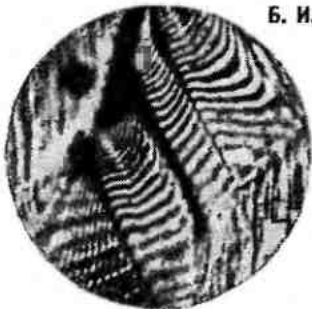


# Качество поверхности и трение в машинах



**Б. И. КОСТЕЦКИЙ, Н. Ф. КОЛЕСНИЧЕНКО**

**Качество  
поверхности  
и трение  
в машинах**





6П5.2  
К72  
УДК 532.526

**Качество поверхности и трение в машинах.** Костен-  
кий Б. И., Колесниченко Н. Ф. «Техника», 1969,  
216 стр.

Основным содержанием книги являются оригинальные дан-  
ные об изменениях качества поверхности деталей машин в  
связи с различными условиями эксплуатации.

Рассмотрены параметры, определяющие исходное, эксплуа-  
тационное и остаточное состояние поверхностей и поверхно-  
стных слоев деталей машин, работающих в условиях трения,  
смазки и износа. Даны основные представления о геометри-  
ческих характеристиках поверхностей, физико-химико-меха-  
нических свойствах поверхностных слоев и напряжениях в  
них, о субмикрорельефе поверхностей, обусловленном несо-  
вершенствами кристаллического строения металлов и спла-  
вов. Расширены представления о защитных вторичных  
структурах на поверхностях трения. Освещены вопросы теори-  
и внешнего трения. Введены представления о физическом  
рельефе поверхностей трения. Представлена классификация  
рабочего рельефа — поверхностей трения деталей машин.  
Даны зависимости формирования сил трения в связи с ка-  
чеством поверхностей трения. Рассмотрены вопросы теории  
антифрикционности, фрикционности и износостойкости, свя-  
занные с характеристиками качества поверхностей деталей  
машин.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников,  
занимающихся конструированием, изготовлением и эксплуа-  
тацией машин.

Табл. 22, илл. 146, библи. 213.

Рецензент докт. техн. наук *И. С. Воронцын*

Редакция литературы по машиностроению и транспорту  
Заведующий редакцией инж. *М. А. Василенко*

3-13-3  
129-69М

РАЗВИТИЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ГЛАВНЫМИ ТЕНДЕНЦИЯМИ КОТОРОГО  
являются увеличение скоростей и рост нагрузок при рабо-  
те машин, требует постоянного повышения надежности,  
долговечности и точности работы машин и приборов.  
НАДЕЖНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ МАШИН В ПЕР-  
вую очередь зависят от качества поверхностей их деталей.  
КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ОКАЗЫВАЕТ РЕШАЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ХА-  
РАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ, ИЗНОСА, РАЗВИТИЕ УСТАЛО-  
СТНЫХ ЯВЛЕНИЙ, КОРРОЗИЮ И ДРУГИЕ ПРОЦЕССЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН.

ВОПРОСАМ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ИХ ФОРМЕ,  
ВОЛНИСТОСТИ, СТЕПЕНИ ШЕРОХОВАТОСТИ, ТВЕРДОСТИ, ТЕПЛОСТОЙ-  
КОСТИ, ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ И НАПРЯЖЕННОМУ СОСТОЯНИЮ  
УДЕЛЯЕТСЯ БОЛЬШОЕ ВНИМАНИЕ. В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ  
БЫЛИ РАЗВИТЫ СТРОИТЕ РАБОТЫ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЕОМЕТРИИ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В СВЯЗИ С ПРОЦЕССАМИ ТЕХНОЛО-  
ГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. РАЗРАБОТАНЫ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ПОВЕРХНО-  
СТЕЙ МАКРОСКОПИЧЕСКОГО И МИКРОСКОПИЧЕСКОГО ПОРЯДКА.  
КРУПНЫЕ УСПЕХИ ДОСТИГНУТЫ ТАКЖЕ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХ-  
НОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН. НАРЯДУ С ИЗВЕСТНЫМИ МЕТОДАМИ УПРОЧНЕНИЯ — ТЕР-  
МИЧЕСКИМИ (ТОКН ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ), ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИМИ  
(ЦЕМЕНТАЦИЯ, АЗОТИРОВАНИЕ), ПРИМЕНЕНИЕМ ГАЛЬВАНИЧЕ-  
СКИХ ПОКРЫТИЙ (ХРОМИРОВАНИЕ), МЕХАНИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ  
(НАКЛЕП) — ВОЗНИКАЮТ И РАЗВИВАЮТСЯ НОВЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧ-  
НЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН. ТАКИМИ МЕТОДА-  
МИ ЯВЛЯЮТСЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ, ОБЛУЧЕНИЕ ПОТО-  
КОМ ИОНОВ, КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ (СУЛЬФОЦИАНИ-  
РОВАНИЕ) И ДР. В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
УСТАНОВИЛОСЬ ПОНЯТИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ.

В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ НАРЯДУ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ И ЗАДАН-  
НЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАШИН,  
НАЧИНАЮТ ОСУЩЕСТВЛЯТЬСЯ РАБОТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТИ НЕПОСРЕДСТВЕННО ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН.  
В ЭТИХ РАБОТАХ ОСОБЕННО ЭФФЕКТИВНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ЯВЛЯЕТ-  
СЯ СОЗДАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТЯХ  
ТРЕНИЯ ЗА СЧЕТ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИСАДОК К СМАЗОЧНЫМ МАСЛАМ  
И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИХ С МЕТАЛЛОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ В  
ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ТРЕНИИ.

С РАЗВИТИЕМ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О КАЧЕСТВЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОРГА-  
НИЧЕСКИ СВЯЗАНО РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ, ТЕОРИИ  
АНТИФРИКЦИОННОСТИ, ФРИКЦИОННОСТИ, ПРИРАБОТКИ И ИЗНОСО-  
СТОЙКОСТИ В МАШИНАХ.

УСПЕХИ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И, В ЧАСТНОСТИ, ТЕОРИИ НЕСОВЕРШЕНСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ, УСПЕХИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ, ХИМИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ОТКРЫВАЮТ БОЛЬШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВСЕХ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПРОБЛЕМОЙ ТРЕНИЯ, СМАЗКИ И ИЗНОСА МЕТАЛЛОВ.

ВОПРОСЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ В ДАННОЙ РАБОТЕ РАССМОТРЕНЫ С ПОЗИЦИИ АНАЛИЗА ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ТЕОРИИ НЕСОВЕРШЕНСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ (ТЕОРИИ ДИСЛОКАЦИИ), ТЕОРИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ СРЕД. ОСОБОЕ ВНИМАНИЕ УДЕЛЕНО ИЗУЧЕНИЮ РАЗВИТИЯ ТОПОГРАФИИ НАГРУЖАЕМЫХ И ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, РЕЛЬЕФ НА КОТОРЫХ ВОЗНИКАЕТ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗВИТИЯ НЕСОВЕРШЕНСТВ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН РАССМОТРЕНО В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМОМ УСЛОВИЯМИ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ, И В ОСТАТОЧНОМ СОСТОЯНИИ; ИЗУЧЕН РАБОЧИЙ РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КОНКРЕТНЫХ МАШИН И ДАНА ЕГО КЛАССИФИКАЦИЯ.

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ИСХОДНОМ, РАБОЧЕМ И ОСТАТОЧНОМ СОСТОЯНИИ РАССМОТРЕНО В СВЯЗИ С ГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ФИЗИКО-ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ И НАПРЯЖЕНИЯМИ В НИХ. ИЗУЧЕНА КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ, ОБОСНОВАНЫ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ. ДАНА ТРАКТОВКА ЯВЛЕНИЙ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ, ОПИРАЮЩАЯСЯ НА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА. РАССМОТРЕНЫ ВОПРОСЫ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СИЛ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ.

ОТЗЫВЫ И ПОЖЕЛАНИЯ ПРОСИМ НАПРАВЛЯТЬ ПО АДРЕСУ: КИЕВ, 4, ПУШКИНСКАЯ, 28, ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА».

● — Глава 1.



## ПОНЯТИЕ О КАЧЕСТВЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Решение основных задач износостойкости, антифрикционности и фрикционности деталей машин во многом зависит от качества их рабочих поверхностей.

Понятие о качестве поверхности включает данные о геометрии поверхности, механических, физических и химических свойствах тонких поверхностных слоев и напряжениях в них.

Отклонение реальной поверхности изделий от идеальной геометрической плоскости связано с наличием неровностей. Эти неровности могут быть макро-, микро- и субмикрogeометрического порядка. Природа образования их различна. Главными источниками макро- и микроскопических неровностей (нерегулярные отклонения формы, волнистость, микрорельеф) поверхности являются окончательные операции механической обработки. Возникновение субмикроскопических неровностей поверхности зависит от внутреннего строения твердых тел и его несовершенств.

Механические, физические и химические свойства тонких поверхностных слоев определяются исходными характеристиками материала, деформациями, возникающими при контактировании, физико-химическим действием рабочих сред и температурой. Геометрические параметры поверхности детали и состояние металла в поверхностном слое взаимно связаны.

# 1. Основные характеристики качества поверхности

## Геометрия поверхности

Особенностью внешнего трения твердых тел является дискретность механического контакта сопряженных поверхностей. При трении несмазанных поверхностей и при наличии несовершенной (граничной) смазки взаимодействие поверхностей осуществляется не по всей номинальной (кажущейся) площади соприкосновения, а в ряде изолированных друг от друга площадок контурного контакта, сумма точек фактического контакта внутри которых составляет площадь фактического или истинного контакта.

В связи с дискретностью контакта при анализе взаимодействия поверхностей при внешнем трении различают [22, 88]:

1) номинальную (кажущуюся) площадь контакта  $S_n$  — геометрическое место всех возможных фактических площадок контакта, ограниченную размерами и формой соприкасающихся деталей;

2) контурную площадь контакта  $S_k$ , образованную деформацией локальных поверхностных объемов тел; формирование контурной площади обусловлено макро-неровностями соприкасающихся поверхностей и нагрузкой;

3) фактическую (истинную) площадь контакта  $S_f$ , представляющую собой сумму малых площадок физического контакта тел. По существующим представлениям, фактическая площадь контакта является функцией геометрического очертания отдельной неровности и приходящейся на нее нагрузки [88].

Формирование физического, а также истинного контакта существенным образом связано с наличием субмикрорельефа (физического рельефа), развитие которого обусловлено внутренним строением твердых тел, его несовершенствами, деформациями локальных поверхностных объемов металла и физико-химическим действием рабочих сред в зоне контакта [58, 59, 61, 70].

Схема контакта двух шероховатых поверхностей показана на рис. 1.

При всех условиях внешнего трения номинальная (кажущаяся) площадь контакта всегда больше контурной, которая, в свою очередь, больше площади фактического контакта:

$$S_n > S_k > S_f. \quad (1)$$

Явления внешнего трения, очевидно, связаны с непосредственным фактическим контактом поверхностей, поэтому сила внешнего трения всегда будет пропорциональна площади фактического контакта, с которым всегда будут связаны истинные напряжения локальных объемов поверхностных слоев, а также деформация и величина износа. Степень дискретности контакта, т. е. отношение  $S_f$  к  $S_n$ , определяется в большой мере геометрическими параметрами сопрягаемых поверхностей. Из этого ясна роль геометрии поверхности в процессах трения и очевидна необходимость изучения всех ее параметров.

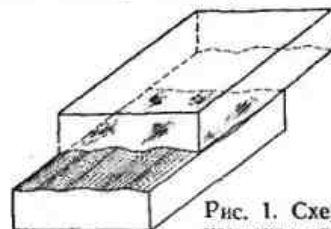


Рис. 1. Схема контакта двух шероховатых поверхностей.

Макрогеометрия — это отклонение геометрии всей детали и неровности геометрии больших участков поверхности.

Предметом микрогеометрии является характеристика формы и размеров поверхностных неровностей, расположенных внутри квадрата со стороной порядка одного или нескольких миллиметров [26].

Субмикрогеометрия характеризует особый вид неровностей, механизм возникновения которых связан с внутренним строением металла и его несовершенством. Субмикроскопический рельеф рассматривается на участках поверхности площадью от одного до нескольких квадратных микрон. По природе образования несовершенства строения поверхности макро- и микроскопического порядка, как правило, связаны с технологией изготовления, в частности — с механической обработкой. Изменить макро- и микрогеометрию в эксплуатации можно в период приработки и при патологических недопустимых видах износа.

Геометрические несовершенства строения поверхности субмикроскопического порядка имеют другую природу,

их возникновение связано с внутренним строением материала и наличием несовершенств тонкой структуры. К этому виду несовершенств геометрии относится субмикрорельеф, который существует при всех условиях обработки металлов, развивается и изменяется при всех условиях нагружения поверхностей в эксплуатации. Большое влияние на геометрические характеристики поверхности имеет рабочая среда в зоне контакта, причем это влияние особенно велико и может быть определяющим для неровностей третьего порядка — субмикрорельефа.

Объективная оценка геометрических параметров поверхности металла, и в частности деталей машин, должна включать оценку макро-, микро- и субмикрорельефа с учетом природы и механизмов образования геометрических несовершенств, т. е. с разделением на составляющие, вызываемые механической обработкой, внутренним строением и нагружением при эксплуатации.

В настоящее время разработана и сформирована автономная область технических знаний о макро- и микрогеометрии поверхностей деталей машин, получаемых при окончательной технологической обработке; составлены классификация качества поверхности по классам чистоты и соответствующие стандарты (ГОСТ 2789—59 и ГОСТ 2940—63) [16, 17, 23, 94, 110].

Единичные, не повторяющиеся регулярно, макронеровности представляют собой отклонения поверхности от номинальной формы всей детали — конусность, эллиптичность, бочкообразность, корсетность для цилиндров, неплоскостность, выпуклость, вогнутость для плоскостей и др. Эти виды неровностей измеряются и нормируются в заводских условиях. Особый вид неровностей представляет волнистость. Под волнистостью следует понимать совокупность периодических, более или менее регулярно повторяющихся и близких по размерам чередующихся возвышений и впадин, образующих неровности с расстоянием между ними значительно большим, чем у микронеровностей поверхности [26]. Форма волн близка к синусоиде. Фотография поверхности, волнограмма и схема поверхности при наличии волнистости показана на рис. 2. Волнистость связана с неравномерностью процесса резания при обработке металлов, вследствие чего возникают колебания — вибрации станка, изделия и режущего инструмента. Механизм возникновения вибраций при реза-

нии металлов изучали многие исследователи. Вибрации при резании связаны с процессом трения стружки о режущий инструмент, наличием нароста и его периодическим срывом, недостаточной и переменной жесткостью системы станок — инструмент — изделие, неуравновешенными массами вращающихся деталей и др. [26].

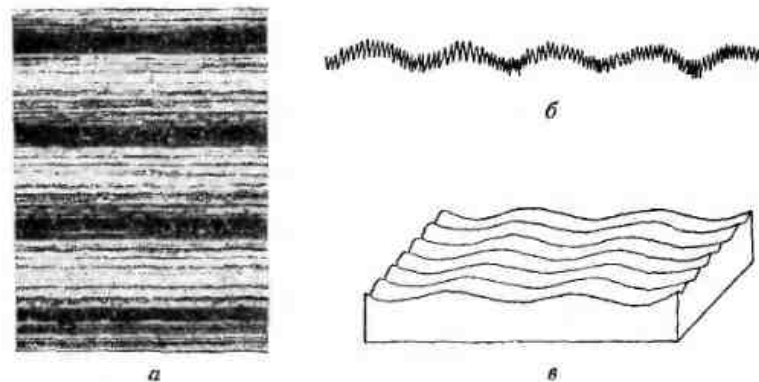


Рис. 2. Поверхность, образованная точением при наличии волнистости: а — вид в плане,  $\times 100$ ; б — волнограмма; в — схема поверхности.

Образование волнистости поверхности зависит от многих причин и далеко не так изучено, как образование микрошероховатостей. Этим параметром геометрии поверхности не всегда удается управлять в практике.

Образование микронеровностей поверхности обусловлено взаимодействием режущего инструмента с обрабатываемым изделием — процессом снятия стружки. Различают продольную и поперечную шероховатости, учитывают направленность следов обработки [26]. На величину микронеровностей при обработке режущим инструментом оказывают влияние следующие факторы:

- режимы резания — (подача и скорость);
- упругая и пластическая деформации обрабатываемых материалов;
- геометрическая форма режущего инструмента;
- жесткость системы станок — изделие — инструмент и связанные с ней вибрации [23].

П. Е. Дьяченко с сотрудниками, выполнившие фундаментальные исследования в области изучения геометрии

ческих характеристик поверхности после технологической обработки [23, 26, 94], получили следующую зависимость для оценки микрогеометрии поверхности [23]:

$$H_{\max} = H_p + H_{\text{пл}} + H_{\text{л}} + H_{\text{упр}} + H_{\text{цар}} + H_{\text{ж}}. \quad (2)$$

В эту формулу входят доли общей высоты неровностей обрабатываемой поверхности, зависящие от основных геометрических и физических причин:

$H_p$  — вычисляемая по форме вершины режущего инструмента и продольной подаче;

$H_{\text{пл}}$  — получающаяся за счет пластической деформации металла перед лезвием инструмента (деформированная зона в процессе резания, остатки которой в виде нароста на лезвии наблюдаются после прекращения резания);

$H_{\text{л}}$  — создаваемая шероховатостью лезвия инструмента, т. е. линии пересечения двух режущих граней, которые в известной мере отпечатываются на обрабатываемой поверхности;

$H_{\text{упр}}$  — получающаяся за счет упругого восстановления металла после прохода режущего инструмента;

$H_{\text{цар}}$  — создаваемая царапанием обрабатываемой поверхности отходящей стружкой, которая не всегда помещается в промежутках между зубьями многолезвийного инструмента (развертки, протяжки, фрезы, зенкеры, сверла и т. д.), а также лезвием выводимого из отверстия инструмента;

$H_{\text{ж}}$  — получающаяся за счет недостаточной жесткости системы станок — инструмент — изделие.

Каждая из причин, составляющих зависимость (2), была детально изучена в работах П. Е. Дьяченко и его сотрудников [23, 26, 94]. Эти работы составили основу науки о геометрическом качестве поверхности деталей машин, были положены в основу ГОСТ и многих нормалей по чистоте поверхности. Обширная система методов изучения геометрических параметров макро- и микропрофиля обработанных поверхностей и большое количество приборов разработаны В. П. Линником, Б. М. Левинным, К. Л. Аммоном, В. М. Киселевым и инженерами завода «Калибр» и др.

Фотография, профилограмма и интерферограмма типового микрорельефа поверхности, обработанной шлифованием, показана на рис. 3.

Макро- и микрогеометрические параметры поверхности деталей машин оказывают существенное влияние на эксплуатационную надежность и долговечность работы машин. Их значение особенно велико для начала работы трущихся сопряжений — периода приработки и связанного с этим сохранения в процессе эксплуатации

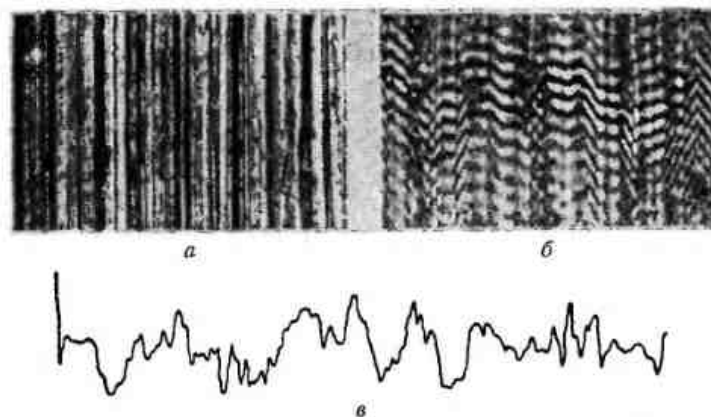


Рис. 3. Поверхность, обработанная шлифованием: а — фотография,  $\times 400$ ; б — профилограмма, в у. — 8000, г. у. — 116,7; в — интерферограмма,  $\times 250$ .

заданных посадок. Вместе с тем попытки использования данных о технологическом рельефе для изучения общих закономерностей трения, смазки и износа не дали удовлетворительных результатов. Нельзя считать нормальным тот факт, что макро- и микроскопические параметры технологического рельефа являются до настоящего времени важным и чуть ли не единственным исходным материалом для существующих теорий внешнего трения.

Однако существующие характеристики технологического рельефа оценивают только микроскопическую сторону явлений. Тонкий субмикроскопический рельеф, обусловленный особенностями внутреннего строения металла и их несовершенствами и формирующийся при пластической деформации как в процессе изготовления, так и при нагружении трением, пока не изучен и при оценке качества поверхности не учитывается. Кроме того, технологический рельеф в процессе эксплуатации быстро исчезает. Геометрические параметры поверхности под

воздействием пластической деформации, возникновения вторичных структур и разрушения поверхностей при трении коренным образом изменяются. Образуется новая топография поверхности, не имеющая ничего общего с исходной.

При нормальных условиях эксплуатации и установившемся процессе возникновения и разрушения на поверхностях трения тонких пленок окислов геометрическое

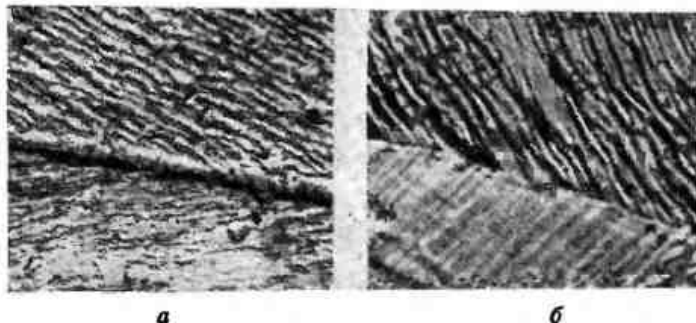


Рис. 4. Структура поверхности, обусловленная несовершенствами внутреннего строения:

*а* — железо Армко после отжига и химического травления,  $\times 3000$ ; *б* — алюминий после деформации на 10,5%,  $\times 600$ .

состояние поверхности будет характеризоваться микроскопическим и тонким субмикроскопическим рельефами, основные характеристики которых будут определяться внешними силовыми воздействиями, особенностями внутреннего строения материалов и физико-химическим действием среды.

По мнению авторов, характеристики субмикроскопического рельефа, образующегося непосредственно при контакте трущихся поверхностей, составляют ту отсутствующую до настоящего времени основу, без которой невозможно достаточно объективное и полное понимание процессов трения, смазки и износа. Представления о физическом или рабочем рельефе, главную характеристику которого составляет тонкий субмикрорельеф, положены авторами в основу оценки геометрического качества поверхностей при эксплуатации, обуславливающего формирование сил трения, образование вторичных структур, интенсивность износа.

Успехи развития теории дислокаций, науки о поверхностных явлениях открывают большие возможности в развитии представлений о третьем порядке геометрических характеристик поверхности — о субмикрорельефе поверхностей контакта. Развитие науки о трении и износе металлов привело к необходимости введения новых представлений о физическом или рабочем рельефе поверхностей трения.

Фотографии поверхности металла, характеризующие несовершенства и особенности его внутреннего строения, показаны на рис. 4.

Субмикроскопический рельеф поверхности имеет особую природу возникновения. Его параметры зависят прежде всего от внутренних несовершенств деформируемого металла и прилагаемых напряжений. Для качественной стороны и количественных параметров субмикрорельефа большую роль играют пленки окислов и адсорбированных слоев жидкости и газов.

Авторы предложили следующую общую зависимость формирования субмикрорельефа поверхности трения:

$$H_{смп} \approx \varphi(D, \sigma, K), \quad (3)$$

где  $D$  — параметр, учитывающий особенности кристаллической структуры металла;  $\sigma$  — действующие напряжения в поверхностных объемах металла;  $K$  — параметр, учитывающий характеристики адсорбционных слоев на поверхности металла.

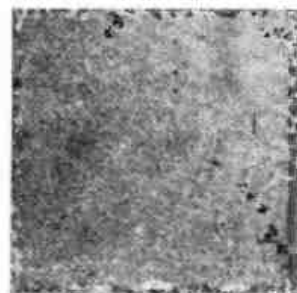
Количественно характер субмикрорельефа определяется величиной выступов и впадин, их формой и частотой расположения на поверхности металла.

В формирование рабочего рельефа, возникающего непосредственно при трении, определенный вклад вносят процесс текстурирования поверхностных объемов металла под действием нормальных и тангенциальных напряжений и процесс разрушения тонких поверхностных слоев при трении — износ.

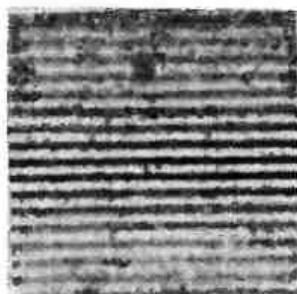
Интерферограмма, профилограмма и электронная фотография рабочего рельефа поверхности металла, работающего при нормальных условиях трения, показаны на рис. 5. Эти фотографии, а также снимки, характеризующие технологический рельеф поверхностей, описывающий только макро- и микроскопическую геометрию поверхностей, свидетельствуют о том, что природа, меха-



низмы и основные параметры формирования технологического качества поверхности, получаемого при обработке деталей машин, и рабочего качества поверхности, образуемого при эксплуатации, различны. Топография поверхности, получаемая при окончательных операциях технологической обработки, характеризующаяся макро- и микрошероховатостями, после начала эксплуатации постепенно исчезает, ее начальная роль теряется, на первый план начинают выходить топография, связанная с субмикроскопическим порядком величин, формирующаяся при нормальных условиях эксплуатации, и микрошероховатости, возникающие при разрушении (износе) рабочих поверхностей.



а



б



в

Рис. 5. Поверхность при нормальных условиях трения: а — электронная фотография,  $\times 6000$ ; б — интерферограмма,  $\times 290$ ; в — профилограмма.

Качество поверхностей деталей машин, кроме геометрии поверхностей, определяется механическими, физическими и химическими свойствами тонких поверхностных слоев и их напряженным состоянием. Тонкие поверхностные слои, толщина которых находится в пределах от десятков ангстрем до сотых и редко десятых долей миллиметра, имеют, как правило, иную структуру и свойства, чем материал внутри изделия. Отличие свойств тонких поверхностных слоев от свойств сердцевины обусловлено тремя основными причинами:

а) состоянием атомов металла у поверхности, отличающимся от состояния атомов в объеме, следствием чего

является наличие свободной поверхностной энергии и большая адсорбционная активность;

б) суммой механических, тепловых и физико-химических воздействий на поверхность металла при окончательных и предварительных операциях технологической обработки;

в) суммой повторных циклических, механических, тепловых и физико-химических воздействий на поверхность металла при нагружении трением в эксплуатации.

Физически чистая или ювенильная [1] поверхность металла, обладая особо высокой способностью к адсорбции, при контакте со смежной (газообразной или жидкой) средой вступает с ней во взаимодействие, что приводит к адсорбции атомов и молекул среды на внешних и внутренних поверхностях металла.

Существует физическая (обратимая) и химическая (необратимая) адсорбция, составляющие ряд ступеней взаимодействия среды с металлической поверхностью: от адсорбции, обусловленной силами Ван дер Ваальса, например адсорбция поверхностно-активной смазки, до прямых химических реакций, например окисление с образованием фазы  $Fe_2O_3$  на железе. Наличие только адсорбционных слоев на поверхности металлов с неизменной структурой может быть достигнуто в особых лабораторных условиях. В реальных условиях производства и эксплуатации деталей машин поверхностные слои металла имеют гораздо более сложное строение.

При обработке металлов резанием, шлифованием и другими аналогичными методами в поверхностных слоях возникает весьма интенсивная пластическая деформация, локальные объемы металла находятся под действием высоких температур, определенное влияние на состояние поверхности оказывает физико-химическое действие рабочих сред, охлаждающе-смазочных жидкостей, кислорода воздуха. В этих условиях поверхностные слои обрабатываемого металла на глубине от долей до десятков микрон резко изменяют свои свойства. При этом изменение физико-химических свойств тонких поверхностных слоев происходит неизбежно как следствие технологических операций, преследующих другие цели. Однако в ряде случаев поверхностные слои деталей машин обрабатываются специальными методами для изменения их физико-химических и механических свойств в нужном направлении.

К таким методам относятся: азотирование, цементация, газовое хромирование, борирование, закалка токами высокой частоты, накатка различными методами и др.

При нагружении трением в эксплуатации тонкие граничные слои рабочих поверхностей трения находятся под многократным повторным воздействием нормальных и тангенциальных напряжений и нагреваются до значительных

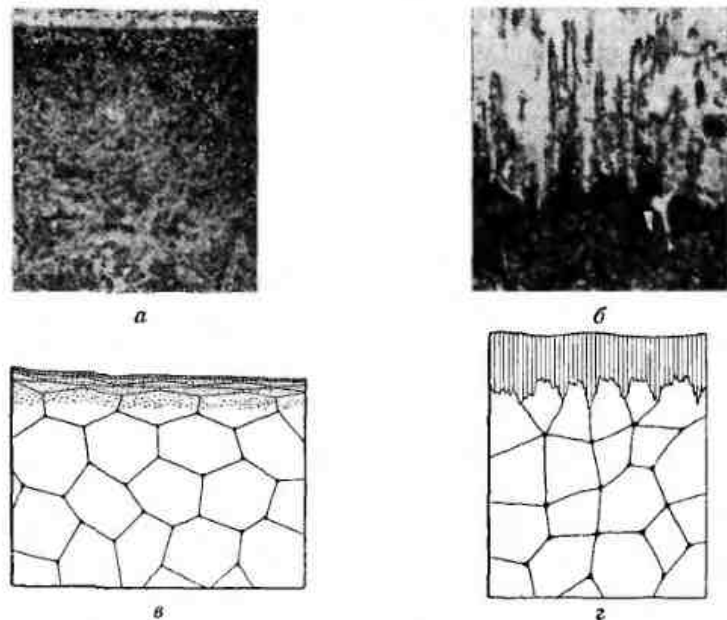


Рис. 6. Фотографии сечений,  $\times 400$  и модели строения поверхностных слоев металла:

а, а — после шлифования; б, г — после борирования.

температур. Особое значение в этих условиях имеют рабочие среды зоны трения. В качестве примера на рис. 6 показаны фотографии сечений и модели строения тонких поверхностных слоев металлов после обработки их шлифованием и борированием. Очевидно, что как механические, так и физико-химические свойства тонких поверхностных слоев резко отличаются от свойств основного металла. На рис. 7 показаны графики изменения твердости по глубине для поверхностных слоев металлов, обработанных шлифованием и борированием.

В практике технологической обработки рабочих поверхностей деталей машин часто нарушаются технологические режимы, что приводит к резкому ухудшению качества поверхностей, явному и скрытому браку. Это в меньшей мере относится к геометрическим характеристикам обрабатываемой поверхности и весьма существенно

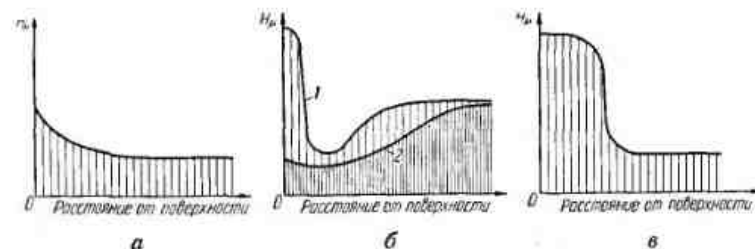


Рис. 7. Графики изменения твердости поверхностных слоев после обработки шлифованием: а — без дефектов; б — с дефектами вторичной закалки (кривая 1) и дефектами отпуска (кривая 2); в — после обработки борированием.

для характеристик свойств поверхностных слоев и особенно напряжений в них. В качестве примера на рис. 8 показаны дефекты рабочей поверхности кулачка распределительного вала двигателя, вызванные неправильным режимом цементации [66], и дефекты рабочих поверхностей стальных деталей двигателя, возникшие при неправильных условиях шлифования. Работа деталей машин с дефектами поверхностей такого типа может вызвать недопустимые виды износа, раннее развитие усталости, переход к аварийному состоянию.

Роль исходных механических, физических и химических свойств тонких поверхностных слоев металла, формирующихся в процессах технологической обработки, чрезвычайно велика. Однако, как и геометрические параметры поверхности, физико-механические свойства тонких поверхностных слоев изменяются в процессе нагружения трением. Условия физико-химико-механического воздействия при трении коренным образом (радикально) отличаются от условий воздействия при технологической обработке. Неудивительно, что и свойства поверхностных слоев в эксплуатации резко изменяются. В связи с этим возникает необходимость анализа кинетики этих изменений и изучения вторичных структур поверхностных слоев,

формирующихся непосредственно при работе деталей машин.

Главным фактором, вызывающим изменение свойств тонких поверхностных слоев при эксплуатации, является повторная пластическая деформация.

Механизмы пластической деформации наиболее полно

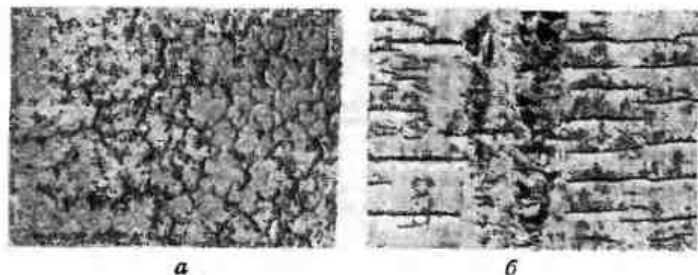


Рис. 8. Трещины на поверхности стали:  
а — после некачественной цементации,  $\times 5$ ; б — при нарушении режимов шлифования,  $\times 10$ .

