, обусловленными геометрией и кинематикой зубьев колес. Рассмотрим цикл зацепления пары зубьев прямозубой цилиндрической передачи (рис. 12.15). Здесь  $M$  — точка контакта зубьев в некоторый момент времени. Она лежит на линии зацепления  $AB$  — общей касательной к обоим основным окружностям, из которых получают профили эвольвент. Линия  $AB$  совпадает с нормалью к обоим зубьям в точке контакта  $M$ . Окружные скорости шестерни и колеса в точках, совпадающих с  $M$ , перпендикулярны радиальным линиям  $O_1M$  и  $O_2M$  соответственно. Согласно основному



правилу зацепления, их проекции на линию зацепления должны быть одинаковыми, а проекции  $v_1$  и  $v_2$  на общую касательную в зубьях в точке контакта  $M$  не равны между собой.

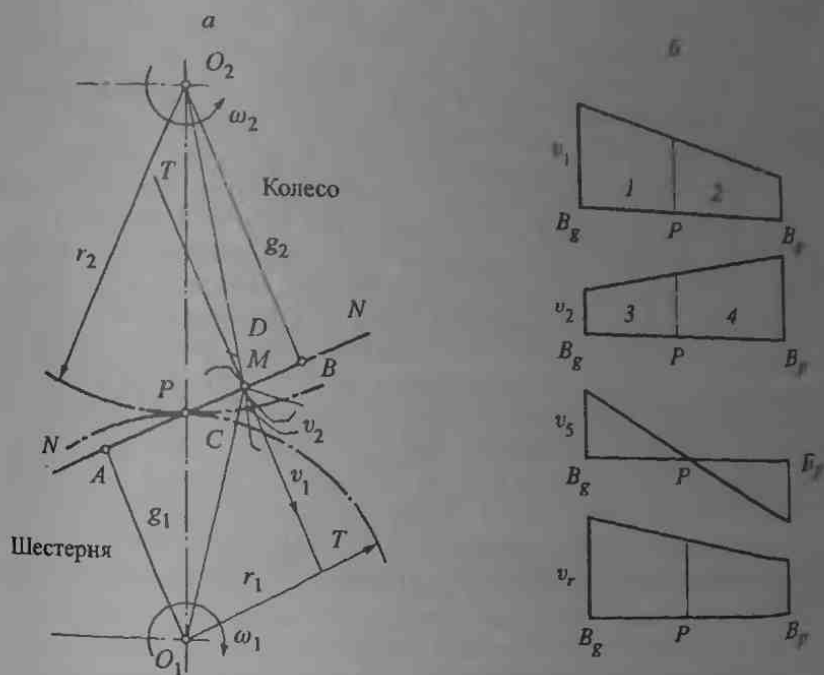


Рис. 12.15. Схема зацепления зубьев эвольвентной передачи (а) и изменения скоростей скольжения и качения вдоль линии зацепления (б): 1, 2 — головка и ножка зуба шестерни; 3, 4 — ножка и головка зуба колеса

Это означает, что во время цикла зацепления реализуется движение, включающее качение и скольжение, и что в этом процессе скорость скольжения  $v_s$  равна разности скоростей  $v_1$  и  $v_2$ , которые линейно изменяются при движении точки контакта вдоль пути  $AB$  с постоянной скоростью (рис. 12.15, б).

Тогда скорость  $v_s$ , как разность скоростей  $v_1$  и  $v_2$ , также изменяется линейно. Анализ показывает, что скорость скольжения равна угловой скорости качения, умноженной на расстояние между точкой контакта скорости качения, и полюсом зацепления  $P$ . Следовательно, скорость скольжения равна нулю, когда зуб шестерни находится в контакте в полюсе и максимален на концах пути, т.е. чистое качение сопряженных профилей зубьев происходит только в полюсе. Очень важно отметить, что в этой точке скорость скольжения меняет знак, т.е. направление скольжения изменяется при переходе от доплюсовой части активной линии зацепления к заплуюсовой. Другими словами, касательная скорость в точке контакта на головке зуба всегда выше касательной скорости

в сопряженной точке на ножке зуба. Этот факт, наряду с трением покоя в полюсе, очень важен для объяснения разрушения сопряженных поверхностей зубьев.

При работе зубчатых пар их зубья периодически вступают в контакт, что может привести к повреждению их поверхностей и разрушению. Реализуются различные виды разрушения в зависимости от материалов шестерен, конструктивных особенностей и условий работы пары. Классификация Американского общества производителей зубчатых передач (AGMA) насчитывает 20 видов разрушения шестерен.

Герцевская усталость (питтинг) — наиболее часто встречающийся и опасный вид разрушения зубьев в закрытых коробках передач с масляной смазкой. Изначально трещины усталости зарождаются вблизи линии зацепления, где трение, а следовательно, поверхностные напряжения имеют наибольшее значение вследствие минимальной скорости скольжения (см. рис. 12.15). Эти трещины могут возникать как на поверхности, так и в подповерхностной области, что в значительной степени зависит от толщины смазочной пленки. При малой толщине может преобладать поверхностное растрескивание. Трение происходит в условиях смешанной смазки, и осуществляется контакт металла по металлу. При обильной смазке обычно происходит подповерхностное растрескивание. Трещины зарождаются на подповерхностных включениях, пустотах и других дефектах, служащих концентраторами напряжений.

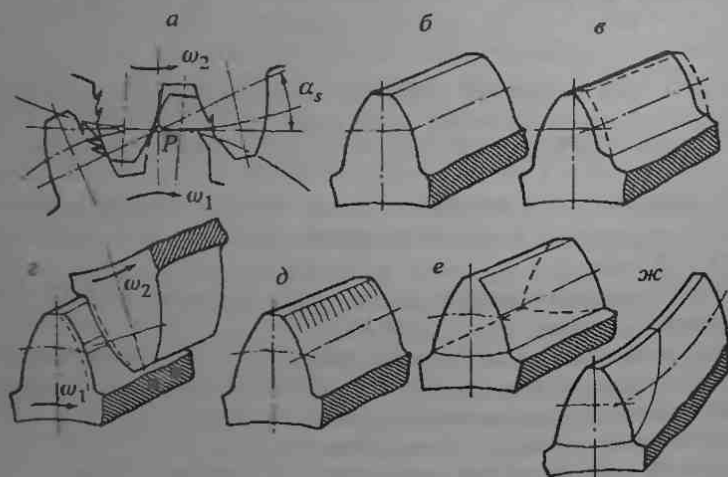


Рис. 12.16. Характерные виды разрушения зубьев

Трещины возникают и растут преимущественно на обгоняемой поверхности трения (для эвольвентных шестерен это ножка зуба) (рис. 12.16, а, б). Зародившаяся трещина распространяется в направ-

лении, приблизительно совпадающем с направлением силы трения. Поверхностная трещина проникает в объем материала, разветвляется и встречается с другими трещинами, что может приводить к образованию частиц износа. Часто подповерхностная трещина движется в направлении, приблизительно параллельном поверхности зуба, а затем разветвляется, поворачивает или встречает другую трещину (в том числе и поверхностную). В конечном итоге трещина достигает поверхности и происходит отделение частицы износа. Обычно для образования продуктов износа требуется большое число циклов.

После отделения частицы материала с поверхности на ней остается след (ямка — англ. pit), а связанный с его образованием усталостный процесс называют *питтингом*. Углубление большого размера, образующееся в результате слияния нескольких маленьких углублений, часто называют *выкрашиванием*, которое можно рассматривать как более жесткую форму питтинга.

Как отмечено выше, питтинг возникает в непосредственной близости от линии зацепления, а затем распространяется на всю поверхность ножки зуба. В области головки зуба питтинг встречается редко. То есть, выносливость контакта на поверхности головки оказывается выше, чем на поверхности ножки.

Размеры повреждений при питтинге колеблются от десятков микрометров до нескольких миллиметров. В первом случае очень маленькие углубления невозможно обнаружить невооруженным глазом. Однако этот процесс протекает подобно классическому питтингу и поэтому этот процесс протекать подобно классическому питтингу и поэтому получил название микропиттинг. Микропиттинг не представляет большой опасности для зубьев шестерен и с ним можно бороться в процессе приработки, когда микроуглубления удаляются вследствие умеренного «полирующего» износа. Однако в особых случаях микропиттинг может переходить в обычный питтинг и следует принимать меры, предотвращающие разрушение.

Существуют различные способы повышения сопротивления зубьев шестерен питтингу. Так, практика показывает, что закаленная и гладкая поверхность зуба лучше противостоит питтингу. Чем выше твердость поверхности и меньше ее шероховатость, тем большую нагрузку могут нести зубья шестерни без проявления питтинга. Увеличение радиусов кривизны профиля зуба в точке контакта и правильный выбор смазки также способствуют предотвращению питтинга. Переная мера достигается применением скорректированных передач с увеличенным числом пар зубьев в зацеплении. Выбор смазки подразумевает использование высоковязких масел без загрязнений.

Другой причиной разрушения шестерен является *изнашивание*. Среди различных видов изнашивания, абразивное играет наиболее важную роль в снижении долговечности зубчатых передач (рис. 12.16, в); в открытых зубчатых передачах абразивное изнашивание протекает гораздо интенсивнее, чем в закрытых. В зубчатых передачах могут проявляться оба вида абразивного изнашивания.

изнашивание закрепленными частицами и изнашивание свободным абразивом. Первый вид изнашивания вызван неровностями на твердой поверхности или твердыми частицами износа, внедренными в более мягкую поверхность, что приводит к царапанию и образованию канавок на сопряженной с зубом поверхности. Этот тип абразивного изнашивания представляет угрозу для шестерен при их перегрузках, особенно при частых пусках и остановах, когда происходит разрушение смазочной пленки и осуществляется контакт металла по металлу. Изнашивание свободным абразивом обычно связано с загрязнением смазки инородными частицами или продуктами износа шестерен. Интенсивное абразивное изнашивание рабочих поверхностей приводит к изменению геометрических размеров и формы зубьев и к росту динамических и ударных нагрузок и шума. При значительном уменьшении толщины зуба вследствие абразивного износа и снижении его прочности может произойти разрушение зуба. В таких случаях ситтинг поверхности зуба не наблюдается, так как абразивное изнашивание выглаживает очаги питтинга. Механизмы питтинга и абразивного изнашивания могут действовать совместно в зубчатых парах, выполненных из некоторых пластмасс (например, шестерни из слоистых материалов на основе ткани и бумаги с фенольными смолами в качестве связующих).

Снижение абразивного износа достигается, в первую очередь, сведением к минимуму образования частиц износа и инородных частиц в смазке. Первая задача решается применением поверхностно-упрочненных зубьев шестерен, гладких поверхностей зубьев и высоковязких смазок, а вторая — установкой маслонепроницаемых уплотнений и масляных фильтров. Кроме того, следует уменьшать проскальзывание и контактные напряжения.

Здесь следует отметить, что в зубчатых передачах могут встречаться, за малым исключением, все виды изнашивания, такие как коррозионное изнашивание, фреттинг-коррозия, кавитационное изнашивание, адгезионное изнашивание и т. п. Однако эти виды изнашивания играют второстепенную роль в работе зубчатых передач, хотя бывают и исключения. Так, адгезионный износ не представляет опасности для зубчатой передачи. Однако, если в процессе работы оксидные пленки на поверхностях зубьев шестерен разрушаются и обнажаются ювелирные участки поверхностей, возможно проявление сильной адгезии, что приводит к интенсивному износу и даже заеданию, который мы рассмотрим ниже. В тяжело нагруженных низкоскоростных зубчатых передачах, в которых реализуется режим граничной смазки, может протекать изнашивание при скольжении со значительной пластической деформацией, если твердость материалов шестерен относительно мала. Материалы испытывают деформации в направлении силы трения, на поверхностях зубьев ведущей шестерни образуются впадины, а на поверхностях зубьев ведомой шестерни — выступы. Оба типа повреждений находятся вблизи линии зацепления (рис. 12.16, з).

Как отмечено выше, заедание представляет собой тяжелую форму адгезионного изнашивания (рис. 12.16, а). Этот вид изнашивания начинается с умеренного адгезионного изнашивания и определяется взаимодействием металлов на пятнах фактического контакта, свободных от смазочных, адсорбированных и оксидных пленок, образующихся при реакциях металлов со смазкой и окружающей средой. Заедание может развиваться при работе зубьев шестерен в условиях граничной смазки. Высокое контактное давление и большая скорость скольжения способствуют возникновению очень больших термических напряжений, приводящих к утоньшению смазочной пленки и потере смазочной способности. Этот процесс сопровождается значительной контактной деформацией. Часть нагрузки передается через масляную пленку, в которой возникает высокое давление, а оставшуюся нагрузку несут неровности поверхностей. Если пленка не способна нести определенную долю нагрузки, защитные граничные слои разрушаются и контакт металл — металл становится настолько плотным, что образуются адгезионные связи (локальное сваривание). В более мягком металле происходит подповерхностный сдвиг с образованием частиц износа, которые могут размазываться по поверхности. Начальные стадии заедания вызывают незначительные повреждения поверхностей, которые становятся очень гладкими, подобно полированным поверхностям. Зубчатая передача претерпевает некоторый износ без опасности разрушения. Однако, если разрушающие факторы продолжают действовать, адгезия в итоге приводит к сильному износу. Этот процесс сопровождается разрушением участков материалов, переносом металла с более мягкой поверхности на более твердую, образованием кратеров, гребешков, глубоких царапин в направлении скольжения, наплавленных кромок. Это заключительные стадии заедания, которые могут привести к полному выходу из строя зубчатой пары.

Заедание — это комплексное явление, определяемое не только химическими и физическими процессами на границе раздела сопрягаемых зубьев, но и другими многочисленными факторами, например контактным давлением, скоростями качения и скольжения, физическими и механическими свойствами контактирующих материалов, геометрией и шероховатостью поверхностей зубьев, температурой, смазкой и составом окружающей среды.

Механизм этого процесса еще недостаточно хорошо изучен, однако есть все основания полагать, что интенсивный фрикционный нагрев играет чрезвычайно важную роль в задире. Это предположение вытекает из пионерской работы Блока (1937), который предположил, что существует некоторая критическая температура контакта  $T_{кр}$ , являющаяся характеристикой каждой комбинации материалов и смазки, при которой масло теряет смазочную способность и возникает заедание. Принимая во внимание, что температура контакта является суммой объемной температуры шестерни  $T_{об}$  и температуры вспышки  $T_{всп}$ ,

можно записать условие отсутствия заедания:

$$T_{об} + T_{исп} \leq T_{кр}$$

Объемная температура — это установившаяся температура зубчатой пары, определяемая экспериментально или расчетным путем. Температура вспышки является локальным и мгновенным повышением температуры, возникающим в зоне контакта вследствие трения. Ее рассчитывают по формуле Блока:

$$T_{исп} = 0,83 \frac{f P_L (v_1 + v_2)}{(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 v_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 v_2}) \sqrt{b}}$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $P_L$  — погонная нагрузка, Н/м;  $b$  — полуширина герцевской полоски контакта, м;  $\lambda_j$  — теплопроводность, Дж/(м · с · К);  $\rho_j$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c_j$  — удельная теплоемкость на единицу массы, Дж/(кг · К);  $v_j$  — скорость качения, м/с ( $j = 1$  и  $2$  для шестерни и колеса соответственно).