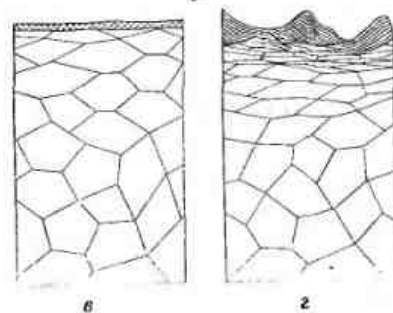
описываются с помощью теории несовершенных кристаллов (теории дислокаций) [10]. С точки зрения теории несовершенных кристаллов пластическая деформация осуществляется путем перемещения и размножения дислокаций. В процессе пластической деформации возникает большая и неравновесная концентрация вакансий и дислоцированных атомов, которые образуются в результате движения дислокаций со ступеньками, рекомбинации отрезков дислокаций противоположных знаков, поперечного скольжения дислокаций, а также неполной аннигиляции сегментов дислокаций противоположных знаков, проходящих близко друг от друга в соседних плоскостях скольжения [10].

Резкое увеличение концентрации вакансий и дислоцированных атомов при пластической деформации вызывает своеобразную активизацию поверхностных объемов трущихся металлов и развитие явлений диффузии. При нормальных условиях трения своеобразная активизация металла и развитие диффузионных явлений способствуют процессу окисления поверхностных слоев трущихся металлов. Эти же причины при нарушении нормальных условий эксплуатации могут вызвать недопустимые явления схватывания контактируемых поверхностей [50, 77].

Процессы окисления металла, развивающиеся при трении, вносят особый вклад в изменение свойств тонких поверхностных слоев. Образующиеся пленки окислов имеют резко отличительные механические и физико-химические свойства. В качестве примера на рис. 9 показаны фотографии сечений и модели строения тонких поверх-



Рис. 9. Фотографии сечений и модели строения поверхностных слоев стальных деталей, работавших в условиях:  
а, в — окисления,  $\times 500$ ; б, г — схватывания 1-го рода,  $\times 100$ .



ностных слоев деталей машин, работавших в условиях схватывания и окисления при трении. На рис. 10 приведены графики изменения твердости по глубине от поверхности для поверхностных слоев металла, работавшего при этих условиях трения.

В реальных условиях эксплуатации машин и механизмов возможны нарушения нормальных режимов трения, смазки и износа. При этом вероятность нарушения нормальных эксплуатационных условий в зоне трения, как показывает практика, очень велика. Нормальным и чрезвычайно распространенным при работе деталей машин является окислительный износ. Это непрерывный процесс образования и разрушения на поверхностях

трения тончайших пленок окислов. Качество поверхности при этом характеризуется высоким классом чистоты и отсутствием нежелательных изменений структуры в поверхностных объемах. Качество поверхности при недопустимых видах износа, особенно это относится к процессам схватывания 1 и 2-го родов и усталостным разрушениям, характеризуется низкими классами чистоты, нежелательными изменениями структуры и свойств поверхностных

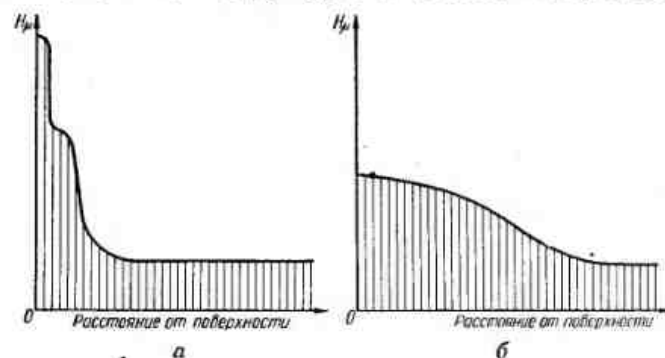


Рис. 10. Графики изменения твердости поверхностных слоев: а — при окислении; б — при схватывании 1-го рода.

слоев. Работа машин с такими видами разрушения поверхностей может привести к аварии и в нормальных условиях эксплуатации недопустима.

Важной характеристикой состояния тонких поверхностных слоев деталей машин является их напряженное состояние. Происхождение остаточных напряжений может быть связано как с технологией обработки, так и с эксплуатацией. В том и в другом случаях остаточные напряжения возникают при изменении объема металла вследствие фазовых и структурных превращений в тонких поверхностных слоях и в результате тепловых воздействий, вызывающих остаточную деформацию металла в локальных объемах поверхностных слоев.

На рис. 11 приведены некоторые данные о величине и знаке остаточных напряжений поверхностных слоев и их распределение от поверхности в глубину металла для случая технологической обработки и при эксплуатации деталей машин. На механические, а также физико-химические свойства тонких поверхностных слоев при

обычной технологической обработке резанием оказывают влияние пластическая деформация (однократная), температура и в очень небольшой мере действие рабочих сред. При простой специальной обработке поверхностных слоев деталей машин, например, при упрочнении их механическим наклепом, основным фактором, определяющим особенности изменения свойств поверхностных объемов металла, будет степень их пластической деформации. При

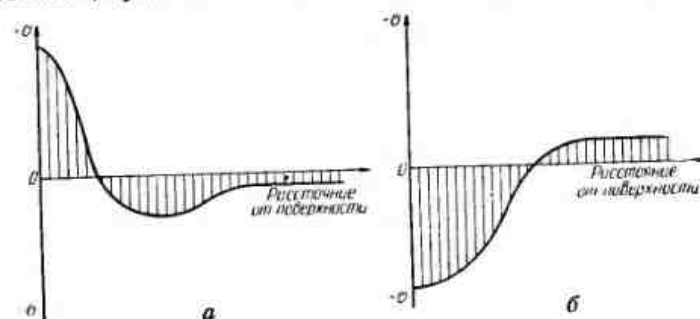


Рис. 11. Остаточные напряжения в поверхностных слоях стали: а — при точении; б — при усталостном износе.

сложных специальных методах технологической обработки, например, при химико-термической обработке, главное и определяющее влияние на свойства поверхностных слоев оказывает режим нагрева и охлаждения, а также действие специальных активных сред.

При эксплуатации формирование тонких рабочих поверхностных слоев деталей машин обусловлено многократно повторяющейся пластической деформацией, температурой и ролью рабочих газовых и жидких сред зоны контакта.

Особое влияние на физико-химико-механические свойства тонких поверхностных слоев деталей машин оказывает кислород воздуха. Основным процессом при трении и изнашивании деталей машин, работающих в нормальных условиях, является окисление. Износ при этом происходит путем постоянного образования и разрушения тонких пленок окислов [51, 52].

Анализ различных состояний поверхности с точки зрения геометрических параметров, характеристик физико-химико-механических свойств тонких поверхностных

слоев и остаточных напряжений в них свидетельствует о большом взаимном влиянии и о наличии органической связи между всеми этими составляющими.

## 2. Исходное (технологическое), рабочее (эксплуатационное) и остаточное состояния поверхностей и поверхностных слоев деталей машин

При рассмотрении общих характеристик качества поверхности было показано, что оценка состояния поверхности и поверхностных слоев деталей машин далеко не исчерпывается характеристиками геометрии поверхности и свойств тонких поверхностных слоев в исходном состоянии, обусловленном технологией обработки. При нагружении трением все эти характеристики претерпевают радикальные изменения.

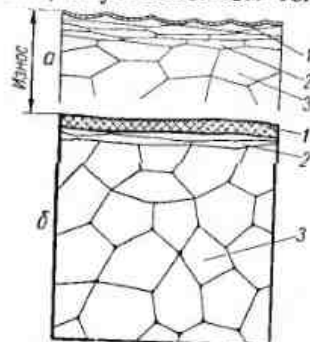


Рис. 12. Схема строения поверхностных слоев изнашиваемого металла:

а — в исходном состоянии; б — в остаточном состоянии (1 — пленка окислов; 2 — слой деформированного металла; 3 — основной металл).

Наряду с исходным состоянием качества поверхности существует рабочее состояние и остаточное. Переход от исходного качества поверхности к рабочему состоянию осуществляется постепенно под воздействием факторов внешнего трения (нагрузки, скорости движения, температуры в зоне контакта и среды) и в зависимости от условий трения по времени может длиться от нескольких минут до десятков часов. Этот переход связан с изменением геометрии поверхности, физико-химико-механических свойств тонких поверхностных слоев и с перераспределением остаточных напряжений. Изменения поверхности и особенно состояния тонких поверхностных слоев во время работы трущейся пары могут быть обратимыми, исчезающими после снятия нагрузок, и необратимыми — остаточными. Поэтому наряду с рабочим состоянием поверхности и тонких поверхностных слоев следует рассматривать также оста-

точное состояние, возникающее после снятия нагрузки трением.

Типовая схема строения тонких поверхностных слоев в исходном и остаточном состояниях показана на рис. 12.

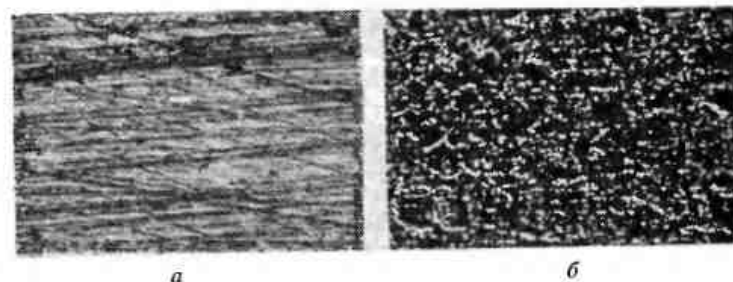


Рис. 13. Микрофотография поверхности наружного кольца подшипника: а — исходное состояние,  $\times 300$  ( $H_{\mu 20} = 800 \text{ кг/мм}^2$ ); б — после эксплуатации,  $\times 300$  ( $H_{\mu 20} = 960 \text{ кг/мм}^2$ ).

На рис. 13 и 14 показаны фотографии в плане поверхности с основными характеристиками изменений геометрии, структуры и свойств. Кинетика перехода от

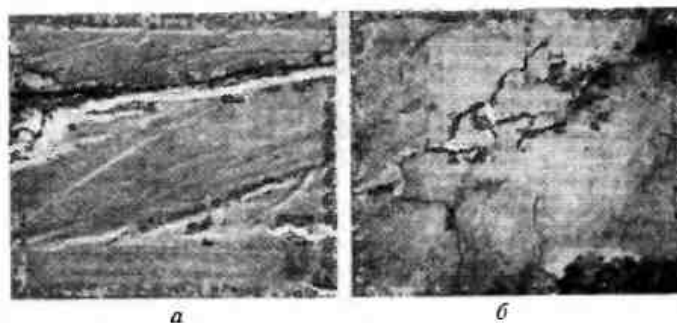


Рис. 14. Электронные фотографии поверхности наружного кольца подшипника: а — исходное состояние,  $\times 10\,000$ ; б — после эксплуатации,  $\times 10\,000$ .

исходного состояния к рабочему и остаточному хорошо иллюстрируется данными по изучению температуры, напряженного состояния и величины электрического потенциала, характеризующего состояние окисных пленок [72].

Результаты изменения рабочих температур, возникающих в процессе трения, показаны на рис. 15. Наблюдаются три периода развития теплового режима трения. В начале работы трения температура растет от комнатной до величины, характеризующей условия работы пары трения. Затем наступает период насыщения, характеризующий установившиеся условия трения. После снятия нагрузки трением поверхностные слои охлаждаются до комнатной температуры.

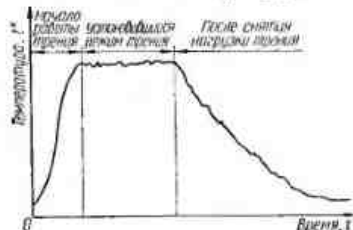


Рис. 15. График изменения температуры поверхности при внешнем трении.

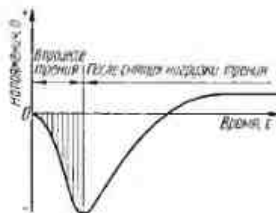


Рис. 16. График рабочих и остаточных напряжений в поверхностных слоях при внешнем трении.

Рабочие и остаточные напряжения при внешнем трении исследовали авторы с сотрудниками [65]. На рис. 16 представлен график рабочих и остаточных напряжений при трении. Во время трения поверхностный слой в результате нагревания расширяется. Создаются временные (температурные) рабочие сжимающие напряжения, которые при определенной температуре могут вызвать в поверхностных слоях пластическое укорочение металла. После снятия нагрузки трением и охлаждения в рабочем слое возникают остаточные растягивающие напряжения, которые уравниваются остаточными напряжениями, локализованными в остальной части сечения металла. Такое чисто термическое происхождение напряжений наблюдается при трении чистых металлов и чистых сплавов, где не происходят значительные фазовые превращения и связанные с ними структурные изменения [65]. В случае трения металлов и сплавов с метастабильной структурой возникновение напряжений в поверхностных слоях может быть связано не только с напряжениями чисто теплового происхождения, но также и с объемными (структурными) напряжениями, обусловленными фазо-

выми превращениями [65]. Б. М. Барбалат [3] исследовал изменения электрохимического потенциала, фиксирующего наличие или отсутствие пленок окислов на поверхностях трения. График изменения электрохимического потенциала при внешнем трении приведен на рис. 17. В начале работы трения происходит разрушение исходных естественных пленок окислов, всегда присутствующих на поверхности металла. Это разрушение сопровождается резким отрицательным смещением величины электрохимического потенциала. Дальнейшее трение в нормальных условиях приводит к образованию вторичных пленок окислов, типичных для установившегося окислительного износа, что вызывает увеличение и стабилизацию величины электрохимического потенциала (кривая 1). Кривая 2 характеризует ненормальный процесс приработки и переход к аварийному износу схватыванием [3].



Рис. 17. График изменения электрохимического потенциала поверхности при внешнем трении.

Переход от исходного состояния поверхности к рабочему характеризуется, во-первых, образованием вторичных структур, происхождение которых связано с много-

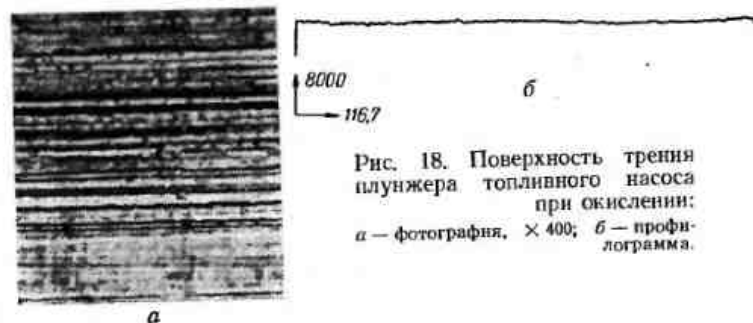


Рис. 18. Поверхность трения плунжера топливного насоса при окислении: а — фотография,  $\times 400$ ; б — профилограмма.

кратной повторной деформацией поверхностных слоев при трении, и процессом окисления металла кислородом воздуха, а во-вторых, по мере приработки происходит своеобразное возрастание значения субмикрорельефа, при этом роль исходного микрорельефа уменьшается.

При установившейся нормальной работе пары трения основные характеристики качества поверхности определяются параметрами субмикрорельефа и свойствами вторичных структур, возникающих при конкретных условиях трения.

Переход тонких поверхностных слоев деталей машин от исходного состояния к рабочему может осуществляться



Рис. 19. Поверхность трения плунжера топливного насоса при схватывании: а — фотография,  $\times 400$ ; б — профилограмма.

в пределах нормальной приработки (деформации тонких поверхностных слоев и их окисления). Это будет иметь место при правильном использовании конструктивных, технологических и эксплуатационных средств, обеспечивающих надежную работу сопряжений.

При нарушении этого условия, что в практике бывает достаточно часто, могут возникнуть нарушения нормы. В этом случае переход от исходного состояния поверхности и поверхностных слоев к рабочему будет связан с возникновением явлений схватывания и других нежелательных процессов. Узел трения может попасть в аварийное состояние, что вызовет потерю надежности работы машины.



Рис. 20. Электронная фотография поверхности трения плунжера топливного насоса,  $\times 10\ 000$ .

Переход от исходного состояния поверхности к нормальному (эксплуатационному) иллюстрируется данными о приработке сопряженных деталей топливного насоса

двигателя. На рис. 18 показаны фотография и профилограмма поверхности трения плунжера насоса. Качество исходной поверхности отвечает 10-му классу (ГОСТ 2789—59), а после приработки и перехода к рабочему состоянию — 11-му классу. Структура и свойства поверхностных слоев не имеют нежелательных изменений. В некоторых случаях при нарушении режима приработки

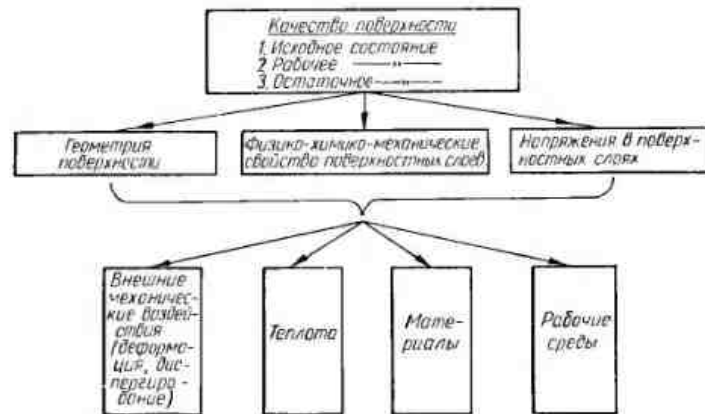


Рис. 21. Схема, описывающая состояние поверхности, характеристики качества поверхности и факторы, обуславливающие их изменения.

геометрическое состояние поверхности и структура поверхностных слоев испытывают резкие нежелательные изменения. Профилограмма и фотография поверхности плунжера с дефектным состоянием поверхности приведены на рис. 19. Электронная фотография (рис. 20) свидетельствует о развитии процесса схватывания на скользящем контакте этой пары.

При переходе от рабочего к остаточному состоянию поверхностей трения геометрические характеристики поверхности остаются без заметных изменений. Существенно изменяются свойства тонких поверхностных слоев. Это вызывается изменением температуры в поверхностных объемах при снятии нагрузки трением. Значительно изменяются также напряжения в поверхностных слоях.

Схема, описывающая состояние поверхностей трения, характеристики качества поверхностей и факторы, оказы-

вающие основное влияние на их изменение, представлена на рис. 21.

Очевидно, что решение сложных вопросов внешнего трения, смазки и износа возможно при условии учета состояния поверхностей, характеристик качества поверхностей и анализа закономерностей влияния факторов, определяющих изменение качества поверхности.



Исходное качество поверхности, полученное при технологической обработке деталей машин, имеет характеристики, не совпадающие с характеристиками его рабочего состояния, формирующегося в процессе эксплуатации. Поэтому в начале работы машин возникают процессы трансформации и перехода от исходного состояния качества поверхности к рабочему или эксплуатационному, т. е. происходят коренные изменения геометрии поверхности и физико-химико-механических свойств тонких поверхностных слоев. Переход от исходного состояния к рабочему называется *приработкой* или *периодом начального износа*.

Одной из основных задач проблемы трения, смазки и износа деталей машин является обеспечение наиболее быстрого и легкого перехода от исходного состояния поверхностей к рабочему. Период приработки или начального износа оказывает влияние на весь период работы узла или сопряжения деталей машин. Особенно это важно в связи с сохранением заданных посадочных свойств поверхностного слоя и формированием оптимального рельефа. В период приработки могут возникнуть резкие отклонения от нормальных условий работы, нежелательные повреждения поверхности, явления схватывания и др. Обоснованные решения вопросов о приработке возможны при условии знания природы процессов внешнего трения, характеристик качества исходной поверхности и условий нагружения при эксплуатации. Главным в этих решениях должно быть стремление к максимальному сокращению разрыва между характеристиками качества поверхности в исходном состоянии и характеристиками качества поверхности, находящейся в состоянии эксплуатации.



### 3. Внешнее трение

#### Теории внешнего трения

Работы, посвященные изучению внешнего трения, охватывают большой период времени. Первый этап развития классической науки о внешнем трении представлен исследованиями трения покоя. Вопрос о динамической сущности внешнего трения впервые ставился в известных исследованиях Кулона. В наиболее ранних работах преобладали чисто механические представления о процессе внешнего трения. В дальнейшем были выдвинуты и развивались идеи о молекулярных силах взаимодействия при трении [1, 87].

Многочисленные работы по внешнему трению были посвящены в основном изучению зависимости сил или коэффициентов трения от нормального давления. Был накоплен большой экспериментальный материал по определению коэффициентов трения для различных материалов и ограниченных условий трения. Основным результатом работ очень продолжительного этапа развития науки о трении был основной закон Амонтона — Кулона о зависимости силы трения от нормальной нагрузки [87]. В последующих исследованиях было сделано много попыток экспериментально проверить этот закон и теоретически обосновать его [20, 87].

Современные взгляды на природу внешнего трения изложены во многих работах [1, 6, 20, 29, 30, 83, 87, 88, 173]. Основные гипотезы о внешнем трении содержатся в работах Б. В. Дерягина [20, 21], Ф. П. Боудена [6, 173], Г. И. Епифанова [29, 30], И. В. Крагельского [83, 86, 87, 88], Г. Эрикса и М. Мерченца и др. [47, 48, 86, 92, 162, 178].

Возникновение и обоснование гипотезы о молекулярном взаимодействии поверхностей трения связано с именами И. Деагюлье, М. Бриллюэна, В. Гарди, Г. Томлинсона, Б. В. Дерягина [1, 86]. Наибольшее развитие молекулярная теория трения получила в работах Б. В. Дерягина [20, 21]. Б. В. Дерягин, формулируя молекулярную теорию трения, исходит из представления о дискретном атомно-молекулярном строении материи [20, 21]. Теоретическая схема Б. В. Дерягина основана на рассмотрении модели контакта и скольжения двух идеальных и одинаково ориентированных монокристаллов (рис. 22).

Соприкасающиеся при скольжении поверхности тел вследствие атомной структуры ведут себя как две шероховатые поверхности, имеющие выступы и впадины. Трение, по мнению автора, обусловлено действием отталкивающих сил, развивающихся при сближении электронных оболочек атомов сопряженных тел. Пользуясь геометрическими представлениями в соответствии с предложенной теоретической схемой автор вывел двухчленный закон внешнего трения [20].

$$F = \mu(N + S_0 p_0), \quad (4)$$

где  $F$  — сила трения;  $\mu$  — истинный коэффициент трения;  $N$  — нормальное давление;  $S_0$  — площадь действительного контакта;  $p_0$  — сила молекулярного притяжения.

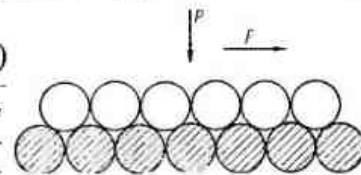


Рис. 22. Схема контакта и скольжения атомов, образующих поверхности двух монокристаллов (Б. В. Дерягин).

Формула (4) является молекулярно-физической интерпретацией закона Амонтона-Кулона.

Эволюция механической гипотезы, впервые сформулированной Б. Делагиром, связана с именами А. Парана, Л. Эйлера, Д. Лесли, Л. Гюмбеля и др. [1, 86, 92].

Деформационные теории трения, в основе которых лежат представления о взаимодействии поверхностей на скользящем контакте, связанные с явлениями сдвига, среза, оттеснением металла, образованием пластической волны, пропахиванием, схватыванием и т. д., изложены в работах Ф. П. Боудена [6, 173], Г. И. Епифанова [29], И. В. Крагельского и др. [83, 85, 86, 87, 92].

Ф. П. Боуден и его сотрудники провели много исследований в области внешнего трения [6, 173]. В основе взглядов Ф. П. Боудена лежит представление о дискретном взаимодействии металлических поверхностей, пластической деформации в местах контакта, образовании металлических связей, их разрушении и пластическом оттеснении более твердым металлом менее твердого [6, 173].

Сила трения  $F$  по Боудену — это сумма сопротивлений срезу металлических соединений  $F_c$  и сопротивлений пластическому оттеснению (пропахиванию)  $F_n$ :

$$F = F_c + F_n = \theta_{пр} S_{\phi} + \tau S, \quad (5)$$

где  $\theta_{пр}$  — сопротивление на срез;  $S_{ф}$  — площадь фактического контакта;  $\tau$  — предел текучести;  $S$  — площадь профиля царапины.

По мнению Г. И. Епифанова [29], основным содержанием процесса внешнего трения чистых металлических поверхностей следует считать пластическое сдвигообразование, развивающееся в относительно тонких поверх-

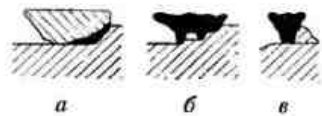


Рис. 23. Схема основных видов взаимодействия реальных поверхностей трения (Г. И. Епифанов).

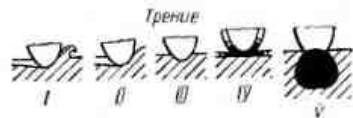


Рис. 24. Схема основных видов нарушения фрикционных связей (И. В. Крагельский):

*I* — выцарапывание, нагревание металла; *II* — пластическое отщеснение металла; *III* — упругое отщеснение материала; *IV* — поверхностное разрушение слабого молекулярного мостика; *V* — глубинное разрушение прочного молекулярного мостика.

ностных слоев трущихся тел [29, 30]. Схема основных видов взаимодействия реальных поверхностей трения представлена на рис. 23 [30].

Основным видом взаимодействия реальных поверхностей является внедрение более прочных выступов или участков одной поверхности в менее прочные участки другой (рис. 23, а). При более грубой шероховатости контакт показан на рис. 23, б. Шероховатость поверхностей трения может приводить также к механическому зацеплению (рис. 23, в).

«Сопротивление перемещению — сила трения — определяется в основном прочностью на срез материала этих неровностей» [30]. Адгезия, по мнению Г. И. Епифанова, не является существенным фактором, влияющим на формирование сил внешнего трения [30]. Основываясь на этих представлениях, Г. И. Епифанов выводит двучленный закон трения [29]:

$$F = S\tau_0 + KN, \quad (6)$$

где  $S$  — площадь сдвига;  $\tau_0$  — прочность на сдвиг;  $N$  — нормальная нагрузка;  $K$  — коэффициент, выражающий зависимость касательных напряжений от нормальных.

В современной литературе широко освещена молеку-

лярно-механическая теория трения [83, 84, 87, 88]. В основе молекулярно-механической теории внешнего трения лежит представление о пяти видах нарушения фрикционных связей (рис. 24). Первые три вида имеют место при механическом взаимодействии поверхностей, последние два — при молекулярном [87, 88].

Описывая общую картину трения, И. В. Крагельский указывает: «Пусть две прижатые друг к другу поверхности взаимно перемещаются в тангенциальном направлении. Вследствие волнистости реальные точки касания расположены в некоторых областях, контурах. Вследствие различной высоты неровностей контактирующие точки оказываются внедренными на различную глубину и соответственно, согласно приведенной выше классификации фрикционных связей, оказывают различное действие на контртело. Только касающиеся точки производят упругое деформирование материала, вышедшие из зацепления контакты начинают совершать колебания, что вызывает звук, более внедрившиеся неровности пластически деформируют материал. Они гонят перед собой волну деформированного материала. Работа пластической деформации непосредственно переходит в тепло. Наконец, сильно внедрившиеся неровности блокируют прилегающий материал и сдвигают, скалывают его, производя сильное разрушение. Такое нарушение фрикционной связи является ненормальным, его стараются избежать, в практике его называют задиром. Если коэффициент молекулярного трения достаточно велик, то первый вид разрушения становится преобладающим и внешнее трение не осуществимо» [87].

Главным в приведенной выше классификации фрикционных связей и в описанной общей картине трения, составляющих основу молекулярно-механической теории, является внедрение на различную глубину контактирующих неровностей. Эта точка зрения детально разработана И. В. Крагельским и его сотрудниками [87, 88].

Вопрос о молекулярном взаимодействии в молекулярно-механической теории мало изучен. При расчете различных видов трения учитываются общие соображения о роли адгезии в связи с наличием пленок на поверхностях твердых тел [87]. Учитывая две категории процессов, И. В. Крагельский выводит следующее выражение для силы трения:

$$T = \tau_{мол} S_{ф-мол} + \tau_{мех} S_{ф-мех}, \quad (7)$$

где  $\tau_{\text{мех}}$  и  $\tau_{\text{мол}}$  — составляющие силы трения механического и молекулярного происхождения;  $S_{\text{ф.мол}}$  и  $S_{\text{ф.мех}}$  — фактические площади молекулярного и механического взаимодействия.

После преобразований и введения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , зависящих от механических и молекулярных свойств поверхностей, автор получил выражение

$$f = \frac{\alpha S_{\text{ф}}}{N} + \beta, \quad (8)$$

которое названо обобщенным законом трения [87].

В работах В. Д. Кузнецова процесс внешнего трения впервые рассматривался с энергетической стороны. Для хрупких тел (кристаллов каменной соли) была изучена зависимость между силой трения и поверхностной энергией трущихся тел [92].

В работах Г. Эрнста и М. Мерченга [178] сделана попытка установить зависимость силы трения от твердости и температуры плавления металлов. В. С. Щедров, Д. Иегер, Х. Блок исследовали теплоту внешнего трения [40, 162, 174].

Для развития науки о внешнем трении принципиальное значение имеют фундаментальные работы школы П. А. Ребиндера [97, 98].

Анализ теоретических работ, посвященных изучению внешнего трения, приводит к заключению, что до настоящего времени нет общепризнанных представлений о физической стороне процесса трения. Далеко неполны сведения о роли химических явлений при внешнем трении. Отдельные взгляды на эти вопросы противоречивы.

В попытках построения математической теории трения авторы используют для расчетов сил трения крайне упрощенные макромеханические модели сопряжения поверхностей. Другой крайностью являются попытки, основанные на представлениях о действии атомных сил притяжения и отталкивания; при этом использовали модели идеального атомно-молекулярного строения твердых тел.

Внешнее трение твердых тел — одно из наиболее распространенных и универсальных явлений. Сложность изучения процессов внешнего трения твердых тел заключается не только в наличии комплекса механических, физических и химических процессов, но и в необходи-

мости сочетать макроскопические представления о характеристиках фрикционного контакта (геометрии его, прочности и пластичности материала поверхностных слоев) с микроскопическими и субмикроскопическими представлениями об атомных механизмах адгезии, дислокационных механизмах деформации, диффузии и др.

Почти во всех исследованиях процессов трения и износа авторы указывают на наличие пластической деформации. Однако роль пластической деформации в процессах внешнего трения сведена к учету ее чисто технических характеристик — предела текучести  $\sigma_s$ , модуля пластичности  $D$ , твердости  $H$ . Эти характеристики используются при расчетах величины работы, затрачиваемой на деформирование поверхностных объемов, а также сил и коэффициентов трения. Основная роль пластической деформации в связи с взаимодействием поверхностей, образованием физического рельефа, производными явлениями при внешнем трении недостаточно раскрыта. Нет достаточных данных об особенностях пластической деформации при статическом контакте и при движении, при сухом трении и при граничной смазке, при трении твердых тел с различными характеристиками упрочняемости и различными типами атомных связей, при наличии адсорбированных пленок, а также отсутствуют данные о градиентах пластической деформации, объемах и интенсивности деформации в поверхностных слоях, соотношении упругой и пластической составляющих в связи с разными материалами и условиями трения.

Механизмы пластической деформации наиболее полно описываются с помощью теории несовершенных кристаллов (теории дислокаций) [10]. В проведенных авторами исследовательских работах широко применяется теория дислокаций для объяснения основных вопросов внешнего трения металлов и формулирования основных гипотез о взаимодействии поверхностей [60, 70], физическом рельефе [58, 68], важнейших производных явлениях — упрочнении [56, 60], окислении и схватывании [76, 77].

Изучение роли пластической деформации в связи с производными процессами внешнего трения дает возможность связать трение с явлениями износа.

## Физика процесса внешнего трения

Анализ материалов по изучению процессов, происходящих на поверхностях и в поверхностных слоях металлов при трении, смазке и износе, позволяет прийти к заключению, что основное содержание внешнего трения обусловлено упруго-пластической деформацией, определяющей главные физико-механические характеристики взаимодействия поверхностей и вызывающей производные физико-химические явления в зоне контакта. Внешние силовые воздействия вызывают упруго-пластическую деформацию на скользящем контакте твердых тел. В своем макроскопическом проявлении упруго-пластическая деформация обуславливает закономерности формирования площади контурного контакта трущихся поверхностей. Атомные механизмы пластической деформации обуславливают развитие микро- и субмикроразмерных параметров поверхности, что является важным фактором в образовании поверхностных связей.

Дислокационные механизмы пластической деформации вызывают особую активизацию металла в деформируемых поверхностных объемах. При этом возникает большая и неравновесная концентрация вакансий и дислоцированных атомов, вызывающая резкое усиление диффузионных процессов. В зависимости от условий трения это способствует развитию процессов окисления или схватывания. Указанные процессы коренным образом влияют на характеристики взаимодействия поверхностей и на возможности образования поверхностных связей.

Весьма важными производными упруго-пластической деформации являются теплота трения, упрочнение, разупрочнение и усталостные процессы. Очевидно, в основе изучения механических, физических и химических явлений внешнего трения должно быть всестороннее исследование не только макроскопических эффектов, но и тонких механизмов пластической деформации, определяющих сложную физико-химическую картину возникающих процессов. Поэтому возникает необходимость анализа явлений в макро-, микро- и субмикроскопическом порядках, а также дифференцированного анализа физических, химических и механических явлений в их динамике с учетом кинетики изменений свойств поверхностей и поверхностных слоев непосредственно в процессе трения.

Методически явления внешнего трения целесообразно рассматривать в двух планах: для единичного контакта и для контакта поверхностей.

С этих позиций ниже рассмотрены основные проблемные вопросы теории внешнего трения: взаимодействие поверхностей и производные процессы при внешнем трении.

### Взаимодействие поверхностей при внешнем трении

Понятие взаимодействия поверхностей включает два важных явления: формирование площади действительного контакта двух поверхностей и образование между этими поверхностями связей, создающих сопротивление движению.

*Контакт поверхностей при внешнем трении.* Формирование площади действительного контакта двух сопряженных поверхностей связано с дискретностью контакта, зависит от внешнего нагружения, исходного геометрического состояния поверхностей, механических свойств каждого из сопряженных тел и их соотношения.

Методы экспериментального определения площади действительного контакта основаны на измерениях электропроводности контакта и отношения поверхностей с изученными геометрическими очертаниями, на переносе вещества с одной поверхности на другую в точках контакта, а также на наблюдении оптических явлений в местах контакта [22, 87].

Метод расчета площади действительного контакта предложен Н. Б. Демкиным [22].

Закономерности изменения площади действительного контакта исследованы в зависимости от нагрузки, материала и начальной шероховатости [22, 84]. Имеющиеся данные о площади фактического контакта относятся главным образом к условиям статического контакта, а не контакта при движении. Следует различать условия образования площади действительного контакта в статике и при движении.

Возможности деформации поверхностных слоев при статическом контакте и при движении различны. Это различие заключается в том, что при статическом контакте силы трения препятствуют деформации поверхностных

слоев, а при трении движения — способствуют деформации этих слоев. При статическом контакте за счет сил трения создается своеобразная «застойная зона», в результате чего ограничивается деформация и соответственно площадь фактического контакта.

При трении движения деформация тонких поверхностных слоев и соответственно этому увеличение площади действительного контакта происходят намного интенсивнее. Создается не «застойная зона», как это было при статическом контакте, а своеобразный легко перетекающий поверхностный слой [60]. Эти представления подтверждены новыми данными, полученными в результате использования оригинального метода высокой чувствительности, основанного на изучении изменений дислокационной структуры [60, 68].

*Поверхностные связи при внешнем трении.* Основной вопрос взаимодействия поверхностей — образование поверхностных связей на участках действительного контакта — более сложен и менее изучен. Вопрос об образовании поверхностных связей, формирующих сопротивление движению или силы трения, является центральным для всех теорий внешнего трения.

О причинах возникновения поверхностных связей, препятствующих движению контактируемых поверхностей и формирующих силу трения, высказано много гипотез [6, 20, 30, 83].

Анализ приведенных работ о механизмах взаимодействия поверхностей при трении свидетельствует об использовании макроскопических характеристик и идеализированных схем атомного строения твердых тел.

Для создания удовлетворительных гипотез о механизмах внешнего трения в связи с изучением взаимодействия поверхностей необходимо прежде всего устранить несоответствие между уровнем представлений, используемых в существующих теориях внешнего трения, и современным развитием физики твердого тела.

Очевидно, что в основу анализа взаимодействия поверхностей трения, кроме внешних макроскопических параметров зоны контакта, обусловленных исходной шероховатостью и волнистостью, должны быть положены характеристики внутреннего строения твердых тел с учетом влияния реального строения в объеме тела на строение его поверхности и поверхностных слоев. Современное

представление о реальном строении твердых тел хорошо описывается теорией дислокаций [10].

Все так называемые структурно-чувствительные свойства металлов и сплавов связаны с возникновением, размножением, движением и взаимодействием дислокаций. В основе всех представлений о прочности и пластичности металлических материалов лежат данные об их дислокационном строении. Объяснение резкого различия между прочностью реального и идеального металла основывается на наличии дислокаций. В настоящее время создана и продолжает развиваться стройная теория дислокаций, находящая применение во всех областях теоретических и практических знаний о металлах. Разработаны геометрические дислокационные модели для ряда технологических процессов и явлений, возникающих при эксплуатации металлических материалов.

В соответствии с дислокационной теорией каждое кристаллическое тело характеризуется определенным типом дислокаций и их плотностью. Поверхности реального кристаллического тела представляют собой сложную систему блоков, фрагментов, мозаик и выходов отдельных групп дислокаций. Дислокационная структура в объеме реального кристаллического тела реализуется на поверхности этого тела в виде тонкой системы ступенек, впадин и выступов. Поверхность идеального кристаллического тела может быть совершенно гладкой и иметь только атомную или молекулярную шероховатость. Поверхность же реального кристаллического тела всегда имеет шероховатость, обусловленную его мозаично-дислокационным строением. Эта шероховатость называется тонким рельефом или субмикрорельефом.

Особенности строения поликристаллических тел и различных сплавов, имеющих гетерогенную структуру, при нагружении и деформации вызывают не только возникновение субмикрорельефа. В процессе деформации таких твердых тел перемещения могут происходить по границам относительно крупных фрагментов, частей кристаллов и даже по границам зерен. При этом в процессе нагружения и деформации наряду с субмикрорельефом образуется своеобразный рельеф, имеющий выступы и впадины на несколько порядков большие, чем у субмикрорельефа [61]. Рельеф, возникающий непосредственно при трении, имеет ряд особенностей в связи с дискретностью контак-

тирования и неравномерностью напряженного состояния. Развитие рельефа протекает по-разному в местах непосредственного контакта и в зонах влияния. Совместное действие нормальных и тангенциальных усилий при трении вызывает в зоне фактического контакта текстурирование металла поверхностных слоев и специфический рельеф.

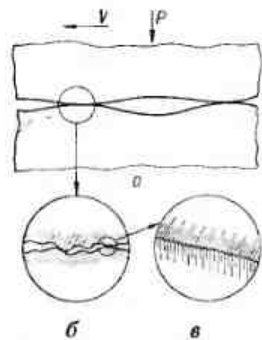


Рис. 25. Схема взаимодействия сопряженных поверхностей трения:

а — макроскопия; б — микроскопия; в — субмикроскопия.

Весьма существенно также влияние адсорбированных пленок окислов и пленок смазки. Определенный вклад в образование рельефа непосредственно при трении вносит процесс диспергирования (разрушения) тонких поверхностных слоев металла при трении [61].

Таким образом, на трущихся поверхностях поликристаллических неоднородных сплавов образуется сложный физический рельеф, основные параметры которого обусловлены напряженным состоянием, структурой и средой в зоне трения. Очевидно, что физический рельеф не имеет ничего общего с представлениями о микрорельефе, образующемся в результате технологической обработки. При этом необходимо

учитывать, что физический рельеф в статических условиях и при трении движения существенно отличается. На рис. 25 приведена схема описанного взаимодействия поверхностей при трении. Процесс взаимодействия поверхностей трения связан с макроскопическим (рис. 25, а), микроскопическим (рис. 25, б) и субмикроскопическим (рис. 25, в) характерами контакта, причем ведущая роль в образовании поверхностных связей, формирующих силы трения, принадлежит субмикрорельефу, мгновенно возникающему в зоне деформации.

Механические деформационные связи на участке фактического контакта сопряженных поверхностей возникают в момент контактирования путем развития субмикронеровностей сопряженных поверхностей и взаимной достройки элементов субмикрорельефа в пределе до полного контакта. Уровень развития дислокационной теории дает возможность осуществить переход от теоретических

представлений физики твердого тела к решению практических задач теории внешнего трения. Примером такого перехода могут служить работы [57, 67, 70], где экспериментально обоснованы количественные соотношения между изменениями тонкой структуры и параметрами трения.

Деформация поверхностей в процессе трения и изменения дислокационной структуры существенным образом связаны со второй причиной возникновения поверхностных связей. Работа внешних сил при пластическом деформировании поверхностных слоев металла в процессе трения расходуется на создание и развитие дефектов решетки и на увеличение энергии их взаимодействия.

При деформации на 10% концентрация дефектов в металле может достигать порядка  $10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$  [10]. Точечные дефекты (вакансии и дислоцированные атомы) возникают в результате движения дислокаций со ступеньками, неполной аннигиляции сегментов дислокаций противоположных знаков, лежащих в близких областях скольжения рекомбинации отрезков дислокаций противоположных знаков, проходящих близко друг от друга в соседних областях скольжения, а также в результате поперечного скольжения дислокаций [10].

Резкое увеличение плотности точечных дефектов в металле поверхностных слоев при трении приводит к усилению диффузии. Участие диффузионной составляющей в формировании суммарной силы внешнего трения связано с образованием металлических связей в зоне контакта и является одним из главных процессов взаимодействия поверхностей при трении — процессом схватывания.

Следующие основные представления о механизме схватывания сформулированы в работах [50, 51, 72, 76, 77]:

1. Для осуществления схватывания металлов необходимо сближение ювенильных поверхностей на расстояния действия межатомных сил.
2. Под действием внешней нагрузки происходит пластическая деформация в местах фактического контакта, возникновение активных дислокационных центров с резко повышенной концентрацией вакансий и дислоцированных атомов [76, 77].
3. В зонах активных центров происходит диффузия между контактируемыми металлами с образованием ме-

таллических связей. Естественным при этом является достройка электронных уровней атомов объединяемых металлов в энергетически выгодных соотношениях [51]. Эта концепция, разработанная и подтвержденная в работах Б. И. Костецкого и его сотрудников, позволяет рассматривать вопрос о склонности к схватыванию и о диффузионной составляющей формирования сил внешнего трения с позиций кристаллического и электронного строения металлов в связи с их расположением в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Металлы с ОЦК и ГЦК решетками по сравнению с металлами, имеющими ГПУ решетку, в соответствии с изложенной теорией схватывания обладают большей склонностью к схватыванию. Это объясняется тем, что в металлах с ГПУ решетками при пластической деформации образуется меньше вакансий. Металлы с заполненными электронными орбитами также меньше склонны к схватыванию, так как достройка электронных уровней в этом случае затруднена.

Таким образом, вакансионная теория схватывания металлов [72, 76, 77] позволяет выбирать форму кристаллической структуры металлов и электронного строения с заранее заданными фрикционными свойствами.

Ранее явления схватывания и окисления при трении рассматривались как процессы, в основе которых лежат различные механизмы. Применение теории дислокаций показывает, что схватывание и окисление при трении являются единым диффузионным процессом.

Проведенные исследования показали, что диффузионные явления при трении зависят от степени деформации и скорости относительного перемещения. При большой степени деформации и малых скоростях скольжения диффузионные явления могут в своем максимальном развитии привести к полному соединению поверхностей (схватыванию 1-го рода — холодному задиру). При увеличенных скоростях скольжения, когда процесс диффузии между сопряженными металлами не успевает проходить, диффузионные явления реализуются путем взаимодействия активных поверхностных слоев металла со средой зоны контакта. Обычно это происходит путем окисления поверхностей трения. При дальнейшем увеличении скорости скольжения рост температуры и резкое усиление диффузионных процессов приводит к вторичному диффу-

зионному взаимодействию между сопряженными металлами (схватыванию 2-го рода — горячему задиру) [51, 76].

В соответствии с общей теорией адгезионных процессов на поверхностях контакта твердых тел неизбежно существование третьего типа связей, обусловленных электростатическим взаимодействием сопряженных тел и возникновением сил типа Ван дер Ваальса [1].

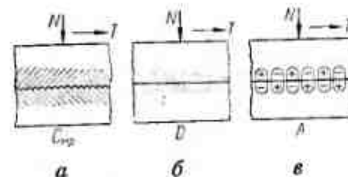


Рис. 26. Схема взаимодействия поверхностей трения.

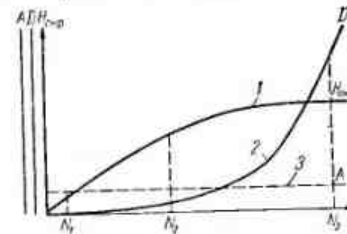


Рис. 27. График развития поверхностных связей.

Таким образом, резюмируя изложенное по вопросам образования поверхностных связей, следует прийти к заключению, что в общем случае внешнего трения существует четыре типа связей:

1. Механические связи, возникающие при взаимодействии шероховатостей поверхности, имеющих технологическое происхождение ( $F_M$ ).

2. Механические связи, обусловленные дислокационными механизмами пластической деформации и возникающие непосредственно при трении в результате взаимного развития — достройки субмикронеровностей контактирующих поверхностей ( $F_M$ ) (рис. 26, а).

3. Физико-химические связи, вызванные пластической деформацией и развитием диффузионных явлений в зоне контакта, реализуемых в виде металллических связей между сопряженными поверхностями ( $F_D$ ) (рис. 26, б).

4. Физические связи, обусловленные силами Ван дер Ваальса, неизбежно сопутствующими любому сопряжению твердых тел ( $F_A$ ) (рис. 26, в).

Очевидно, значение второго и третьего типов связей коренным образом зависит от степени пластической деформации поверхностных объемов металла. Существенное влияние на их развитие оказывают среда, скорость скольжения, температура, соотношение свойств и структура сопрягаемых поверхностей. Четвертый тип связей

зависит, главным образом, от площади фактического контакта трущихся поверхностей.

На основании экспериментальных данных о развитии субмикрорельефа и диффузионных явлений в зависимости от нагрузки и степени пластической деформации, принимая силы Ван дер Ваальса неизменными при изменяющейся нагрузке, можно схематически представить развитие поверхностных связей для элементарного контакта трущихся поверхностей с изменением нормального давления (рис. 27).

При увеличении нагрузки  $N$  растет высота субмикрорельефа  $H_{\text{смп}}$  до определенной величины насыщения (рис. 27, кривая 1). Дальнейшее увеличение  $N$  (за пределами насыщения) вызывает объемную деформацию трущихся тел. Коэффициент диффузии  $D$  в зависимости от  $N$  изменяется по экспоненциальному закону (рис. 27, кривая 2). В результате резкого развития диффузионных явлений при максимальной нагрузке и деформации внешнее трение переходит во внутреннее. Адгезионные связи, обусловленные силами Ван дер Ваальса, не зависят от  $N$  (рис. 27, прямая 3). При самых малых нагрузках преобладающее значение имеют адгезионные связи, возникающие под действием сил Ван дер Ваальса ( $N_1$ ). При средних нагрузках на первый план выходят связи, обусловленные действием субмикрорельефа ( $N_2$ ). При больших нагрузках основное значение приобретают естественные металлические связи, образовавшиеся в результате развития диффузионных явлений ( $N_3$ ).

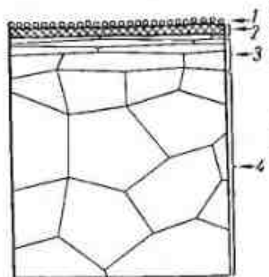


Рис. 28. Модель строения поверхности металла:

1 — слой адсорбированных газов; 2 — слой окислов; 3 — пластически деформированный металл; 4 — основной металл.

связан с разными стадиями разрушения поверхностных пленок и соответственно — с равной активностью или нейтральностью поверхностей контакта. При наличии пленок окислов и адсорбированных слоев разного происхождения диффузионные процессы, вызывающие схваты-

вание поверхностей, не будут оказывать существенного влияния на формирование сил трения.

По мере разрушения адсорбционных слоев и пленок окислов на обнажившихся ювенильных участках сопряженных поверхностей будут развиваться процессы диффузии. В этих случаях природа поверхностных связей может коренным образом изменяться. Основной причиной формирования сил внешнего трения будут процессы образования металлических связей.

### Производные (вторичные) процессы при внешнем трении

В существующих представлениях о внешнем трении недостаточно учитывается динамика изменений состояния металла и его свойств в самом процессе трения. Тонкие механизмы упруго-пластической деформации, неизбежно протекающей при трении, вызывают прямо или косвенно возникновение ряда производных или вторичных процессов в металле трущихся поверхностей. Важнейшими производными при внешнем трении являются:

1) особая активизация металла поверхностных слоев и связанное с этим резкое усиление диффузионных процессов на поверхностях контакта (окисление и схватывание сопряженных поверхностей);

2) теплота трения;

3) упрочнение, разупрочнение, диспергирование;

4) усталостные процессы.

Возникновение и преобладающее развитие тех или иных производных явлений при внешнем трении, вызванных пластической деформацией, коренным образом связано с внешним механическим воздействием на поверхности трения ( $P$ ,  $V$ ), свойствами материалов трущейся пары, а также средой в зоне трения (газовой, жидкой, твердой). Существенное значение имеет также масштабный фактор, напряженное состояние и фактор времени.

Вторичные процессы, неизбежно возникающие при трении, оказывают определяющее влияние на закономерности внешнего трения [51]. Это обусловлено, главным образом, изменением свойств контактирующих поверхностей в процессе трения и соответственно этому изменением количественных характеристик сопротивления движению.



В особых случаях вторичные процессы вызывают изменение природы поверхностных связей, что резко меняет содержание процесса трения. Свойства могут изменяться монотонно, постепенно или резко, скачкообразно, могут быть обратимыми и необратимыми. В связи с этим следует рассматривать начальное состояние, текущие изменения и остаточное состояние металла поверхностных слоев.

Движение, развитие и взаимодействие дислокаций при пластической деформации приводят к резкому увеличению концентрации вакансий и дислоцированных атомов в поверхностных объемах трущихся металлов. Этот процесс своеобразной активизации металла в зависимости от скорости движения и наличия среды в зоне контакта может приводить или к процессу окисления контактируемых поверхностей, или к процессу их схватывания [51]. Особая роль при этом принадлежит среде в зоне контакта. Активные компоненты среды вступают в физико-химическое взаимодействие с пластически деформируемым активным металлом. При этом происходит модификация металла, образование вторичных структур на поверхностях контакта, имеющих свойства, резко отличающиеся от свойств основного металла.

Естественным и наиболее распространенным процессом образования вторичных структур является окисление металла. Свойства возникающих вторичных структур на поверхностях трения определяют антифрикционность, износостойкость и фрикционность пар трения. В связи с процессами окисления и схватывания металлов резко изменяются не только свойства поверхностных слоев, но и природа самого контакта.

Теплота, возникающая при трении, может существенно влиять на изменение структуры и свойств поверхностей трения, вызывать распад предварительно упрочненных метастабильных структур, изменять прочность межатомных связей, вызывать аллотропические превращения и соответствующие изменения свойств металлов и сплавов. Влияние теплоты трения связано также с изменением констант диффузии, адсорбции и химических процессов, протекающих на поверхностях трения.

Пластическая деформация может вызывать процессы механического упрочнения или разупрочнения. Такие изменения свойств обычно протекают монотонно, являются

необратимыми, их количественные параметры обусловлены главным образом внешними механическими воздействиями. Для разных материалов пары трения процессы механического упрочнения и разупрочнения имеют свои особенности.

Производные процессы, возникающие при внешнем трении, имеют различные скорости, причем в любых условиях существует процесс, происходящий с наибольшей скоростью по отношению к другим процессам. Это дает возможность объяснить важный факт о существовании преобладающих (ведущих) процессов в зоне трения и сопутствующих, мало влияющих на трение [51]. Наличие ведущих процессов позволяет учитывать при анализе трения только вид изменений свойств поверхностных слоев и определенный тип поверхностных связей.

Возможные условия внешнего трения бесконечно разнообразны. Лабораторные исследования и анализ многочисленных экспериментальных материалов о работе машин позволяют разделить все процессы, связанные с трением и износом, на две большие группы.

К первой группе относятся допустимые процессы, характеризующиеся постоянными и относительно небольшими коэффициентами трения и малыми скоростями разрушения. Допустимым и чрезвычайно распространенным при работе деталей машин является процесс окислительного трения и износа. Окислительное трение и износ возникают при трении скольжения и трении качения, в условиях контакта несмазанных поверхностей и при граничной смазке. При этом происходит непрерывный процесс образования и разрушения на поверхностях трения тончайших пленок оксидов.

Вторая группа объединяет недопустимые аварийные процессы, характеризующиеся высокими и непостоянными коэффициентами трения, схватывание 1-го рода, обусловленное атермической пластичностью, схватывание 2-го рода, вызванное термической пластичностью, разные виды заедания, абразивный износ и особые виды усталостного разрушения поверхностей (питтинг, осповидный износ). Перечисленные виды разрушения поверхности при трении характеризуются интенсивным износом, вызывают резкое ухудшение рельефа поверхности и нежелательные изменения структуры и свойств поверхностных слоев.

Очевидно, что построение количественной теории трения целесообразно и возможно только для нормальных условий внешнего трения. Построение теории трения при патологических недопустимых процессах в зоне контакта для инженерной практики не имеет смысла. Необходимо изучить границы существования недопустимых явлений в связи с изменением режимов трения, материалами трущейся пары, рабочими средами и др.

Установление граничных условий перехода от нормальных процессов к патологическим позволит применять наиболее эффективные эксплуатационные режимы трения и создаст необходимые предпосылки для разработки конструктивных и технологических средств расширения диапазона условий нормального трения.

Развитие науки о внешнем трении в машинах органически связано с развитием представлений о качестве трущихся поверхностей, т. е. о геометрии и свойствах поверхностей твердых тел. Всякий прогресс в области изучения качества поверхности будет способствовать более глубокому пониманию процессов внешнего трения. Приведение в соответствие современных данных физики твердого тела и химии поверхностных явлений с механизмами внешнего трения наиболее важно для развития теории трения. Важное дополнительное условие заключается в необходимости учета динамики изменений состояния и свойств материала трущихся поверхностей в самом процессе трения.

Необходима также систематизация известных экспериментальных материалов по внешнему трению в соответствии с характером зависимости сил и коэффициентов трения от действия основных факторов внешнего трения — нормального давления, скорости, температуры, среды зоны трения, материалов трущихся поверхностей.

Значение теории внешнего трения не ограничивается расчетными формулами для определения сил и коэффициентов трения.

Не менее важным является также возможность обоснованного управления процессами трения. Располагая данными о процессах взаимодействия поверхностей, видах и причинах возникновения поверхностных связей, о роли производных явлений, возникающих при трении, можно не только рассчитывать силы трения, но и управлять закономерностями их формирования. Это

открывает большие возможности для развития теории износостойкости, антифрикционности и фрикционности в машинах.

#### 4. Качество поверхности при основных видах технологической обработки

Качество обработанной поверхности характеризуется геометрией, механическими, физическими и химическими свойствами поверхностных слоев и остаточными напряжениями в них. За последние десятилетия создана крупная, хорошо разработанная автономная область технических знаний о геометрии поверхности, волнистости, шероховатости, образующихся при основных видах технологической обработки металлов, изучены закономерности формирования геометрии поверхности в зависимости от методов, режимов и условий технологической обработки металлов и сплавов, применяющихся в машиностроении. Наиболее широко и полно разработаны вопросы геометрии поверхности и некоторые характеристики механических свойств для таких основных видов обработки металлов, как точение, фрезерование, строгание, протягивание, шлифование, хонингование, доводка и др. [23, 26, 94, 110]. Разработаны также классификация качества поверхности по классам чистоты и соответствующие стандарты (ГОСТ 2789—59, ГОСТ 2940—63). Достижения в этой области широко используются в металлообрабатывающей промышленности. Создано много приборов для оценки геометрии поверхности [27, 28, 46].

В табл. 1 приведены классы чистоты поверхности после различных видов механической обработки [126]. На рис. 133, 135 показаны фотографии, профилограммы и интерферограммы поверхностей стали, обработанных методами, наиболее широко распространенными в промышленности.

Интерферограммы были сняты на интерферометре В. П. Линника, а профилограммы — на профилографе «Калибр-ВЭИ». На характеристики качества поверхности существенное влияние оказывает обрабатываемый материал и его свойства. Влияние механических свойств на формирование качества поверхности при абразивной доводке различных материалов показано в табл. 2 [5].

Таблица 1

Классы чистоты поверхности после различных видов механической обработки [126]

| Вид обработки                         | Класс чистоты поверхности по ГОСТ 2789-59 | Вид обработки                     | Класс чистоты поверхности по ГОСТ 2789-59 |
|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Точение:                              |   | Шабрение:                         |   |
| обдирочное . . . . .                  | 1-4                                       | предварительное . . . . .         | 4-6                                       |
| среднее . . . . .                     | 1-7                                       | чистовое . . . . .                | 6-9                                       |
| чистовое . . . . .                    | 4-8                                       | тонкое . . . . .                  | 9-10                                      |
| тонкое . . . . .                      | 6-9                                       | Слесарное опливание               | 3-7                                       |
| Растачивание:                         |   | Шлифование кругами:               |   |
| обдирочное . . . . .                  | 1-7                                       | черновое . . . . .                | 4-11                                      |
| чистовое . . . . .                    | 1-7                                       | чистовое . . . . .                | 4-11                                      |
| тонкое . . . . .                      | 6-10                                      | тонкое . . . . .                  | 4-11                                      |
| Развертывание:                        |   | Шлифование на шайбах:             |   |
| чистовое . . . . .                    | 5-9                                       | черновое . . . . .                | —   |
| отделочное . . . . .                  | 6-9                                       | чистовое . . . . .                | 5-6                                       |
| Цилиндрическое фрезерование:          |   | тонкое . . . . .                  | —   |
| обдирочное . . . . .                  | 1-8                                       | Шлифование абразивным полотном:   |   |
| чистовое . . . . .                    | 2-8                                       | грубое . . . . .                  | 6-7                                       |
| Торцовое фрезерование:                |   | чистовое . . . . .                | 8-9                                       |
| обдирочное . . . . .                  | 1-6                                       | тонкое . . . . .                  | 9-10                                      |
| чистовое . . . . .                    | 1-9                                       | Зубошлифование                    | 8-9                                       |
| отделочное . . . . .                  | 1-8                                       | Хонингование:                     |   |
| скоростное . . . . .                  | 6-10                                      | грубое (предварительное)          | 7-12                                      |
| Строгание:                            |   | тонкое (окончательное)            | 7-12                                      |
| черновое . . . . .                    | 1-3                                       | Микрохонинг . . . . .             | 12-14                                     |
| чистовое . . . . .                    | 4-7                                       | Притирка:                         |   |
| отделочное . . . . .                  | 7-9                                       | чистовая . . . . .                | 9-11                                      |
| Сверление и зенкерование              | 3-6                                       | тонкая . . . . .                  | 11-14                                     |
| Протягивание:                         |   | Полирование:                      |   |
| черновое . . . . .                    | 4-9                                       | чистовое . . . . .                | 7-14                                      |
| чистовое . . . . .                    | 4-9                                       | тонкое . . . . .                  | 7-14                                      |
| отделочное . . . . .                  | 4-10                                      | Доводка . . . . .                 | 8-14                                      |
| Шевингование зубчатых колес . . . . . | 8-9                                       | Суперфиниширование:               |   |
| Зубодолбление:                        |   | чистовое . . . . .                | 8-14                                      |
| черновое . . . . .                    | 5-7                                       | тонкое . . . . .                  | 9-14                                      |
| чистовое . . . . .                    | 6-7                                       | Обкатывание роликами              | 9-10                                      |
|                                       |   | Нарезание резьбы резцом . . . . . | 6-8                                       |

Таблица 2

Чистота поверхности при абразивной доводке металлов с различными механическими свойствами [5]

| Металл                           | Высота микронеровностей, мк | Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup> | Класс чистоты поверхности по ГОСТ 2789-51* |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Олово . . . . .                  | 4,5                         | 20                                 | 7  |
| Медь . . . . .                   | 6,6                         | 100                                | 6  |
| Чугун . . . . .                  | 3,8                         | 120                                | 7  |
| Железо Армко . . . . .           | 5,2                         | 130                                | 7  |
| У8 отожженная . . . . .          | 4,3                         | 180                                | 7  |
| ЛК80-3,5 . . . . .               | 3,4                         | 210                                | 8  |
| Бр. АМц 9,2 . . . . .            | 3,2                         | 200                                | 8  |
| Бр. Аж Мц 10-3,5 . . . . .       | 2,8                         | 280                                | 8  |
| Чугун . . . . .                  | 2,6                         | 300                                | 8  |
| Сталь 45, незакаленная . . . . . | 3,0                         | 270                                | 8  |
| ШХ15, незакаленная . . . . .     | 3,0                         | 200                                | 8  |
| 40ХНМА . . . . .                 | 2,5                         | 320                                | 8  |
| Р18, незакаленная . . . . .      | 2,55                        | 325                                | 8  |
| ЭИ 437 . . . . .                 | 2,55                        | 450                                | 8  |
| Сталь 45, закаленная . . . . .   | 1,9                         | 400                                | 9  |
| Р18, . . . . .                   | 1,5                         | 550                                | 9  |
| У8, . . . . .                    | 1,3                         | 395                                | 9  |
| У8, . . . . .                    | 0,8                         | 730                                | 10   |
| ШХ15, . . . . .                  | 0,6                         | 780                                | 10   |
| У8, . . . . .                    | 0,5                         | 800                                | 10-11                                      |

\* Классы чистоты по ГОСТ 2789-51 такие же, как и по ГОСТ 2789-59.

Главной задачей механической обработки деталей машин является создание заданных геометрических форм, размеров и шероховатости поверхности. Однако в процессе механической обработки развиваются большие усилия, металл поверхностных слоев пластически деформируется и упрочняется, возникают значительные температуры, происходит изменение структуры [53, 94, 110].

Некоторые данные об этих характеристиках качества поверхности, получаемые при основных технологических операциях обработки металлов, приведены в табл. 3, 4, 5 [5, 110, 126].

Кроме механических методов обработки поверхностей, развиваются различные электрохимические, химико-механические и электрические методы обработки поверхности изделий и деталей машин.

Таблица 3

Виды обработок и свойства поверхностных слоев (резание) [110]

| Вид обработки   | Степень наклепа,<br>$\frac{H_p \text{ поверхности}}{H_p \text{ сердцевины}} \cdot 100\%$ |            | Глубина наклепа, мк |            |
|---|--|------------|---------------------|------------|
|   | средняя  | наибольшая | средняя             | наибольшая |
|   |  |            |                     |            |
| Точение обычное и скоростное . . . . .                        | 120—150  | 200        | 30—50               | 200        |
| Тонкое точение . . . . .                                      | 140—180  | 220        | 20—60               | —          |
| Фрезерование торцовое . . . . .                               | 140—160  | 200        | 40—100              | 200        |
| Фрезерование цилиндрическое . . . . .                         | 120—140  | 180        | 40—80               | 110        |
| Сверление и зенкерование . . . . .                            | 160—170  | —          | 180—200             | 250        |
| Развертывание . . . . .                                       | —  | 2          | —                   | 300        |
| Протягивание . . . . .  | 150—200  | —          | 20—75               | —          |
| Зубофрезерование и зубодолбление . . . . .                    | 160—200  | —          | 120—150             | —          |
| Шевингование зуба . . . . .                                   | —  | —          | До 100              | —          |
| Шлифование круглое: незакаленная углеродистая сталь . . . . . | 140—160  | 200        | 30—60               | —          |
| малоуглеродистая сталь . . . . .                              | 160—200  | 250        | 30—60               | —          |
| закаленная сталь . . . . .                                    | 125—130  | —          | 20—40               | —          |
| Шлифование плоское . . . . .                                  | 150  | —          | 16—35               | —          |
| Притирка пастами ГОИ . . . . .                                | 112—117  | —          | 3—7                 | —          |

Электролитическое полирование металлов было изобретено в 1911 г. русским ученым Е. И. Шпитальским и получило значительное распространение в различных областях техники. Развитию электролитической полировки в большей мере способствовали работы В. И. Лайнера, Г. С. Воздвиженского, К. П. Баташева и др. [42].

Используя роль химических процессов при полировании, И. В. Гребенщиков предложил и разработал способ химико-механической полировки металлов [18].

В 1943 г. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко предложили электроэрозионный способ обработки любых металлов и сплавов. Этот способ был назван электроискровым. В этом же году независимо от ранее предложенного был изобретен электроэрозионный способ обработки металлов В. Н. Гусевым [165], который назвал его анодно-механическим. При том и другом способе обработки металлов

и сплавов используются явления электрической эрозии металлов при прохождении электрического тока.

Перспективы развития и применения новых электрических способов при обработке металлов велики. Некоторые из перечисленных методов обработки металлов в связи с особенностями процесса воздействия на обрабатываемый металл, кроме основной цели — получения заданной формы и рельефа поверхности, приводят к весьма значительным изменениям структуры и свойств поверхностных слоев. Например, электроэрозионный способ послужил основанием для создания электронского способа упрочнения металлических поверхностей путем нанесения на поверхности изделий различных износостойких покрытий (твердых сплавов), проведения «холодной» цементации металлических поверхностей графитом и др. [165].

Чрезвычайно перспективна и значительно менее разработана крупнейшая область научных и технических знаний о методах создания заданных свойств поверхностных слоев деталей машин.

Изменение свойств поверхностных слоев в заданном направлении осуществляется следующими методами:

1) химико-термической обработкой; 2) поверхностной термической обработкой; 3) механическими средствами; 4) применением покрытий; 5) термомеханической обработкой; 6) электрическим упрочнением.

Наряду с хорошо изученными и давно применяющимися методами упрочнения поверхностных слоев (цементация и азотирование, электролитическое хромирование)

Таблица 4

Глубина наклепа при различных видах механической обработки\* [126]

| Вид обработки                       | Среднее значение глубины наклепа, мк |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Фрезерование плоскостей:            |                                      |
| чистовое . . . . .                  | 100                                  |
| черновое . . . . .                  | 120                                  |
| Точение:                            |                                      |
| чистовое . . . . .                  | 150                                  |
| черновое . . . . .                  | 200                                  |
| Сверление . . . . .                 | 250                                  |
| Зенкерование . . . . .              | 250                                  |
| Развертывание . . . . .             | 250—300                              |
| Протягивание . . . . .              | 15—80                                |
| Зубофрезерование или зубодолбление: |                                      |
| черновое . . . . .                  | 140                                  |
| чистовое . . . . .                  | 120                                  |
| Шевингование . . . . .              | 100                                  |

\* Материал Ст.4.

разрабатывается и начинает внедряться много новых методов упрочнения. Развитие методов упрочняющей технологии особенно характерно для последнего десятилетия. Некоторые данные о характеристиках свойств поверхностных слоев деталей машин, обработанных разными методами упрочняющей технологии, приведены в табл. 6, 7, [2, 110].