Таким образом, заедание определяется интенсивностью фрикционного нагрева, которая, в свою очередь, зависит от мощности трения, пропорциональной коэффициенту трения, нормальной нагрузке и скорости скольжения. Эксперименты показывают, что увеличение коэффициента трения (с увеличением средней поверхностной температуры) приводит к снижению нагрузки заедания (при неизменных скоростях качения и скольжения). При постоянной нагрузке заедание начинается при более низкой скорости скольжения, если коэффициент трения возрастает. То есть, увеличение коэффициента трения оказывает неблагоприятное влияние на сопротивление заеданию.

Повышение скорости скольжения вызывает рост фрикционного тепловыделения даже при одновременном снижении коэффициента трения. Вязкость масла и толщина пленки снижаются, обнажившиеся металлические поверхности вступают в контакт без смазки, в результате чего происходит их локальное сваривание.

Аналогичным образом влияет и нагрузка. Практически всегда с ростом нагрузки возрастает опасность заедания. При более высоких нагрузках заедание возникает при меньших скоростях скольжения и температурах.

Скорость вхождения в контакт оказывает заметное влияние на нагрузку заедания, поскольку, согласно гидродинамической теории смазки, эта скорость способствует увеличению толщины смазочной пленки и снижению температуры контакта. Следовательно, при более высокой скорости входа в зацепление заедание возникает при большей скорости скольжения, или большей нагрузке или температуре, при прочих равных условиях.

Смазка также оказывает значительное влияние на возникновение заедания. Чем выше вязкость смазки, тем меньше коэффициент трения

скольжения и толще смазочная пленка. В результате frictionное тепловыделение снижается, что уменьшает опасность заедания. В этом отношении могут быть очень полезны противозадирные присадки, например такие, как сера, фосфор и соединения бора. Эти присадки вступают в химические реакции с поверхностями металлов при повышенной температуре и высоком контактом давлении, образуя твердые пленки на поверхностях зубьев шестерен. Пленки предохраняют металлы от непосредственного контакта и таким образом снижают опасность заедания.

Кроме того, следует заметить, что смазка может служить охлаждающей средой, отводящей тепло от зубьев шестерен. Эта функция смазки обеспечивает более низкие объемные температуры.

## 12.4. Электрические контакты

**12.4.1. Классификация электрических контактов.** Все многообразие электрических контактов классифицируют по кинематическому и конструктивно-функциональному признакам. Эта классификация показана на рис. 12.17. Эксплуатационные характеристики подвижных



Рис. 12.17. Классификация электрических контактов

контактов определяются различными аспектами трения. Однако даже для многих неподвижных контактов, в частности зажимных, чрезвычайно важно обеспечить максимальную площадь механического контакта, исключая образование в процессе работы непроводящих, например оксидных, пленок.

В разъемных контактах трение и износ играют более важную роль, поскольку при конструировании необходимо учитывать силу размыкания контакта, определяемую силой трения, и ресурс контакта, зависящий от износостойкости. Учитывая, что разъемные электрические контакты широко применяются в радиоприемных устройствах и их

производство потребляет значительное количество цветных и благородных металлов и сплавов, оценка их триботехнических характеристик представляется актуальной задачей. Наиболее сложной проблемой при конструировании разъемных контактов является гарантия совместности требований минимального износа и минимального стабильного значения контактного электрического сопротивления. Так как контактное давление оказывает наиболее сильное влияние на обе эти характеристики, необходимо определить оптимальную величину контактного давления.

Соприкосновения со скользящими электрическими контактами (СК) относятся к наиболее широко используемым в машинах. Достаточно сказать, что большая часть всей электрической энергии в процессе ее генерирования и потребления, по крайней мере, один раз проходит через СК. Несмотря на большое значение СК в технике, остаются нерешенными ряд проблем обеспечения надежности и эффективности их работы. Интенсивность разрушения СК остается довольно высокой по сравнению с другими типами контактов (табл. 12.4).

Т а б л и ц а 12.4. Интенсивность отказов разных видов контактов

Вид	Интенсивность отказов, $10^5 \text{ ч}^{-1}$
Паяные соединения	0,004
Зажимные соединения	0,005
Штепсельные разъемы	0,175
Реле разные	0,04–0,70
Переключатели	0,05–0,50
Релезаги	1,13
Соединители разные	0,4–2,0
Контакты	0,25
Прерыватели	0,5
Электродвигатели и генераторы с кольцами	0,3
Электродвигатели и генераторы с коллектором	До 2,9

В большинстве электрических контактов основные проблемы носят триботехнический характер, а именно: снижение интенсивности изнашивания и увеличение ресурса; увеличение фактической площади контакта, электро- и теплопроводности; предотвращение окисления и загрязнения поверхностей; снижение коэффициента трения.

Роль электрических контактов в современной технике существенно возросла в связи с тенденцией миниатюризации устройств управления и контроля механизмами и машинами, заменой механических устройств электронными, появлением огромного количества портативных устройств (переносные и карманные компьютеры, мобильные теле-



фоны и т. д.). При этом номинальные площади электрического контакта сократились, приблизившись к микрометровому и нанометровому диапазонам размеров, а количество контактов в единице объема прибора увеличилось на порядки. Требования к надежности микроконтактов резко возросли, а необходимость снижения переходного сопротивления и, следовательно, тепловыделения в контактах стала очень актуальной. При этом в микроконтактах начинают сказываться квантовые эффекты и появляется дополнительное сопротивление контакта из-за баллистического рассеяния электронов в нанометровом масштабе. Все это повысило актуальность исследований в области повышения фактической площади контакта при снижении номинальной нагрузки, коэффициента трения и интенсивности изнашивания в электрических контактах.

Существуют три основные направления решения трибологических проблем в электрических контактах: изменение геометрии контакта и топографии поверхностей; разработка самосмазывающихся электропроводящих композитов и разработка эффективных смазок для электрических контактов.

**12.4.2. Конструктивные аспекты.** Рассмотрим, например, очень важную конструктивную проблему образования площади фактического контакта (ФПК) и расчета ее проводимости. В 30-е гг. Холм предложил формулы для ее расчета, в которых сопротивление контакта определялось числом единичных пятен контакта и их размером. Однако практика показывает, что за исключением нескольких простых случаев они дают только качественную оценку проводимости. Следует отметить, что вклад составляющей, зависящей от взаимного расположения пятен и групп пятен в ФПК, в полное контактное сопротивление может быть определяющим. Ни один из существующих методов расчета ФПК не позволяет учесть полный набор этих данных. Перспективным путем решения этой проблемы может быть использование модели случайного поля для расчета ФПК и проводимости контакта (см. гл. 3). Было показано, что эта проводимость, особенно при относительно высоких номинальных контактных нагрузках, сильно зависит от взаимовлияния пятен контакта.

Используя данные о соотношении контактной проводимости и топографии, можно дать рекомендации по конструированию контактов. Например, один из выводов, основанных на вышеупомянутых исследованиях, говорит об эффективности использования регулярного макрорельефа контактирующих поверхностей для равномерного распределения пятен контакта по всей площади контакта.

**12.4.3. Материалы.** Для повышения надежности работы скользящих контактов и увеличения их ресурса используют различные методы. Общей особенностью этих методов является тенденция к применению для контактных поверхностей материалов с тонкими переходными слоями, не влияющими на прохождение тока через контакт, однако значительно снижающими вероятность задира, сварки и

интенсивного механического изнашивания. К наиболее известным и хорошо разработанным методам относится применение композиционных материалов, содержащих твердые электропроводящие смазки. Этот метод, первоначально примененный для разработки углеродно-графитовых контактных материалов для щеток электрических машин, также широко используется в настоящее время при разработке различных типов скользящих и разрывных контактов.

Недавно внимание исследователей привлекли электропроводные металл-графитовые композиты с высоким содержанием металла, который вводится в материал пропиткой его пор расплавом или спеканием металлизированных частиц графита. Содержание металла в композитах составляет до 50% по массе и более. Есть сведения о положительных результатах испытаний спеченных материалов, пропитанных легкоплавкими сплавами, в сильноточных токосъемах транспортных средств. Эксплуатационные характеристики композитов такого типа исследованы при различных специальных режимах, особенно в условиях высокоскоростного трения (скорость скольжения до 100 м/с, плотность постоянного тока 150 А/см<sup>2</sup>, нагрузка 0,5 МПа).

Разработаны также рекомендации по применению твердых проводящих смазок в слаботочных СК. Отмечается, что следует изменить механизм окисления в слаботочных СК таким образом, чтобы ограничить толщину формирующихся граничных слоев пределами туннельной проводимости. Наиболее эффективными в этом плане являются самосмазывающиеся (металлокерамические) материалы, в которых толщина смазочной пленки может регулироваться изменением концентрации, типа смазки и другими факторами.

**12.4.4. Смазки для электрических контактов.** Использование электропроводных твердых смазок или композитов не является единственным путем повышения эффективности работы различного типа контактов. В последние годы внимание специалистов, проектирующих контакты самых различных типов — от сильноточных шарнирных токосъемов до слаботочных электронных СК — все больше и больше привлекают смазки. Положительный эффект применения смазок особенно заметен для низкоскоростных металлических контактных пар с относительно невысокими плотностями тока. В этом случае удачный выбор смазочного материала позволяет повысить износостойкость и снизить коэффициент трения при одновременной стабилизации и снижении контактного сопротивления. Эксперименты, выполненные на микротрибометре с использованием золотой иглы, сканирующей несмазанные и смазанные поверхности металлов, подтверждают это заключение.

Были предприняты попытки применения смазок в сильноточных СК. В частности, положительные результаты были достигнуты при применении наполненных пластичных смазок в СК ножевого типа для железнодорожных устройств автоматического управления и низкоскоростных трамвайных контактов кранового оборудования.

Следует заметить, что проблема разработки смазок для СЖ с относительно высокими скоростями еще далека от решения, так как увеличение скорости скольжения, как правило, приводит к заметному возрастанию интенсивности изнашивания, эрозионных повреждений поверхностей трения и изменению состава смазки.

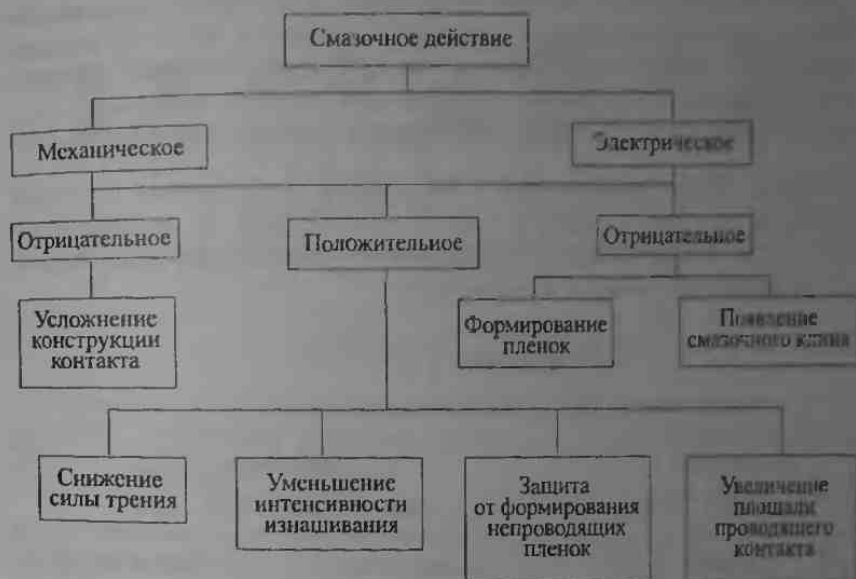


Рис. 12.18. Факторы смазочного действия в электрических контактах.

Факторы смазочного действия в электрических контактах можно разделить на группы в соответствии с их положительным или отрицательным влиянием (рис. 12.18). Наряду с положительными факторами, приводящими к снижению механических и электрических потерь и повышению ресурса и надежности работы контакта, возможно также действие отрицательных факторов — необходимость в некоторых случаях усложнения конструкции и предотвращение необратимых изменений состава смазки, а также предотвращение гидродинамического режима трения, приводящих к искрению и электрической эрозии контакта. Воздействие многих факторов в широком диапазоне условий приводит к возможности существования оптимального сочетания свойств смазки, что гарантирует одновременное удовлетворение требований к фрикционным и электромеханическим характеристикам контакта.

## 12.5. Уплотнения

*Уплотнение* — это устройство, предназначенное для предотвращения утечки смазки или рабочей среды через разъемное соединение или между деталями, движущимися друг относительно друга. Уплотнения также защищают детали машин от загрязнений, включая твердые абра-

тивные частицы (например, пыль, грязь). Эксплуатационные характеристики уплотнений значительно влияют на качество работы машин и механизмов в целом (мощность, производительность, коэффициент полезного действия). Износостойкость и долговечность трущихся деталей (элементы трансмиссий, подшипники, направляющие и т. п.) в большой степени определяются работой уплотнений. Уплотнения должны надежно и эффективно работать в различных условиях, включая высокие давления и температуры, присутствие химически вредных веществ, высокую скорость скользящих уплотняемых деталей, вибрации и т. д. Это обстоятельство объясняет разнообразие конструкций уплотнений.

12.5.1. Типы уплотнений. Уплотнения разделяются по типам движения на два основных класса: статические и динамические (рис. 12.19). К статическим уплотнениям относятся прокладки, сальники, кольцевые резиновые и герметики.

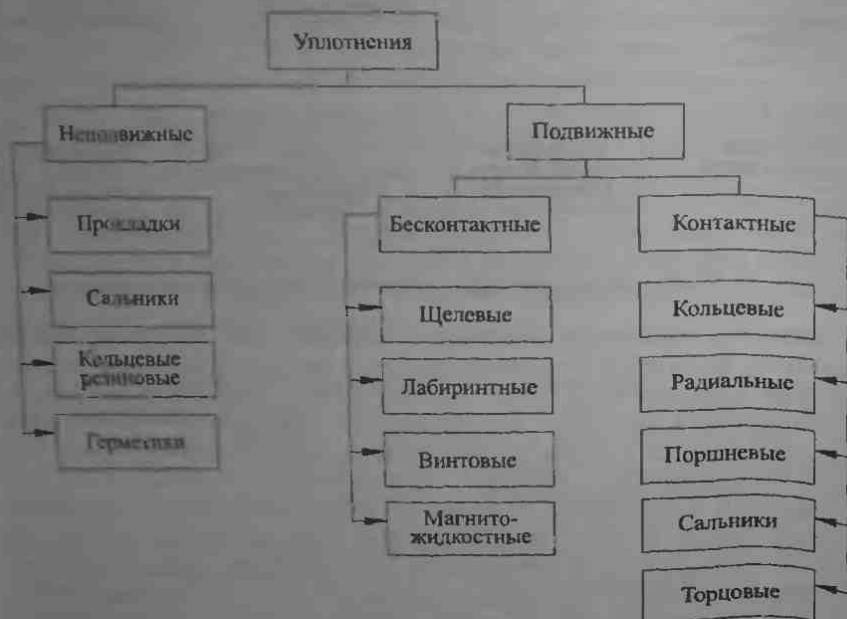


Рис. 12.19. Классификация уплотнений

Прокладки обычно изготавливают из деформируемого материала. Выбор материала базируется на условиях работы, таких как температурный диапазон, химическая совместимость и разность давлений. Наиболее широко применяемым материалом является резина, однако не исключается использование и других материалов, от пробки до меди. Формы прокладок разнообразны (рис. 12.20). Они включают плоские металлические, твердые эластомерные прокладки и резиновые кольца.