Таблица 5

Толщина слоя, затронутого нагревом и деформациями при механической обработке [126]

| Вид обработки                | Толщина слоя, мк |
|------------------------------|------------------|
| Точение резцом               | 250—2000         |
| Шлифование абразивами        | 12—75            |
| Тонкое шлифование абразивами | 2,5—25           |
| Сверхточделка                | 0,25             |

Одной из важных характеристик качества поверхности деталей машин являются остаточные напряжения 1-го рода, возникающие в процессе их обработки.

К сожалению, далеко не всегда исходное качество

Таблица 6

Значения твердости поверхностных слоев при различных технологических методах упрочнения стали [72]

| Метод упрочнения                         | Твердость, кг/мм <sup>2</sup> |
|--|-------------------------------|
| Поверхностный наклеп                     | 300—390                       |
| Термическая обработка:                   |                               |
| закалка с отпуском                       | 650—700                       |
| высокочастотная закалка                  | 740—760                       |
| закалка при помощи облучения электронами | 740—760                       |
| Химико-термическая обработка:            |                               |
| цементация                               | 570—780                       |
| азотирование                             | 1100—1200                     |
| термодиффузионное хромирование           | 1500—1600                     |
| борирование                              | 2200                          |
| ванадирование                            | 1800                          |
| ниобирование                             | 2000                          |
| Электролитические покрытия:              |                               |
| хромирование                             | 900—1200                      |
| хромирование и карбидизация              | До 1800                       |
| никелирование                            | 600—1100                      |
| химическое никелирование                 | 900—950                       |
| покрытие марганцем                       | 980—1100                      |
| Фрикционно-диффузионное                  | 1100—1300                     |
| Электронское                             | 650                           |

Таблица 7

Остаточные напряжения в поверхностном слое при механической, термической и термохимической обработке деталей машин [110]

| Вид обработки  | Обрабатываемый материал | Остаточные напряжения, кг/мм <sup>2</sup> | Знак остаточных напряжений* | Глубина распространения остаточных напряжений, мм |
|--|-------------------------|---|-----------------------------|---|
| Закалка  | Углеродистая сталь      | 40—75                                     | —                           | —   |
| Обкатка поверхности роликами                         | Сталь                   | 70—80                                     | —                           | —   |
| Дробеструйная обкатка                                | "                       | 100—120                                   | —                           | —   |
| Азотирование   | Сталь ЭИ275             | 75—84                                     | —                           | —   |
| "  | Сталь 38ХМЮА            | 120—130                                   | —                           | —   |
| Хромирование   | "                       | 40  | (—)                         | —   |
| Никелирование  | "                       | 45  | (—)                         | —   |
| Покрытие медью                                       | "                       | 20  | (—)                         | —   |
| Круглое шлифование                                   | Сталь 20                | Более 18                                  | (—)                         | 0,25  |
| Плоское шлифование                                   | Малоуглеродистая сталь  | 35  | (—)                         | 0,35  |
| "  | Нержавеющая сталь       | 40  | (—)                         | 0,35  |
| "  | Сталь 45                | 16—28                                     | (—)                         | —   |
| "  | Сталь 20                | 88  | —                           | —   |
| Точение  | "                       |   |                             |   |
| Торцовое фрезерование                                | Сталь                   | 140—150                                   | —                           | —   |
| Скоростное резание с большими отрицательными углами  | Сталь 18ХНМА            | 90—100                                    | (+)                         | —   |
| Торцовое фрезерование при скорости резания 210 м/мин | Сталь 45                | 100—110                                   | (—)                         | —   |
| То же, при 610 м/мин                                 | Сталь 45                | 50—60                                     | (+)                         | —   |
| Наружное круглое шлифование                          | Сталь                   | 40—100                                    | —                           | 0,025—0,03  |
| Точение  | Сталь закаленная        | 30—40                                     | (+)                         | —   |
| "  | Сталь 40                | 40—60                                     | (—)                         | 0,006—0,15  |
| Шлифование   | Техническое железо      | 40—100                                    | (+)                         | 0,005—0,008                                       |
| "  | Отожженная сталь        | 60—80                                     | или (—)                     | —   |

\* + сжимающие напряжения;  
— растягивающие напряжения.

Продолжение табл. 7

| Вид обработки   | Обрабатываемый материал | Остаточные напряжения, кг/мм <sup>2</sup> | Знак остаточных напряжений* | Глубина распространения остаточных напряжений, мм |
|---|-------------------------|---|-----------------------------|---|
| Точение затупившимся резцом   | Сталь                   | 100                                       | —                           | —   |
| Скоростное точение  | —                       | —   | —                           | 0,05—0,1  |
| Скоростное точение с передним углом $\alpha = -30^\circ$                | —                       | —   | —                           | 0,65  |
| Точение и фрезерование со скоростью резания от 11—16 м/мин до 210 м/мин | Сталь 45                | 60—95                                     | (—)                         | —   |
| Торцовое фрезерование со скоростью резания 490—610 м/мин                | —                       | —   | (+)                         | —   |

\* + сжимающие напряжения;  
— растягивающие напряжения.

ство поверхности, его геометрические характеристики и особенно свойства поверхностных слоев, обусловленные технологической обработкой, правильно назначаются и применяются для конкретных пар трения. Наибольшая эффективность технологических средств улучшения геометрии поверхностей и упрочняющей технологии возможна при условии знания режимов силового нагружения при трении, температурных режимов, состава рабочих жидких и газовых сред. Необходимы также четкие представления о влиянии основных параметров качества поверхности, получаемых при технологической обработке, на процессы трения, смазки и износа. Только при этом условии возможно наиболее эффективное и широкое применение существующих средств улучшения качества поверхности в технологических процессах обработки металлов и разработки новых методов. Поэтому необходимо изучение и оценка исходного качества поверхности в связи с его влиянием на формирование сил трения, антифрикционность, фрикционность и износостойкость.



## 5. Приработка трущихся сопряжений

В практике эксплуатации машин хорошо известна необходимость постепенного нагружения новых машин, обкатки машин вхолостую и применения других предосторожностей для предотвращения повреждений поверхностей трения в начале их работы. Эти меры, необходимые для сохранения регламентированных зазоров трущихся сопряжений и обеспечения надежности и долговечности работы машин, вызваны различием качества поверхностей деталей машин в исходном состоянии после окончательных операций технологической обработки и качеством рабочих поверхностей при эксплуатации. Трансформации характеристик качества поверхностей в начале работы трущихся сопряжений называются приработкой.

В основе процесса приработки — перехода от исходного состояния к рабочему — лежат сложные механические, физические и химические процессы. Важным внешним признаком приработки является изменение геометрии поверхности макро-, микро- и субмикроскопического порядка, причем если в основе формирования исходной геометрии поверхности лежали, как правило, чисто механические факторы и процессы, то при формировании геометрии поверхности в процессе трения преобладающими являются факторы и процессы механо-химические и физико-механические.

Главным в процессе приработки следует считать коренное изменение свойств тонких поверхностных слоев трущихся деталей машин, связанное с возникновением специфических вторичных структур на поверхностях трущихся сопряжений, блокирующих поверхности чистых металлов от непосредственного контакта и неизбежно связанных с этим повреждений.

Значение периода приработки особенно велико для ответственных узлов, лимитирующих точность, надежность и долговечность работы машин, для тех сопряжений и узлов машин, которые работают в условиях высоких удельных нагрузок, увеличенных температур, в агрессивных газовых средах, в неблагоприятных условиях изменения скоростей скольжения, при недостаточном подводе смазки. Как правило, в перечисленных условиях запас износостойкости применяемых материалов находится на пределе. В связи с этим в трущихся сопряжениях

в период приработки, а также в последующие периоды могут возникать характерные дефекты, вызываемые схватыванием и разрушением контактирующих поверхностей. Эти дефекты совершенно недопустимы в работе ответственных деталей, так как они вызывают резкое увеличение износа, приводят к значительному снижению объемной усталостной прочности, разрушению деталей и аварии машин.

В связи с процессом приработки необходимо рассмотреть следующие вопросы: о геометрии поверхности и площади фактического контакта в начальном периоде работы сопряжения, об образовании поверхностных связей и их видах, о вторичных структурах, их генерации и разрушении, о патологических производных явлениях, возникновение которых особенно возможно в процессе приработки. Комплекс этих вопросов составляет содержание теории приработки узлов и сопряжений деталей.

При исследовании процесса приработки или начального износа рассматривали закономерности изменения величины износа, силы трения и шероховатостей в зависимости от времени [24, 25, 147, 148, 149, 159]. В некоторых исследованиях затрагивали вопрос об изменении в

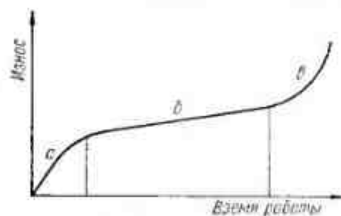


Рис. 29. Принципиальная кривая износа деталей машин в зависимости от времени их работы.

а — начальный износ; б — установившийся износ; в — усиленный (аварийный) износ.

периоде приработки площади фактического контакта [9]. Физическую и физико-химическую сторону процесса приработки специально не рассматривали.

Механический подход к изучению приработки дал ряд важных частных закономерностей.

В результате многих исследований установлено, что в работе деталей машин существует три периода износа (рис. 29).

1. Период начального износа, или период приработки, когда происходит переход от исходного состояния поверхностей трения к установившемуся. В этом периоде скорость износа все время изменяется, приближаясь к некоторой постоянной величине, характерной для периода установившегося износа.

Во время приработки условия трения поверхностей деталей машин постепенно изменяются. Величина фактической площади контакта увеличивается, а среднее удельное давление и средняя температура на площади фактического контакта понижаются.

В начале приработки удельные давления на фактической площади контакта очень большие. В конце приработки величина удельных давлений соответствует допустимой для нормальной эксплуатации машин. При этом происходит изменение структуры поверхности трения.

2. Период установившегося износа, отличающийся относительным постоянством условий работы трения и постоянной скоростью износа, характерной для данных условий трения.

3. Период усиленного износа, вызываемый изменениями зазоров в трущихся сопряжениях и геометрической формы деталей и связанными с этим резкими изменениями условий работы поверхностей трения, а также интенсивным ростом износа.

Анализ работы сопряжений в периоды начального, установившегося и усиленного износов показывает, что для увеличения срока службы деталей машин необходимо сократить величину начального износа до минимума, увеличить продолжительность установившегося износа до возможного максимума и предупредить наступление усиленного износа.

Процесс установившегося износа тесно связан с процессом приработки, или начального износа. При различных условиях трения процесс приработки протекает по-разному. От условий, в которых происходит приработка, и от результатов приработки зависят развитие износа в период эксплуатации и время наступления усиленного или аварийного износа. На рис. 30 показано семейство кривых износа сопряженных поверхностей в зависимости от продолжительности процесса трения. Кривая 2 характеризует наиболее общий случай развития износа во времени. При неблагоприятных условиях приработки износ будет характеризо-

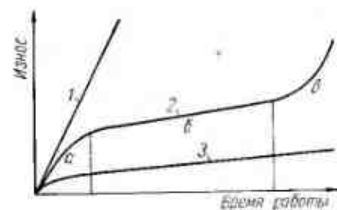


Рис. 30. Кривые износа деталей машин в зависимости от времени их работы.

ваться кривой 3. В этом случае в процессе приработки возникает интенсивное схватывание; на поверхностях, не имеющих защитных пленок, при недостаточной смазке образуются задиры и другие повреждения. Такое состояние поверхности не допускает нормальной эксплуатации машины.

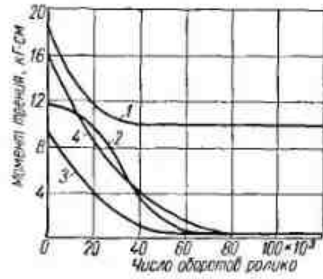


Рис. 31. Кривые изменения момента трения в период приработки колодки со слоем баббита Б-83 и стальных роликов в зависимости от чистоты поверхности:

1 — шлифованная (высота микронеровностей 2,1 мкм); 2 — притертая (высота микронеровностей 1 мкм); 3 — полированная (высота микронеровностей 0,3 мкм); 4 — искусственно приработанная (высота микронеровностей 2 мкм).

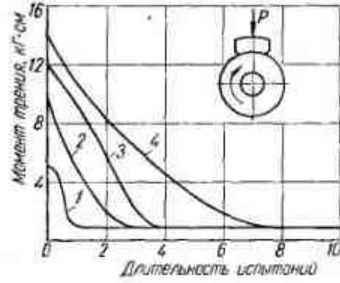


Рис. 32. Кривые изменения момента трения в период приработки чугунной колодки и стальных роликов с различной обработкой поверхности:

1 — поверхность после суперфиниширования (высота микронеровностей 0,63 мкм); 2 — притертая поверхность (высота микронеровностей 0,025—0,5 мкм); 3 — шлифованная поверхность (высота микронеровностей 1,8 мкм); 4 — тонко обточенная поверхность (высота микронеровностей 2,5 мкм).

При резком улучшении процесса приработки характер износа сопряженной пары будет соответствовать кривой 1. В этом случае период начального износа сокращен, интенсивность износа и силы трения небольшие, явления схватывания не получают развития, при приработке создается оптимальный микрорельеф поверхностей трения и образуются износостойкие вторичные структуры.

Важным показателем неустановившегося периода трения — периода приработки — является изменение силы и коэффициента трения. На рис. 31, 32 приведены кривые, характеризующие изменение силы трения во времени в зависимости от периода приработки [149]. Эти кривые свидетельствуют о прямой зависимости момента трения

от времени испытания. Для поверхностей с разными исходными классами чистоты время приработки и начальные параметры внешнего трения различны. Высокое значение момента трения на графике (рис. 31) следует объяснить незавершенным периодом приработки.

Интересные данные о влиянии способа обработки поверхности стали на коэффициент трения и время приработки приводит Л. Я. Попидов [126] (табл. 8). Согласно этим данным, в зависимости от способа обработки поверхностей коэффициенты трения и переход к установившемуся трению изменяются в широких пределах.

Для шлифованных поверхностей коэффициент трения не имеет стабильного значения даже после 300 000 оборотов. Для электрополированных поверхностей стабильное значение коэффициента трения наблюдается уже после 20 000 оборотов. Величина коэффициентов трения в последнем случае также значительно ниже.

Наиболее изучен процесс приработки трущихся сопряжений в зависимости от шероховатостей

Таблица 8

Влияние способа обработки поверхности стали на коэффициент трения [126]

| Способ обработки  | Коэффициент трения после количества оборотов |       |       |       |       |        |
|---|--|-------|-------|-------|-------|--------|
|   | 10000  | 20000 | 40000 | 60000 | 80000 | 100000 |
| Обе поверхности механически шлифованные                                 | 0,116  | 0,097 | 0,082 | 0,070 | 0,060 | 0,052  |
|   | 0,102  | 0,084 | 0,070 | 0,580 | 0,051 | 0,045  |
| Обе поверхности механически полированные                                | 0,092  | 0,062 | 0,042 | 0,028 | 0,016 | 0,016  |
|   | 0,032  | 0,012 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007  |
| Одна поверхность механически полированная, другая — электрополированная | 0,041  | 0,043 | 0,032 | 0,031 | 0,016 | 0,016  |
|   | 0,007  | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007  |
| Обе поверхности электрополированные                                     | 0,041  | 0,043 | 0,032 | 0,031 | 0,016 | 0,016  |
|   | 0,007  | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007  |



поверхности [147, 149]. Фундаментальные исследования в этой области были выполнены М. М. Хрущовым [159]. Наиболее общим выводом в связи с изучением геометрических параметров поверхности в процессе приработки является положение об оптимальной микрогеометрии приработанных поверхностей. По мнению многих авторов, характер разрушения неровностей определяется условиями изнашивания.

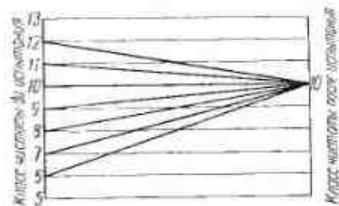


Рис. 33. График изменения микрорельефа поверхности трения при испытании в течение 5 ч образцов, изготовленных из легированной закаленной стали с различным исходным классом чистоты поверхности при трении скольжения в условиях граничной смазки при скорости относительного перемещения 5 м/сек и удельной нагрузке 50 кг/см<sup>2</sup>.

После приработки устанавливается оптимальная шероховатость, не зависящая от первоначальной шероховатости, полученной при механической обработке. Независимо от величины и характера первоначального рельефа после приработки в одинаковых условиях устанавливается один и тот же рельеф. Эта новая шероховатость может быть как больше, так и меньше первоначальной.

Данные об изменении микрорельефа поверхностей с различным исходным классом чистоты приведены также на рис. 33 [72].

Интересные исследования процесса приработки были выполнены М. М. Тененбаумом [150].

На рис. 34 приведены профилограммы, снимаемые по мере приработки стальных роликов при трении о чугунную колодку. Как видно из приведенных профилограмм, снятых с одного и того же участка поверхности, по мере приработки происходит постепенное сглаживание микронеровностей и переход к установившемуся состоянию. Процесс сглаживания шероховатостей происходит по поверхности неравномерно. М. М. Тененбаум указывает, что в некоторых случаях шероховатость поверхностей увеличивается (рис. 35) [150].

В связи с изменением геометрических характеристик поверхности в процессе приработки представляет большой интерес изменение площади фактического контакта,

зависящее от шероховатостей. По данным М. Н. Бучина, эта зависимость представлена в табл. 9 [9]. Эти результаты находятся в соответствии с представлениями об изменении геометрии поверхности в период приработки.

Данные о процессе приработки, полученные в лабораторных опытах, подтверждены рядом исследований про-

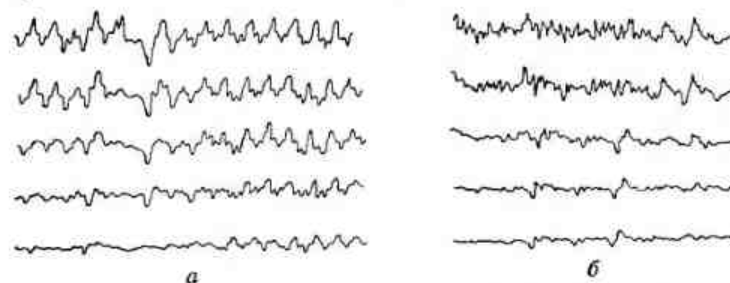


Рис. 34. Изменение профиля микронеровностей стальных роликов в процессе приработки при трении о чугунную колодку: а — только обточенная поверхность, увеличение по высоте 6000; б — шлифованная поверхность, X 8000.

цесса приработки сопряженных деталей конкретных машин [43, 131].

Н. А. Каменевым был выполнен следующий эксперимент [43]. Две группы хромированных гильз (всего восемь) были обработаны хонингованием до различной степени чистоты поверхности. При этом первая группа гильз

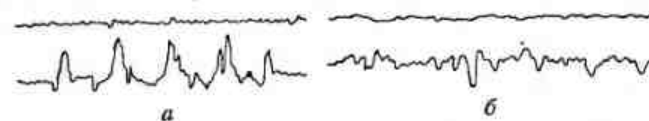


Рис. 35. Профилограммы исходных (вверху) и приработанных (внизу) поверхностей, X 4000: а — шейка коленчатого автомобиля «Москвич»; б — втулка поворотного кулачка автомобиля «Победа».

(гильзы № 1—4, табл. 10) имела чистоту поверхности  $H_{ск}$  в пределах 1,6—0,6, а вторая (гильзы № 5—8) — 0,42—0,2. После хонингования гильзы подвергались холдной обкатке (приработке) на специальном стенде в течение 3—5 ч.

В результате обкатки чистота поверхности гильз значительно улучшилась. Гильзы первой группы получили

чистоту поверхности 0,7—0,25, а гильзы второй группы — 0,24—0,09. После холодной обкатки гильзы были установлены для длительного испытания на двигатель, работавший в течение 80 ч. При замере чистоты поверхности гильз после работы на двигателе обнаружили, что независимо от исходной чистоты поверхности все гильзы приобрели почти одинаковое значение  $H_{ск}$  в пределах 0,24—0,28.

Таблица 9

Изменение площади фактического контакта

| Условия контакта                | Площадь соприкосновения      |               | Примечание   |
|---------------------------------|------------------------------|---------------|--|
|                                 | фактическая, мм <sup>2</sup> | относительная |  |
| Перед скольжением               | 1,6                          | 0,05          | Контакт осуществлялся при трении шлифованной поверхности ползуна (Бр. ОС 5-25) по полированной поверхности стали при удельном давлении 20 кг/см <sup>2</sup> |
| После скольжения по пути 7,6 см | 6,0                          | 0,19          |  |
| То же, 15,0 "                   | 10,6                         | 0,33          |  |
| " " 30,0 "                      | 16,3                         | 0,51          |  |
| " " 45,0 "                      | 18,0                         | 0,57          |  |

Изменение чистоты поверхности каждой гильзы в результате холодной обкатки и работы на двигателе показано в табл. 10.

На основании данных экспериментов и данных практики ремонта двигателей Н. А. Каменев сделал следующие выводы:

1. Оптимальная чистота поверхности зеркала хромированных цилиндров, способствующая ускорению приработки и повышению износоустойчивости цилиндро-поршневой пары двигателя, выражается величиной  $H_{ск} = 0,2 \div 0,3$ .

2. Обеспечивать более высокую степень чистоты поверхности при механической обработке хромированных цилиндров нецелесообразно, поскольку это не только не требуется по условию работы двигателя, но и может привести к повышенному износу поршневых колец и возникновению задиров на трущихся поверхностях цилиндро-поршневой пары.

Исследование оптимальной чистоты поверхности трущихся пар — коленчатый вал и вкладыши коренных

и шатунных подшипников — было проведено на Горьковском автомобильном заводе В. В. Пузанковым [131]. В этой работе, выполненной в максимально приближенных к эксплуатации условиях, были определены количественные величины шероховатости  $H_{ск}$ , устанавливающиеся при эксплуатации сопряженных пар в нормальных условиях.

Было установлено, что оптимальная чистота поверхности  $H_{ск}$  для шеек коленчатого вала находится в пределах 0,15—0,25 мкм. Для вкладышей подшипников  $H_{ск} = 0,5 \div 0,8$  мкм. В работе В. В. Пузанкова подтвержден тот факт, что если исходная чистота поверхности близка к оптимальной, то после приработки она остается без заметных изменений, а если она выше или ниже оптимальной, то оптимальное значение достигается в процессе приработки. Когда исходная чистота поверхности находится выше или ниже оптимальной, она отрицательно влияет как на продолжительность приработки, так и на величину износа. Исходная чистота поверхности закаленного стального вала ( $HRC$  55—60) резко

Таблица 10

Шероховатость  $H_{ск}$  мкм, поверхности хромированных цилиндров двигателей [43]

|           | мм гильз  |           |           |           |           |           |           |   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|
|           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8 |
| 1,6—1,4   | 1,5—1,3   | 1,5—1,2   | 0,9—0,6   | 0,42—0,30 | 0,40—0,30 | 0,25—0,22 | 0,22—0,20 |   |
| 0,7—0,5   | 0,65—0,58 | 0,65—0,50 | 0,30—0,25 | 0,20—0,18 | 0,24—0,10 | 0,15—0,10 | 0,13—0,09 |   |
| 0,26—0,25 | 0,35—0,25 | 0,25—0,23 | 0,25—0,23 | 0,26—0,25 | 0,27—0,25 | 0,30—0,25 | 0,25—0,23 |   |

До обкатки

После холодной обкатки в течение 3 1/2 часов

После работы на двигателе в течение 80 часов

Влияет на продолжительность приработки, износ трущихся пар и коэффициент трения, в то время как исходная чистота поверхности мягких баббитовых вкладышей почти не влияет на продолжительность приработки, износ, коэффициент трения и температуру масла.

Исследованием также установлено, что приработка исследуемых сопряжений происходит быстрее при повышенных числах оборотов вала и удельных давлениях.

Анализ выполненных работ, посвященных вопросам приработки, показывает, что переход от исходного состояния поверхностей к их рабочему состоянию рассматривался в основном с позиций изменения геометрических параметров поверхности и изучения некоторых количественных показателей процессов трения и износа. Таким образом выяснялась только одна из сторон сложного процесса перехода к установившемуся трению. Физико-химическая сторона явлений, происходящих в тонких поверхностных слоях трущихся сопряжений в процессе приработки, не изучалась.

Исследования трения и износа деталей машин [45, 52] и экспериментальное изучение трения и износа металлов в лабораторных условиях [153] показали чрезвычайно большое значение физико-химических факторов в процессах установившегося трения и износа. К настоящему времени разработаны основы теории физико-химического действия рабочих сред при трении и износе металлов, а также теория вторичных структур и окислительного износа [12, 51, 72].

Очевидно, что наряду с изменением геометрических характеристик контакта трущихся поверхностей огромное значение имеет переход в процессе приработки от исходной структуры и свойств поверхностных слоев к структуре и свойствам, характеризующим процесс установившегося трения. Установлено, что в начале работы трущихся сопряжений в их поверхностных слоях происходят резко выраженные изменения структуры и свойств тонких поверхностных слоев. Физико-химические явления, протекающие при трении и износе, приводят к образованию вторичных структур, отсутствующих на исходных поверхностях и формирующихся непосредственно при трении.

При рассмотрении изменений геометрических параметров поверхности в процессе приработки было пока-

зано, что существует оптимальная шероховатость, характеризующая установившийся процесс трения. Следует полагать, что точно также существуют оптимальные параметры изменений структуры и свойств поверхностных слоев, устанавливающиеся после процесса приработки. Объективная оценка характеристик приработанных поверхностей должна включать в себя оптимальные шероховатость поверхности и глубину расположения и свойства вторичных структур, а также характеристики перераспределения внутренних напряжений в поверхностных слоях трущихся сопряжений.

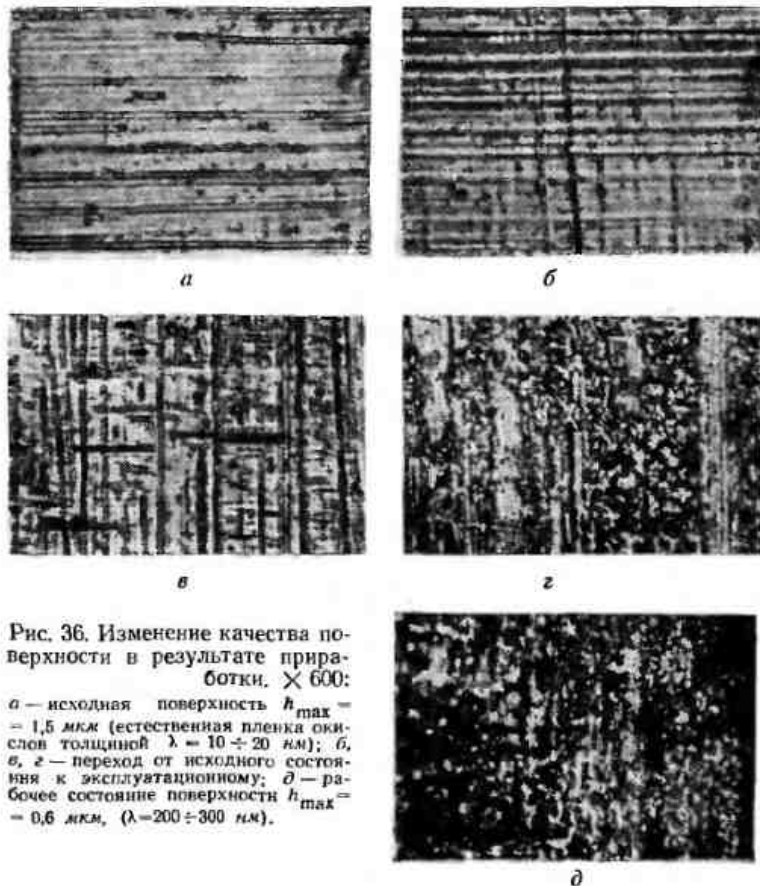


Рис. 36. Изменение качества поверхности в результате приработки.  $\times 600$ :

*а* — исходная поверхность  $h_{\text{max}} = 1,5 \text{ мкм}$  (естественная пленка окислов толщиной  $\lambda = 10 \div 20 \text{ нм}$ ); *б, в, г* — переход от исходного состояния к эксплуатационному; *д* — рабочее состояние поверхности  $h_{\text{max}} = 0,6 \text{ мкм}$ , ( $\lambda = 200 \div 300 \text{ нм}$ ).

Переход от исходного качества поверхности к установившемуся в результате приработки показан на рис. 36.

Далеко не всегда процесс приработки узлов трения машин, а также образцов, испытанных в лабораторных условиях, протекает нормально по известной схеме. При нарушении нормальных условий приработки вследствие силовых перегрузок, напряженного теплового режима, недостаточной смазки и других факторов возникают повреждения и переход к патологическим видам разрушения. Наиболее часто встречающимся дефектом в процессе приработки является процесс схватывания 1 или 2-го рода. Вероятность развития схватывания в начальный



Рис. 37. Схватывание в процессе приработки деталей двигателя,  $\times 5$ .

период работы сопряжения очевидна. Большие локальные давления, обусловленные малой величиной площади фактического контакта, и недостаточная защита сопряженных поверхностей вторичными структурами приводят к значительному сближению сравнительно чистых ювенильных поверхностей сильно деформированного металла, атомы которого обладают повышенной диффузионной активностью.

Это приводит к образованию металлических связей, их упрочнению и разрушению. Пример возникновения схватывания в процессе приработки деталей двигателя показан на рис. 37.

Исследования процесса приработки трущихся деталей, а также анализ основных характеристик качества поверхности после технологической обработки и при эксплуатации позволяют сформулировать некоторые теоретические положения и дать ряд практических рекомендаций для качественной приработки деталей машин.

Главной задачей процесса приработки трущихся сопряжений является достижение минимальных сроков приработки и минимальных величин износа прирабатываемых поверхностей. Процесс приработки заключается не только в изменении геометрии поверхности, но и в радикальной перестройке структуры и свойств тонких

объемов металла, расположенных у поверхностей трения. Поэтому очевидно, что механический подход к решению задач приработки не может быть исчерпывающим. Создание при обработке геометрии поверхности, соответствующей оптимальной, формирующейся в нормальных условиях эксплуатации, не является полным решением задачи о качественной приработке поверхностей. Кроме оптимальной геометрии, необходимо обеспечить оптимальные структуры и свойства поверхностных слоев. При изготовлении машин и при существующих методах технологической обработки решение этой двойной задачи пока нереально. По-видимому, при технологической обработке необходимо стремиться к такой геометрии поверхности, которая позволила бы осуществлять приработку в минимальные сроки без перехода в патологические процессы схватывания и с минимальными потерями на износ. Очевидно, что формирование защитных, вторичных структур значительно эффективнее осуществляется в самом процессе трения при многократном воздействии нагрузки на поверхность контакта в присутствии специальных физически и химически активных рабочих сред.

Практически хорошо приработанная поверхность с оптимальным микрорельефом и вторичной структурой, прочно и равномерно расположенной на поверхности контакта, может и должна быть получена двумя основными путями: 1) технологическим путем при изготовлении, доводке и сборке деталей и узлов; 2) при эксплуатации, особенно при обкатке и в начальный период работы машины. Технологический путь заключается:

а) в подборе материалов пары трения, не склонных к взаимному схватыванию, что очень важно потому, что в начальный период поверхности трения не защищены прочными пленками вторичных структур, которые образуются при дальнейшей работе трения, кроме того, фактические удельные давления весьма велики и значительно превышают величину давления при установившемся износе, что также при повышенной склонности к схватыванию может вызвать нежелательные явления и дефекты;

б) в механической обработке поверхности и создании микрорельефа, наиболее близкого к оптимальному рельефу, образуемому при работе данного сопряжения. Излишне грубая шероховатость будет вызывать пики

удельных давлений, разрушение поверхностей, образование больших зазоров, кроме того, увеличит время приработки. Излишняя чистота микрорельефа поверхности может вызвать ухудшение условий смазки и экономически нецелесообразна;

в) в качественном монтаже сопряженных деталей и узлов, обеспечивающем отсутствие перекосов, при наличии которых возникают повышенные удельные нагрузки, приводящие к нежелательным явлениям. Необходимо также обеспечить соответствующие зазоры в сопряжениях и исключить возможность попадания между трущимися поверхностями абразивных частиц и загрязнений.

При эксплуатации пути улучшения приработки заключаются:

а) в правильном нагружении узлов трения при обкатке и обеспечении плавного роста нагрузки на рабочие звенья во времени;

б) в применении смазок, способствующих образованию оптимального микрорельефа, структуры и свойств поверхностей трения, а также физически и химически активных добавок (поверхностно-активных веществ, коллоидного графита, металлозолей, сернистых соединений) и т. п.;

в) в правильном выборе режима эксплуатации машин в установившемся период.

Как первый, так и второй путь улучшения процесса приработки позволяет резко сократить время приработки, вести приработку с малыми коэффициентами трения, малыми увеличениями температур и малой интенсивностью износа, а также с меньшими фактическими удельными давлениями. При этом резко сократятся возможности возникновения схватывания как в начальный период работы, так и в последующий период эксплуатации машин. Приработка будет происходить с лучшими условиями смазки и более быстрым образованием вторичных структур. Переход к установившемуся режиму будет осуществлен с меньшими потерями на износ и с получением более износостойких поверхностей.



Основные показатели трения и износа, надежности и долговечности машин обусловлены физико-химико-механическими процессами, протекающими на поверхностях трения и определяющими характеристики качества поверхности, формирующегося непосредственно при эксплуатации.

Качество поверхностей трения деталей машин в период нормального или установившегося режима трения и износа является результатом действия ряда факторов. Основными факторами являются внешние силовые воздействия, вызывающие повторную деформацию поверхностных слоев. Существенный вклад в формирование поверхностей и свойств поверхностных слоев вносится физико-химическим действием рабочих сред. Важную роль играет также исходный материал, его структура и свойства.

Весьма существенное влияние на весь период эксплуатации и особенно на период начала работы оказывает качество поверхности, полученное при технологической обработке.

В содержание главы 3 входит дифференцированный анализ роли основных факторов, обуславливающих формирование качества поверхностей трения. В первых четырех разделах приведены основные теоретические сведения о механизмах пластической деформации, теории несовершенств кристаллического строения (теории дислокаций), теории статического трения и начала движения, описаны специальные методики исследования состояния поверхности и дислокационной структуры. В этих разделах последовательно представлены результаты исследования качества поверхности при разных условиях деформации, в присутствии пленок окислов, пленок адсорбированной смазки, при статическом нагружении

и трении движения, показаны особенности строения текстурированных поверхностей, представлены данные о рельефе поверхностей металлов, имеющих разное кристаллическое строение при диспергировании — износе.

Наряду с дифференцированным методом изучения роли отдельных факторов в формировании качества поверхности, возникающего непосредственно при трении, в главе 3 представлены результаты исследования влияния всей гаммы факторов, участвующих в формировании геометрии поверхности и свойств поверхностных слоев при трении. Эти данные помещены в пятом разделе главы. С этой целью исследовано большое количество пар трения, работавших в лабораторных условиях на испытательных установках, и много деталей конкретных машин, работавших в разных условиях эксплуатации.

На основании анализа качества поверхностей и механизмов его формирования при дифференцированном исследовании роли отдельных факторов и изучения влияния всей суммы факторов, действующих непосредственно при трении, разработана классификация рабочего рельефа поверхностей трения деталей машин.

## 6. Теория несовершенств кристаллического строения и механизмы пластической деформации

Известно, что металлы являются кристаллическими веществами, состоящими из одного или множества кристаллов или зерен, разделенных межзеренными границами. Основной характеристикой кристаллического материала является определенная и упорядоченная внутренняя структура, простирающаяся в трех измерениях, или кристаллическая решетка.

Элементарные кристаллические решетки (ячейки), содержащие одинаковое количество атомов или ионов, образуют пространственную решетку. Понятие пространственной решетки является геометрической абстракцией, с помощью которой можно описать и установить соотношение элементов симметрии реальных кристаллов. Известно, что существует 14 различных типов пространственных решеток (решеток Бравэ).

Пространственные решетки различных веществ отличаются

формой и размерами своих элементарных ячеек. Три основных вектора, являющиеся ребрами элементарной ячейки, называют трансляциями, а абсолютную величину трансляций  $a, b, c$  — периодами элементарной ячейки. Периоды ячейки и три угла между ними однозначно характеризуют элементарную ячейку [10, 112, 113].

Таблица 11

Соотношения между периодами и осевыми углами

| Наименование сингоний     | Соотношение между периодами | Соотношение между осевыми углами                  |
|---------------------------|-----------------------------|---|
| Кубическая . . . . .      | $a = b = c$                 | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$              |
| Тетрагональная . . . . .  | $a = b \neq c$              | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$              |
| Ромбическая . . . . .     | $a \neq b \neq c$           | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$              |
| Гексагональная . . . . .  | $a = b \neq c$              | $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$   |
| Ромбоэдрическая . . . . . | $a = b = c$                 | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$           |
| Моноклинные . . . . .     | $a \neq b \neq c$           | $\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$ |
| Триклинная . . . . .      | $a \neq b \neq c$           | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$     |

Исходя из различных соотношений между трансляциями и осевыми углами, установлено семь кристаллических систем — сингоний, с помощью которых описывают все многообразие пространственных решеток встречающихся в природе кристаллов.

В табл. 11 даны названия сингоний и соотношения между периодами и осевыми углами [113].

Каждый металл имеет определенный тип кристаллической решетки. Большинство металлов имеют кубическую решетку объемноцентрированную (о. ц. к.), гранецентрированную (г. ц. к.), или гексагональную, плотно упакованную с соотношением осей  $c/a = 1,63$ , что соответствует наиболее плотной упаковке шаров.

В совершенном кристалле должно быть правильное периодическое расположение атомов, простирающихся до бесконечности. Но в действительности таких кристаллов практически не существует. В реальных кристаллах правильное кристаллическое строение всегда имеет определенные нарушения — дефекты. Все дефекты в кристаллах разделяют на четыре группы: точечные, линейные, поверхностные (плоские) и объемные [130, 145].

Точечные дефекты физически бесконечно малы в трех измерениях. К ним относятся: вакансии — узлы кристал-

лической решетки, не занятые атомами; дислоцированные атомы — атомы, расположенные в междуузлиях; атомы примесей и т. д.

Линейные дефекты малы в двух измерениях, а в третьем имеют значительную протяженность. К линейным дефектам относятся дислокации. Дефекты упаковки (нарушения в чередовании плотно упакованных атомных плоскостей, границы двойников и т. д.) относят к плоским дефектам, имеющим определенную протяженность в двух измерениях.

Скопление точечных дефектов и системы дислокаций относятся к объемным дефектам, имеющим значительные размеры в трех измерениях.

Понятия о дефектности строения реальных кристаллов были развиты в связи с попыткой объяснить расхождение между теоретически рассчитанной прочностью кристаллических тел и экспериментально определяемой. Теоретический расчет прочности оценивается величиной сил межатомного взаимодействия в идеальном кристалле и на несколько порядков больше реально наблюдаемой прочности. Так, для монокристаллов алюминия величина критического сопротивления сдвигу равна  $0,12—0,24 \text{ кг/мм}^2$ , а теоретический расчет дает  $90 \text{ кг/мм}^2$ ; для железа реальная величина критического сопротивления сдвигу составляет  $2,90 \text{ кг/мм}^2$ , теоретическая —  $230 \text{ кг/мм}^2$ . Такое огромное расхождение теоретических расчетов прочности и экспериментальных данных не могло быть объяснено с точки зрения недостаточно правильной оценки величины сил взаимодействия между атомами.

Было высказано много гипотез о том, что наблюдаемое несоответствие реальной и теоретической прочности связано с наличием различных неоднородностей и дефектов строения кристаллической решетки. При действии на кристаллы внешних деформирующих сил незначительной величины около этих микроскопических неоднородностей возникают перенапряжения, степень которых может достигать  $10^3—10^4$ , т. е. в этих местах будут действовать напряжения, близкие к теоретической прочности. Однако в этих гипотезах вначале не учитывалась природа дефектов и причины их появления в кристаллах.

В настоящее время доказано, что наиболее важная роль в строении реальных кристаллов и деформации их

принадлежит вполне определенным дефектам — дислокациям. В последние годы дислокационная теория очень быстро развивается и благодаря новым методам физического эксперимента получает все новые экспериментальные доказательства. С помощью электронных микроскопов высокого разрешения удалось наблюдать дислокации

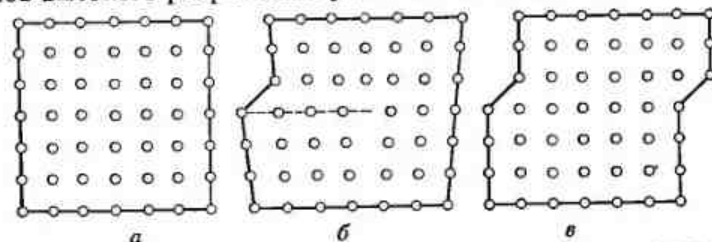


Рис. 38. Схема распространения сдвига по Тейлору [121]: а — строение идеального кристалла; б — начало сдвига — возникновение дислокации; в — элементарный сдвиг.

в реальных кристаллах, их зарождение, движение, взаимодействие. Дислокационная теория описывает и объясняет атомный механизм пластической деформации, строение границ зерен и блоков мозаики, разрушение кристаллов, процессы диффузии и т. д. [10, 44, 80, 81, 121, 145, 146].

Распространение элементарного сдвига в решетке идеального кристалла впервые было рассмотрено Я. И. Френкелем совместно с Т. А. Конторовой [82, 157]. Я. И. Френкелем развиты представления о других несовершенствах кристаллической решетки — вакансиях и дислоцированных атомах.

Понятие дислокаций было введено в 1934 г. Г. Тейлором для объяснения механизма пластической деформации и упрочнения. Схема распространения сдвига по Г. Тейлору показана на рис. 38. Под действием напряжений, приложенных к одной из сторон идеального кристалла, образуется сдвиг. При этом в кристалле на границе зоны сдвига возникает линейное нарушение расположения атомов — дислокация. Распространение сдвига представляет собой перемещение дислокации через весь кристалл. При выходе дислокации на другую сторону кристалла происходит элементарный сдвиг. Дислокации, возникающие в результате сдвига по Г. Тейлору, в настоящее время называются краевыми.

На рис. 39 схематически показана краевая дислокация в плоскости скольжения в простом кубическом кристалле по Коттрелу [44, 80]. Верхний атомный слой сдвинулся на одно межатомное расстояние в левой части плоскости скольжения, в правой части этого не произошло. Граница между той частью, где сдвиг произошел, и той частью, где

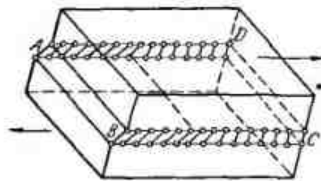


Рис. 39. Схема краевой дислокации в плоскости скольжения ABCD [44].

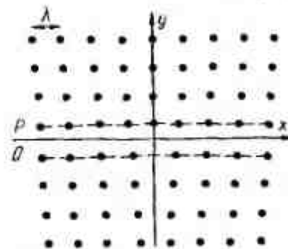


Рис. 40. Атомная модель краевой дислокации [44].

его не было, и есть дислокация. Таким образом, краевая дислокация неограниченно простирается в плоскости скольжения в направлении, нормальном к направлению скольжения.

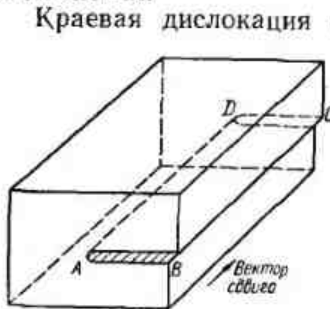


Рис. 41. Схема образования винтовой дислокации в плоскости скольжения ABCD [121].

Краевая дислокация представляет собой линейный дефект кристаллической структуры, который возникает при вставлении или убирании полуплоскости атомов (рис. 40) [44]. Можно считать, что деформация вызвана появлением лишней атомной плоскости, совпадающей на рисунке с верхней половиной оси  $y$ . В верхней половине кристалла имеет место сжатие ( $P$ ), в нижней половине — растяжение ( $Q$ ). Такая дислокация называется положительной. Если лиш-

няя атомная плоскость проходит в нижней половине кристалла, то дислокация называется отрицательной.

Другой простой тип дислокаций — это винтовая дислокация, схематически изображенная на рис. 41 [121].

Граница между смещенной и несмещенной частями кристалла располагается параллельно направлению скольжения, а не перпендикулярно, как в случае краевой дислокации. Наличие винтовой дислокации превращает атомные плоскости в кристалле в геликондальную поверхность, подобную винтовой лестнице без ступенек. Произвольную дислокацию можно считать состоящей из отрезков, имеющих краевую и винтовую компоненты.

В исследованиях братьев В. и И. Бюргерсов было показано, что дислокации однозначно могут быть охарактеризованы путем геометрических построений и особого вектора, названного вектором Бюргерса. Вектор Бюргерса — это вектор, замыкающий разрыв особого рода петли, называемой контуром Бюргерса. Контур Бюргерса должен удовлетворять следующим требованиям [135]: 1) должен лежать целиком в «хорошем» материале, хотя и может окружать «плохой» (структурно несовершенный кристалл) материал; 2) должен быть замкнутым, если он строится в совершенном кристалле.

Вектор Бюргерса имеет следующие особенности:

- 1) у линейной дислокации вектор Бюргерса нормален к линии дислокации и лежит в плоскости скольжения, а у винтовой — параллелен ей;
- 2) если контур Бюргерса охватывает несколько дислокаций, то вектор Бюргерса этого контура будет равен геометрической сумме векторов отдельных дислокаций;
- 3) величина вектора Бюргерса вдоль линии дислокации остается постоянной.

Вектор Бюргерса является основной количественной математической характеристикой энергии дислокации.

Механизм распространения сдвига путем движения дислокаций, предложенный Г. Тейлором, оказался очень удачным. Однако вопрос о первоначальном происхождении дислокаций и механизме возникновения новых дислокаций во время пластической деформации оставался неясным.

Дальнейшим важным шагом в развитии теории дислокаций является расширение представлений об источниках зарождения дислокаций [81, 118, 119, 121, 156, 169, 184, 211]. Известны следующие механизмы зарождения дислокаций:

- 1) на границе зерен;
- 2) на границе двойников;



- 3) испускание дислокаций полигонизационными стенками;
- 4) на поверхности раздела разных фаз, где неизбежны сильные нарушения;
- 5) возникновение источников дислокаций во время скольжения благодаря взаимодействию дислокаций;
- 6) классический источник Франка — Рида.

Пластическая деформация представляет собой процесс образования новых дислокаций и их движение по кристаллу. В процессе деформации плотность дислокаций в отожженных кристаллах возрастает примерно с  $10^8$  до  $10^{11}$ — $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, т. е. более чем в 1000 раз.

Если одна дислокация проходит вдоль всей плоскости скольжения, то это должно соответствовать смещению атомной плоскости только на одно межатомное расстояние, тогда как в действительности смещения оказываются в  $10^2$ — $10^3$  раз больше. Ф. Франк и В. Рид предложили модель размножения дислокаций, с помощью которой можно объяснить наблюдающиеся факты [135, 184]. На рис. 42 схематически показан процесс действия источника Франка — Рида [121]. Отрезок дислокации, лежащий в плоскости скольжения, можно считать закрепленным на концах в точках, где данная дислокация пересекается с другими дислокациями или с любыми неоднородностями кристалла. Если на отрезок краевой дислокации длиной  $l$ , закрепленной в точках  $A$  и  $B$  (рис. 42, а), действует скалывающее напряжение  $\tau$ , то под действием этого напряжения дислокация прогнется и образует дугу радиусом  $R$  (рис. 42, б). В изогнутой краевой дислокации появятся компоненты винтовой дислокации. Такую дислокацию можно представить в виде двух отрезков винтовых дислокаций и одного отрезка краевой дислокации (рис. 42, в). Благодаря движению отрезков винтовых дислокаций под действием напряжений в противоположные стороны возникнут отрезки краевых дислокаций  $AA'$  и  $BB'$  обратного знака по отношению к первоначальной (рис. 42, г). Отрезки новых дислокаций  $AA'$  и  $BB'$  будут удаляться от старой дислокации  $AB$ . При этом возникнет петля дислокации (рис. 42, д). Дальнейшее движение краевых и винтовых дислокаций приведет к аннигиляции отрезков  $MM'$  и  $NN'$  (рис. 42, е), петля освободится от источника дислокаций и будет свободно распространяться по кристаллу, а источник восстановится

(рис. 42, ж). Таким образом, любой закрепленный отрезок дислокации под действием напряжений может «рождать» новые петли дислокаций.

Условие работы источника Франка — Рида:

$$F_1 > F_2,$$

где  $F_1 = \tau b$  — сила, действующая на единицу длины дислокации ( $\tau$  — действующее напряжение;  $b$  — вектор Бюргерса);  $F_2 = W/l$  — противоположная сила натяжения ( $W \sim Gb^2$  — упругая энергия единицы длины дислокации;  $G$  — модуль сдвига). Откуда  $\tau > Gb/l$ . Отсюда следует, что критическое напряжение монотонно уменьшается с ростом длины источника. Этот механизм размножения дислокаций приводит к возникновению сдвигов и естественным образом объясняет возрастание плотности дислокаций при пластической деформации.

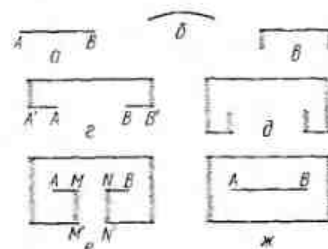


Рис. 42. Схема действия источника Франка — Рида [121].

Условия работы источника Франка — Рида уточнены А. Н. Орловым [118]. Он вычислил минимальное напряжение  $\sigma = \sigma_m$ , при котором работает источник, если испускаемые им петли тормозятся за счет образования точечных дефектов ступеньками на винтовых компонентах петель. А. Н. Орловым учтена возможность аннигиляции ступенек и показано, что существует такое  $\sigma = \sigma_m$ , выше которого при отсутствии иных механизмов торможения источник испускает неограниченное число петель.

А. Н. Орлов [119] указал и другие механизмы образования дислокаций во время пластической деформации и показал, что существует два типа источников:

- 1) стороны призматических дислокаций (дисков), образующихся при коагуляции вакансий;
- 2) отрезки ступенчатых дислокаций, образующихся в результате поперечного скольжения и аннигиляции винтовых дислокаций, испущенных различными источниками.

Очевидно, существует несколько различных механизмов зарождения дислокаций. Накопленный к настоящему

времени экспериментальный материал свидетельствует о том, что микромеханизм пластической деформации заключается в образовании и движении дефектов кристаллов.

И. А. Одинг приводит одиннадцать возможных механизмов пластической деформации, которые подразделяет на три группы [114]. В первую группу он включает сдвиговые процессы, во вторую — диффузионные и в третью — процессы пластической деформации, вызванные



Рис. 43. Схема кристалла после деформации растяжением [8].

относительным перемещением зерен, блоков зерен и границ, — так называемые периферийные процессы.

К первой группе И. А. Одинг относит дислокационный механизм скольжения, проявляющийся в перемещении одной части кристалла (зерна) по отношению к другой.

Скольжение может происходить только вдоль определенных кристаллографических направлений и по определенным плоскостям скольжения. Для многих металлов и сплавов экспериментально определены плоскости и направления скольжения (системы скольжения). Системы скольжения основных металлов приведены в табл. 12 [10].

При деформации поликристаллических образцов могут одновременно действовать несколько систем скольжения, но все они принадлежат к одной или двум кристаллографическим ориентациям.

Как правило, в кубических металлах плоскостями скольжения являются наиболее плотно упакованные плоскости, а направлениями скольжения — наиболее плотно упакованные направления в этих плоскостях.

При скольжении сдвиговые перемещения частей кристалла под действием деформирующих напряжений по определенным кристаллографическим плоскостям проявляются на поверхности кристалла в виде систем параллельных линий или полос скольжения. Линии скольжения на поверхности представляют собой не что иное, как ступеньки сдвига атомных слоев относительно друг друга. На рис. 43 показана схема скольжения при деформации растяжением. Полосы скольжения являются проявлением на поверхности процессов, происходящих внутри кристаллов.

Таблица 12

Плоскости и направления скольжения для различных металлов [10]

| Структура       | Металл    | Низкая температура     |                        | Высокая температура    |                        |
|-----------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                 |           | Плоскость скольжения   | Направление скольжения | Плоскость скольжения   | Направление скольжения |
| Г.ц.к.          | Al        | (111), (010)           | [101]                  | (010)                  | [101]                  |
|                 | Cu        | (111)                  | [101]                  | (111)                  | [101]                  |
|                 | Ag        | (111)                  | [101]                  | (111)                  | [101]                  |
|                 | Au        | (111)                  | [101]                  | (111)                  | [101]                  |
|                 | Ni        | (111)                  | [101]                  | (111)                  | [101]                  |
| О.ц.к.          | α Fe      | (110), (211), (321)    | [111]                  | (110)                  | [111]                  |
|                 | Mo        | (211)                  | [111]                  | (110)                  | [111]                  |
|                 | W         | (211)                  | [111]                  | (110), (321)           | [111]                  |
| Г.п.у.          | Mg        | (0001)                 | [2110]                 | (1011)                 | [2110]                 |
|                 | Cd        | (0001)                 | [2110]                 | (1011)                 | [2110]                 |
|                 | Cd        | (0001)                 | [2110]                 | (1011)                 | [2110]                 |
|                 | Zn        | (1122)                 | [1123]                 | (1011)                 | [2110]                 |
|                 | Ti        | (1010), (0001)         | [2110]                 | (1011)                 | [2110]                 |
| Ромбоэдрическая | Bi        | (111)                  | [101]                  |                        |                        |
|                 | Hg        | (100) и др.            |                        |                        |                        |
| Орторомбическая | Lu        | (001) и другие системы | [100]                  | (001) и другие системы | [100]                  |
| Тетрагональная  | β Sn      | (110)                  | [001]                  | (110)                  | [111]                  |
|                 |           | (100)                  | [001], [011]           |                        |                        |
|                 |           | (101)                  | [101]                  |                        |                        |
|                 |           | (121)                  | [101]                  |                        |                        |
| Алмаза          | C, Ge, Si | (111)                  | [101]                  | (111)                  | [101]                  |

Исходя из обширного экспериментального материала по изучению линий и полос скольжения на различных металлах оптическими и электронно-микроскопическими методами, можно сказать, что характер линий скольжения в поликристаллах существенно зависит от ориентации зерен относительно действующей нагрузки, температура

туры, степени деформации и т. д. [8, 10, 121, 155, 167].

С увеличением степени деформации растет число линий скольжения на единице площади, уменьшается расстояние между ними примерно от 1000 до 10 мкм, увеличивается величина сдвига в каждой полосе от 1 до 50 нм (10—500А) и больше.

На начальных стадиях деформации удалось обнаружить с помощью электронного микроскопа элементарную структуру полос скольжения. Это однородные плотно упакованные следы скольжения, которые характеризуют более однородную деформацию и образуют ступеньки на поверхности кристалла высотой 3—10 нм [8, 212]. При увеличении степени деформации появляются пачки полос скольжения и деформация менее равномерно распределяется по объему кристалла. Между отдельными ступенями скольжения находятся недеформированные области.

При неблагоприятных для процесса скольжения условиях деформация развивается другими путями, например двойникованием, сбросообразованием и др. При этом на поверхностях кристаллов образуется рельеф, характерный для этих процессов деформации. Эти механизмы пластической деформации по И. А. Одингу характеризуют сдвиговые процессы в особых условиях.

Двойникование — это своеобразная форма скольжения, приводящая к изменению ориентировки одной части кристалла относительно другой. Расположение атомов в двойниковой области является зеркальным отображением структуры, существующей в другой области кристалла. Двойникование, как и скольжение, является дислокационным процессом.

С определенным поворотом некоторых областей решетки связаны и другие виды деформации (пластинкование, сбросообразование, образование полос деформации, полос со вторичными сдвигами и иррациональных двойников). Это еще одна группа механизмов сдвиговой деформации по И. А. Одингу. Все эти виды деформации отличаются друг от друга внешними геометрическими признаками. Механизм деформации — пластинкование, описанный А. В. Степановым [143], отличается от двойникования тем, что угол поворота одной пластинки относительно другой не является постоянным и зависит от степени деформации. Угол поворота является функцией деформации.

На рис. 44 показаны три схемы переориентации решетки в кристаллах с помощью скольжения [155].

При деформации сбросом происходит поворот решетки вокруг направления, лежащего в плоскости скольжения и перпендикулярного направлению скольжения. Сбросы образуются как при деформации сжатия, так и при растяжении. На рис. 45 показаны образцы, в которых при деформации возникли сбросы [49]. Как показывают экспериментальные данные, в полосах деформации кристаллическая решетка повернута относительно недеформированной части кристалла на некоторый угол, который зависит от степени деформации. На рис. 46 показана полоса деформации в  $\alpha$ -латуни. Полосы деформации образуются при торможении сдвигов на границах какой-то области. В результате деформации решетка основного кристалла поворачивается вследствие скольжения, а в полосе деформации такого поворота нет.

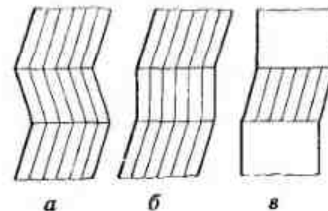


Рис. 44. Схемы переориентации решетки в кристаллах с помощью скольжения:

а — образование иррациональных двойников (скольжение в соседних областях по разным системам скольжения); б — образование полос деформации (скольжение вне полосы); в — образование полос сброса (скольжение локализовано внутри полосы) [155].

Полосы со вторичными сдвигами возникают в результате скольжения по вторичной системе плоскостей скольжения с одновременным поворотом этих плоскостей вокруг нормали к ним. На рис. 47 показаны полосы со вторичными сдвигами в алюминии.

Для появления в кристаллах при деформации областей с переориентированной решеткой необходимо наличие неоднородного напряженного состояния. Поэтому в поликристаллических образцах металлов, где существует взаимодействие зерен, пластическая деформация может развиваться вышеприведенными механизмами. В крайнем случае эти механизмы могут вносить существенный вклад в деформацию. Так, с помощью сбросов были получены деформации до 75% [155].

Полосы сброса изучали различные исследователи при испытаниях металлов на усталость, при изучении

ползучести, при растяжении. Все эти виды деформации описываются дислокационной теорией.

Вторая группа механизмов пластической деформации по И. А. Одингу включает диффузионные и самодиффузионные процессы. Отмечаются две возможности этих процессов:

1) перемещение атомов в плоскостях максимальных касательных напряжений путем замещения вакантного места («дырки» по Френкелю);

2) внедрение атома в упругодеформированную кристаллическую решетку.

Диффузионная пластичность проявляется и растворно-осадительным механизмом, который впервые отметил А. А. Бочвар [7]. Он указал, что для обеспечения высокой пластичности нужно создавать возможность перемещения части вещества и взаимодействия фаз за счет переноса вещества. Для осуществления этого необходимо наличие двух фаз.

И, наконец, И. А. Одинг описывает дислокационно-диффузионный механизм, который рассматривает пластическую деформацию как передвижение дислокаций совместно с «облаком» из растворенных в основной кристаллической решетке атомов, окружающих дислокацию.

В третью группу входят такие механизмы пластической деформации (по И. А. Одингу):

1) относительное перемещение и поворот зерен;

2) релаксационный механизм пластической деформации; считают, что скорость деформации в этом случае значительно повышается за счет переноса вещества и ослабления отдельных участков металла, в которых происходит релаксация;

3) механизм полигонизации, представляющий собой процесс дробления зерен на более мелкие, каждое из которых ориентировано несколько иначе по сравнению с соседними.

В. С. Иванова [34] экспериментально подтверждает, что при циклическом нагружении пластическая деформация металлов также протекает путем сдвиговых, диффузионных и периферийных процессов.

Э. С. Яковлева [166] изучала механизм пластической деформации поликристаллического алюминия в широком



Рис. 46. Полосы деформации в  $\alpha$ -латуни (деформация 20%).

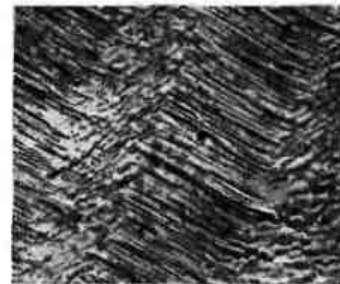


Рис. 47. Полосы вторичного скольжения в алюминии (деформация 17,5%).

диапазоне температур и скоростей растяжения. В результате исследования установлено, что механизм деформации меняется с изменением условий деформации. Повышение температуры и уменьшение скорости растяжения изменяют механизм деформации в одном и том же направлении. Использование широкого диапазона скоростей растяжения от  $7,3 \cdot 10$  до  $4,0 \cdot 10^{-3}\%$  в 1 с позволило проследить за переходом от сдвигового к атомно-диффузионному механизму при температуре 250°C. Переход осуществлялся постепенно путем уменьшения протяженности сдвига вдоль плоскостей скольжений и увеличения деформации, локализованной по границам зерен. При наиболее низких скоростях растяжения деформация сопровождалась разбиением отдельных зерен на крупные блоки.

При рассмотрении различных форм протекания пластической деформации видно, что деформация всегда определенным образом изменяет геометрию (топологию) поверхности.

М. Г. Лозинский с сотрудниками описывает различные виды микрорельефа [101, 102], возникающие на поверхностях образцов металлов и сплавов в процессе

Рис. 45. Фотографии различных участков золотой микропроволоки при сбросообразовании [49].

деформации при повышенных температурах. Он приводит классификационные схемы основных видов этих микрорельефов. Все многообразие деформационных микрорельефов при повышенных температурах сводится к двум большим группам: 1) рельефы, возникающие внутри зерна; 2) рельефы, возникающие преимущественно на границах зерен.

В 1-ю группу включены различные внутризеренные сдвиговые рельефы и рельефы, связанные с возникновением областей с переориентированной решеткой. В 1-й группе первый и второй тип микрорельефов связан с проявлением однородного одинарного и множественного скольжений, выражающихся в появлении на поверхности прямолинейных линий скольжения. Экспериментальные данные подтверждают, что эти микрорельефы возникают в условиях повышенных температур в однофазных твердых растворах и менее характерны для чистых металлов.

Третий и четвертый типы микрорельефов связаны с появлением одинарного и множественного неоднородного скольжения в зернах, т. е. скольжения, происходящего по нескольким различным кристаллографическим плоскостям при сохранении данного направления скольжения. Следы скольжения в этом случае имеют волнистый характер. Авторы предполагают, что эти типы микрорельефа связаны главным образом с возникновением поперечного скольжения.

Пятый и шестой тип микрорельефов связан с появлением областей с переориентированной кристаллической решеткой относительно основной части зерна. Сюда отнесены полосы перегиба (сбросы) и полосы деформации.

Седьмой тип рельефа связан со скольжением в зернах при наличии двойниковых прослоек, где наблюдается характерный перелом следов скольжения при переходе через границу двойника.

И, наконец, к восьмому типу микрорельефов 1-й группы отнесены микрорельефы, связанные с образованием полос приспособления, когда происходит своеобразное «приспособление» атомных слоев основной кристаллической решетки к решетке двойника или к границе зерна и характерное искривление следов скольжения.

Авторы указывают, что микрорельефы 1-й группы появляются при температуре до  $0.5 T_{пл}$  при медленной

деформации, а при увеличенной скорости деформации — и при более высоких температурах.

Вторая группа микрорельефа связана с деформацией границ зерен. Сюда отнесены такие типы рельефов:

1) возникающие при взаимном смещении границ;

2) образующиеся в виде характерных складок в районе «тройных» точек на границах зерен, являющихся проявлением неоднородной пластической деформации при скольжении по границам;

3) связанные с фрагментацией исходных зерен и возникновением субзерен;

4) связанные с направленной миграцией границ зерен;

5) обусловленные рекристаллизацией при высоких температурах под напряжением;

6) связанные с возникновением и развитием межкристаллических трещин в результате деформации.

В экспериментальных исследованиях М. Г. Лозинского показано, что различные типы микрорельефа 1-й и 2-й группы могут одновременно развиваться на отдельных стадиях испытания образцов и образовывать сложные микрорельефы.

## 7. Экспериментальные методы изучения состояния поверхности металлов

Наряду с широко изученными методами профилографирования и интерференции для изучения физического рельефа и дислокационной структуры деформируемых поверхностей были применены специальные методики: изучение топографии поверхности на электронном микроскопе, изучение дислокаций с помощью ямок травления и прямого электронно-микроскопического исследования дислокационной структуры.

### Методика изучения топографии поверхностей на электронном микроскопе

Для изучения физического рельефа образцов и тонкого рабочего рельефа поверхностей деталей машин на электронном микроскопе был использован метод реплик — тонких пленок, прозрачных для электронов, которые

точно копируют рельеф изучаемых объектов [14, 105, 122, 125, 151, 154].

Известны два основных способа приготовления реплик:

1) одноступенчатый, когда реплика наносится непосредственно на образец и после отделения ее от образца сразу может просматриваться в электронном микроскопе (рис. 48).

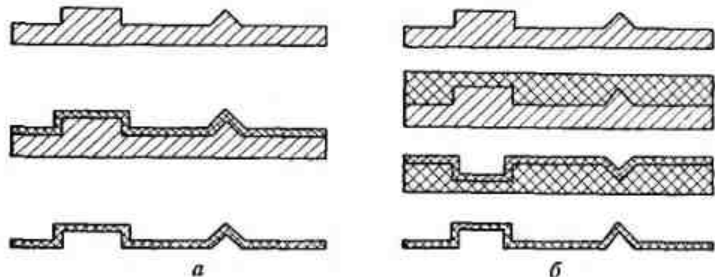


Рис. 48. Способы получения реплик:  
а — одноступенчатый; б — двухступенчатый.

2) двухступенчатый, когда на исследуемый образец предварительно наносят какой-либо пластический материал и получают предварительный отпечаток, воспроизводящий рельеф исследуемой поверхности. Реплику снимают с этого пластического отпечатка и исследуют в микроскопе.

Существует много различных типов реплик, отличающихся как по исходному материалу, так и по технике приготовления. Многочисленность способов приготовления реплик обусловлена тем, что способ, пригодный для исследования одного типа поверхности, может быть непригоден для другого. Универсального способа нет.

К репликам предъявляются следующие требования: 1) материал реплики не должен выявлять собственной структуры при увеличении в электронном микроскопе и не должен химически взаимодействовать с материалом исследуемой поверхности; 2) реплика должна воспроизводить детали структуры поверхности, соизмеримые с разрешающей способностью электронного микроскопа и обладать хорошей механической прочностью и стойкостью против воздействия электронного луча.

Ниже приведена разрешающая способность различных реплик [14, 125]:

| Реплики                     | Разрешающая способность, $\mu\text{м}$ |
|-----------------------------|--|
| Лаковые (коллодий, формвар) | 20—50 (200—500 Å)                      |
| Угольные                    | 1—2 (10—20 Å)                          |
| Кварцевые                   | 15—20 (150—200 Å)                      |
| Оксидные                    | 5—10 (50—100 Å)                        |

Разрешение реплик зависит от размеров элементов их собственной структуры.

Для повышения контраста изображения в электронном микроскопе производят оттенение реплик различными металлами большой рассеивающей способностью для электронов. Оттенение создает эффект объемности и позволяет количественно измерить высоту объекта, оценить его форму. Оттенение производится в специальной вакуумной установке.

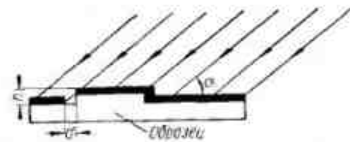


Рис. 49. Схема оттенения реплики.