*Лабиринтное уплотнение* (рис. 12.21, в, г) состоит из чередующихся азоров и камер расширения, которые снижают расход через лабиринт за счет расширения газа и его турбулентного движения. Действие *вязкостных уплотнений* основано на возникновении давления за счет вязкого сопротивления в узком кольцевом зазоре или щели с канавками на вращающемся валу или пластине.

Магнитожидкостные уплотнения используют ферромагнитную жидкость, помещенную в зазор между подвижной и неподвижной поверхностями. Магнитная жидкость (коллоидная суспензия ферромагнитных частиц в жидкости-носителе) удерживается магнитным полем, предотвращая утечку.

Бесконтактные уплотнения обеспечивают высокую износостойкость, однако их уплотняющее действие ниже, чем у контактных уплотнений.

Наиболее распространены контактные уплотнения. При оптимальной конструкции и правильной установке уплотнения утечка очень мала, однако в этом случае возникают трибологические проблемы.

*Кольцевые резиновые уплотнения* (рис. 12.22, а, б) круговой или другой формы сечения успешно используются в незагрязненных средах при низких скоростях скольжения ( $v \leq 3-5$  м/с), однако они могут вызывать повышенный износ вала.

*Радиальные манжетные уплотнения* (рис. 12.22, в, г) широко используются в механизмах для уплотнения вращающихся валов при низком давлении масла. Такие уплотнения обычно состоят из металлического корпуса, гибкой детали и фланца, прижимаемого к валу за счет разности давлений (в) или стопорной пружины, охватывающей фланец (г). Фланцы часто выполняют из масло- и бензостойкой резины, однако для применения в уплотнениях пригодны и некоторые полимеры, например силикон, полиакрил, политетрафторэтилен (ПТФЭ) и др.

*Поршневые кольца* (рис. 12.22, д, е) применяют для уплотнения поршней двигателей внутреннего сгорания, поршневых компрессоров и других машин. Эти уплотнения обычно выполняют из металлов, работающих при высоких температурах, которые достигаются, например, в двигателях внутреннего сгорания. Если температура невысока, можно использовать самосмазывающиеся полимеры. Кольца разрезают и устанавливают в кольцевых канавках.

*Сальниковые уплотнения* (рис. 12.22, ж) подразделяются на сальники в виде эластичных втулок, торцовые сальники и сальники с вязкой набивкой. Их разрабатывают для возвратно-поступательного, колебательного и вращательного движения. Например, сальники в виде эластичных втулок применяются для уплотнения плунжеров поршневых насосов, а торцовые сальники — в гидравлических и пневматических системах высокого давления. Сальники с вязкой набивкой наиболее работают в разнообразных промышленных, авиакосмических и военных применениях.

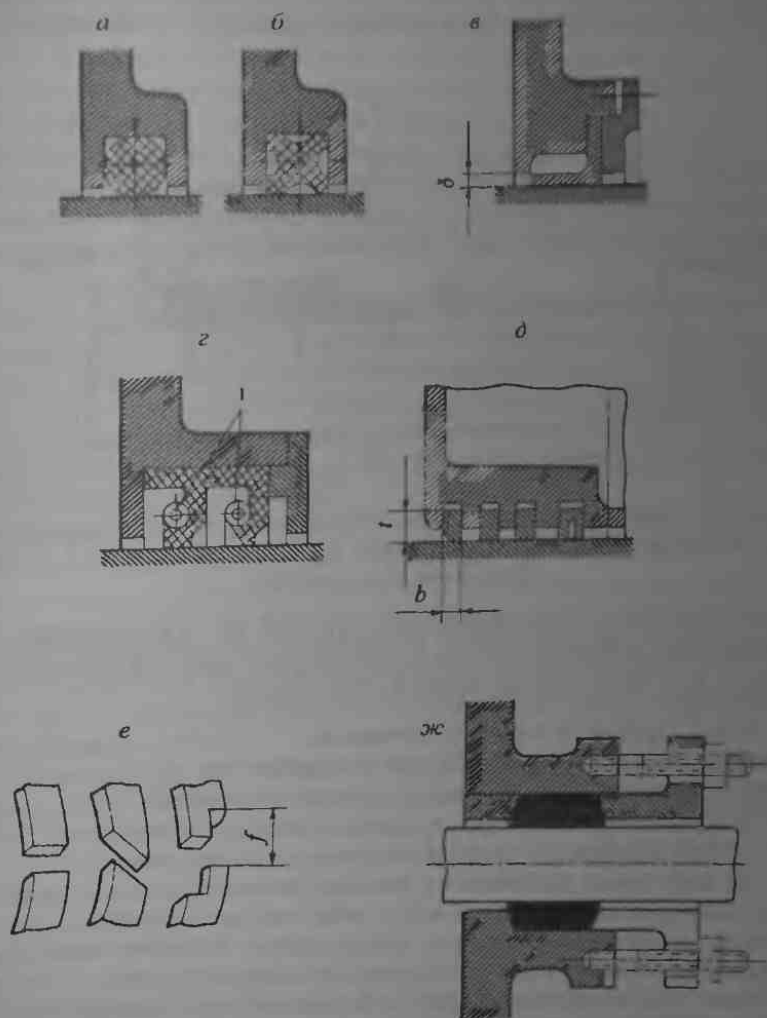


Рис. 12.22. Контактные уплотнения: а, б) с круглыми и фасонными кольцами; в, г) лабиринтные; д, е) самопружинящиеся разрезные кольца (поршневые); ж) сальники

*Механические торцовые уплотнения* (рис. 12.23) включают три основных компонента (уплотнительное и сопряженное кольца, образующие уплотняемый контакт, и вторичное уплотнение) и предназначены для предотвращения утечки жидкостей вдоль вращающегося вала. Такие уплотнения способны работать при высоком (до 200 атмосфер) давлении, высокой скорости (до 50 000 об/мин) и в широком диапа-

зоне температур ( $-200 \dots + 650^\circ\text{C}$ ); условия трения на уплотняемой границе раздела изменяются в широких пределах от непосредствен-

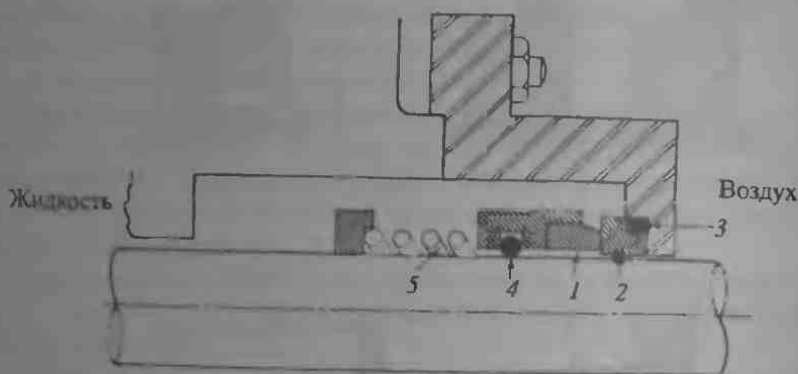


Рис. 12.23. Торцовое уплотнение: 1 — вращающееся уплотнительное кольцо; 2 — неподвижное уплотнительное кольцо; 3 — упругий элемент; 4 — осевое уплотнение, 5 — пружина

ного контакта тел (этот режим нежелателен) до гидродинамического режима (для эффективного уплотняющего действия смазочная пленка должна быть очень тонкой, порядка  $0,25\text{--}5 \text{ мкм}$ ).

**12.5.2. Трение и износ уплотнений.** С трибологической точки зрения уплотнения очень напоминают подшипники, хотя уплотнения и предназначены для предотвращения утечки жидкостей. Выбор наилучшей конструкции уплотнения сводится к поиску оптимального сочетания утечки и потерь на трение и повреждения поверхности.

По существу, в уплотнениях реализуются все режимы трения от сухого скольжения до трения в условиях гидродинамической смазки, а также все виды изнашивания. Сухое трение является нежелательным режимом, однако оно неизбежно сопровождает пуски и остановки. Чтобы в данных обстоятельствах избежать сухого трения, необходимо использовать самосмазывающиеся материалы (например, полимеры или композиты на их основе) или предусмотреть наличие резервуара для хранения масла, связанного с уплотнением.

Как и в случае подшипников со смазкой, режим трения уплотнения определяется безразмерным эксплуатационным параметром  $G = \eta V/P$ , являющимся аналогом числа Зоммерфельда. Многочисленные эксперименты, выполненные с механическими уплотнениями, показывают, что зависимость коэффициента трения от эксплуатационного параметра описывается типичной кривой, подобной кривой Герси—Штрибека. То есть коэффициент трения проходит через минимум в окрестности некоторого значения эксплуатационного параметра  $G$ . Было установлено, что это значение находится в пределах  $10^{-8}\text{--}10^{-7}$  для уплотнений.



работающих в поршневых насосах, т. е. в переходном режиме между жидкостной и граничной смазкой. Это означает, что существует смазочная пленка, которая почти полностью разделяет уплотняемые поверхности и может нести контактную нагрузку. В то же время, неровности сопрягаемых поверхностей вступают в контакт. Этот смешанный режим смазки определяется многими факторами, включающими гидродинамические свойства, свойства материалов и тепловые эффекты.

Смазочная пленка не должна быть ни слишком толстой, так как повышается утечка, ни слишком тонкой, иначе происходит интенсивный износ и разрушение уплотнения.

Аналогично и влияние шероховатости поверхности. Слишком большая шероховатость чревата нежелательными последствиями, такими как трение, ускоренным износом и малой долговечностью. Тем не менее, если поверхности слишком гладкие и плоские, возникновение гидродинамического давления в жидкости невозможно, что влечет за собой упомянутые выше последствия. Оптимальное значение шероховатости составляет не менее 0,25 мкм.

Трибологические свойства смазочной пленки в большой степени зависят от температуры контакта. Вследствие трения температура может на несколько сотен градусов превышать температуру окружающей среды. При повышении температуры смазочная пленка становится тоньше и может разрушаться, что приводит к развитию режима сухого трения и в конечном итоге к разрушению уплотнения.

Типичным примером является торцовое уплотнение, работающее на стальном валу.

При работе уплотнений могут иметь место различные термические эффекты. Так возможны ситуации, когда определенное сочетание упругих и термических свойств контактирующих материалов приводит к концентрации нагрузки на малых участках номинального контакта. В результате, происходит локальный фрикционный нагрев, и эти участки за счет термического расширения располагаются выше уровня окружающей поверхности и уменьшают площадь фактического контакта. Тем самым давление на этих участках и температура вновь повышаются. Этот процесс, известный как *термоупругая неустойчивость* (см. гл. 4), может привести к неэффективному функционированию и даже разрушению уплотнений.

Как и для подшипников, для уплотнений подвижных сопряжений существует эксплуатационный предел, определяемый как произведение контактного давления на скорость скольжения. Этот фактор представляет собой энергию, рассеянную с единицы площади проекции торца уплотнения при единичном коэффициенте трения. Предельное значение этой энергии соответствует разрушению жидкостной пленки, что приводит к возникновению сухого трения между торцами уплотнения. При достаточном давлении и тепловыделении материал на вершинах, образующих контакт неровностей, может расплавиться, и возникает адгезионный износ.

Если твердость сопрягаемых материалов различается, то неровности более твердого материала могут царапать поверхность контртела, вызывая абразивное изнашивание (изнашивание частицами закрепленного абразива). Похожим образом могут действовать твердые наполнители композитов, например армирующее стекловолокно, используемое во фторопластовых уплотнениях. Существует много других причин абразивного изнашивания. К ним относятся посторонние абразивные частицы, такие как песок, грязь, оксиды. Если они удерживаются между трущимися поверхностями, происходит изнашивание свободным абразивом.

Другой проблемой является коррозия. Она возникает благодаря химическому взаимодействию между торцом уплотнения и сопряженными поверхностями, уплотняемой жидкостью и окружающей средой. Коррозия представляет угрозу долговечности уплотнения, она также вызывает образование абразивных частиц (оксидов), присутствие которых ускоряет изнашивание и снижает ресурс уплотнения. Важную роль в коррозионном износе играет температура. Опыт показывает, что при увеличении температуры на 17 градусов скорость коррозии почти удваивается, а вязкость большинства масел уменьшается вдвое.

Кавитационное изнашивание проявляется в уплотнениях, в которых жидкость содержит воздушные или газовые пузырьки. Схлопывание пузырьков вызывает отрыв частиц материала с поверхности и может в итоге приводить к утечке жидкости и выходу из строя уплотнения.

Эрозионное изнашивание часто встречается в уплотнениях. Оно может быть вызвано кавитацией (кавитационная эрозия) или потоком жидкости с вкрапленными в него твердыми частицами.

Статические уплотнения склонны к фреттингу и фреттинг-коррозии. Эти виды изнашивания могут быть вызваны вибрацией узла машины при работе уплотнений, например, в седле клапана. Для снижения такого износа эффективно применение дополнительной прокладки или замена материалов сопряжения.

## 12.6. Тормозные устройства

Ряд трибосистем конструируются как фрикционные устройства, в которых коэффициент трения должен быть как можно более высоким. К таким устройствам относятся тормоза и муфты. Эти устройства предназначены для изменения скорости машины или ее частоты путем преобразования кинетической энергии в тепловую в процессе трения и последующего рассеяния этой тепловой энергии.

Фрикционные устройства применяются для ускорения (муфты) или остановки (все виды тормозов) транспортных средств и для передачи движения или изменения его направления (фрикционные муфты и регуляторы).

## 12.6.1. Некоторые конструкции фрикционных устройств.

Фрикционные устройства классифицируют по следующим признакам.

По конструктивным особенностям тормоза подразделяются на ленточные (рис. 12.24, а), колодочные (рис. 12.24, б), камерные (рис. 12.25, а), однодисковые и многодисковые (рис. 12.25, б и в) и рельсовые тормоза (рис. 12.26, а).