Сущность оттенения сводится к тому, что на поверхность реплики, воспроизводящую рельеф исследуемого объекта, под определенным углом в вакууме наносят тонкий слой металла с большим атомным номером [14, 105, 122, 154] (рис. 49).

Высоту рельефа  $h$  можно вычислить, зная величину теней и угол оттенения:

$$a = \frac{a'}{M}, \quad (9)$$

где  $a$  — действительный размер тени;  $a'$  — размер тени на фотографии;  $M$  — увеличение микроскопа.

$$\text{Тогда} \quad h = a \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

Угол оттенения подбирают опытным путем. Он зависит от характера изучаемого рельефа или структуры образца. Для сравнительно гладких поверхностей угол оттенения составляет  $5-7^\circ$ , для грубых шероховатых поверхностей — до  $45^\circ$ . Д. Е. Брэдли [154] вывел формулу для расчета количества распыляемого материала для получения теней оптимальной плотности:

$$M = \frac{\pi \epsilon r^2 d}{3 \sin^2 \cdot 10^6}, \quad (11)$$

где  $t$  — толщина осадка,  $\text{Å}$ ;  $M$  — навеска испаряемого материала,  $g$ ;  $\alpha$  — угол отнения;  $r$  — расстояние от испарителя до образца,  $cm$ ;  $d$  — плотность материала,  $g/cm^3$ . Так как  $16\pi/3 \sin \alpha \cdot 10^8$  — величина постоянная, то, заменяя ее через  $k$ , получаем

$$M = ktdr^2. \quad (12)$$

Угол отнения обычно выражают в виде  $\arcs \operatorname{tg}^{1/2}$ ,  $\arcs \operatorname{tg}^{1/3}$  и т. д. Для облегчения расчетов приводится табл. 13 [154].

Таблица 13

Значение коэффициента  $k$  для расчета навески испаряемого материала [154]

| Угол отнения   | $\operatorname{tg} \alpha$ | $\sin \alpha$ | $k$                  |
|----------------|----------------------------|---------------|----------------------|
| $90^\circ$     | $\infty$                   | 1             | $1,67 \cdot 10^{-7}$ |
| $45^\circ$     | 1                          | 0,7071        | $2,36 \cdot 10^{-7}$ |
| $26^\circ 34'$ | 1/2                        | 0,4472        | $3,74 \cdot 10^{-7}$ |
| $18^\circ 25'$ | 1/3                        | 0,3159        | $5,28 \cdot 10^{-7}$ |
| $14^\circ 2'$  | 1/4                        | 0,2425        | $6,90 \cdot 10^{-7}$ |
| $11^\circ 19'$ | 1/5                        | 0,1962        | $8,50 \cdot 10^{-7}$ |
| $9^\circ 28'$  | 1/6                        | 0,1645        | $1,02 \cdot 10^{-6}$ |
| $8^\circ 8'$   | 1/7                        | 0,1415        | $1,19 \cdot 10^{-6}$ |
| $7^\circ 7'$   | 1/8                        | 0,1239        | $1,35 \cdot 10^{-6}$ |
| $6^\circ 20'$  | 1/9                        | 0,1100        | $1,52 \cdot 10^{-6}$ |
| $5^\circ 43'$  | 1/10                       | 0,0996        | $1,68 \cdot 10^{-6}$ |

Для изучения топографии образцов и деталей машин авторы применяли одноступенчатые углеродные реплики, оттененные хромом. Углеродные реплики получались методом термического распыления угольных электродов в вакууме  $10^{-2}$  н/м ( $10^{-4}$  мм рт. ст.) на вакуумной установке ЭВП-2, схема которой приведена на рис. 50. При распылении использовали угольные электроды, применяемые для спектрального анализа.

Конец одного электрода затачивали, как карандаш, а на конце другого делали площадку под углом  $45^\circ$ . Один электрод неподвижно зажимали в держателе, а второй свободно перемещался и непрерывно контактировал с первым благодаря нажатию пружины. При пропускании через электроды тока  $50-60$  а в месте контакта происхо-

дил сильный разогрев и получалось испарение. Толщину пленки контролировали визуально по цвету пленки. Соломненно-желтый цвет получается при толщине пленки менее  $20$  нм, при  $20-25$  нм имеем коричневый цвет, а при более толстой пленке — синий [122].

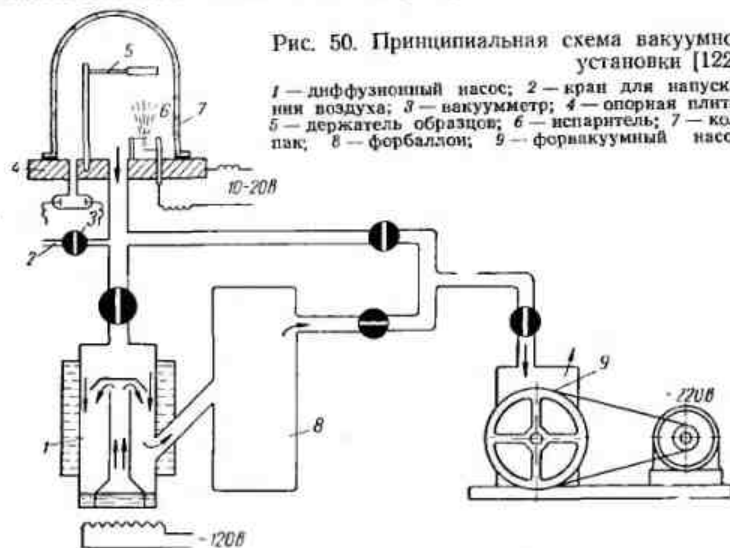


Рис. 50. Принципиальная схема вакуумной установки [122]:

1 — диффузионный насос; 2 — кран для напуска воздуха; 3 — вакуумметр; 4 — опорная плата; 5 — держатель образцов; 6 — испаритель; 7 — колпак; 8 — форбаллон; 9 — форвакуумный насос.

Исследуемые образцы в специальной оправке помещали на расстоянии  $10-12$  см над электродами в горизонтальной плоскости. В установке было сделано приспособление для вращения образцов во время напыления с целью получения более равномерно напыленного слоя. Для улучшения контраста реплики оттенялись электролитическим хромом. Образцы с более тонким рельефом оттенялись под углом  $7-15^\circ$ , с грубым рельефом — под углом  $20-40^\circ$ . Испаритель представлял собой коническую спираль из вольфрамовой проволоки диаметром  $0,3$  мм. Новую спираль вначале прокаливали в вакууме при токе  $50$  а в течение  $5-10$  сек для удаления окислов. Затем в испаритель помещали навеску хрома и производилось отнение по следующему режиму. В течение  $1$  мин спираль с навеской хрома прогревалась при токе  $15-20$  а, а затем ток резко увеличивался до  $50-60$  а и происходило равномерное испарение хрома в течение  $10-15$  сек. Навеска хрома колебалась от  $7$  до  $10-12$  мг

в зависимости от получения толщины оттеняющего слоя для увеличения контраста изображения. Толщина оттеняющего слоя хрома должна быть не более 7—10 нм.

Углеродные реплики с исследуемых образцов отделяли механическим сдираанием с помощью желатина. Раствор желатина в дистиллированной воде (20%-ный), разогретый на водяной бане до 60—70° С, наносили стеклянной палочкой на поверхность образца, покрытую углеродной репликой в виде тонкого слоя. Затем образец высушивали в сушильном шкафу при температуре 60—70° С и реплика вместе с желатином отделялась от образца. Желатин отмывали в горячей воде, а реплику вылавливали из воды на медную электролитическую сеточку, просушивали на фильтровальной бумаге и затем просматривали ее в микроскопе.

Описанная методика косвенного изучения топографии поверхностей образцов и деталей с помощью угольных реплик была выбрана благодаря ее преимуществам:

- 1) относительной простоте приготовления реплик;
- 2) хорошей точности воспроизведения рельефа (разрешающая способность угольных реплик 2 нм или 20Å);
- 3) возможности изучения работающих поверхностей деталей машин и образцов без разрушения их.

Реплики просматривали на универсальном электронном микроскопе УЭМВ-100 с разрешающей способностью 1 нм (10Å) при увеличении 5000—30 000. Электронный микроскоп наряду с большой разрешающей способностью обладает увеличенной глубиной резкости, которая обусловлена малым значением апертурного угла.

Если глубина резкости оптического иммерсионного объектива составляет 0,06 мкм, то в электронном микроскопе эта величина составляет примерно 2 мкм. Следовательно, части микрорельефа исследуемой поверхности с разницей по высоте до 2 мкм будут находиться в фокусе. Это преимущество электронного микроскопа дает более правильное представление о форме и размерах отдельных деталей изучаемых объектов.

При изучении поверхностей трения в электронном микроскопе важным является правильное определение места исследования. Поэтому поверхности предварительно тщательно изучают под оптическим микроскопом, выбирают исследуемые места, на которых делают соответствующие метки. При изготовлении реплики на ней

тоже делают специальные метки, которые затем дают возможность правильно ориентироваться при просмотре ее в электронном микроскопе. Такой подход к исследованию позволяет наблюдать любой участок поверхности образца, заранее изученный на оптическом микроскопе, и дает возможность правильно интерпретировать электронно-микроскопическое изображение.

### Обнаружение дислокаций с помощью ямок травления

При определенных режимах термического, химического или электролитического травления на полированных поверхностях металлов появляются специфические ямки травления, ограниченные кристаллографическими плоскостями. Так, в металлах с г. ц. к. решеткой ямки травления в плоскости [111] имеют треугольную форму, в плоскости [100] — квадратную, в плоскости [110] — удлиненную [10].

Предположение о том, что эти ямки травления появляются в местах выхода на поверхности дислокаций, было проверено и подтверждено многими исследователями [10].

На деформированных металлах ямки травления располагаются вдоль линий скольжения. Это подтверждает дислокационную теорию пластической деформации. При помощи метода ямок травления было показано движение дислокаций в монокристаллах германия, кремния, цинка и др. Д. Фогель установил соответствие между теоретически рассчитанной и экспериментально определенной плотностью дислокаций вдоль границ зерен в кристаллах германия [134]. П. Лакомб и А. Божар на монокристаллах алюминия впервые наблюдали сетки фигур травления по границам субзерен.

Зарождение ямок травления на выходах дислокаций теоретически рассмотрел Б. Кабрера [10]. Дислокация влияет на процесс травления потому, что вблизи нее понижается энергия, необходимая для удаления с поверхности твердого тела атома или электрона. Ямки травления образуются на дислокациях, если скорость «испарения» атомов с поверхности вблизи дислокации  $V$  больше скорости «испарения» с совершенной поверхности  $V_0$ :

$$V > V_0. \quad (13)$$



По форме и симметрии ямок травления можно определить тип дислокаций: у краевых — ямки травления симметричны, у винтовых — несимметричны. Дислокации разных типов дают ямки разной глубины. По ямке травления можно судить о расположении линии дислокации относительно поверхности кристалла. Ямка имеет вид обращенной квадратной пирамиды с вершиной в центре, если линия дислокации перпендикулярна поверхности;

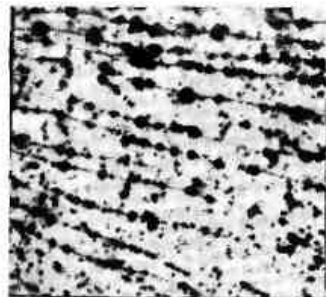


Рис. 51. Ямки травления вдоль линий скольжения на поверхности деформированного алюминия.

если она расположена под углом к поверхности, то вершина пирамиды смещается от центра ямки. Угол  $\varphi$  наклона линии дислокации к поверхности можно вычислить по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{d}, \quad (14)$$

где  $a$  — расстояние смещения вершины пирамиды от центра;  $d$  — глубина ямки травления [122].

Для выявления дислокаций методом ямок травления

необходимо тщательно приготовить поверхность шлифа с помощью электролитической полировки. Поверхность должна быть зеркальной. Необходимо убедиться, что выбранный травитель и режим травления правильны и действительно выявляют дислокации. Это подтверждается воспроизводимостью картины в одинаково ориентированных зернах поликристаллов, повторяемостью плотности дислокаций при неоднократном последовательном стративании и травлении на ямки.

Разработано и предложено много различных травителей и режимов для выявления дислокаций на различных металлах [4, 35, 41, 93, 129, 139]. При выборе травителя руководствуются следующим соображением. Скорость зарождения ямок травления на дислокациях должна быть больше скорости движения краев этих ямок по поверхности кристалла [144]. Для химического травления выходов дислокаций на поверхность при пластической деформации алюминия был использован реактив Лакомба-Божара: 47 частей  $\text{HNO}_3$ , 50 частей  $\text{HCl}$ , 3 части  $\text{HF}$ .

Используют только свежеприготовленный реактив [144]. Каплю раствора наносят на предварительно электролитически полированную зеркальную поверхность образца при комнатной температуре и выдерживают в течение 5—10 сек, после чего образец хорошо промывают в проточной воде и высушивают на фильтровальной бумаге.

Таблица 14

Электролиты и режимы полировки алюминия [127, 158]

| Номер электролита | Состав электролита   | Содержание, %       | $I, \text{a/dm}^2$ | $v, \text{в}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $T, \text{мин}$ |
|-------------------|--|---------------------|--------------------|---------------|---------------------|-----------------|
| 1                 | $\text{H}_3\text{PO}_4$<br>$\text{H}_2\text{SO}_4$<br>$\text{CrO}_3$<br>$\text{H}_2\text{O}$ | 65<br>15<br>6<br>14 | 20—50              | 12—15         | 70—80               | 2—5             |
| 2                 | $\text{H}_3\text{PO}_4$<br>$\text{H}_2\text{SO}_4$<br>$\text{CrO}_3$<br>$\text{H}_2\text{O}$ | 36<br>36<br>4<br>24 | 20—40              | 12—15         | 70—90               | 1—5             |
| 3                 | $\text{H}_3\text{PO}_4$<br>$\text{CrO}_3$<br>$\text{H}_2\text{O}$                            | 82<br>16<br>6       | 20—40              | 12—15         | 70—80               | 1—3             |

На рис. 51 показан образец алюминия, деформируемый изгибом. Дислокации вдоль линий скольжения хорошо выявлены описанным реактивом.

В табл. 14 приведены рецепты растворов и режимы предварительной электролитической полировки алюминиевых образцов [127, 158].

В качестве катода может быть использован свинец, нержавеющая сталь или алюминий. Для выявления дислокаций на нержавеющей стали IX18H9T авторы применяли реактив Л-1, предложенный В. С. Ивановой [35]. Состав травителя: 100  $\text{см}^3$  метилового спирта, 2,5  $\text{см}^3$  соляной кислоты, 1 г хлорного железа. Травление производили в две стадии: 1) химическое травление в течение 30 сек; 2) травление тем же реактивом, но с добавкой 30 г тиосульфата натрия.

В табл. 15 приведены состав электролитов и условия предварительной полировки для нержавеющей стали [122]:

Таблица 15

Состав электролитов и режимы полировки нержавеющей стали [122]

| Состав электролита  | $I, \text{ а/см}^2$ | $v, \text{ в}$ | $t, \text{ }^\circ\text{C}$ |
|---|---------------------|----------------|-----------------------------|
| $\text{H}_3\text{PO}_4$ — 860 мл<br>$\text{H}_2\text{SO}_4$ — 51 мл<br>$\text{CrO}_3$ — 100 г | 10—15               | 100            | 60—70                       |
| $\text{H}_3\text{PO}_4$ — 60%<br>$\text{H}_2\text{SO}_4$ — 40%                                | 1,5—2,0             | 10—20          | 60                          |

### Прямое электронно-микроскопическое исследование дислокационной структуры металла

Исследование состояния поверхности на электронном микроскопе с помощью реплик позволяет изучать топографию поверхности при различных видах пластической деформации и при трении. Наряду с этим с помощью электронного микроскопа можно непосредственно наблюдать нарушения кристаллического строения — дислокации, их пространственное расположение, движение и взаимодействие.

Существует несколько методов наблюдения изображения атомных плоскостей и дислокаций в электронном микроскопе. В кристаллах, имеющих большие межплоскостные расстояния (более 0,5 нм), можно непосредственно наблюдать кристаллическую структуру и дислокации, так как разрешающая способность современных электронных микроскопов составляет 0,5—1 нм.

Изображение кристаллической решетки и дислокаций можно наблюдать в муаровом узоре от двух наложенных друг на друга прозрачных кристаллов. Сложность этого метода заключается в необходимости получения очень тонких и однородных по толщине пленок для исключения хроматической aberrации, сильно искажающей муаровый узор.

И, наконец, рассмотрим наблюдение дислокаций в тонких металлических образцах по дифракционному контрасту на их искаженных окрестностях. Этот метод, впервые использованный Р. Хейденрайхом [191], В. Боллменом [171] и П. Хиршем [193], в настоящее время полу-

чил самое широкое применение. Электронно-микроскопическое изображение возникает лишь при различных интенсивностях электронных лучей, рассеянных отдельными участками объекта. Пренебрегая поглощением электронов при прохождении через тонкий кристаллический объект, можно считать, что рассеяние электронов на объекте имеет дифракционную природу. Интенсивность неотклоненного пучка, формирующего изображение, представляет собой разность интенсивностей первичного и диффрактированного пучков:

$$I = I_{\text{перв}} - I_{\text{диф}} \quad (15)$$

Так как электронный микроскоп имеет малое значение апертурного угла, то при отклонении электронов от прямолинейного движения на угол более  $30'$  они отсекаются диафрагмой и не участвуют в формировании изображения. Таким образом, сильный контраст в изображении возникает даже при небольшом различии в ориентации соседних частей объекта. Если какой-либо участок объекта находится в положении сильного отражения, то на экране микроскопа он будет выглядеть наименее ярко.

Интенсивность диффрактированных пучков электронов зависит не только от кристаллографической ориентировки кристалла или фрагмента как целого по отношению к первичному лучу, но и от толщины кристалла и ее изменения в поле зрения, изгиба кристалла, локальных упругих искажений решетки и рассеивающей способности вещества. Любое локальное изменение этих условий приводит к возникновению контраста в изображении объекта. Возникновение дифракционного контраста на дислокациях и других несовершенствах в кристаллах (для тонких пленок) хорошо описывается кинематической теорией рассеяния, в которой не учитывается взаимодействие диффрактированного пучка с кристаллом и прямым пучком [192, 208].

Динамическая теория дифракционного контраста основана на учете взаимодействия отраженных электронов с атомами объекта и первичным пучком [191, 196, 210]. Это взаимодействие необходимо учитывать при увеличении толщины кристалла или приближении кристалла к отражающему положению.

Таким образом, для прямого наблюдения дислокаций в электронном микроскопе требуются достаточно тонкие

образцы толщиной не более 200 нм, прозрачные для электронов, имеющих энергию 75—100 кэв.

Образцы в виде фольги указанной толщины можно получить различными способами: конденсацией из пара [11], кристаллизацией из расплава [205], срезанием тонкой пленки ультрамикротомом [200]. Однако такие пленки имеют специальный интерес, так как не характеризуют структуру массивных образцов.

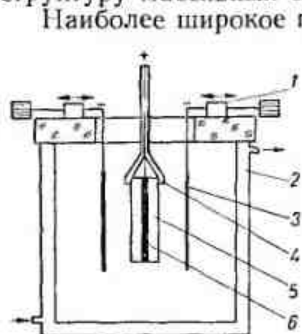


Рис. 52. Схема приспособления для электролитического утонения образцов: 1 — механизм передвижения катода; 2 — ванна, охлаждаемая проточной водой; 3 — катод; 4 — держатель образца; 5 — оправка для образца; 6 — образец.

печить наибольшую однородность поля и равномерную двухстороннюю полировку образца. Расстояние между катодами можно регулировать.

Полировку проводили в электролите следующего состава: 860 мл ортофосфорной кислоты, 51 мл серной кислоты, 100 г хромового ангидрида при температуре электролита 60° С, плотности тока 10—15 а/см<sup>2</sup> и напряжении 100 в.

Образец, вырезанный из деформированной растяжением ленты, заklючили в кольцо диаметром 25 мм и полировали по указанному режиму. Электролит, находящийся в сосуде с двойными стенками, охлаждался проточной водой и постоянно перемешивался. При достижении нужной толщины образца (примерно 100 нм) в нем появлялись сквозные отверстия. На этой стадии поли-

ровку прекращали, образец хорошо промывали в проточной воде и метиловом спирте. В районе отверстий специальным пуансоном вырезали образец диаметром 2 мм для исследования на микроскопе.

## 8. Элементы формирования рабочего рельефа поверхностей деталей машин при действии отдельных факторов

### Рельеф поверхности при статической деформации растяжением и сжатием

В условиях внешнего трения под действием нормальных и тангенциальных напряжений поверхностные слои металла испытывают упруго-пластические деформации. Анализ напряженного состояния поверхностных объемов и экспериментальные данные показывают, что деформация в зоне контакта при внешнем трении происходит путем растяжения и сжатия. На рис. 53 показаны результаты исследования кинетики упруго-пластической деформации, выполненного О. В. Зайцевым [32]. При этом был использован поляризационный оптический метод определения деформации в зоне контакта. Светлые участки на рис. 53, а характеризуют симметричное распределение упруго-пластической деформации сжатия под индентором при действии только нормальной нагрузки. При приложении тангенциальной силы и перемещения индентора на расстояние 4 и 8 мкм (рис. 53, б, в) картина деформации резко изменяется. Впереди индентора возрастают деформации сжатия, а за индентором возникают деформации растяжения. В связи с этим целесообразно дифференцированно изучить характер влияния деформации растяжения и сжатия на формирование физического рельефа. Пластическую деформацию авторы рассматривают как фактор, ответственный за появление особой шероховатости поверхности (физического рельефа), обуславливающей формирование сил трения.

Изучение микропроцессов пластической деформации путем наблюдения линий скольжения получил наиболее

широкое распространение. Выполнено много работ, посвященных изучению механизма пластической деформации с помощью наблюдений возникновения полос скольжения на полированной поверхности деформированного кристалла, движения по границам зерен и фрагментов, относительного поворота и дробления зерен [8, 10, 34, 103,



Рис. 53. Кинетика упруго-пластических деформаций при трении сферического индентора с радиусом при вершине 1,25 мм по свежесколотой поверхности (100) монокристалла NaCl в направлении [100] при нормальной нагрузке 0,5 кг и скорости скольжения 0,008 мм/сек (движение индентора справа налево):

*a* — тангенциальная нагрузка  $T = 0$ ; *b*, *c* —  $T \neq 0$  при прохождении соответственно 4 и 8 мкм пути с момента приложения тангенциальной нагрузки.

112, 116, 121, 123, 137, 138, 160, 166]. Эти работы позволили вскрыть ряд принципиальных закономерностей в развитии пластической деформации и связать проявления деформации на поверхности кристаллов с неравномерностью внутрикристаллических процессов.

В результате экспериментальных работ в этой области [8, 91, 95, 116, 123, 124, 166, 170] получен вывод о неоднородности протекания пластической деформации в поликристаллических материалах. Неоднородность деформации объясняется взаимодействием зерен по границам и проявляется не только на поверхности, но и в объеме поликристаллического материала [123, 124, 166]. С возрастанием степени деформации неравномерность распределения ее на поверхности и внутри образца уменьшается [91, 116, 123].

Линии скольжения, являясь местами относительной локализации заданной кристаллу деформации, образуют на поверхности кристалла определенный рельеф. На формирование рельефа на поверхности поликристалла также влияют движение и относительный поворот зерен, фрагментов, блоков [102, 103, 137, 138, 166].

В соответствии с этими возможными механизмами формирования рельефа на поверхности при деформации исследовали топографию технически чистого алюминия А00,  $\alpha$ -латуни Л-68 и нержавеющей стали аустенитного класса 1Х18Н9Т. Указанные материалы для исследования оказались наиболее удобными, так как, с одной стороны, структура поверхности этих материалов в связи с несовершенствами кристаллического строения достаточно хорошо изучена (особенно монокристаллический алюминий), что улучшает возможность сравнения топографии поверхности, характерной для нагружения трением и обычного деформирования; с другой стороны, эти материалы широко применяются в практике конструирования узлов трения.

Образцы из указанных материалов изготовляли путем прокатки на лабораторном прокатном стане и вырезали по специально изготовленным шаблонам. После окончательной механической обработки образцы для растяжения имели размеры 100 × 8 × 0,8 мм. При этом в центре образца наносили концентратор напряжений с радиусом закругления 10 мм. Все образцы подвергали предварительному высокотемпературному отжигу в вакууме с последующим медленным охлаждением в печи для получения равновесного состояния структуры.

С целью регулировки величины зерна серию образцов после общего отжига подвергали специальному рекристаллизационному отжигу. Например, алюминиевые образцы после общего отжига деформировали на 1—1,5% и затем вторично отжигали в течение 1—1,5 ч при температуре 600°С в вакууме. Средняя величина зерна при этом, измеренная металлографическим путем, составляла 8—15 мкм. После отжига все образцы электролитически полировали и качество поверхности в результате полировки соответствовало 13—14 классу чистоты.

Пластическую деформацию растяжением проводили на специально сконструированном приспособлении, которое укрепляли на предметном столике металломикроскопа МИМ-8 либо интерферометра МИИ-4 при помощи привода с постоянной скоростью деформации. В поле зрения микроскопа всегда находился участок образца с нанесенным концентратором напряжения. Путем соответствующих манипуляций в фокальной плоскости микроскопа можно с большой точностью установить в поле

зрения исследуемый участок поверхности: границу зерен, фрагментов, внутризеренной области. Степень пластической деформации оценивали как по общему удлинению образца, так и на микроучастках с помощью следующего

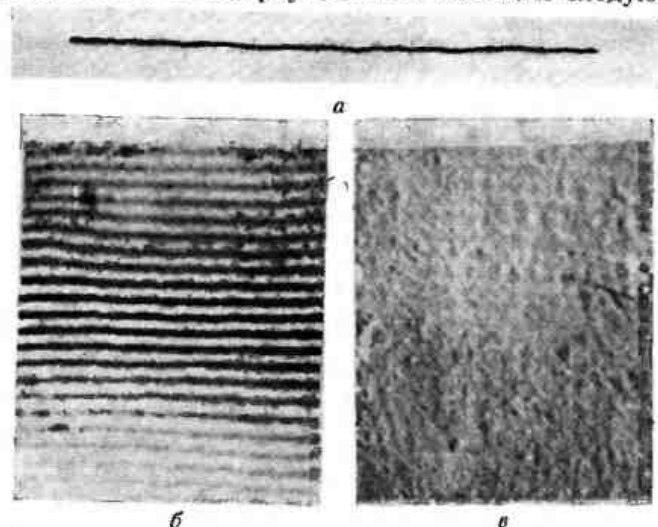


Рис. 54. Исходная поверхность алюминия:  
а — профилограмма, в. у. 8000, г. у. 116,7; б — интерферограмма,  $\times 290$ ; в — электронная микрофотография,  $\times 6000$ .

приема. Предварительно в поле зрения микроскопа на фиксированных участках тонкой иглой наносили две или несколько точек. Расстояние между этими точками, определяемое с помощью окуляр-микрометра с точностью до 0,005 мм, принимали за исходное. Разницу в измерениях расстояния при нагружениях рассматривали как меру пластической деформации участка, видимого в поле зрения микроскопа.

На рис. 54 показаны профилограмма, интерферограмма и электронная микрофотография исходной поверхности алюминия. На рис. 54, в виден тонкий рельеф, который обнаруживается на полированных поверхностях при больших увеличениях. Особенности этого рельефа зависят от режимов электрополировки и кристаллического строения материала.

Пластическая деформация растяжением позволила обнаружить неравномерность развития рельефа поверх-

ности, вызванную различной кристаллографической ориентировкой зерен и взаимодействием зерен по границам.

Типичные виды рельефа, возникающего при растяжении на линиях скольжения, границах зерен и фрагментов,

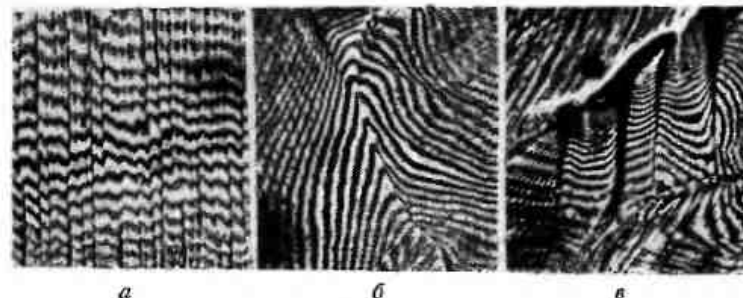


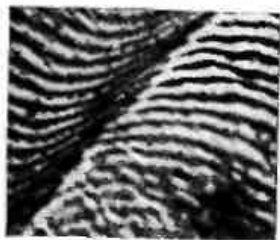
Рис. 55. Развитие рельефа на поверхности алюминия и  $\alpha$ -латуни, деформированных растяжением:  
а — на линиях скольжения алюминия,  $\epsilon = 17\%$ ,  $\times 290$ ; б — на границе двух зерен алюминия,  $\times 290$ ; в — на границах фрагментов  $\alpha$ -латуни,  $\epsilon = 20\%$ ,  $\times 290$ .

показаны на рис. 55. Характерные особенности развития рельефа на границах зерен представлены на рис. 56.

В интервале деформаций 1—5% на отдельных зернах, благоприятно расположенных к действующим внешним напряжениям, возникает однородная система полос скольжения, распространяющаяся, как правило, по всей поверхности зерна. Расстояние между отдельными полосами скольжения составляет в среднем 9—12 мкм. При изучении поверхности в электронном микроскопе в этом интервале деформаций обнаружили наличие в полосе серии более тонких линий скольжения, расстояние между которыми составляет 20—50 нм. Величина ступеньки, вызванной появлением сдвига в линии, составляет 100—150 нм (рис. 57).

Неравномерность протекания деформации в отдельных зернах при небольших степенях деформации подтверждается непосредственным наблюдением дислокационной структуры в электронном микроскопе. В поле зрения микроскопа дислокации расположены крайне неравномерно, почти не взаимодействуя между собой, обнаруживаются лишь отдельные скопления у границ и включений (рис. 58).

Многочисленные микрофотографии, полученные с различных участков, позволили установить, что с увеличением деформации на образцах алюминия появляются поперечные линии скольжения, разделяющие уже существующие линии легкого скольжения, а также проявляется двойникование на  $\alpha$ -латуни и стали (рис. 59). Вели-



а

Рис. 56. Особенности развития рельефа на границах зерен деформированного алюминия,  $\times 290$ ,  $\epsilon = 15\%$ :

а, б, в — смежные зерна различной кристаллографической ориентации.



б



в

чина ступенек на полосах скольжения находится в пределах 200—250 нм. На рис. 60 показана кинетика формирования рельефа, связанного с процессом образования двойника, отчетливо выявляются вершины неровности (стрелка А) и впадины (стрелка Б).

Развитие рельефа поверхности при образовании сложной системы двойников на образцах  $\alpha$ -латуни показано на рис. 61. Увеличение деформации до 15—20% сопровождается появлением полос изгиба, полос вторичного скольжения, фрагментацией зерен. Деформация на поверхности образца протекает относительно равномерно, наблюдается огрубление полос скольжения, в значи-

тельной мере проявляются границы зерен. Профилографирование участков границ зерен показало, что развитие рельефа на границах вызывается смещением зерен относительно друг друга и возможной разориентировкой на небольшой угол.

Изучение кинетики развития поверхности при деформации растяжением на фиксированных участках зерен, границ зерен и фрагментов позволило проследить за изменениями неровностей на поверхности непосредственно при нагружении образца. Кинетика развития рельефа на границах зерен представлена на рис. 62. Было установлено, что рельеф, возникающий при деформации на границах зерен и при образовании двойников, имеет большую высоту выступов и впадин (до 4—5 мкм) при максимальных деформациях.

Кинетика развития рельефа на линиях скольжения при постепенном увеличении деформации образца алю-

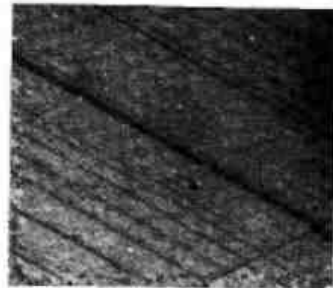


Рис. 57. Электронная фотография деформированной поверхности  $\alpha$ -латуни,  $\epsilon = 5\%$ ,  $\times 10\,000$ .

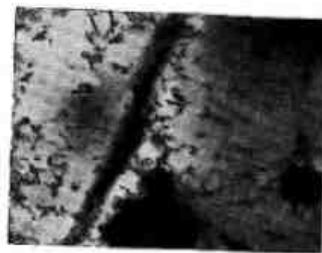


Рис. 58. Дислокационная структура стали IX18N9T, деформированной растяжением на 2%,  $\times 30\,000$ .

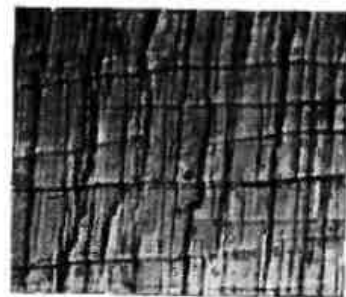


Рис. 59. Поперечные линии скольжения на алюминии. Деформация 15%.  $\times 500$ .

миния от 3 до 17% представлена на рис. 63. Для исследуемых металлов величина рельефа, образуемого на линиях скольжения, колеблется в больших пределах — от вели-

чин порядка нескольких размеров параметра решетки до 200—300 нм. При деформации поликристаллических образцов с разным расположением кристаллов относитель-

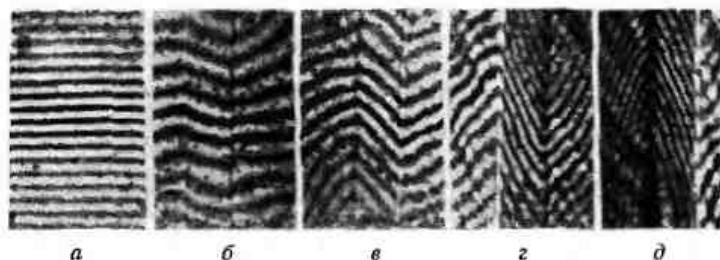


Рис. 60. Кинетика развития рельефа при деформации двойникованием на образце  $\alpha$ -латуни,  $\times 290$ :

а — исходная поверхность; б, в, г, д — деформация соответственно 1,5; 5,2; 13 и 24%.