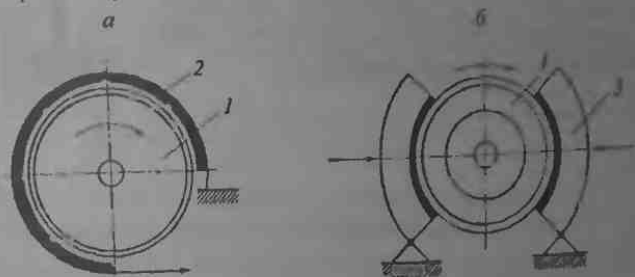


Рис. 12.24. Ленточный (а) и колодочный (б) тормоза. 1 — барабан; 2 — лента с колодками; 3 — колодки (по Чичингадзе и Брауну)

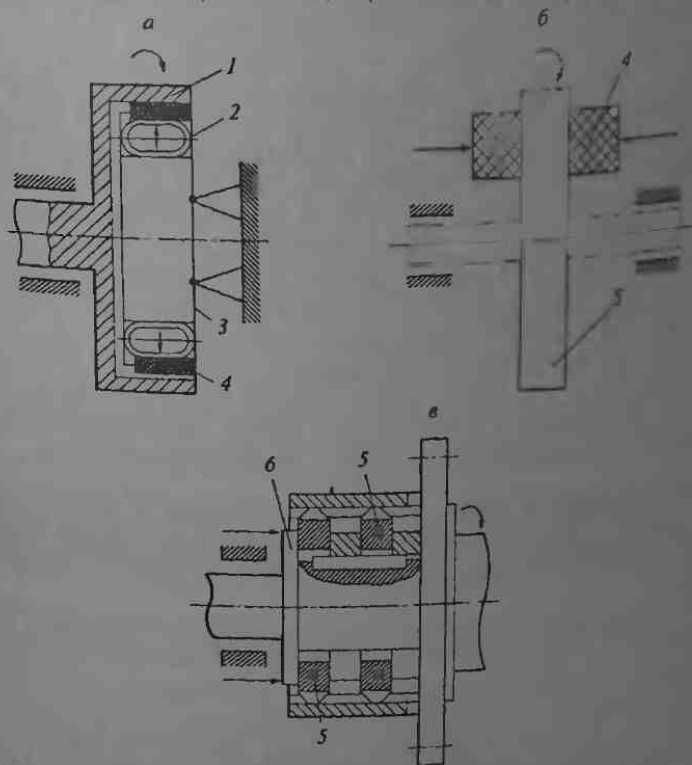


Рис. 12.25. Камерный (а), однодисковый (б) и многодисковый (в) тормоза: 1 — барабан; 2 — камера; 3 — корпус; 4 — колодки; 5 — диски; 6 — корпус, соединенный с неподвижными дисками (по Чичингадзе и Брауну)

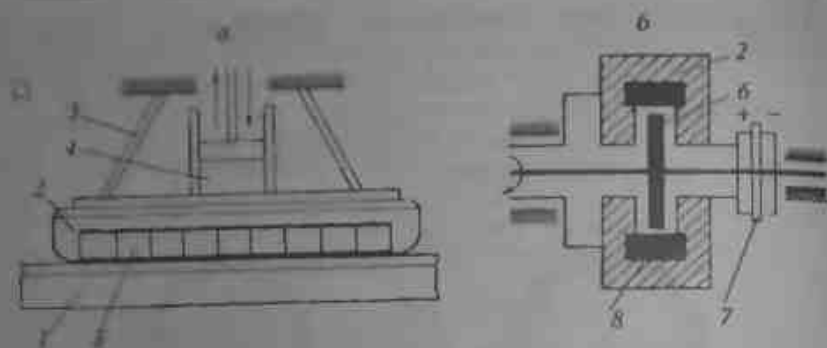


Рис. 12.26. Магнито-рельсовый тормоз (а) и порошковая муфта (б): 1 — рельс, 2 — соленоид, 3 — баушка, 4 — прижимной цилиндр, 5 — пружины, 6 — ротор, 7 — плита давления, 8 — обмотка (по Чичинадзе и Брауну)

Муфты и регуляторы могут быть дискового и колодочного типов. Используются также магнитопорошковые муфты (рис. 12.26, б).

Каждое из этих устройств, за исключением рельсового тормоза, состоит из ведущей и ведомой деталей. В тормозах, в отличие от муфт, ведомая деталь всегда неподвижна. В ленточных и колодочных тормозах контакт осуществляется прижатием frictionного элемента — шарнирной на гибкой ленте накладке или жесткой колодки — к вращающемуся барабану или валу. В данном случае frictionный элемент контактирует с затормаживаемой деталью только по одной поверхности — внешней или внутренней. В устройствах дискового типа трение осуществляется по обеим сторонам frictionного элемента, что делает узел более компактным и увеличивает его мощность.

В тормозах многодисковой конструкции, работающих как в масляной ванне, так и при сухом трении, момент трения является суммой моментов, возникающих в каждой паре дисков (вращающемся и неподвижном). Такая конструкция является наиболее компактной.

**12.6.2. Трение и износ в тормозах.** Трение и износ тормозов определяются целым рядом факторов, таких как конструкция тормоза и состав материала накладок, а также температура, скорость скольжения и давление.

Более высокие и менее стабильные значения коэффициента трения независимо от вида контакта наблюдаются при высокой податливости frictionного элемента в нормальном и касательном направлениях. Такая податливость обеспечивает более равномерное распределение фактической нагрузки на контакте и таким образом снижает его температуру. Градиент температуры и термические напряжения. Обычно зависимость коэффициента трения от температуры описывается падающей характеристикой (рис. 12.27). Снижение контактной температуры вызывает возрастание коэффициента трения.

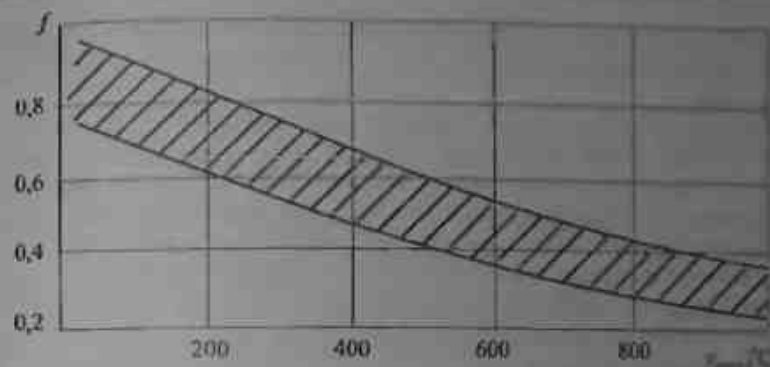


Рис. 12.27. Фрикционная теплостойкость спеченной металл-графитовой композиции (по Чичинадзе)

Следует отметить, что высокая податливость frictionных элементов вызывает снижение инерции  $I_{ин}$  frictionного устройства (то есть времени, в течение которого момент трения  $T_f$  повышается после приложения нагрузки или падает до нуля после ее снятия). Это имеет особое значение для муфт, работающих в динамическом режиме. При работе в масле можно снизить  $I_{ин}$  путем нанесения канавок на трущиеся поверхности. Наименьшая инерция характерна для устройств с круговыми канавками на трущихся поверхностях или с большим числом frictionных элементов, а наибольшая — для устройств без канавок на трущихся поверхностях. Канавки улучшают теплоотвод и способствуют удалению продуктов износа.

В современных frictionных устройствах начальная скорость скольжения изменяется в широком диапазоне от нескольких сантиметров в секунду до 100 м/с, а иногда и более. Скорость скольжения при выключении также значительно изменяется. В муфтах она снижается на несколько процентов по отношению к начальной скорости, а в тормозах падает до нуля. Скорость скольжения существенно влияет на мощность, работу трения и температуру. Температура, в свою очередь, наряду с нагрузкой определяет характеристики трения и изнашивания.

Нагрузка на frictionное устройство также изменяется в широком диапазоне (от нескольких граммов до нескольких тонн). При высоких нагрузках рекомендуется более компактная многодисковая конструкция. Ожидаемая удельная нагрузка рассчитывается для заданных габаритных размеров устройства. Однако этот параметр следует корректировать после оценки средней объемной и средней поверхностной температур.

Коэффициент трения должен быть достаточным для развития требуемой силы трения при рабочих нагрузках, действующих на frictionное устройство. Для frictionных материалов, трущихся по металлу, коэффициент трения изменяется в пределах 0,2–0,5. Frictionный материал должен иметь стабильный коэффициент трения в течение всего периода работы устройства.

Коэффициент трения зависит от действующей нагрузки, температуры, конструктивных особенностей, качества поверхностей и типа материалов.

Наибольшая долговечность пары трения характерна для ее работы в режиме, когда реализуется упругий или упруго-пластический контакт. Для обеспечения такого режима работы необходимо либо разработать конструкцию с большей площадью трущихся поверхностей и относительно малыми допустимыми нагрузками, либо применять фрикционные материалы с высокой износостойкостью. В качестве оценки принимают коэффициент трения равный 0,28–0,30 для пар трения металл — композит, 0,20–0,23 для пар металл — металлокерамика, 0,15 для пар металл — металл.

Стабильность коэффициента трения является критическим фактором. Его падение с ростом скорости (температуры) приводит к потере эффективности работы фрикционного устройства. Этот эффект иногда можно наблюдать в тормозах, когда продолжительное и повторяющееся торможение не способно остановить транспортное средство.

Некоторые материалы проявляют необратимое ухудшение фрикционных свойств и износостойкости, вызванное нагревом. Такие материалы не могут применяться во фрикционных устройствах. Для использования в таких устройствах рекомендуются только специальные фрикционные материалы.

Время торможения, скорость скольжения и изменение мощности представляют собой наиболее важный набор начальных данных для расчета температуры трущихся поверхностей и последующего развития уравнений тепловой динамики трения, разработанной Чичинадзе. Эти уравнения позволяют предсказать на стадии разработки изменения тормозного момента, скорости и температуры.

В числе рабочих параметров фрикционных пар важна также средняя удельная мощность включения и скольжения, так как она существенно влияет на выходные характеристики.

Интенсивность изнашивания должна быть задана, исходя из возможности современных фрикционных материалов.

Фрикционный элемент (например, тормозная колодка) и контртело (металлический барабан, диск и т. п.) работают в условиях циклического нагрева и охлаждения. Развивающиеся в этих условиях термические напряжения значительно превышают механические напряжения. Поэтому фрикционные материалы должны эффективно противостоять термической усталости. Для таких материалов интенсивность изнашивания  $i_d$  в первом приближении можно рассчитать по формуле  $I = i_d R / H V$ , где  $I$  — износ в метрах на 1 м пути трения.

Если пара трения правильно подобрана и работает в заданном для нее температурном диапазоне,  $i_d$  изменится в пределах  $10^{-6}$ – $10^{-7}$ . Для предсказания долговечности достаточно разделить припуск на износ на величину  $I$ . В результате получим путь трения, на котором фрикционный элемент должен обеспечивать нормальную работу на

протяжении своего ресурса. Однако для таких оценок принуде должен браться с учетом значительных изменений твердости и износостойкости, характерных для различных партий фрикционных материалов.

После того как все требования к паре трения сформулированы, материал выбирают, используя каталоги.

### Список литературы

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника (пособие для конструктора). Учебник для технических вузов. — М.: Машиностроение, 1999.
2. Гузенков П. Г. Детали машин. — М.: Высшая школа, 1975.
3. Дмитриев В. А. Детали машин. — Ленинград: Судостроение, 1970.
4. Кончиц В. В., Мешков В. В., Мышкин Н. К. Триботехника электрических контактов. — Минск: Наука и техника, 1986.
5. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. — М.: Машиностроение, 1986.
6. Захаров С. М., Никитин А. П., Загорянский Ю. А. Подшипники валенчатых валов тепловых дизелей. — М.: Транспорт, 1981.
7. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин. — М.: Машиностроение, 1984.
8. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2003.
9. Основы трибологии / Под ред. А. В. Чичинадзе. Учебник для технических вузов. — М.: Центр «Наука и техника», 1995. 778 с., 2-е изд. — М.: Машиностроение, 2001.
10. Словарь-справочник по трению, износу и смазке машин / В. Д. Зозуля, Б. Д. Шведков, Д. Я. Ровенский, Э. Д. Браун. — Киев: Наукова думка, 1990.
11. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды и А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, Варшава. Т. 1, 1989. Т. 2, 1990. Т. 3, 1992.
12. Справочник. Трение, изнашивание и смазка / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. — М.: Машиностроение. Т. 1, 1978. Т. 2, 1979.
13. Чернин И. М., Кузьмин А. В., Ицкович Г. М. Расчеты деталей машин: Справочник. — Минск: Вышэйшая школа, 1974.
14. Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. — М.: Наука, 1967.
15. ASM Handbook. V. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology. ASM International, 1992.
16. Handbook of Fluid Sealing / Ed. by R. V. Brink, D. E. Cheznik, L. A. Herve. McGraw-Hill, 1993.
17. Konchits V. V., Braunovic M., Myshkin N. K. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications, and Technology. — N. Y.: Taylor & Francis CRC Press, 2006.
18. Myshkin N. K., Kim C. K., Petrokovets M. I. Introduction to Tribology. — Seoul: CMG Publishers, 1997.
19. Summers-Smith J. D. An Introduction to Tribology in Industry. The Machinery Publishing Company, 1969.
20. Shigley J. E., Mischke C. R. Bearings and Lubrication. — McGraw-Hill, 1991.

## Приложение I СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Параметрический способ описания шероховатой поверхности включает целый ряд параметров, дополняющих перечисленные в п. 1.2 и облегчающих решение трибологических задач. Ниже дается определение наиболее распространенных параметров. Как правило, они определяются относительно средней линии. В мировой практике используются два способа ее построения: система М, или «система средней линии», и система Е, или «система огибающей линии».

Первый способ рекомендован ISO и стандартами большинства стран — Англии, Голландии, России, США и т. д., второй — используется стандартами Германии, Италии, Швейцарии и некоторых других стран. Согласно системе М средняя линия проводится по методу наименьших квадратов таким образом, что сумма квадратов отклонений профильной кривой от этой линии минимальна, а по форме средняя линия должна совпадать с номинальным (геометрическим) профилем. Например, для кругового цилиндра — это прямая, если речь идет о шероховатости вдоль образующей, или дуга окружности, если — вдоль направляющей.

Система Е предусматривает обкатывание реального профиля окружностью достаточно большого радиуса (например, 25 мм в германском стандарте). Траектория центра окружности, смещенная на величину радиуса обкатывания, дает огибающую профиля, которая опускается внутрь профильной кривой на глубину сглаживания. В результате получается средняя линия профиля, состоящая из дуг окружности обкатывания и приближенно отвечающая принципу наименьших квадратов.

Различие между М- и Е-системами практически незначительно. В обеих системах средняя линия проводится в пределах так называемой базовой длины  $l$ , которая представляет собой длину такого элементарного участка профильной кривой, что неровности других видов в первую очередь волнистость, удается исключить из рассмотрения. Базовая длина обычно стандартизируется и лежит в пределах от 0,08 до 8 мм в зависимости от шероховатости (см. табл. П1.1).