но направления деформирующего усилия рельеф на линиях скольжения различных кристаллов будет, естественно, изменяться в широких пределах как по величине ступенек сдвига, так и по их направлению. Этим объясняются

большие колебания величины рельефа на линиях скольжения.

При состоянии, близком к разрушению образца, поверхность его значительно огрубляется. Отдельные участки поверхности алюминия с линиями скольжения вблизи места разрыва образца при деформации растяжением показаны на рис. 64, а, б, в.

Развитие рельефа при растяжении схематически показано на рис. 65, а зависи-

мость величины рельефа, возникающего на линиях скольжения и на границах зерен, от степени деформации образцов — на рис. 66.

Для изучения рельефа при статическом сжатии были изготовлены образцы из этих же материалов, имеющие

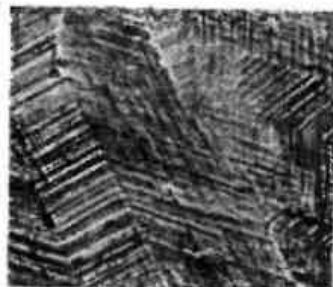


Рис. 61. Развитие рельефа поверхности при деформации двойникованием  $\alpha$ -латуни,  $\epsilon = 17\%$ ,  $\times 290$ .

форму куба с ребром 10 мм. Всю предварительную обработку образцов производили по вышеописанной методике.

Деформирование сжатием выполняли на лабораторном прессе в специальном стакане с подвижным штоком.

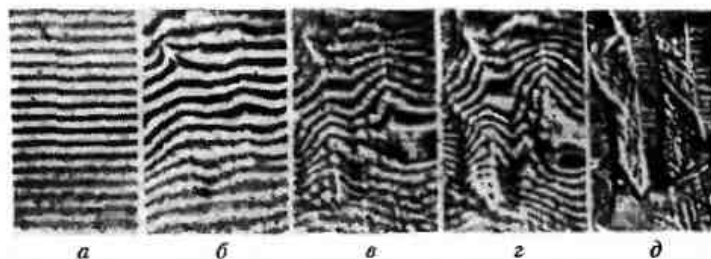


Рис. 62. Кинетика развития рельефа на границах зерен  $\alpha$ -латуни,  $\times 290$ :

а — исходная поверхность; б, в, г — деформация соответственно 1; 5 и 10%; д — тот же участок без интерференции.

Степень деформации оценивали по величине осаждения образцов. В отдельных опытах сжатию подвергали одновременно два образца, контактируемые поверхности ко-

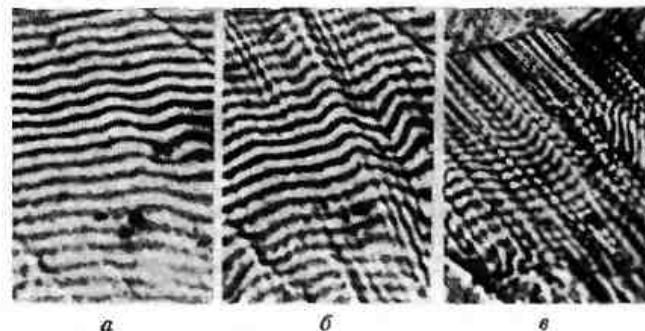


Рис. 63. Кинетика развития рельефа при непрерывном деформировании образца алюминия,  $\times 290$ :

а, б, в — деформация соответственно 3, 5, 17%.

торых предварительно тщательно шлифовывали и полировали.

В результате всестороннего изучения рельефа при деформациях сжатием пришли к заключению, что развитие поверхности в этом случае обусловливается теми же

структурными факторами, что и при растяжении. Однако при действии тех же механизмов деформации, которые формируют рельеф при растяжении, поверхности образцов, подвергнутых сжатию, имеют некоторые отличия рельефа. Роль полос скольжения в формировании неровностей проявляется в несколько меньшей степени, чем при растяжении. Так, например, если для растяжения

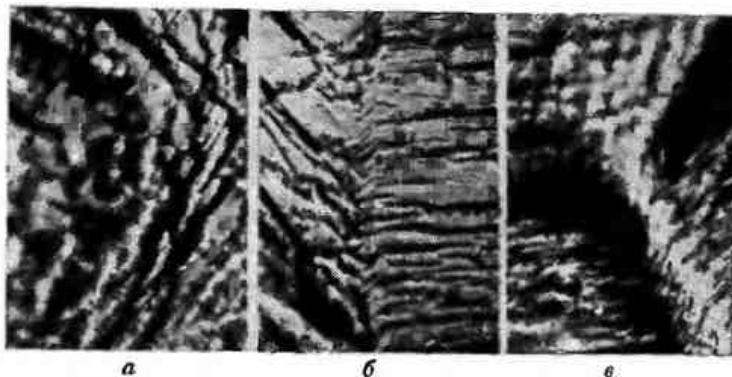


Рис. 64. Участки поверхности образцов алюминия вблизи места разрушения при деформации растяжением,  $\times 290$ .

высота неровностей на линиях скольжения стали при деформации 15% составляет приблизительно 250 нм, то для

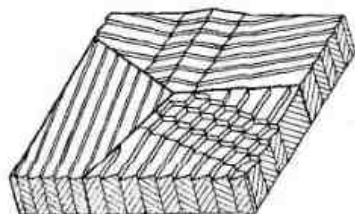


Рис. 65. Схема развития элементов рельефа при пластической деформации.

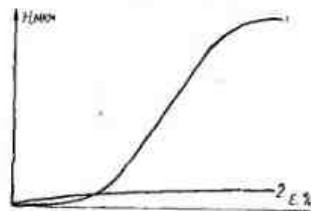


Рис. 66. Кривые изменения величины рельефа при деформации образцов растяжением:

1 — на границах зерен; 2 — на линиях скольжения.

этой же деформации при сжатии неровности имеют величину в среднем 170—200 нм. Развитость границ зерен и фрагментов по величине выступов и впадин несколько

отличается от подобных структурных участков при растяжении. Кинетика же самого процесса развития рельефа при сжатии не отличается от этого процесса при деформации растяжением. По-видимому, численные различия в основном обуславливаются некоторым стеснением смещения как внутризеренных составляющих, так и самих зерен, характерным для напряжения сжатия.

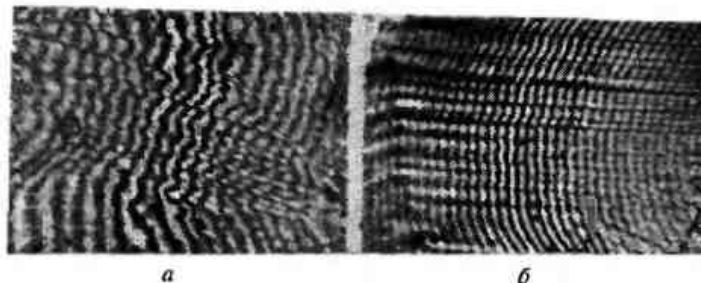


Рис. 67. Рельеф на линиях скольжения при деформации сжатием на поверхностях алюминия,  $\times 290$ : а — торцевой; б — боковой.

Особенно ощутимые изменения возникают при формировании рельефов на торцах образцов. Особенности фор-

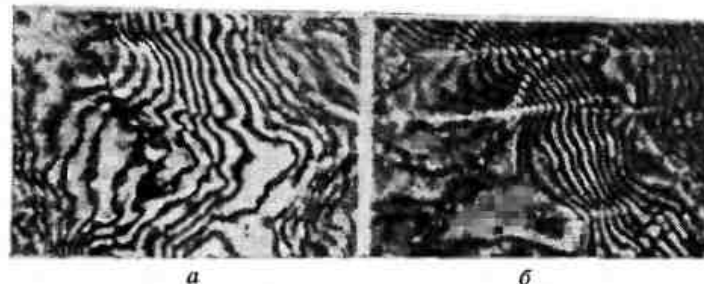


Рис. 68. Рельеф, образованный при деформации сжатия стали 1X18H9T,  $\times 290$ : а — на торцах; б — на боковых поверхностях.

мирования этих рельефов связаны с условиями контактирования, наличием поверхности контртела, затрудняющей свободное развитие рельефов и т. д. На рис. 67 показан рельеф на линиях скольжения при деформации сжатием на торцах и боковых поверхностях образцов, а на



рис. 68 — рельеф, образующийся при сжатии на торцах и боковых поверхностях стали 1Х18Н9Т, связанный с разориентировкой границ зерен и фрагментов. Рельеф на торцах образцов стали, возникающий при больших удельных давлениях, виден на рис. 69. Появление сложного рельефа в этих условиях обусловлено не только большими удельными давлениями, но и большой площадью фактического контакта и сложным напряженным состоянием.

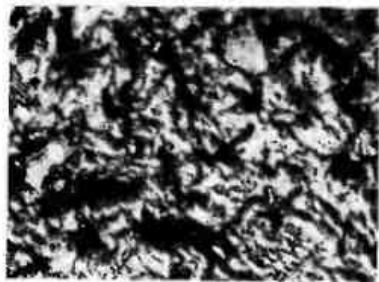


Рис. 69. Рельеф торцевой поверхности стали, возникающий при больших давлениях сжатия,  $\times 290$ .

риентировкой зерен вдоль границ с последующим значительным огрублением рельефа в связи с развитием вышеперечисленных явлений при больших степенях деформации.

### Рельеф и структура поверхности при циклическом нагружении

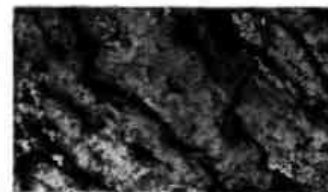
Сдвиговые процессы (скольжение, двойникование, относительное перемещение и поворот зерен), протекающие при усталости, так же, как и при статическом нагружении, приводят к возникновению физического рельефа [59]. Несмотря на некоторую аналогию механизмов пластической деформации при действии статических и циклических нагрузок, рельеф и другие характеристики качества поверхности металла, подвергнутого действию переменных напряжений, обладают рядом специфических особенностей.

В результате действия циклического нагружения на поверхности металла появляются выступы (экструзии), впадины (интрузии), ямки (поры), устойчивые полосы

скольжения (рис. 70). Такой рельеф никогда не возникает при статическом нагружении. При статических нагрузках полосы скольжения на ранних стадиях имеют относительно небольшую ширину и только при предельном упрочнении на стадии, близкой к разрушению, возникают широкие полосы скольжения. При действии переменных напряжений в процессе скольжения развиваются



а



б



в

Рис. 70. Развитие рельефа при циклическом нагружении:

а — экструзия и интрузия,  $\times 25\ 000$ ; б — разрывление полос скольжения,  $\times 25\ 000$ ; в — устойчивые полосы скольжения,  $\times 400$ .

грубые полосы скольжения, ширина которых в начальной и конечной стадиях процесса усталости, как правило, почти не изменяется [36]. Плотность полос скольжения при усталости при данном числе циклов зависит от уровня напряжения, а при постоянном уровне напряжения — от числа циклов. Как правило, при увеличении числа циклов полосы скольжения становятся намного более рельефными, чем полосы скольжения в образце, подвергнутом нагрузке одного знака [109]. Полосы скольжения, вызываемые статическим нагружением, имеют форму лестницы [180], а полосы, возникающие при усталости, — форму желоба или гребня. Рельефность такого скольжения при усталостном нагружении обусловлена тем, что она имеет форму широкого выступа или глубокой впадины — явление экструзии (выдавливаний) или интрузии (вдавливаний). Явление экструзии [181, 182] заключается в выдавливании тонких лепестков вдоль полос

скольжения и обусловлено циклическим характером приложения нагрузки, а также наличием пересекающихся систем скольжения [37, 176, 194].

При усталостном нагружении в условиях высоких и низких амплитуд сдвиговые перемещения имеют существенные различия [13]. Большие амплитуды вызывают лавинное возникновение сдвиговых перемещений на расстояния, равные нескольким сотням периодов решетки.



Рис. 71. Дислокационная структура образца стали 1X18H9T при усталости:

а — внутренние слои; б — поверхностные слои,  $\times 35\,000$ .

Малые амплитуды вызывают малые сдвиги на несколько периодов решетки. Для удаления грубых полос скольжения, возникающих при усталости, необходимо снять поверхностный слой толщиной в несколько десятков микрон. Это во много раз больше, чем слой, необходимый для снятия полос скольжения при статической деформации [152, 206, 207]. Поэтому такие полосы называются устойчивыми.

Особенностью рельефа, возникающего при усталости, является появление при сравнительно низких напряжениях характерных следов скольжения, часто прерывающихся, имеющих вид пунктира или ряда точек [152, 140, 195, 209]. Электронно-микроскопические исследования показали, что эти точки являются порами (ямками) глубиной в несколько микрон с максимальным развитием их в местах пересечения полос скольжения [37].

Локализация дефектной структуры в поверхностных слоях подтверждается прямым электронно-микроскопическим изучением дислокационной структуры (рис. 71).

Следы скольжения, вызванные статическим действием сил, всегда упрочняют металл, т. е. увеличивают его

твердость. При действии циклических нагрузок развитие грубых полос скольжения приводит к разрыхлению микрообъемов, т. е. уменьшению его твердости [115].

Пластическая деформация при усталости может осуществляться не только скольжением, но и двойникованием [36, 160]. Изменения структуры при усталости сосредоточиваются главным образом в поверхностных слоях. В процессе циклического нагружения обнаруживаются явления упрочнения и разупрочнения металла. Упрочнение при усталости обусловлено двумя факторами — наклепом и механическим старением. Разупрочнение металлов в процессе циклического нагружения по И. А. Одингу связано с такими факторами:

- 1) образованием и коагуляцией вакансий в колонии, приводящих к разрыхлению кристаллической решетки и уменьшению межатомных связей;
- 2) остаточными напряжениями между различно ориентированными зернами металла;
- 3) взаимодействием силовых полей дислокаций, приводящих к облегчению действия источников дислокаций [115].

Тонкая структура металлов в условиях циклических нагружений существенно изменяется. В результате экспериментов установлено, что в процессе усталости возникают многочисленные вакансии [136, 172, 189, 204, 213].

В металлах, подвергнутых усталостному нагружению, обнаруживается большое количество дислокационных петель [204, 213], увеличение температурной чувствительности, предела текучести [172, 189], увеличение электросопротивления [15, 36, 38, 39, 186]. Более интенсивное возникновение вакансий при циклическом нагружении по сравнению с статической нагрузкой отмечали в своих работах А. Коттрел [175], Ф. Франк и Дж. Холден [183] и др.

### Пленки окислов и рельеф поверхности

Трение тел всегда сопровождается возникновением и развитием ряда структурированных пленок, наличие которых обуславливается взаимодействием активной поверхности трения с рабочими средами. Наиболее распространены в реальных условиях нагружения трением два основных типа вторичных структур: пленки окислов и адсорбированные пленки смазки. Рассмотрим развитие рельефа

при нагружениях в условиях наличия на поверхности указанных пленок.

Пленки окислов в реальных условиях в значительной мере могут влиять на механические свойства металла [89, 111]. Пленка и основной металл могут иметь разные параметры решеток, различную поверхностную энергию и т. д. Все это оказывает существенное влияние на взаимодействие дислокаций с поверхностью, а следовательно, и на развитие рельефа поверхности при пластической деформации.

Если параметр решетки и структура пленки отличаются от основного материала, то на границе раздела существует сетка дислокаций несоответствия между параметрами решетки. Эта сложная дислокационная сетка представляет серьезное препятствие для выхода дислокаций на поверхность [111].

Для понимания механизма деформации тонких поверхностных слоев металла необходимо представлять распределение дислокаций на границе металл — пленка, учитывать силы их взаимодействия и величины деформирующих напряжений.

Задача о конфигурации ряда дислокаций одного знака перед препятствием была решена Ф. Франком и др. [179]. Теория Франка объясняет лишь некоторые моменты деформации, так как при деформации образуются дислокации разных видов и знаков с различной конфигурацией дислокационных сеток.

Наиболее полно в общем виде взаимодействие дислокаций с поверхностью рассмотрел Е. Д. Щукин [163]. Он вычислил критерий деформируемости кристалла в зависимости от поверхностной энергии и величины потенциального барьера для выхода дислокаций.

Влияние окисных и других металлических пленок на деформируемость монокристаллов изучено многими исследователями [89, 97, 111, 168, 177, 185, 187, 199, 201, 202]. Это влияние может быть весьма существенным. Например, окисная пленка толщиной 100 атомных слоев на кадмии увеличивает критическое напряжение сдвига на 100% [177, 201]. После снятия окисной пленки с поверхности критическое напряжение сдвига понижается до нормальной величины.

В. И. Лихтман и В. С. Островский также установили, что предел текучести окисленных кадмиевых образцов на

14% выше, чем у чистых [100]. На алюминии при увеличении толщины окисной пленки с 10 до 50 нм критическое напряжение сдвига возрастает с 76 до 175 Г/мм<sup>2</sup> [89].

Критическое напряжение сдвига увеличивают также покрытия из сплавов и тонкие металлические пленки [168, 185, 187, 188, 198, 199, 202].

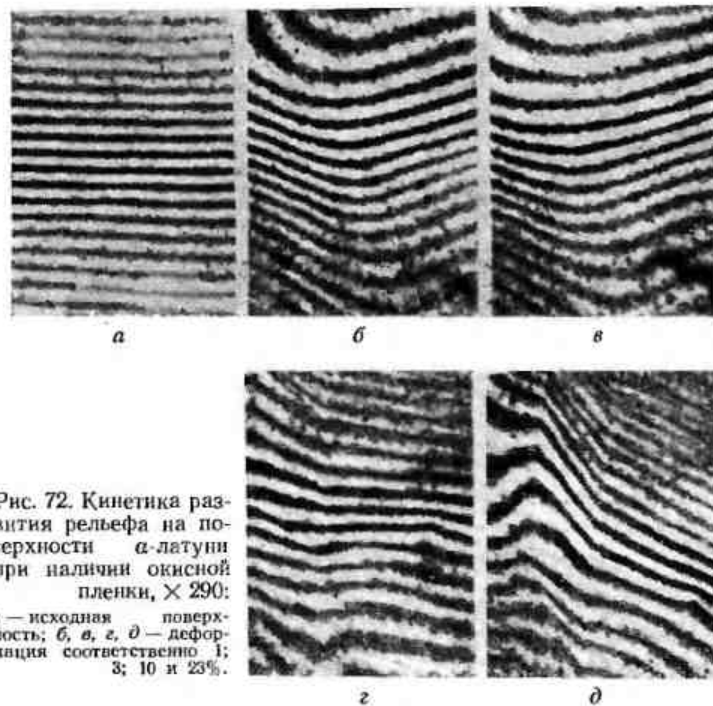
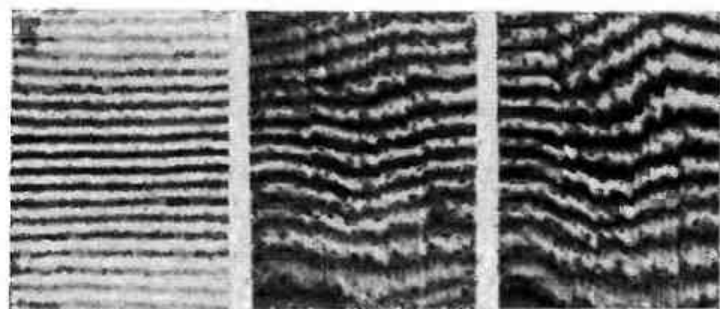


Рис. 72. Кинетика развития рельефа на поверхности  $\alpha$ -латуни при наличии окисной пленки,  $\times 290$ :  
а — исходная поверхность; б, в, г, д — деформация соответственно 1; 3; 10 и 23%.

Пленки окислов оказывают большое влияние на развитие топографии поверхности при пластическом деформировании. Естественные пленки окислов толщиной 2—3 нм, существующие при обычных условиях деформации металлов, существенного влияния на формирование физического рельефа не оказывают. Авторы исследовали влияние пленок окислов, возникающих при тепловом воздействии на металл, на развитие физического рельефа поверхности.

Предварительное окисление полированных образцов они проводили в вакуумной печи при небольшом напуске

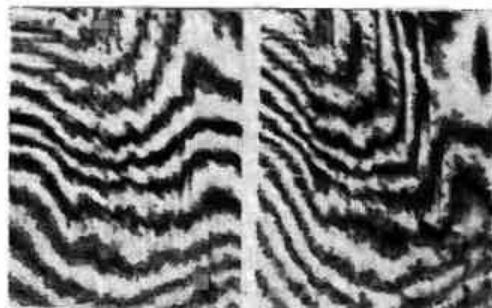
воздуха до  $10 \text{ н/м}^2$  ( $10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$ ) с нагревом до разных температур и при различной выдержке. Толщины пленок окислов, полученных в этих условиях, оценивали по окраске поверхности и интерференционными методами; они составляли 16—57 нм.



*a*

*б*

*в*



*z*

*д*

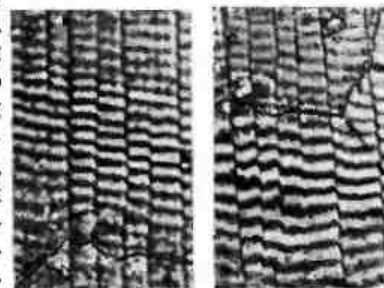
Рис. 73. Рельеф на линиях скольжения при наличии окисной пленки на поверхности  $\alpha$ -латуни,  $\times 290$ :

*a* — исходная поверхность; *б, в, z, д* — деформация соответственно 6; 10; 20 и 41%.

Деформация в условиях наличия окисных пленок различной толщины на образцах алюминия, латуни и нержавеющей стали показала, что присутствие окисных пленок резко тормозит развитие поверхности на всех элементах ее структуры. Рельеф при наличии окисных пленок сглажен, высота шероховатостей меньше. Наиболее значительные неровности, проявляемые на фрагментах и границах зерен при растяжении, в условиях окисления резко затормаживаются и составляют 1—2 мкм по сравнению с 4—5 мкм при той же деформации без пленки. Эти различия наиболее резко проявляются на начальных ста-

диях деформации и постепенно исчезают с увеличением степени деформации и с уменьшением толщины окисной пленки. На рис. 72 показана панорама развития рельефа на поверхности  $\alpha$ -латуни при наличии окисной пленки толщиной примерно 46 нм. Физический рельеф на линиях скольжения при толщине пленки 16 нм представлен на рис. 73. Толщина пленки окислов была меньше и поэтому эффект сглаживания проявился в меньшей степени.

Опыты с локальным окислением, специально полученным на отдельных участках зерен алюминиевых образцов, показали, что развитие одной и той же системы полос скольжения может сильно тормозиться на участке, покрытом пленкой. На рис. 74 показан рельеф поверхности алюминия с локальными участками окисления. Стрелками указаны участки поверхности с окислами толщиной 0,1 мкм.



*a*

*б*

Рис. 74. Рельеф поверхности алюминия с локальными участками окисления,  $\epsilon = 20\%$ ,  $\times 290$  (стрелками показаны границы окисной пленки: *A* — участки без пленки; *Б* — окисная пленка):

*a* — на участке без пленки; *б* — на участке с пленкой.

На рис. 75 показан рельеф, образуемый на границах зерен и фрагментов  $\alpha$ -латуни при наличии окисной пленки. Необходимо отметить, что сдвиговые деформации на границах зерен в меньшей степени связаны с наличием окисной пленки на поверхности деформируемого металла. При детальном рассмотрении участков границ зерен в электронном микроскопе установлено, что окисные пленки по мере увеличения деформации разрушаются, обнажая участки поверхности, свободные от окисления. Этот фактор, по-видимому, является определяющим в исчезновении различия в топографии поверхностей на участках фрагментов и границ зерен при больших степенях деформации.

Изучение дислокационной структуры при внешнем трении на поверхностях LiF, покрытых тонкими пленками полимера (толщина 15 нм), подтверждает описанные представления о влиянии адсорбированных пленок на

изменение состояния поверхности. На рис. 76 показана дислокационная структура поверхности кристаллов LiF при трении без пленки и с пленкой.

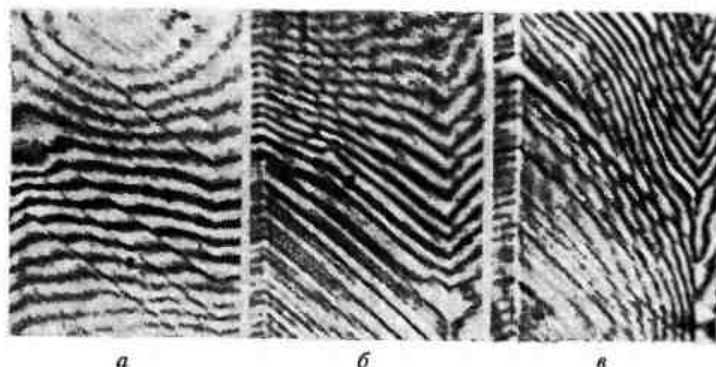


Рис. 75. Рельеф на границах зерен и фрагментов  $\alpha$ -латуни при наличии окисной пленки,  $\times 290$ :  
 а, б, в — деформация соответственно 2; 6; 10%.

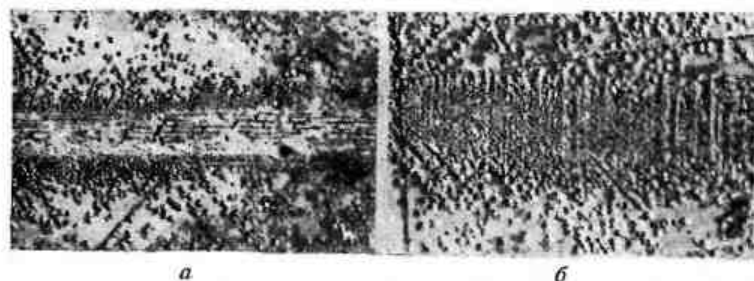


Рис. 76. Дислокационная структура поверхности кристаллов LiF при трении:  
 а — без пленки; б — с пленкой.

### Адсорбция смазки и рельеф поверхности

На механизмы пластической деформации в поверхностных слоях и, следовательно, на рельеф и структуру поверхностей деформируемых металлов большое влияние оказывают жидкие смазочные среды. Это связано с явлением обратимой физической адсорбции и хемосорбции.

Влияние поверхностно-активных рабочих сред, обусловленное физической адсорбцией, весьма существен-

но. Эффекты адсорбционного пластифицирования (облегчения пластических деформаций), адсорбционного понижения прочности (возникновения хрупкого разрушения при малых интенсивностях напряженного состояния, вплоть до самопроизвольного диспергирования) и упрочнения поверхностных слоев металла под действием поверхностно-активных сред были открыты П. А. Ребиндером [132, 133, 97, 98].

Различают внешний и внутренний адсорбционные эффекты П. А. Ребиндера [98]. В основе внешнего адсорбционного эффекта лежит чисто поверхностное взаимодействие металла со средой. Диффузия крупных молекул поверхностно-активных веществ в решетку металла невозможна вследствие стерического эффекта. Под влиянием физической или обратимой адсорбции происходит уменьшение свободной поверхностной энергии деформируемого металла, что приводит к его пластифицированию, т. е. к снижению предела текучести и коэффициента упрочнения [99, 164]. При этом всегда наблюдается значительное измельчение пачек скольжения и зеренной структуры деформируемого металла.

Хотя первичным действием поверхностно-активной среды является пластифицирование металла, конечным результатом может оказаться значительное упрочнение поверхностных слоев вследствие значительно большей, чем в отсутствие поверхностно-активной среды, пластической деформации [31, 106, 107, 108].

Внутренний адсорбционный эффект вызывается адсорбцией поверхностно-активных веществ на внутренних поверхностях раздела — зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации металла. Это приводит к уменьшению образования новых поверхностей и облегчению развития микротрещин, что проявляется в возникновении хрупкости и резкой потере прочности [98].

Поверхностно-активная среда существенное влияние оказывает также на развитие рельефа поверхности при усталости. При сравнении профилограмм, снятых с алюминиевых образцов (рис. 77, а), видно, что образцы, испытанные в поверхностно-активной среде (рис. 77, б), имеют более тонкий деформационный микрорельеф, чем рельеф, характерный для испытаний в инактивной среде (вазелиновое масло, рис. 77, в). Это связано с тем, что,

адсорбируясь на внешней поверхности, поверхностно-активные компоненты снижают поверхностную энергию, облегчая сдвигообразование и увеличивая число сдвигов [97, 98]. Уменьшение поверхностной свободной энергии поверхностно-активными веществами приводит к снижению энергетического барьера для выхода дислокаций на поверхность и к активизации подповерхностных источников дислокаций. Это подтверждается электронно-микроскопическими исследованиями дислокационной структуры [57, 59]. В последних работах авторов было показано, что проявление эффекта П. А. Ребиндера в условиях трения и износа металлов резко усиливается (на 2—3 порядка) при испытаниях в газовых средах, не содержащих кислород (аргон). Это объясняется отсутствием экранирующей функции пленок окислов, резко снижающих действие поверхностно-активных веществ [63].

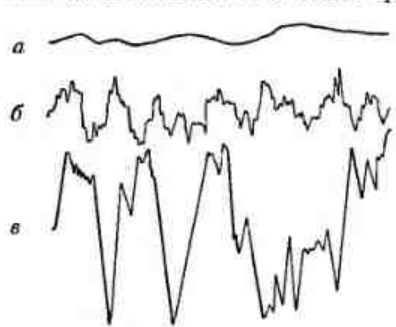


Рис. 77. Профилграммы поверхностей алюминиевых образцов, испытанных на усталость: *a* — исходная поверхность; *b* — после испытаний в 0,2%-ном растворе оксаловой кислоты в вазелиновом масле; *c* — после испытания в вазелиновом масле.

На развитие рельефа и структуру поверхности не меньшее влияние оказывают рабочие среды, содержащие химически активные компоненты.

М. Э. Натансон показал, что в результате применения химически активных веществ в качестве присадок к смазочным маслам на поверхности трения образуются необратимые адсорбционные слои, обладающие малым напряжением сдвига. Было установлено, что это происходит при одновременном выведении и локализации деформации металла в тончайшие слои поверхностей трения.

Для этих исследований использовали устойчивые коллоидные растворы роданидов меди и железа в смазочных маслах, а также ряд других химически активных веществ [62]. В результате пластифицирования тончайших слоев поверхностей трения, происходящего под влиянием хими-

ческого взаимодействия с молекулами указанных присадок, значительно улучшается микрорельеф. Причем существенное уменьшение величины микронеровностей, происходящее в результате применения химически активных присадок, сопровождается уменьшением толщины

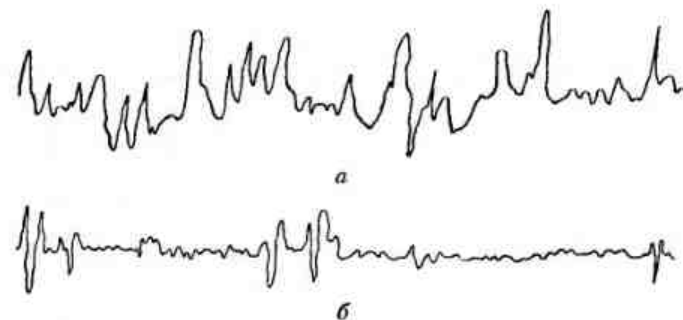


Рис. 78. Профилграммы поверхностей железа Армко, испытанных на трение при  $v = 1,5$  м/сек,  $P = 40$  кг/см<sup>2</sup>: *a* — в среде масла МС-20; *b* — в среде масла МС-20 с присадкой роданида меди.

пластически деформированного слоя. На рис. 78, *a* показана профилграмма поверхности трения, работавшей в среде чистого масла МС-20. Средняя величина микронеровностей этой поверхности составляет 1,4 мкм. В то же время, как видно из профилграммы поверхности трения, работавшей в среде масла МС-20 с присадкой роданида меди (рис. 78, *b*), средняя высота микронеровностей уменьшается до 0,6 мкм. Структура поверхностей трения образцов испытана в присутствии роданидов меди и железа и характеризуется наличием вторичных пленок, представляющих собой химически фиксированные адсорбционные слои. Величина микротвердости поверхностей трения, испытанных в масле МС-20 и в присутствии указанных присадок, не имеет существенных отличий. Таким образом, химически активные вещества в основном влияют на улучшение чистоты поверхностей трения и способствуют улучшению их антифрикционных свойств.

## Рельеф и структура поверхности при статическом контакте

Формирование рельефа при статическом контакте сопряженных поверхностей обуславливается пластической деформацией, вызываемой нормальной нагрузкой, и связано с дискретностью контакта.

Дискретность контакта приводит к неоднородности развития деформации на поверхности в местах фактического касания сопряженных тел и в местах, непосредственно прилегающих к ним и вовлекаемых в зону влияния напряжений.

В местах непосредственного контакта формирование рельефа происходит в сложных стесненных условиях путем выхода на поверхность линий скольжения, а также переориентировки границ зерен и фрагментов.

На участках, где есть непосредственный физический контакт, происходит взаимная

достройка рельефов сопрягаемых поверхностей. Характеристика или параметры этой достройки находятся в прямой связи с механическими и физическими свойствами сопряженных металлов, соотношениями между ними и напряжениями в зоне контакта. По мере роста нагрузки площадь фактического контакта увеличивается. Соответственно этому описанный механизм развития рельефа будет распространяться на большие участки поверхности. Развитие механизма достройки рельефов сопряженных тел в местах непосредственного контакта теоретически может происходить до получения полного физического контакта. Практически получить полную площадь физического контакта невозможно. В связи с этим при анализе изменений площади фактического соприкосновения при статическом контакте и тем более при трении движения в зависимости от нагрузки можно говорить только о степени реализации возможностей достройки на какой-то определенный процент. Схема типовых случаев фор-

мирования рельефа в местах непосредственного контакта представлена на рис. 79.