Таблица III.1. Параметры шероховатости и базовые длины (по ГОСТ 25142-82)

Классы шероховатости	Разряды	Параметры шероховатости		Базовая длина $l$ , мм	
		$R_a$	$R_z$		
1	—		320-160	8,0	
2	—		160-80		
3	—		80-40		
4	—	—	40-20	2,5	
5	—	—	20-10		
6	а	2,5-2,0	—	0,8	
	б	2,0-1,6	—		
	в	1,6-1,25	—		
7	а	1,25-1,0	—		
	б	1,0-0,8	—		
	в	0,8-0,63	—		
8	а	0,63-0,50	—		
	б	0,50-0,40	—		
	в	0,40-0,32	—		
9	а	0,33-0,25	—		
	б	0,25-0,20	—		
	в	0,20-0,16	—		
10	а	0,160-0,125	—	0,25	
	б	0,125-0,100	—		
	в	0,100-0,080	—		
11	а	0,080-0,063	—		
	б	0,063-0,050	—		
	в	0,050-0,040	—		
12	а	0,040-0,032	—		
	б	0,032-0,025	—		
	в	0,025-0,020	—		
13	а	—	0,100-0,080		0,08
	б	—	0,080-0,063		
	в	—	0,063-0,050		
14	а	—	0,050-0,040		
	б	—	0,040-0,032		
	в	—	0,032-0,025		

Среднее квадратичное отклонение профиля  $R_q$  определяется как среднее квадратичное значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_q = \left( \frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx \right)^{1/2} \quad (\text{III.1})$$



или в дискретном виде

$$R_q = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2 \right)^{1/2}$$

Параметры  $R_a$  и  $R_q$  различаются незначительно по величине. Для одной и той же поверхности  $R_a$  примерно на 6–30% меньше, чем  $R_q$ . Так, для синусоидальной поверхности с единственной гармоникой отношение  $R_q/R_a$  равно  $\pi/2^{1/2} \approx 1,11$ , а для гауссовской случайной поверхности  $R_q = 1,25R_a$ . Оба параметра практически не чувствительны к шагу неровностей, малым изменениям геометрии профиля и к случайным высоким пикам и глубоким впадинам.

Глубина сглаживания  $R_p$  — это расстояние от линии выступов до средней линии в пределах базовой длины.

Степень заполнения профиля  $K_p$  равна отношению площади материала (площади фигуры, ограниченной профилем и линией впадин) к площади прямоугольника, заключенного между линиями выступов и впадин в пределах базовой длины.

Существуют параметры, характеризующие форму единичного выступа. Среди них наиболее распространенным и, к сожалению, наименее информативным является средний радиус кривизны вершины выступа профиля  $r_p$ , который определяется как величина, обратная средней кривизне  $c_{pi}$  всех вершин выступов в пределах базовой длины. Последняя есть вторая производная уравнения профиля  $z(x)$  в вершине неровности и обычно рассчитывается с помощью центральных разностей:

$$c_{pi} = (2z_i - z_{i-1} - z_{i+1})/\Delta l_i^2.$$

Тогда средний радиус кривизны определяется по формуле

$$r_p = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} \frac{1}{c_{pi}}. \quad (\text{П1.2})$$

В отечественной литературе часто радиус кривизны  $r_{pi}$  отдельной вершины рассчитывают по формуле

$$r_{pi} = \frac{\Delta l_i^2}{8h_i}, \quad (\text{П1.3})$$

где  $\Delta l_i$  — длина сечения данного выступа линией, эквидистантной средней линии и отстоящей от его вершины на расстоянии  $h_i$ , которое принимается примерно равным  $0,3 R_a$ . Затем значения  $r_{pi}$  усредняются по пяти наиболее высоким выступам в пределах базовой длины.

Это далеко не полный перечень параметров шероховатости, используемых в настоящее время. Большинство из перечисленных выше параметров вошло (или, по крайней мере, входило) в национальные

Таблица П1.2. Некоторые национальные стандарты шероховатости

$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$R_p$	$t_p$	$S$	$S_m$	Страна
+	+						Англия
+	+	+					Германия
$k_m$	$H$						Испания
+	+	+		+	+	+	Россия
+							США
+	+	+		+			Швеция
+	$R$	+	+	$(T_p)C$	$AR$		Франция
+	+	+					Япония
+	+	+					ИСО

стандарты в разных сочетаниях (см. табл. П1.2, где для сравнения приведен также стандарт ИСО).

При пользовании иностранными стандартами нужно соблюдать большую осторожность, поскольку

— один и тот же параметр может иметь разное обозначение в разных стандартах (в табл. П1.2 такие расхождения отмечены особо, например  $k_m$  вместо  $R_a$  в испанском стандарте);

— одно и то же обозначение имеют разные или по-разному определенные параметры. Так, в отличие от приведенного выше определения  $R_z$ , соответствующего ГОСТ 25142-82, германский стандарт определяет этот параметр как среднее максимальных высот неровностей в пяти последовательных базовых длинах;

— разные стандарты рекомендуют разное количество базовых длин, используемых для длины оценки одного и того же параметра.

**Вероятностный подход**, базирующийся на теории вероятности и теории случайных процессов, часто используется при предположении, что шероховатые поверхности являются гауссовскими (нормальными).

Отклонение реальной поверхности от нормальной оценивается с помощью таких параметров, как асимметрия  $S_k$  и эксцесс  $K_s$ . Асимметрия  $S_k$  является мерой отклонения плотности вероятности от симметричной формы (рис. П1.1) и определяется следующим образом:

$$S_k = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} z^3 f(z) dz, \quad (\text{П1.4})$$

где  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение ординаты профиля.

Естественно, что симметричные распределения (например, распределение Гаусса) имеют нулевую асимметрию. Для профилей с изношенными вершинами неровностей и глубокими царапинами асимметрия отрицательна, в то время как асимметрия положительна, если на поверхности имеются высокие неровности или ее впадины не глубоки или заполнены продуктами изнашивания.

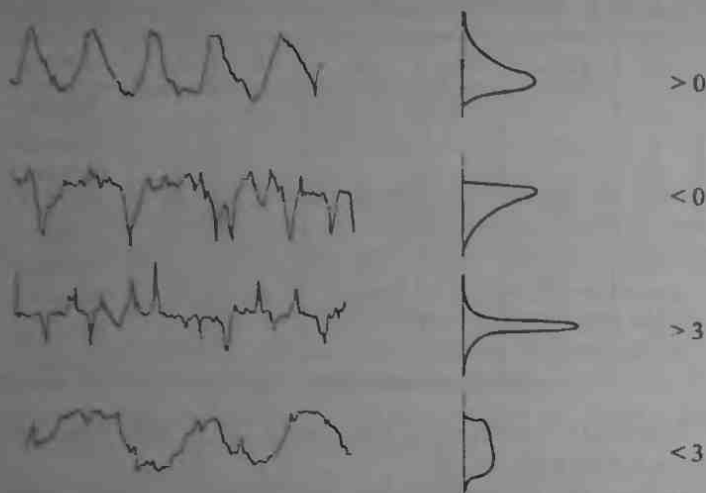


Рис. П1.1. Асимметрия  $S_k$  и эксцесс  $K_s$  реального профиля

Эксцесс  $K_s$  характеризует плосковершинность распределения (рис. П1.1):

$$K_s = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 f(z) dz. \quad (\text{П1.5})$$

Симметричное гауссовское распределение имеет эксцесс, равный трем. Если профиль имеет сравнительно небольшое количество высоких неровностей и глубоких впадин как результат обработки острым инструментом, то  $K_s < 3$  и распределение называется плосковершинным. В противном случае, когда много высоких неровностей и глубоких впадин,  $K_s > 3$  и распределение называется островершинным.

Метод описания микрогеометрии реальных поверхностей, основанный на применении теории случайных процессов, широко применяется в настоящее время и представляется весьма перспективным. Не вдаваясь в достаточно сложные математические подробности метода, которые при необходимости можно найти в литературе, рассмотрим общую схему рассуждений и главные результаты, имеющие прикладное значение. Как уже отмечалась выше, ордината шероховатой поверхности  $z$ , отсчитываемая, скажем, от средней плоскости, рассматривается как случайная функция двух переменных  $z = z(x, y)$ . Согласно теории случайных полей, если поле  $z$  однородно и нормально, что обычно и предполагается при анализе шероховатых поверхностей, то оно полностью определяется своей корреляционной функцией:

$$K(x, y) = \lim_{L_1, L_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{4L_1 L_2} \int_{-L_1}^{L_1} \int_{-L_2}^{L_2} z(x_1, y_1) z(x_1 + x, y_1 + y) dx_1 dy_1.$$

Практически любая задача, касающаяся определения характеристик поля (некоторые из них будут перечислены ниже), может быть решена. Однако часто удобнее пользоваться Фурье преобразованием корреляционной функции:

$$\Phi(k_x, k_y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(x, y) \exp[-i(xk_x + yk_y)] dx dy,$$

которое называется спектральной плотностью. Здесь  $k_x, k_y$  — компоненты волнового вектора  $k$ .

В дальнейшем анализе широко используются моменты спектральной плотности:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(k_x, k_y) k_x^p k_y^q dk_x dk_y. \quad (\text{П1.5})$$

Для изотропных поверхностей нетрудно показать, что

$$\begin{aligned} m_{20} = m_{02} = m_2, \quad m_{11} = m_{13} = m_{31} = 0, \\ m_{00} = m_0, \quad 3m_{22} = m_{40} = m_{04} = m_4, \end{aligned} \quad (\text{П1.7})$$

где  $m_0, m_2, m_4$  — моменты спектральной плотности профилограммы.

Практически моменты определяются по профилограммам поверхности с помощью формул Лонге-Хиггинса для плотности нулей  $D_{z,0}$  и экстремумов (максимумов и минимумов)  $D_{e,0}$ :

$$D_{z,0} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2}, \quad (\text{П1.8})$$

$$D_{e,0} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{m_4}{m_2} \right)^{1/2}. \quad (\text{П1.9})$$

Откуда находим

$$m_2 = \pi^2 \sigma^2 D_{z,0}^2, \quad (\text{П1.10})$$

$$m_4 = \pi^4 \sigma^2 D_{z,0}^2 D_{e,0}^2, \quad (\text{П1.11})$$

где среднее квадратичное отклонение профиля  $\sigma$ , равное  $(m_0)^{1/2}$ , также находится по профилограмме. Современное измерительное оборудование позволяет находить автоматически плотности нулей и экстремумов.

Для определения ряда характеристик шероховатой поверхности можно ограничиться совместной плотностью вероятности случайной функции и ее первых двух производных:

$$\begin{aligned} \xi_1 = z(x, y), \quad \xi_2 = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x}, \quad \xi_3 = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y}, \\ \xi_4 = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2}, \quad \xi_5 = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x \partial y}, \quad \xi_6 = \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2}. \end{aligned}$$

Считается, что эти случайные величины удовлетворяют достаточно общим условиям центральной предельной теоремы и их совместная плотность вероятности записывается в виде

$$p(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_6) = \frac{1}{8\pi^3 \Delta^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi^T M \xi\right), \quad (\text{П1.12})$$

где  $\xi$  — вектор-столбец величин  $\xi_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 6$ );  $T$  — символ транспонирования;  $M$  — квадратная матрица  $6 \times 6$ , обратная матрице  $N$ :

$$N = \begin{pmatrix} \overline{\xi_1^2} & \overline{\xi_1 \xi_2} & \overline{\xi_1 \xi_3} & \dots & \overline{\xi_1 \xi_6} \\ \overline{\xi_2 \xi_1} & \overline{\xi_2^2} & \overline{\xi_2 \xi_3} & \dots & \overline{\xi_2 \xi_6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{\xi_6 \xi_1} & \overline{\xi_6 \xi_2} & \overline{\xi_6 \xi_3} & \dots & \overline{\xi_6^2} \end{pmatrix},$$

где черта сверху означает усреднение соответствующих выражений.

Обращение матрицы  $N$  с учетом (П1.7) дает для изотропной шероховатости следующее выражение:

$$M = \begin{pmatrix} \frac{2m_4}{\Delta_1} & 0 & 0 & \frac{3m_2}{2\Delta_1} & 0 & \frac{3m_2}{2\Delta_1} \\ 0 & \frac{1}{m_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3m_2}{2\Delta_1} & 0 & 0 & \frac{9\Delta_2}{4m_4\Delta_1} & 0 & -\frac{3\Delta_3}{4m_4\Delta_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_2} & 0 \\ \frac{3m_2}{2\Delta_1} & 0 & 0 & -\frac{3\Delta_3}{4m_4\Delta_1} & 0 & \frac{9\Delta_2}{4m_4\Delta_1} \end{pmatrix},$$

где  $\Delta_1 = 2m_0m_4 - 3m_2^2$ ,  $\Delta_2 = m_0m_4 - m_2^2$ ,  $\Delta_3 = m_0m_4 - 3m_2^2$ .

Тогда искомая совместная плотность вероятности запишется в виде:

$$p(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_6) = \frac{1}{8\pi^3 \sqrt{\Delta}} \exp\left(-\frac{1}{2} X\right), \quad (\text{П1.13})$$

где

$$\Delta = \frac{4}{27} (m_2 m_4)^2 (2m_0 m_4 - 3m_2^2);$$

$$X = \frac{2m_4}{\Delta_1} \xi_1^2 + \frac{9\Delta_2}{4m_4\Delta_1} (\xi_4^2 + \xi_6^2) + \frac{3}{m_4} \xi_2^2 + \frac{3m_2}{\Delta_1} \xi_1 (\xi_4 + \xi_6) - \frac{3\Delta_3}{2m_4\Delta_1} \xi_4 \xi_6 + \frac{1}{m_2} (\xi_2^2 + \xi_3^2).$$

Теперь определение различных полезных характеристик шероховатой поверхности является уже делом техники. Например, опять же не вникая в детали, посмотрим, как находится распределение высот вершин. Поверхность имеет выступ (т. е. локальный максимум) в точке  $(x, y)$ , если выполняются следующие условия:

$$\xi_2 = \xi_3 = 0, \quad \xi_4 < 0, \quad \xi_6 < 0, \quad \xi_4 \xi_6 - \xi_5^2 \geq 0.$$

Если точка находится в пределах элементарной области  $dA$ , над которой располагается вершина, то переменные  $\xi_2, \xi_3$  будут изменяться в области

$$d\xi_2 d\xi_3 = \left| \frac{\partial(\xi_2, \xi_3)}{\partial(x, y)} \right| dA = |\xi_4 \xi_6 - \xi_5^2| dA.$$

Тогда плотность вершин с ординатой  $\xi_1$  находится интегрированием:

$$P_{sum} = \iiint_V p(\xi_1, 0, 0, \xi_4, \xi_5, \xi_6) |\xi_4 \xi_6 - \xi_5^2| d\xi_4 d\xi_5 d\xi_6,$$

где область интегрирования  $V$  определяется следующими неравенствами:

$$\xi_4 < 0, \quad \xi_6 < 0, \quad \xi_4 \xi_6 - \xi_5^2 \geq 0.$$

При определенном навыке и тяге к нетривиальным преобразованиям легко показать, что последний интеграл берется в конечном виде, а после его нормирования на плотность вершин (число вершин, приходящееся на единицу площади):

$$D_0 = \frac{1}{6\pi\sqrt{3}} \frac{m_4}{m_2} \quad (\text{П.14})$$

находим после преобразований плотность вероятностей высот вершин:

$$p(\xi_1^*) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ \xi_1^* \left[ \frac{3(2\alpha - 3)}{\alpha^2} \right]^{1/2} \exp(-C_1 \xi_1^{*2}) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} (\xi_1^{*2} - 1) \times \right. \\ \times \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \xi_1^* \left( \frac{3}{2(2\alpha - 3)} \right)^{1/2} \right) \right] \exp \left( -\frac{1}{2} \xi_1^{*2} \right) + \left[ \frac{2\pi\alpha}{3(\alpha - 1)} \right]^{1/2} \times \\ \left. \times \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \xi_1^* \left( \frac{\alpha}{2(\alpha - 1)(2\alpha - 3)} \right)^{1/2} \right) \right] \exp \left[ -\frac{\alpha \xi_1^{*2}}{2(\alpha - 1)} \right] \right\}. \quad (\text{П.12.15})$$

где  $\xi_1^* = \xi_1/m_0^{1/2}$ ;  $\alpha = m_0 m_4/m_2^2$ ;  $C_1 = \alpha/(2\alpha - 3)$ .

В дальнейшем это распределение будем называть распределением Найака, который первым предложил его именно в таком виде для описания шероховатых поверхностей.

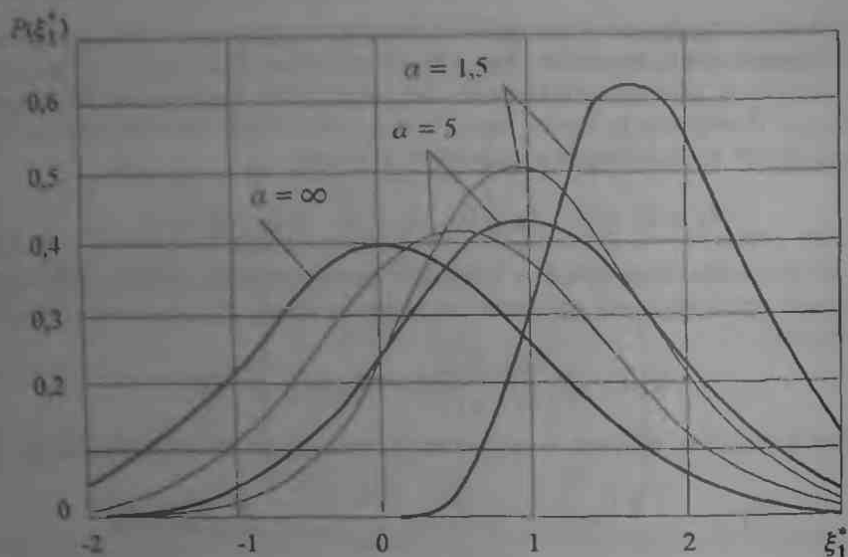


Рис. III.2. Плотность распределения высот выступов на профилограмме (тонкие линии) и на поверхности (толстые линии)

Рассмотрим некоторые особенности распределения Найака:

— распределение  $p$  зависит от спектральных моментов только в некоторой безразмерной комбинации  $\alpha$ , которая может быть найдена по профилограмме поверхности, как описано выше. Параметр  $\alpha$  называется параметром широкополосности, поскольку связан с шириной спектральной плотности поверхности. Чем больше  $\alpha$ , тем более широким является спектр, т. е. больше диапазон длин волн, составляющих данную поверхность. Узкий спектр ( $\alpha \rightarrow 1,5$ ) показывает, что все волны имеют примерно одинаковую длину;

— параметр широкополосности изменяется в диапазоне от 1,5 до бесконечности, как это показал еще Лонге-Хиггинс, причем в предельных случаях распределение Найака вырождается в известные распределения Релея и Гаусса:

$$p_N(\xi^*) = \begin{cases} 0, & \xi^* < 0, \\ \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{2\pi}} [\xi^{*2} - 1 + \exp(-\xi^{*2})] \exp(-\xi^{*2}), & \xi^* > 0, \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

$$p_G(\xi^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^{*2}\right).$$

Рассуждения, аналогичные приведенным выше, применимы и к описанию сечения шероховатой поверхности, т. е. ее профилограммы. В частности, показано, что высоты выступов профилограммы имеют

следующее распределение вероятностей:

$$p(\xi^*) = \left( \frac{\alpha - 1}{2\pi\alpha} \right)^{1/2} \left[ \exp \left( -\frac{\alpha \xi^{*2}}{2(\alpha - 1)} \right) + \xi^* \frac{\pi}{2(\alpha - 1)} \left( 1 + \operatorname{erf} \frac{\xi^*}{\sqrt{2(\alpha - 1)}} \right) \exp \left( -\frac{1}{2} \xi^{*2} \right) \right]. \quad (\text{П.12.17})$$

где параметр  $\alpha$  имеет тот же физический смысл, но в общем случае изменяется от 1 до  $\infty$ , хотя для профилограмм изотропной случайной поверхности возможны лишь значения  $\alpha > 1,5$ .

На рис. П1.2 дано сравнение распределения высот выступов на поверхности и на профилограмме. Видно, что профилограмма искажает поверхность, показывая меньшее количество высоких пиков и большее количество низких пиков. Наибольшее искажение наблюдается при  $\alpha = 1,5$ , но с увеличением параметра широкополосности оно становится все меньше и меньше и полностью исчезает при  $\alpha = \infty$ .

### Список литературы

1. Лонге-Хиггинс М. С. Статистическая геометрия случайных поверхностей // Гидродинамическая неустойчивость. — М.: Мир, 1964.
2. Найак П. Р. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей // Проблемы трения и смазки. 1971. № 3. С. 85–96.
3. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). — М.: Наука, 1975.
4. Thomas T. R. Rough surfaces. — London: Imperial College Press, 1990.



Приложение 2  
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

**Постановка задач теории теплопроводности.** Теплопроводность — это процесс переноса теплоты от более нагретых участков тела к менее нагретым. В теле, в котором происходит распространение теплоты, можно выделить поверхности с одинаковой температурой, которые называются *изотермическими поверхностями*. Совокупность изотермических поверхностей в любой момент времени дает распределение температур в теле, т.е. его *температурное поле*, определение которого составляет основную задачу теории теплопроводности. Поскольку в фиксированный момент времени в одной и той же точке не может быть двух различных температур, то две изотермические поверхности с разными температурами не могут пересекаться (рис. П2.1). А теплота не может распространяться вдоль изотермических поверхностей, и кратчайший для нее путь — вдоль

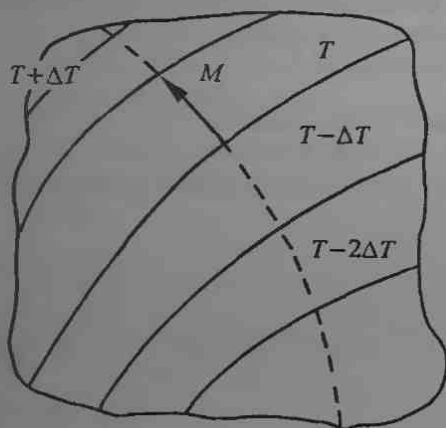


Рис П2.1. Изотермы двумерного температурного поля

нормали к изотермической поверхности, где имеет место наибольший перепад температур. Это изменение температур, отнесенное к единице

длины перемещения в сторону увеличения температуры, называется *градиентом температуры* или градиентом температурного поля в данной точке. Математически это означает, что градиент температуры есть вектор, который определяется как производная температурной функции  $T$  по направлению нормали  $n$ :

$$\text{grad } T = n dT/dn.$$

Если градиент отличен от нуля, то обязательно имеет место перекоп теплоты, и как показывает опыт, в сторону, противоположную градиенту. Мерой переноса является тепловой поток (векторная величина), определяемый как количество теплоты, проходящее в единицу времени в направлении убывания температуры. Его размерность — Вт или Дж/с. Поток  $q$ , приходящийся на единицу площади сечения, перпендикулярного к направлению потока, называется *удельным тепловым потоком* или *плотностью теплового потока* (размерность Вт/м<sup>2</sup> или Дж/(м<sup>2</sup>·с)). Как показали многочисленные опыты, существует прямая пропорциональность между удельным тепловым потоком и температурным градиентом (закон Фурье):

$$q = -\lambda \text{grad } T. \quad (\text{П2.1})$$

Знак минус поставлен потому, что направления теплового потока и градиента температур, как отмечалось выше, противоположны. Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называется коэффициентом теплопроводности (или просто теплопроводностью), который характеризует теплопроводящие свойства материала. Он численно равен количеству теплоты, проходящей через единицу площади изотермической поверхности в единицу времени при градиенте температуры, равном единице. Его размерность — Вт/(м·К).

Теплоинерционные свойства материала характеризуются коэффициентом температуропроводности  $a$ , который определяет скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности и численно равен отношению коэффициента теплопроводности к объемной удельной теплоемкости:  $a = \lambda/(c\rho)$  [м<sup>2</sup>/с], где  $c$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — плотность материала.

Температурное поле в твердом теле находится путем решения дифференциального уравнения теплопроводности, вывод которого базируется на законе Фурье (П2.1) и на рассмотрении баланса теплоты в элементарном объеме тела, где происходит кондуктивный перенос теплоты.

В декартовых координатах трехмерное нестационарное температурное поле  $T = T(x, y, z, t)$  описывается дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (\text{П2.2})$$

вывод которого и обсуждение методов решения приводится во многих монографиях по теории теплопроводности и в старой, но по-прежнему прекрасной работе В. С. Щедрова (1955). В трибологических задачах часто ограничиваются рассмотрением одномерного теплового потока  $T = T(x, t)$ , для которого уравнение теплопроводности записывается в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (\text{П2.3})$$

В цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$ , связанных с декартовыми координатами соотношениями:  $x = r \cos \varphi$ ,  $y = r \sin \varphi$ ,  $z = z$  ( $0 \leq r < \infty$ ,  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ,  $-\infty < z < \infty$ ), уравнение принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (\text{П2.4})$$

Если внутри тела имеется источник теплоты производительностью  $\Phi$  (количество выделяемой или поглощаемой теплоты в единицу времени в единице объема), то в правую часть уравнения теплопроводности следует добавить слагаемое  $\Phi/(c\rho)$ .

Если имеется стационарное поле температур, то левая часть уравнения теплопроводности обращается в нуль.

Чтобы решить уравнение теплопроводности, необходимо задать некоторые краевые (начальные и граничные) условия. В частности, следует знать распределение температуры внутри тела в некоторый момент времени, принимаемый за начальный. Обычно принимается равномерное распределение температуры в начальный момент времени:  $T(x, y, z, 0) = T_0 = \text{const}$ . Кроме того задаются одним из следующих граничных условий (или их комбинацией для разных участков поверхности), устанавливающих взаимодействие между поверхностью тела и окружающей средой: на поверхности задано распределение температуры (условие 1-го рода) или известен тепловой поток (условие 2-го рода); считается известным теплообмен между поверхностью и окружающей средой, чаще всего в форме закона Ньютона (условие 3-го рода); при соприкосновении твердых тел или твердого тела с жидкостью (температура соприкасающихся тел одинакова) имеет место равенство потоков теплоты (условие 4-го рода).

**Простые задачи теплопроводности.** Прежде всего, рассмотрим действие точечного теплового источника на полупространство. Такой источник является аналогом сосредоточенной силы для упругого полупространства (см. п. 3.1) в том смысле, что температурное поле, вызванное действием распределенного по поверхности и во времени источника может быть определено суммированием решений для точечного источника. Кроме того, такие решения для точечных источников представляют не только теоретический, но и определенный трибологический интерес. Известно, что контакт отдельных неровностей осуществляется по очень малым площадкам и в течение очень коротких

промежутков времени. Это позволяет оценивать температурные поля вне пятна контакта и для промежутков времени, превосходящих длительность его существования, используя сравнительно простые формулы для точечных источников, приведенные ниже.

Мгновенный точечный источник (рис. П2.2) есть некоторая идеализация, относящаяся к следующей ситуации:

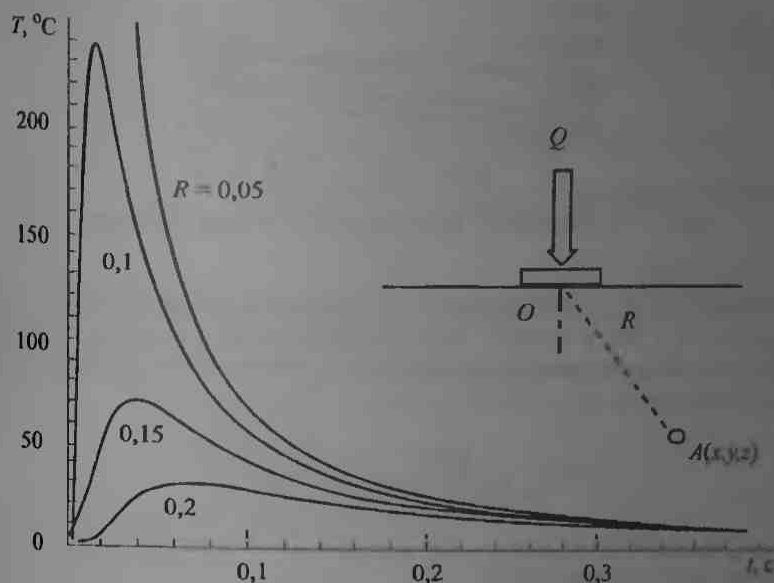


Рис. П2.2. Мгновенный точечный источник.

Пусть на поверхности полупространства, начальная температура  $T_0$  которого постоянна, выделяется конечное количество теплоты  $Q$  на очень малой площади (практически нулевой) в некоторый момент времени, принимаемый за начальный  $t = 0$ . Тогда температурное поле полупространства описывается следующим уравнением:

$$T = \frac{Q}{4\rho c(\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right), \quad (\text{П2.5})$$

где  $R$  — расстояние от рассматриваемой точки полупространства до начала координат, точки приложения источника.

Это решение уравнения (П2.2) можно найти практически в любом учебнике по теории теплопроводности или просто проверить его подстановкой. Оно показывает, что температура в любой точке тела возрастает от нуля до максимального значения, которое достигается в момент времени  $t = R^2/(6a)$ , и затем убывает до нуля (рис. П2.2).

Непрерывно действующий точечный источник (рис П2.3) моделирует ситуацию, при которой в некоторой точке выделяется теплота

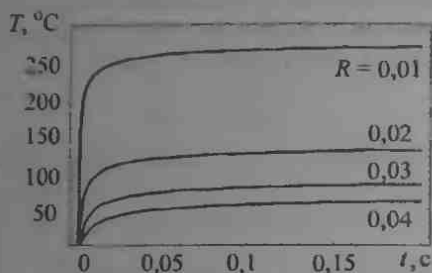


Рис. П2.3. Непрерывно действующий точечный источник

со скоростью  $q$ . Если эта скорость постоянна, то за малый промежуток времени  $(t, t + \Delta t)$  в точке  $O$  выделится  $dQ = q\Delta t$  теплоты. Согласно (П2.5), эта теплота приведет к повышению температуры полупространства на величину

$$\Delta T = \frac{q\Delta t}{4\rho c(\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right).$$

Интегрирование последнего соотношения дает температурное поле в полупространстве (рис П2.3):

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda R} \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{\sqrt{4at}}\right), \quad (\text{П2.6})$$

где  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$  — дополнительная функция ошибок

$\bar{R} = R/\sqrt{4at}$ . Формула (П2.6) показывает, что при  $t \gg R^2/(4a)$  вблизи источника устанавливается стационарное состояние с температурой  $T = q/(2\pi\lambda R)$ .

**Непрерывный движущийся точечный источник** (рис. П2.4). Пусть точечный источник мощности  $q$  движется со скоростью  $v$  по границе полупространства вдоль оси  $x$  (рис. П2.4, а).

Оценим температуру в произвольной точке полупространства  $A(x, y, z)$ , рассматриваемой в подвижной системе координат, связанной с источником. В неподвижной системе координат  $(x', y', z')$  тепловой источник в некоторый момент времени  $t'$  будет находиться в точке  $B(ut', a, 0)$ . За малый промежуток времени  $dt'$  он выделит  $dQ = qdt'$  теплота, пот рая через промежуток времени  $t - t'$  (т.е. в момент  $t$ )

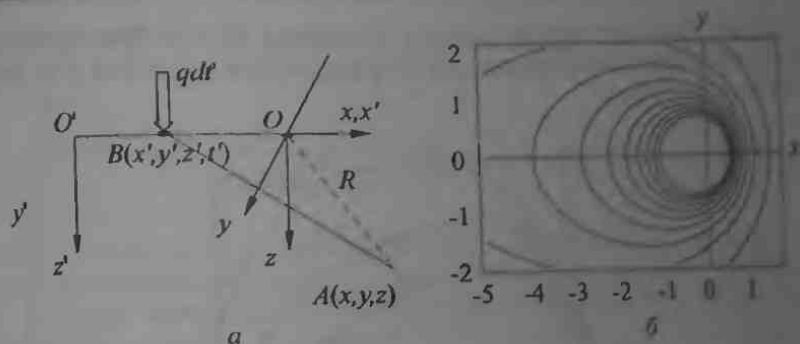


Рис. П2.4. Непрерывный движущийся точечный источник

вызовет в точке  $A$  приращение температуры, определяемое формулой (П2.5):

$$\Delta T(x', y', z', t) = \frac{q \Delta t'}{4\rho c(\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4a(t-t')}\right),$$

где  $R^2 = (x' - vt')^2 + y'^2 + z'^2$ . Суммируя по всем промежуткам времени от  $0$  до  $t$  и переходя затем к подвижной системе координат, получим после интегрирования

$$\begin{aligned} T &= \frac{q}{4\rho c(\pi a)^{3/2}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x' - vt')^2 + y'^2 + z'^2}{4a(t-t')}\right] \frac{dt'}{(t-t')^{3/2}} = \\ &= \frac{q}{4\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \left[ \exp\left(\frac{Rv}{2a}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{\sqrt{4at}} + \frac{v\sqrt{t}}{\sqrt{4a}}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(-\frac{Rv}{2a}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{\sqrt{4at}} - \frac{v\sqrt{t}}{\sqrt{4a}}\right) \right], \end{aligned}$$

где  $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ .

При  $t \rightarrow \infty$  получаем квазистационарное температурное поле, вызванное подвижным точечным источником:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{v}{2a}(x + R)\right].$$

Последняя формула показывает, что распределение температуры на поверхности полупространства имеет вид, представленный на рис. П2.4, б. Характерно, что впереди источника имеет место ступенчатое изотерм, т.е. наблюдается более высокий градиент, чем позади источника.

*Распределенный тепловой источник.* Обычно теплота при трении генерируется на площадках конечных размеров. Температурное поле нагреваемого тела находится суперпозицией решений от точечных ис-

точников. Так, для прямоугольного источника  $2b \times 2l$ , действующего на поверхности полупространства и движущегося вдоль оси  $x$  со скоростью  $v$ , получаем

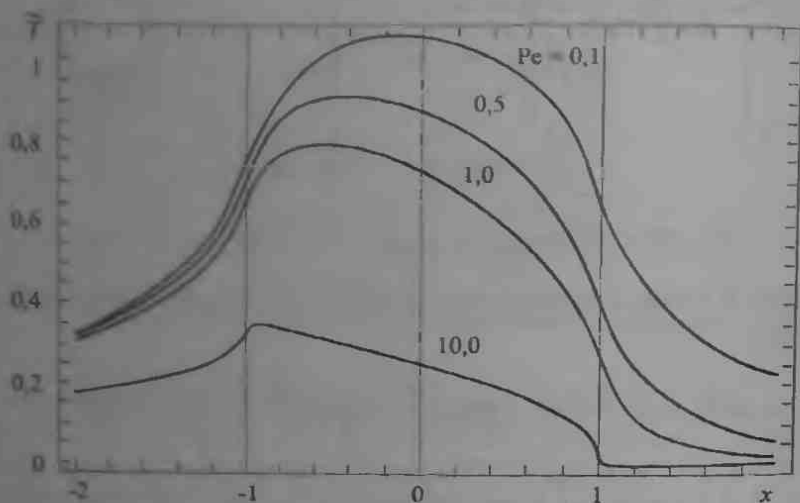


Рис П2.5. Влияние скорости квадратного источника теплоты на распределение средней поверхностной температуры

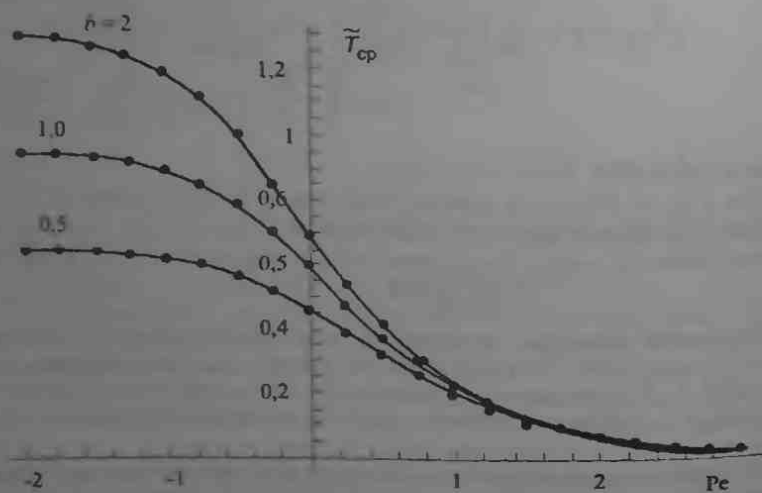


Рис П2.6. Влияние скорости на среднюю поверхностную температуру

$$\tilde{T} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^{2\sqrt{Fo}} \exp\left(-\frac{z^2}{u^2}\right) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+\bar{b}}{u}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-\bar{b}}{u}\right) \right] \times \\ \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{\bar{x}+1}{u} + \frac{1}{2}u\operatorname{Pe}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\bar{x}-1}{u} + \frac{1}{2}u\operatorname{Pe}\right) \right] du,$$

где  $\tilde{T} = T/(ql/\lambda)$ ,  $\operatorname{Pe} = vl/(2\alpha)$ ,  $Fo = at/\mu^2$ , а черта сверху означает, что данная величина нормирована характерным размером (рис П2.5).

Средняя поверхностная температура (см. рис П2.6) на площади источника находится по формуле

$$\tilde{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{4\bar{b}} \int_{-\bar{b}-1}^{\bar{b}} \int_{-1}^1 \tilde{T}(z=0) dy dx.$$



Приложение 3

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ И СТАНДАРТЫ  
ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

I. Техническая функция трибосистемы				
II. Рабочие переменные				
Тип движения:		Продолжительность работы $t$		
Нагрузка $F_n(t)$	Скорость $v(t)$	Температура $T(t)$		
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		
Другие рабочие переменные:			Местоположение:	
III. Структура трибосистемы				
Свойства элементов (начальные, конечные)	Трибоэлемент 1	Трибоэлемент 2	Смазка 3	Атмосфера 4
Обозначение элемента и материала				
Объемные свойства	Геометрия, размеры, объем			
	Химический состав			
	Физико-механические данные: твердость, вязкость, другие			
Свойства поверхности	Топографические данные		Другие данные:	
	Данные поверхностного слоя (если отличны от объемных)			
Площадь контакта			Трибологические взаимодействия:	
Площадь контакта	$\epsilon(1)$	$\epsilon(2)$		
Полный след износа				
Режим смазки:				
IV. Трибологические характеристики				
Изменение свойств элементов	Данные о трении (в зависимости от времени $t$ или расстояния $s$ )		Данные об износе (в зависимости от времени $t$ или расстояния $s$ )	
<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Другие характеристики (сопротивление контакта, вибрация, шум и т. п.):			Внешний вид изношенных поверхностей:	
<input type="text"/>			<input type="text"/>	

Рис. ПЗ.1. Карта данных испытаний трибосистемы

Т а б л и ц а ПЗ.1 Форма представление результатов испытаний, рекомендованных комитетом G2 ASTM

*Стандартный пример представления данных трибоиспытаний*

## НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА:

### СЕКЦИЯ 1.0. МЕТОД ИСПЫТАНИЙ

#### 1.1. Обозначение метода испытаний

- Метод испытаний по стандарту ASTM
- Модифицированный ASTM-метод
- Другой стандартизованный метод испытаний
- Модификация другого метода испытаний
- Нестандартизованный метод испытаний

#### 1.2. Исходная геометрия контакта (деталь сопряжения 1 — деталь сопряжения 2)

- Плоскость -- плоскость • Сфера — плоскость
- Цилиндр — плоскость • Царапанье или испытание с абразивом
- Криволинейная поверхность — криволинейная поверхность (неконформный контакт)
- Криволинейная поверхность — криволинейная поверхность (конформный контакт)
- Другая геометрия

#### 1.3. Условия испытаний

Нагрузка (Н) (укажите в кружке знак экспоненты)

Скорость (м/с)

Атмосфера: газ..... относительная влажность, %

Температура:

*Особые условия*

- Контролируемое атмосферное давление
- Контролируемое итоговое качество поверхности
- Другие специальные условия

#### 1.4. Режимы приработки (если стадия приработки рассматривается)

- Указанные в методике испытаний
- Задаваемые исследователем заранее
- Определяемые в процессе наблюдения за ходом испытаний

#### 1.5. Метод измерения силы трения

- Непрерывная регистрация аналогового или высокоскоростного цифрового сигнала на протяжении всего испытания
- Периодическое измерение (как часто...)
- Однократное измерение (когда...)

### СЕКЦИЯ 2.0. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

#### 2.1. Состав и особенности материалов

2.1.1. Элемент пары трения 1  
поверхностная обработка / покрытие  
другие особенности

2.1.2. Элемент пары трения 2  
поверхностная обработка / покрытие  
другие особенности

2.2. Связь на уровне разных материалов

- 2.2.1. Состояние вещества • газ • жидкость • твердое тело • смесь • другое
- 2.2.2. Описание

**СЕКЦИЯ 3.0. СООБЩЕНИЕ О ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ**3.1. Число испытаний

- число испытаний • среднее из  $n$  испытаний

3.2. Продолжительность испытания

- путь трения • количество шлюзов • время • другое

3.3. Классификация режима

- значение  $\tau$  установившегося режима • максимум + дисперсия • минимум — дисперсия
- установившийся режим не достигнут • наблюдаемый минимум • наблюдаемый максимум

Таблица П3.2 Стандарты СССР по методам триботехнической оценки

ГОСТ	Название документа
23 201-78	Метод испытаний материалов и покрытий на самонагревание возникающее с помощью центробежного ускорения
23 202-78	Метод определения коэффициента трения при ударе
23 203-78	Метод определения прочности адгезионной связи покрытий при трении
23 204-78	Метод оценки истирающей способности поверхности трения
23 205-79	Ускоренные рекуссивные испытания с термодинамическим флюоресцентным датчиком
23 207-79	Метод испытания материалов на ударно-абразивное изнашивание
23 208-79	Метод испытания материалов на изнашиваемость при трении и оценке образовавшихся абразивных частиц
23 210-80	Метод оценки фракционной теплостойкости материалов
23 211-80	Метод испытания материалов на изнашивание при фритинге и фритинг-абразиве
23 212-82	Метод испытания материалов на изнашивание при ударе в условиях низкого уровня тур
23 213-84	Метод оценки противокоррозийных свойств материалов
23 215-84	Экспериментальная оценка приработчиваемости материалов
23 216-84	Метод испытания материалов на трение и изнашивание при смешивании жидкостями и твердыми веществами
23 218-84	Метод определения энергоемкости при пластической деформации материала
23 219-84	Метод испытаний на изнашиваемость материалов и деталей турбомашин турбомашин
23 220-84	Метод оценки истирающей способности поверхностей восстановленных шин
23 221-84	Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных масел при трении
23 223-85	Метод определения триботехнических свойств материалов при взаимодействии с волокнистой массой
23 224-86	Метод оценки износоустойчивости восстановленных деталей
26 614-85	Материалы антифрикционные порошковые. Метод определения триботехнических свойств
426-77	Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении
6975-75	Кожа искусственная. Метод определения истираемости и сцепления шнуром
9188-75	Картон обувной. Метод определения истираемости во влажном состоянии
9210-77	Шкурки меховые. Метод определения устойчивости окраски к трению
9490-75	Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине
3778-78	Материал переплетный на бумаге с пленочным покрытием. Метод определения устойчивости к истиранию
10642-63	Кожа для низа обуви. Метод испытания подшивочной кожи на сопротивление истиранию
11279 8-83	Красители органические. Метод определения устойчивости окраски к воздействию абразивной пленки к сухому и мокрому трению
11629-75	Пластмассы. Метод определения коэффициента трения
12739-89	Полотна и изделия трикотажные. Метод определения устойчивости к истиранию
13869-74	Кожа хромовая для верха обуви. Метод определения устойчивости покрытия к мокрому трению
14090-68	Шкурки меховые. Метод определения устойчивости к истиранию
14340.10-69	Провода эмалированные круглые. Методы испытания межвитковой трещины изоляции на истирание
15967-70	Ткани льняные и полудлянные для спецодежды. Метод определения стойкости к истиранию по плоскости
16218 8-89	Изделия текстильно-галантерейные. Метод определения устойчивости к истиранию
16483.39-81	Древесина. Метод определения показателя истирания
16733-71	Ткани текстильные. Метод определения стойкости к истиранию на вальцах
21523.10-88	Древесина модифицированная. Метод определения истирания
23509-79	Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении по жесткой поверхности
25691-83	Кожа искусственная и синтетическая для одежды. Метод определения коэффициента трения
27492-87	Материалы электроизоляционные полимерные, пленочные и листовые. Метод определения коэффициента трения
27820-88	Метод определения стойкости защитно-декоративных покрытий к истиранию
28169-89	Шины пневматические. Метод определения износоустойчивости шин при дорожных испытаниях
28976-91	Кожа искусственная. Метод определения устойчивости к истиранию
29068-91	Рукава резиновые. Определение износоустойчивости наружной поверхности
29104.17-91	Ткани технические. Метод определения стойкости к истиранию по плоскости

Таблица ПЗ.3. Испытания на трение по стандарту ASTM ([2])

Материалы	Комментарии	Код ASTM (примечание)
Спеченный металл	Нагретый тормозной барабан (сухие трения)	B 460 M
Спеченный металл	Тормозной барабан со смазкой	B 461 M
Спеченный металл	Сухое сцепление, маховик	B 526 M
Трифит	Материалы для уплотнений	C 808 G
Втулка	Испытания электроизоляции, наклонная плоскость	D 202 M
Листовые	Пять устройств для испытаний листовых материалов и пленок	D 1894 M
Машина для натирки пола	Машина Джеймса, статическое испытание для покрытий пола	D 2047 M
Дорожные	Ускоренный ползун по обработанному полу	D 2394 M
Вал	Салазочное испытательное устройство	D 2534 M
Металл, керамика, пластик	Вал — частичный вкладыш (машина Фалекс)	D 2714 M
Пластинки	Трибометрический маятник, листы, пленки	D 3028 M
Металл — пряжа	Обернутый пряжей барабан, текстильные машины	D 3108 M
Фибра	Горизонтальная плоскость, гофрированная, и твердая доска	D 3247 M
Фибра	Наклонная плоскость, гофрированная, и твердая доска	D 3248 M
Ткань	Наклонная плоскость, коэффициент статического трения	D 3334 M
Прядь — пряжа	Закрученная или намотанная на шпульку нитка	D 3412 P
Машина для натирки пола	Платформа поверхности пола для испытаний	D 4103 M
Дорожное покрытие	Портативный маятниковый прибор	E 303 M
Дорожное покрытие	Лабораторное испытание на стенде	E 510 P
Дорожное покрытие, шины	Измеритель коэффициента трения для боковой силы	E 707 M
Ребри, ткань	Пробуксовка шины, маятниковый прибор	F 489 M
Ребри, кожа	Каблук и подошва обуви, машина Джеймса	F 695 P
Ребри, кожа	Слипки данных, полученных на машине Джеймса	F 732 P
Металл, керамика, пластик	Возвратно-поступательное движение по схеме палец — плоскость, протезы	F 732 P
Смазочные материалы, испытания, связанные с трением		
Пластинные смазки	Подшипники с фреттингом или возвратно-вращательным движением	D 2509 M
Пластинные смазки	Вал — частичный вкладыш, тест по Тимкену, свойства при сверхвысоких давлениях	D 2716 M
Талочные смазки	Палец — плоскость, в вакууме	D 4170* M
Смазки	Формование из металлических листов, волоочильное при- способление	D 4173 P

Примечание. М — стандартизованный метод, G — методические указания, P — рекомендуемая практика.

Т а б л и ц а П 3.4 Испытания на износ по стандарту ASTM

Материалы	Комментарии	Код ASTM	
		Символ	Материал
Твердые сплавы	Абразивная суспензия, плоскость - колесо	B 611	M
Минеральная композиция	Стойкость к дроблению шаровой мельницы	C 121	M
Бетон	Пескоструйная обработка	C 418	M
Керамика (фарфор, эмаль)	Демонстрация машины Национального бюро стандартов США	C 418	M
Керамическая плитка	Огнеупорные блоки	C 301	M
Минеральная композиция	Стойкость к дроблению	C 325	M
Огнеупорный кирпич	Струйная эрозия при комнатной температуре	C 704	M
Бетон	Три машины: абразивное изнашивание, трение скольжения, изнашивание при ударе	C 776	M
Углеродистый графит	Данные для испытания уплотнений	C 808	G
Бетон	Сверильный станок, вращающийся напильник	C 944	M
Органические покрытия	Образцы красок, лаков, подпруг при изнашивании струей абразива	D 658	M
Органические покрытия	Падающий песок/карбид кремния - образцы лаков и красок	D 965	M
Органические покрытия	Изнашивание покрытий полов - см. D 658, D 965	D 1395	M
Резина, кожа	Каблуки и подошвы обуви, барабанная абразивная машина	D 1630	M
Металл, керамика, пластмассы	Вал - частичный вкладыш	D 2714	M
Текстиль	Изнашивание одежды	D 3911	M
Металл	Испытание на машине Фалекс с упорной шайбой для жестких условий самосмазывания	D 3702	M
Текстиль	Абразивная износостойкость	D 3884	M
Текстиль	Трение при изгибе переплетенных тканей	D 3885	M
Текстиль	Трение переплетенных тканей по выпуклой диафрагме	D 3886	M
Текстиль	Истирание колеблющимся цилиндром	D 4157	M
Текстиль	Изнашивание абразивом при вращении (машина Шифера)	D 4158	M
Органические покрытия	Изнашивание покрытий полов (машина Тейбера)	F 310	M
Изоляция	Испытание с вращающимся барабаном для покрытий трубопроводов	G 8	M
Металл, керамика, пластмассы	Испытание в вибрирующей накаточной улитке	G 33	M
Текстиль	Изнашивание сплетенных лент, бескабели, сплетенные лентами	G 56	M
Металл	Поток сухого песка, вращающееся резиновое колесо	G 55	P
Металл, пластмассы	Эрозия струями жидкости, каплями, прядильная машина	G 73	P
Металл	Гидроабразивное изнашивание, погружной коловратно-поступательный притир	G 75	M
Металл, керамика, пластмассы	Эрозия, частицы, падающие на плоский абразив	G 78	P
Металл, керамика, пластмассы	Изнашивание при трении скольжения, шар - частичный вкладыш (см. D 2714)	G 77	P
Металлы, композиты	Пластина, моделирующая изнашивание в шкворной заделке	G 81	P
Металл	Скрещенные цилиндры	G 83	M
Пластинчатые смазки	Четырехшаровая машина, противонаправленные скольжения	D 2396	M

## Продолжение таблицы ПЗ.4

Материалы	Комментарии	Код ASTM	
		Примечание	
Пластиковые шпатель	Изготовлены по стандарту Тивенто, но — частичный делением, свойства при сжимающей нагрузке.	D 2508	M
Пластиковый шпатель	Четырехшариковая машина, свойства при сжимающей нагрузке.	D 2596	M
Пластиковые шпатель	Вел — испытаний в лаборатории, противокоррозийные свойства.	D 3704	M
Пластиковый шпатель	Испытание по Фидриу на фракционное измельчение и протекание.	D 4170	M
Стекло шпатель	Австрия, лист в армированной алюминиевой пленке.	D 2510	M
Стекло шпатель	Вспрей и покрытие стальной панелью (гипсовой узор).	D 2511	M
Стекло шпатель	Стальной шпатель в машине с клиновидным вырезом, оптическая способность.	D 2625	M
Стекло шпатель	Кольцо — Алл.	D 2981	M
Железные шпатель	Нагруженность способность зубчатых колес, машина Райдере.	D 1947	M
Железные шпатель	Стекло шпатель в кольце с клиновидным вырезом, испытание на сжатие.	D 2670	M
Железные шпатель	Стекло шпатель в кольце с клиновидным вырезом, оптическая способность при сжимающей нагрузке.	D 2670	M
Железные шпатель	Четырехшариковая машина, противокоррозийные свойства.	D 2596	M
Пористый железо	Изготовлены детали циркуляционных насосов.	D 2551	P
Пористый железо	Изготовлены детали циркуляционных насосов.	D 2882	M

Примечание: M — стандартный метод, G — методические указания, P — рекомендуемая литература.

## Предметный указатель

- Адгезия 18, 144  
 Адсорбция 64  
 — физическая 64  
 — химическая 64  
 Балитты 240  
 Волнистость 19, 20  
 Выращивание 152  
 Влажность 61  
 — динамическая 61  
 — кинематическая 61  
 — объемная (вторая) 64  
 Градиент температуры 335  
 Грузоподъемность подшипника 308  
 — — базовая динамическая 308  
 Долговечность подшипника 308  
 — — базовая номинальная 308  
 Заедание 159, 321  
 Закон Майера 86  
 — трения 46  
 — Фурье 351  
 Изнашивание 53, 150, 216  
 — абразивное 152, 154–159, 334  
 — адгезионное 152, 159, 216  
 — гидробразивное (газобразивное) 152, 172, 368  
 — гидрозрозионное (газоэрозионное) 152, 217, 216  
 — кавитационное 152, 173, 217, 334  
 — коррозионное 152, 165–167  
 — коррозионно-механическое 152, 217  
 — механическое 152, 175  
 — окислительное 152, 165, 208, 217  
 — при скольжении 152, 159, 161  
 — при фреттинге 152, 165, 167  
 — при фреттинге-коррозии 152, 167, 217  
 — усталостное 152, 162–165, 217  
 — электрокоррозионное 152, 153, 173  
 — эрозионное 152, 153, 170–173, 334  
 — химическое 152, 169  
 Износ катастрофический 55  
 Износостойкость 150, 235, 243  
 Индекс пластичности 105–107  
 Инженерия поверхности 273  
 Интенсивность изнашивания 150, 163, 167, 171, 338  
 — тепловыделения 128, 296  
 Испытания модельные 205  
 — вальные 205  
 — стандартные 205  
 — ускоренные 205  
 Источник теплоты мгновенный точечный 353  
 — — непрерывно действующий точечный 354  
 — — непрерывный движущийся точечный 354, 355  
 — — полосовой 181  
 — — прямоугольный 131, 356  
 — — распределения 255  
 Карта износа 162, 208  
 — по 207  
 Качение свободное 136  
 — с проскальзыванием 136  
 Керамика оксидная и нитридная 242  
 — оксид алюминия 242  
 Клин масляный 63  
 Контакт герцевский 76, 80  
 — линейный 73  
 — пластический 83, 99, 119  
 — точечный 73  
 — упругий 99, 102, 116  
 — упругий с адгезией 94  
 — упругопластический 83  
 — шероховатый пластический 105  
 — шероховатый упругий 97  
 — электрический 240, 323  
 Коэффициент взаимного передергива 129  
 — гистерезисных потерь 116  
 — износа 57  
 — распределения тепловых потоков 131  
 — сопротивления качению 137  
 — трения качения 136, 137  
 — трения скольжения 323  
 Кривая Герси-Штрибека 62, 294  
 — опорная 24  
 Критерий перехода от упругого контакта к пластическому 103  
 — Тейбора 95  
 Макроотклонение 13  
 Масло базовое 255, 256  
 — минеральное 59, 256  
 — моторное 256  
 — синтетическое 256  
 — трансмиссионное 256  
 Микропроскальзывание по Рейнгольду 141  
 — по Хизкоуту 142  
 Микротрибосистема 65  
 Микроэлектромеханическая система (МЭМС) 67  
 Модель Боудена-Тейбора 115  
 — Грениуда-Вилламанна 101



- Демкина 97
- Доригина-Муллера-Торова 88
- Джонсона-Кендалла-Роберта 90
- Молярное давление поверхности 273
- Мониторинг изнашивания 216
- Муфта 336
- Надежность подшипника 307
- Наплавка 274
- Неустойчивость, вызванная трибохимическими реакциями 134
  - обусловленная температурной зависимостью коэффициента трения 134
  - связанная со сменой режимов трения 134
  - термоупругая 133
- Параметры шероховатости
  - асимметрия 33
  - высота неровностей профиля по десяти точкам 24
  - глубина скалывания 342
  - наибольшая высота неровностей профиля 24
  - относительная опорная длина профиля 24
  - среднее арифметическое отклонение профиля 23
  - среднее квадратичное отклонение профиля 341
  - средний радиус кривизны вершины выступа 24
  - средний шаг острых выступов профиля 24
  - средний шаг неровностей профиля 24
  - степень заполнения профиля 342
  - энтальпия 33
- Передача зубчатая 200
- Питтинг 163
  - фактическая 50
- Повторность изотермическая 350
- Подшипник качения двухрядный со сферическими роликами 306, 311
  - - - - - однорядный с коническими роликами 304, 311
    - - - - - роликовый 137, 302
    - - - - - с литыми роликами 206, 311
    - - - - - с иглообразными роликами 306, 311
    - - - - - с цилиндрическими роликами 307, 311
      - - - - - шариковый 311
      - - - - - двойной упорный 304
      - - - - - двухрядный самоустанавливающийся 304
      - - - - - двухрядный упорный 304
      - - - - - однорядный радиально-упорный 304
      - - - - - однорядный радиальный 304
  - - - - - однорядный упорный 304
  - - - - - упорный 304
- Подшипник скольжения 291
  - - - - - радиально-упорный 291
  - - - - - радиальный 291
  - - - - - упорный 291
- Полимер термопластичный 244
  - термореактивный 244
  - эластомер 244
- Предварительное смещение 46
- Приработка 55
- Присадки
  - антивспениватели 263
  - антиоксиданты 265
  - вязкостные 266
  - депрессанты 266
  - дезмульгаторы 266
  - диспергирующие 268
  - для сверхвысоких давлений 264
  - жидкокристаллические 271
  - ингибиторы коррозии 266
  - модификаторы трения 268
  - моющие 264
  - противоизносные 264
  - эмульгаторы 266
- Приспосабливаемость 146
- Распределение Гаусса 27, 103
  - давления по Герцу 91
  - Найака 27
  - Релея 27, 103
- Связь Ван-дер-Ваальсова 13
  - ионная 12
  - ковалентная 12
  - металлическая 12
- Смазка гидродинамическая 64
  - граничная 64
  - пластичная (консистентная) 262
  - твердая 269
  - упругогидродинамическая 200
- Составляющая трения адгезионная (молекулярная) 51
  - - - - - вследствие упругого гистерезиса 116
  - - - - - деформационная (механическая) 52
  - - - - - пропахивающая 115
- Сплавы алюминиевые 240
  - железа 235
  - на основе меди 240
  - цинковые 240
- Сталь 235
- Шероховатость 21
- Твердость 57, 104
- Температура вспышки 66
  - объемная 66
  - поверхностная 66
- Текстура 29

- Теория длинного подшипника 197  
— короткого подшипника 193
- Термотрибология 127, 128
- Течение Куэтта 182  
— Пуазейля 183
- Тормоза 334
- Трение 46  
— верчения 108  
— граничное 108  
— движения 108  
— жидкостное 108  
— качения 108  
— покоя 126  
— скольжения 109  
— сухое (без смазочного материала) 109
- Третье тело 115
- Трибодиагностика 176, 216
- Уплотнение 327  
— бесконтактное 328  
— вязкостное 330  
— герметик 329  
— кольцевое резиновое 330  
— контактное 329  
— лабиринтное 330  
— механическое торцовое 331  
— поршневое кольцо 330  
— прокладка 328  
— радиальное манжетное 330  
— сальниковое 329  
— щелевое 329
- Упрочнение 16  
— деформационное 284  
— трансформационное 285
- Упругий гистерезис 116
- Уравнение Арчара 67  
— Герца 89  
— Денширда-Джонса 87  
— Навье-Стокса 180  
— Рейнольдса 190  
— Фурье 351
- Число Герца 62  
— Гумболя 188  
— Зоммерфельда 199  
— Пекле 131  
— Рейнольдса 190  
— Фурье 357
- Чугун 237
- Шероховатость 21  
— равновесная 14
- Формула Баруса 178  
— Герца 93  
— Ньютона  
— Петрова 187  
— Рейнольдса 189
- Фреттинг 167  
Фреттинг-усталость 167  
Фрикционная усталость 162  
Фрикционный перенос 160
- Эрозия жидкостная 172  
— дождевая 172
- Эффект Иоффе 16  
— Ребиндера 15  
— Роско 16

Учебно-справочное пособие

*МЫШКИН Николай Константинович*

*ПЕТРОКОВЕЦ Марк Иосифович*

**ТРЕНИЕ, СМАЗКА, ИЗНОС. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТРИБОЛОГИИ**

Редактор *А.Г. Мордвинцев*

Оригинал-макет: *О.В. Вальберг*

Подписано в печать 22.03.07. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 23. Уч.-изд. л. 25,3. Тираж 800 экз.  
Заказ № 889

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: [fizmat@maik.ru](mailto:fizmat@maik.ru), [fmisale@maik.ru](mailto:fmisale@maik.ru);

<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ООО «Чебоксарская типография № 1»  
428012, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 978-5-9121-0821-9



9 785922 108249