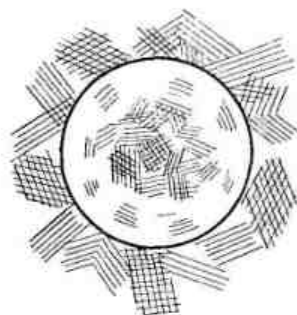


Рис. 79. Схема формирования рельефа при статическом контакте системы шар — плоскость.



Рис. 80. Рельеф, возникающий в зоне непосредственного контакта системы шар — плоскость,  $\times 290$ .



Рис. 81. Рельеф, возникающий в зоне влияния при статическом контакте системы шар — плоскость,  $\times 290$ .

При контакте двух твердых тел совершенно естественно, что напряженное состояние распространяется за пределы непосредственного контакта. Эти участки поверхности, находящиеся в зоне влияния непосредственного контакта, испытывают неравномерное напряженное состояние. Формирование физического рельефа на этих участках происходит в менее стесненных условиях и в определенной мере аналогично формированию рельефа при деформации растяжения и сжатия.

На рис. 80 показан физический рельеф, возникающий в зоне непосредственного контакта сферы-плоскости (дно лунки), а на рис. 81 — рельеф, возникающий в зоне влияния, прямо прилегающей к зоне непосредственного контакта. На рис. 82 видна дислокационная структура при статическом контакте системы шар — плоскость.

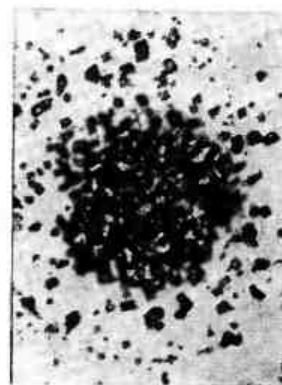


Рис. 82. Дислокационная структура алюминия при статическом контакте системы шар — плоскость,  $\times 290$ .

## Рельеф и структура поверхности при трении движения

Формирование физического рельефа при трении движения еще более сложно и зависит от действия ряда факторов. В зоне непосредственного контакта даже при однократном нагружении (один проход) возникают напряжения растяжения и сжатия, происходит процесс текстурирования поверхностных слоев, могут проявляться некоторые признаки диспергирования — износа. Физический рельеф на участках непосредственного контакта



Рис. 83. Схема формирования рельефа при трении скольжения системы шар — плоскость.



Рис. 84. Рельеф, возникающий впереди движущегося индентора при трении скольжения,  $\times 290$ .

и в зоне влияния формируется по-разному. Схема формирования рельефа при скольжении шара по плоскости приведена на рис. 83.

Рельеф впереди движущегося индентора, возникновение которого связано с деформацией сжатия, показан на рис. 84. Зона влияния, где не происходит непосредственный контакт трущихся тел, в случае трения движения включает в себя участки металла впереди, по бокам и сзади движущегося индентора. Физический рельеф на участках непосредственного контакта при движении показан на рис. 85.

Исследование дислокационной структуры, раскрывающее некоторые механизмы пластической деформации при трении скольжения, было выполнено П. В. Назаренко путем выявления ямок травления, соответствующих выходам дислокаций на поверхность. На рис. 86 показана дислокационная структура на поверхностях кристаллов NaCl, возникающая при трении корундового индентора

( $r = 50$  мкм) при нагрузке  $3 \Gamma$  в плоскости (100). Характер развития дислокационной структуры зависит от направления движения.

Дислокационная структура в сечениях поверхностных слоев при разном нормальном давлении на индентор показана на рис. 87.

Между величиной нормального давления, плотностью дислокаций и их распределением по сечению [67] наблюдается определенное соответствие.

Наряду с известными механизмами формирования рельефа при растяжении и сжатии одним из важнейших механизмов, связанных непосредственно с трением движения, является механизм текстурирования. На рис. 88 показаны элементы механизма текстурирования.

Зона влияния сбоку индентора представлена на рис. 89. Поверхность контакта на дорожке трения при очень малых нагрузках показана на рис. 90. Характерным для всех условий трения скольжения является то, что механизм поверхностного деформирования и диспергирования вызывает наличие рельефа, шероховатости которого совпадают с направлением движения при трении.

Наряду с этим существует механизм деформирования внутренних объемов поверхностных слоев, шероховатости которого (в основном линии скольжения) направлены перпендикулярно к направлению движения при трении.

Вопрос о повреждаемости поверхностей трущейся пары является одним из центральных в теории внешнего трения.

При анализе геометрического состояния поверхностей при внешнем трении необходимо рассматривать два случая. В первом случае деформация и повреждения поверхности происходят в основном в материале движущегося тела, во втором — в поверхностных слоях материала неподвижной поверхности. Как известно, основное содержание внешнего трения обусловлено процессами уруго-



Рис. 85. Рельеф на участках непосредственного контакта при трении  $\alpha$ -латуни,  $\times 30\,000$ .



пластической деформации, которая на элементарном контакте вызывает ряд производных явлений:

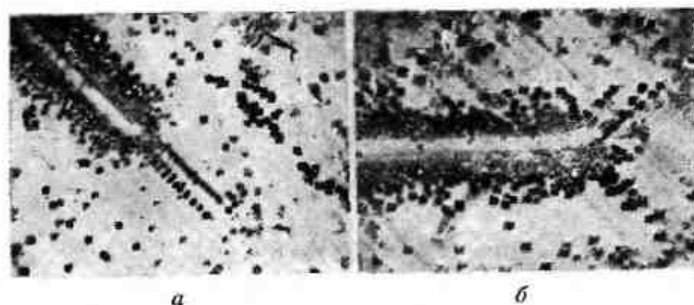


Рис. 86. Дислокационная структура поверхности кристалла NaCl, возникающая при трении корундового индентора в плоскости (100) при нагрузке 3 Г: *а* — при трении в направлении (110); *б* — в направлении (100).

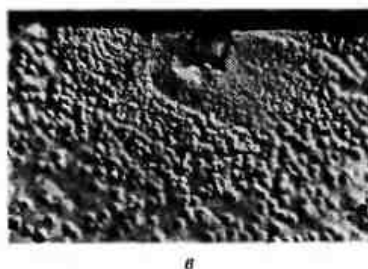
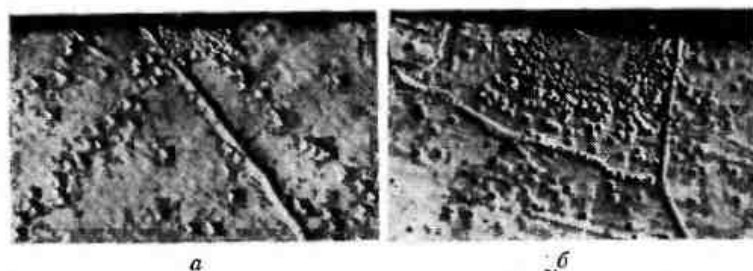


Рис. 87. Дислокационная структура в сечении кристалла NaCl при различном нормальном давлении:

*а* — минимальная нагрузка; *б* — средняя нагрузка; *в* — максимальная нагрузка.

- а) теплоту внешнего трения;
- б) специфическую активизацию металла (увеличение плотности вакансий и дислоцированных атомов) и свя-

занные с ней явления схватывания, окисления, различные виды хемосорбции и физической адсорбции;

в) явления упрочнения, усталости, диспергирования и др.

Очевидно, что явления повреждаемости при внешнем трении являются результатом как непосредственного действия упруго-пластической деформации, так и влияния всех производных от нее явлений (схватывания, усталости, тепловых воздействий, окисляемости поверхности трения и др.).

Авторами установлено, что существует два вида повреждаемости поверхностей при внешнем трении:

1) допустимый вид повреждаемости, развивающийся при нормальных условиях внешнего трения, происходит путем деформации тончайших поверхностных слоев металла и постоянного разрушения и восстановления



Рис. 88. Элементы механизма текстурирования,  $\times 23\ 000$ .

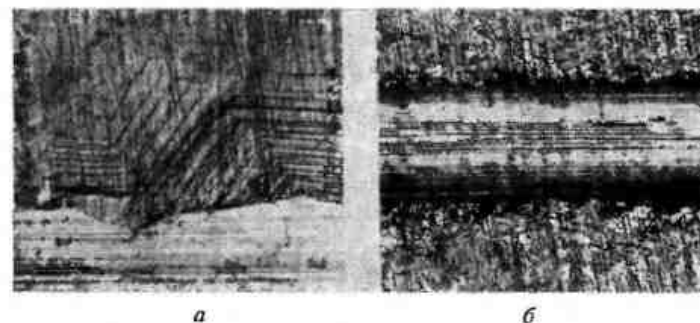


Рис. 89. Зона влияния сбоку индентора при трении скольжения,  $\times 290$  (стрелкой показано направление движения индентора): *а* — медь; *б* — кадмий.

окисных пленок. К этому же виду относятся все другие случаи образования вторичных защитных структур (тончайших пленок на поверхностях контакта, являющихся результатом взаимодействия поверхностей трения

с окружающей смазочной и газовой средой). В нормальных условиях работы деталей машин процесс внешнего трения возможен только при условиях существования вторичных защитных структур, формирующихся непосредственно в самом процессе трения;

2) вид повреждаемости, объединяющий значительную группу патологических недопустимых процессов, которые возникают на контакте трущихся тел. К этому виду относятся процессы схватывания и разрушения металлических связей, процессы теплового разупрочнения и размягчения металла, абразивного действия и связанного с этим микрорезания, интенсивного деформирования на большие глубины, процессы усталости и т. п.

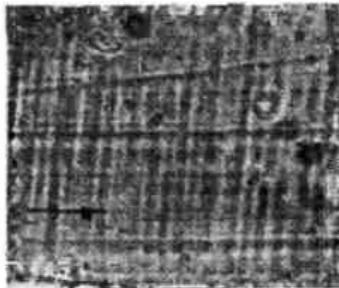


Рис. 90. Поверхность контакта на дорожке трения, образованная при малых нагрузках,  $\times 290$ .

Описанные патологические виды повреждаемости поверхностей трения являются переходными к процессам внутреннего трения, объемного разрушения и относятся ближе к некоторым техно-

логическим процессам, например к шлифованию и обработке давлением, и недопустимы при нормальных условиях внешнего трения.

Типичные случаи повреждаемости поверхности трения первого и второго вида, вызванные действием перечисленных факторов при трении, приведены на рис. 91—116.

## 9. Классификация рабочего рельефа деталей машин

Рабочий рельеф деталей машин формируется в результате действия всех факторов, обуславливающих внешнее трение: пластической деформации при растяжении, сжатии, циклическом нагружении, наличии пленок окислов, пленок адсорбированной смазки, в условиях деформации при непосредственном контакте и в зонах влияния с образованием своеобразных текстур и повреждений. Внешнее

трение неразрывно связано с процессом диспергирования — износа. Поэтому на формирование рабочего рельефа процесс диспергирования также оказывает влияние. Естественно, что рабочий рельеф деталей машин, изготовленных из разных материалов и эксплуатируемых в различных условиях при разных скоростях скольжения и давлениях в различных рабочих (жидких и газовых) средах, имеет существенные особенности.

Для изучения закономерностей формирования рабочего рельефа и возможностей управления этими процессами необходима их четкая классификация. Классификация рабочего рельефа поверхностей деталей машин прямо связана с их износостойкостью, антифрикционностью и фрикционностью. Очевидно, что важнейшим признаком различия рабочих рельефов и состояния поверхностей деталей машин является их классификация в связи со сложными физико-химико-механическими процессами, возникающими при внешнем трении. Все случаи формирования качества поверхностей деталей машин необходимо разделить на две большие группы: при допустимых и недопустимых видах износа.

К первой группе относятся рабочие рельефы, возникающие при нормальных условиях трения и связанные с процессом деформации тончайших поверхностных слоев, активизации металла в них, образованием вторичных структур, их разрушением и постоянным восстановлением. Типичным примером формирования рабочих поверхностей этого вида является качество поверхности при окислительном износе.

Вторую группу составляют рельефы, возникающие при развитии недопустимых патологических видов разрушения (износа) поверхностей трения: схватывания атермического, термического, абразивного и усталостного износа, а также некоторых других, связанных с явлениями коррозии, эрозии, кавитации.

### Рельеф поверхности при нормальных условиях эксплуатации

При нормальных условиях эксплуатации узлов трения деталей машин происходит процесс постоянного образования и разрушения тончайших пленок вторичных

защитных структур, строение и свойства которых резко отличаются от строения и свойств металла внутри объема.

Наличие защитных структур на поверхностях трения является очевидным и совершенно необходимым условием нормальной эксплуатации трущихся сопряжений. Под вторичными защитными структурами следует понимать пленки различного состава, строения и свойств, разделяющие ювенильные поверхности металлов при их контактировании.

Наиболее типичными вторичными структурами являются пленки окислов, возникающие в самом процессе трения. При трении со смазкой, в зависимости от состава смазочных материалов и особенно присадок к ним, пленки вторичных структур образуются при совместном действии кислорода воздуха, активных компонентов смазки и металлической фазы.

Наиболее изученными пленками вторичных структур, формирующимися при взаимодействии металла со смазкой, являются сульфидные и фосфидные пленки. В условиях граничного трения на металлических поверхностях образуется особый слой смазки, обладающий квазиупругими свойствами. Этот слой образуется в результате действия электрического поля металлической поверхности. Этот слой условно можно также считать своеобразной вторичной структурой.

При изготовлении ответственных и тяжело нагруженных поверхностей трения деталей машин защитные структуры создают за счет насыщения поверхностей металла серой, фосфором, азотом, кислородом, углеродом, бором, хромом и другими элементами.

Изучение поверхностей трения деталей машин, работающих в реальных условиях эксплуатации, и лабораторные исследования позволяют утверждать, что при всех нормальных условиях внешнего трения существуют защитные поверхностные структуры — естественные (пленки окислов) или искусственно создаваемые при изготовлении или в самом процессе эксплуатации. Механические, физические и химические свойства этих защитных структур обуславливают антифрикционность, износостойкость и фрикционность трущихся узлов и сопряжений. При одинаковых функциях защитных структур их происхождение может быть различным, различны механизмы и условия формирования. Общим для защитных структур на по-

верхностях трения является высокое сопротивление нормальным напряжениям и легкость сдвига под действием тангенциальных усилий. В наиболее простом случае окислительного изнашивания на поверхностях трения образуются пленки окислов различных составов и толщины, а также слои твердых растворов кислорода в металле и различных эвтектик разной степени насыщения.

Окислы, образующиеся на различных металлах, имеют свои особенности. Наряду с основными прочностными свойствами пленок (твердость, прочность, хрупкость и др.) большое значение имеет прочность соединения пленок с основным металлом.

Качество поверхности деталей машин при нормальных условиях эксплуатации органически связано с процессами формирования вторичных структур, со всеми превращениями в них при трении и с процессом их разрушения.

Процесс образования и разрушения вторичных структур носит периодический характер и вследствие дискретности механического контакта происходит неравномерно на всей поверхности сопряжений.

Качество поверхности при нормальных условиях эксплуатации зависит от геометрии, структуры, свойств и напряжений, обусловленных процессами формирования, существования и разрушения вторичных структур.

Большой опыт изучения вторичных структур в деталях машин, работающих в конкретных условиях эксплуатации, и лабораторные исследования трения образцов, выполненные с помощью рентгеновского, электронно-графического, электронно-микроскопического, спектрального анализов и других методов исследования, показывают, что существует два принципиально различных процесса образования и разрушения защитных вторичных структур окислов. Внешне это выражается, в одном случае, в формировании пластических перемещающихся (аморфизированных) поверхностных пленок, поведение которых еще сохраняет признаки металлического состояния. В другом случае — это формирование особо хрупких, как правило, повышенной твердости поверхностных пленок, разрушающихся путем развития трещин, раздробления и откалывания микрочастиц с поверхности металла. Эти пленки имеют свойства, резко отличающиеся от металлических.

В сравнительно редких случаях поверхности трения деталей машин работают без смазки. В этих случаях, как правило, образование пленок окислов происходит более интенсивно, так как преобладают окислы с предельным насыщением металла кислородом, т. е. химические соединения. На рис. 91 показаны фотография и профилограмма



Рис. 91. Поверхность стали при сухом трении: а — фотография,  $\times 320$ ; б — профилограмма.

стальной поверхности, работающей без смазки в условиях окислительного трения, а на рис. 92 — типичные поверхности трения деталей машин, работающих в условиях граничной смазки и окислительного износа.

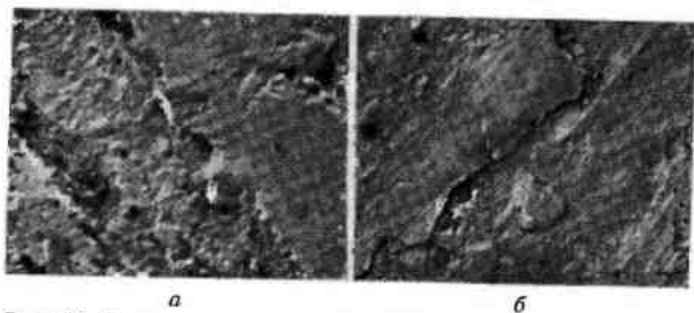


Рис. 92. Электронные микрофотографии поверхности стальных деталей при граничном трении,  $\times 30\ 000$ : а, б — различные участки поверхности.

Механизм формирования защитных пленок и механизмы их разрушения определяют все характеристики качества поверхности обширного класса деталей машин, работающих в нормальных условиях эксплуатации.

*Первая форма образования вторичных структур.* Как было указано, качество поверхности деталей машин при окислительном трении имеет две модификации. Первая модификация связана с образованием в процессе трения

подвижных пленок вторичных структур, перемещающихся по поверхности трения, заполняющих все впадины и неровности. В результате образуются гладкие поверхности II—IV класса чистоты. Эти поверхности слабо травятся и в остаточном состоянии имеют увеличенную твердость по сравнению с твердостью основного металла. На рис. 93 показан поршневой палец двигателя с таким качеством поверхности. Необходимо отметить, что процесс получения такого качества поверхности достаточно универсален. Различные типы сталей с разной термической обработкой при определенных условиях трения при эксплуатации могут давать качество поверхности с характеристиками указанного вида. Такое качество поверхности характерно для самого различного типа сталей и чугунов, работающих в нормальных условиях трения. В сплавах на основе цветных металлов (бронзы, латуни, алюминиевые), работающих в нормальных условиях эксплуатации, вторичные структуры имеют другие характеристики качества поверхности.



На рис. 94 представлены фотография, профилограмма и интерферограмма поверхности, описывающие особенности структур этого класса. Существующие методы оценки качества поверхности по геометрическим параметрам не дают возможности точно оценить состояние поверхности. На электронных микрофотографиях видна исключительно гладкая поверхность без ощутимых признаков рельефа (рис. 95). Дефекты поверхности, обнаруживаемые при анализе с помощью электронного микроскопа, как правило, связаны с исходным состоянием поверхности. На гладких поверхностях, характеризующих рассматриваемую форму образования вторичных структур, встречается два типа специфических дефектов. Первый тип связан со своеобразной волнистостью (рис. 96). Шаг волны переменный и находится в пределах 0,1—0,5 мкм, а высота волны составляет 50—80 нм. Возникновение волнистости, очевидно, связано с кавитацион-

Рис. 93. Поршневой палец двигателя,  $\times 0,5$ .

ным характером разрушения рассматриваемых вторичных структур.

Второй тип дефектов заключается в образовании единичных микротрещин на поверхности (рис. 97), происхождение которых, очевидно, связано с охрупчиванием пластичной вторичной структуры в местах, наиболее интенсивно деформируемых и насыщенных кислородом.

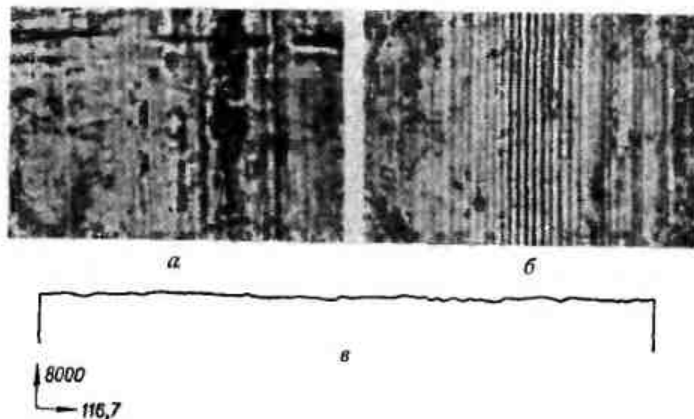


Рис. 94. Поршневой палец двигателя:  
а — фотография,  $\times 320$ ; б — интерферограмма,  $\times 290$ ; в — профилограмма.

Механизм формирования вторичных структур рассматриваемого типа следующий. При нагружении трением под действием нормальных и тангенциальных напряжений тончайшие слои поверхностных слоев пластически деформируются. Пластическая деформация, механизмы которой обусловлены перемещением, размножением и взаимодействием дислокаций, вызывает резкое увеличение концентрации вакансий и дислоцированных атомов [10], что, в свою очередь, приводит к увеличению диффузионной подвижности и развитию диффузионных явлений.

Активные объемы поверхностных слоев, взаимодействуя с кислородом воздуха, образуют твердые растворы и эвтектики разной степени насыщения. Механизм разрушения поверхностей трения с вторичными структурами этого типа заключается в постоянном перемещении тончайших пленок по поверхности трения и в уносе их за

пределы рабочих поверхностей контакта. Важной особенностью этих пленок является отсутствие четких границ перехода от вторичной структуры к структуре основного металла. Это обстоятельство в большой мере определяет описанный механизм их износа. Образование и унос вторичных структур этого типа схематически показаны на рис. 98.

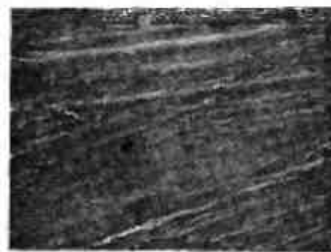


Рис. 95. Электронная фотография поверхности поршневого пальца,  $\times 30\ 000$ .



Рис. 96. Электронная фотография поверхности поршневого пальца с волнистостью,  $\times 30\ 000$ .

*Вторая форма образования вторичных структур.* Вторая модификация вторичных структур, возникающих в нормальных условиях внешнего трения, связана с образованием твердых и хрупких пленок на поверхностях контакта. Поверхности трения, покрытые такими пленками, отличаются относительно большой гладкостью. При очень больших увеличениях с помощью электронной микроскопии удается обнаружить шероховатость субмикроскопического порядка. Вторичные структуры этого типа почти не травятся и имеют резко увеличенную твердость по сравнению с твердостью основного металла.



Рис. 97. Электронная фотография поверхности поршневого пальца с охрупчиванием и возникновением субмикроскопических трещин,  $\times 30\ 000$ .

На рис. 99 показана макрофотография поверхности подшипника качения с вторичными структурами такого типа. Пленки вторичных структур этого типа образуются

преимущественно на сталях, термически обработанных на высокую твердость, при относительно тяжелых условиях трения, на сплавах цветных металлов и особенно характерны для условий трения качения.

Микрофотография, профилограмма и интерферограмма поверхности при установившемся трении и наличии структур описываемого типа представлены на рис. 100.

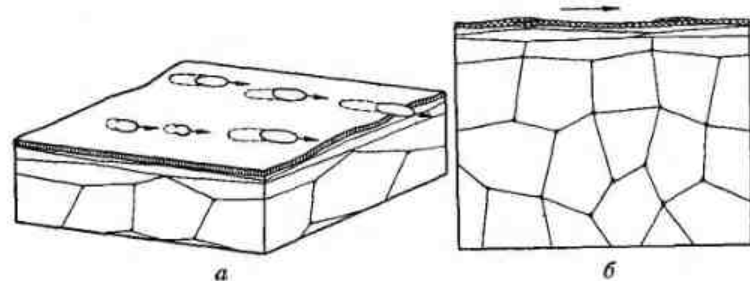


Рис. 98. Схема образования и уписа вторичных подвижных структур: а — в плане; б — в сечении.

По внешним признакам поверхности со второй формой вторичных структур имеют резкие отличия как от исходных, обусловленных технологией обработки, так и от поверхностей с первой формой вторичных структур.



Рис. 99. Макрофотография поверхности подшипника качения.

Наиболее развитые вторичные структуры этого типа дают поверхность без всякой ориентировки структуры в направлении движения при трении, обнаруживаются субмикротрещины, поверхности покрыты чередующимися участками с разрушенной и неразрушенной пленкой вторичных структур. Интерферограмма и профилограмма подчеркивают это чередование (рис. 100). На рис. 101 показаны электронные микрофотографии поверхностей трения шатунной

шейки коленчатого вала двигателя (рис. 101, а, б) и кольца подшипника качения (рис. 101, в, г) с характерными

этапами развития и разрушения вторичных хрупких структур.

Исследовать структуры этого типа в сечении очень трудно потому, что глубина расположения этих структур чрезвычайно незначительна (до 1 мкм).

Механизм формирования вторичных структур рассматриваемого типа следующий. Структуры этого типа представляют собой химические соединения и твердые растворы кислорода с металлом.

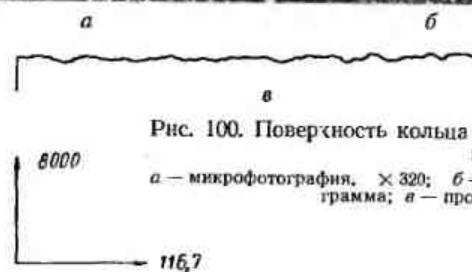
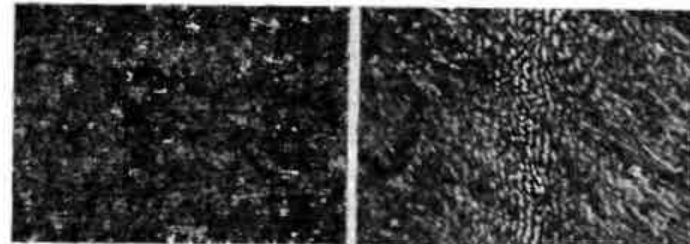


Рис. 100. Поверхность кольца подшипника качения: а — микрофотография,  $\times 320$ ; б — интерферограмма; в — профилограмма.

Сложность определения точного химического состава этих структур связана с их очень малой толщиной на поверхностях трения. Обычные методы химического анализа не дают результатов.

Подтверждение гипотезы об окислительной природе этих поверхностных пленок было получено путем электронографического исследования. На рис. 102 показаны электронные микрофотографии окисленных участков и соответственно электронограммы, полученные с этих участков.

При образовании вторичных структур с участием серы, фосфора и других активных элементов химические соединения будут соответственно содержать и эти элементы [62]. В принципе возможны два пути образования хрупких защитных пленок на поверхностях трения.

В первом случае хрупкие соединения металла с кислородом, серой, фосфором возникают без участия переходных структур твердых растворов. Это происходит при трении особо твердых сталей и сплавов при повышенных температурах и интенсивной пластической деформации,

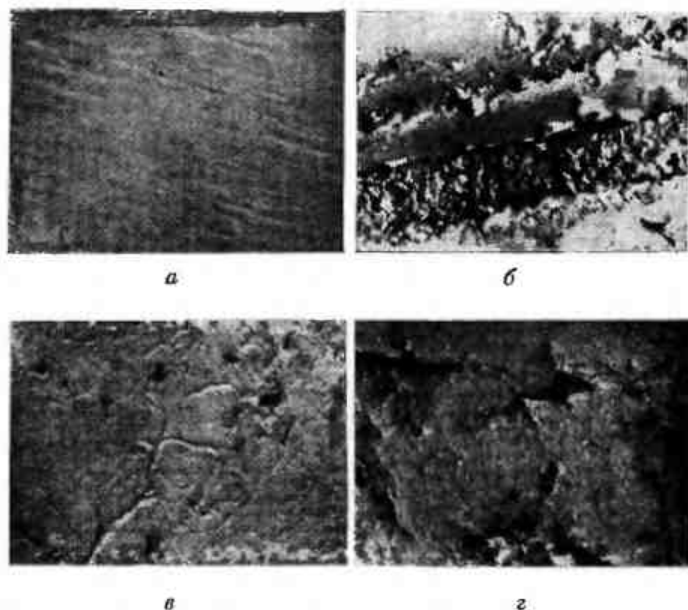


Рис. 101. Электронные фотографии поверхностей шатунной шейки вала двигателя,  $\times 46\ 000$ , и кольца подшипника качения,  $\times 30\ 000$ :

*а* — начало развития вторичной структуры; *б* — хрупкое отслаивание пленки; *в* — субмикротрещины; *г* — образование участков разрушения.

охватывающей очень малые объемы поверхностных слоев.

Во втором случае хрупкие вторичные структуры металла возникают из твердых растворов и тонких эвтектик путем постепенного насыщения металла активными элементами среды до предельных значений, соответствующих конкретным условиям нагружения.

Механизм разрушения поверхностей трения со вторичными структурами этого типа связан с их увеличенной хрупкостью и, как правило, с непрочным соединением

этих пленок с основным металлом. Линии раздела хрупких пленок на поверхности с основным металлом очень четкие и почти не имеют переходных структур. В большинстве случаев эти пленки имеют большие остаточные напряжения, возникновение которых связано с изменением удельного объема при их образовании. Все металлы

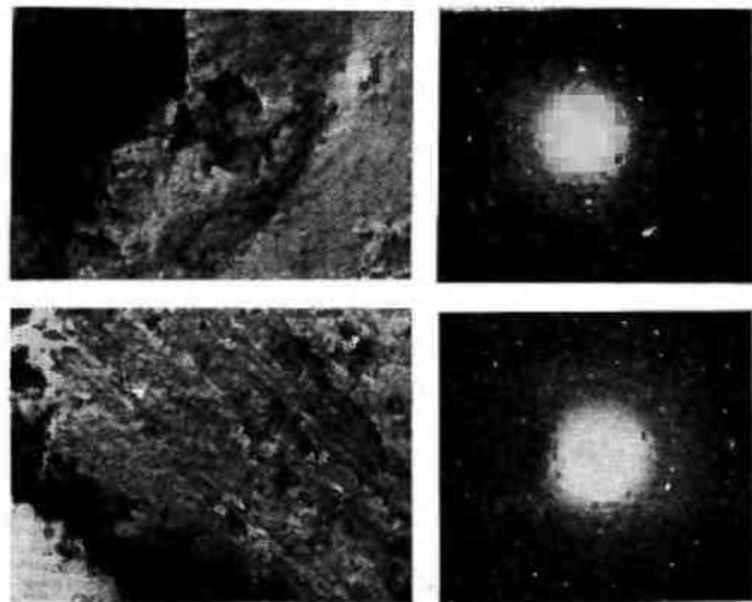
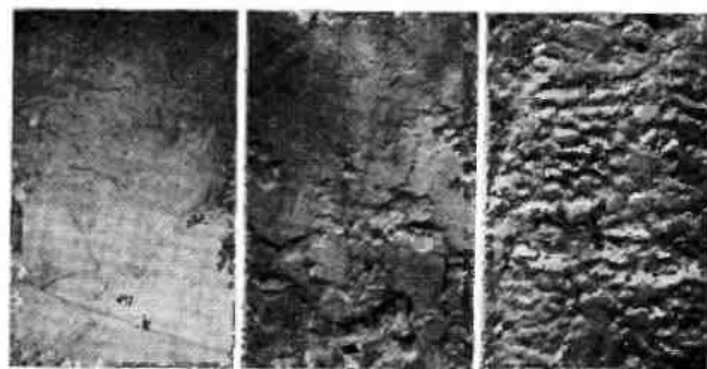


Рис. 102. Электронные микрофотографии различных участков поверхностей трения, работающих в условиях окислительного износа,  $\times 6000$ , и соответствующие им электронограммы.

и сплавы при образовании химических соединений с кислородом делятся на две группы. В одной группе переход в окислы связан с увеличением объема (до 5%), в другой — с уменьшением. При образовании окисленных пленок на поверхностях трения металлов первой группы возникают напряжения сжатия. При трении таких металлов износостойкость и прочность поверхностных пленок, как правило, более высокая. При трении металлов второй группы прочность и износостойкость пленок вторичных структур резко понижена [51].

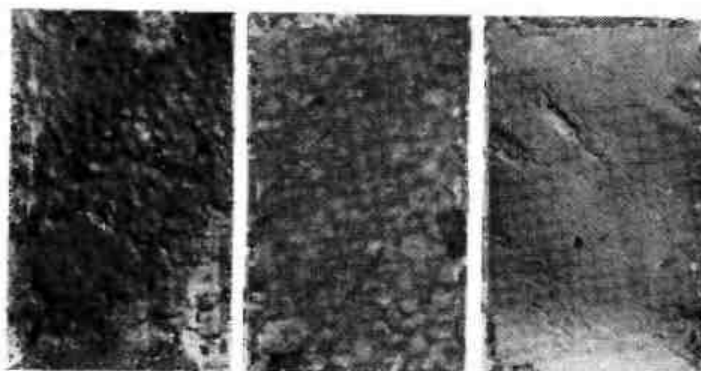
В табл. 16 приведены результаты испытания на износ металлов первой и второй групп. Хрупкие пленки вторичных структур, имеющие четкую линию раздела и непроч-



а

б

в



г

д

е

Рис. 103. Образование и разрушение вторичных хрупких пленок при окислительном трении,  $\times 30\,000$ :

а — возникновение субмикротрещин; б — отслаивание хрупких пленок; в, г, д, е — обнажение и приработка нижележащих поверхностей.

ное соединение с основным металлом, под повторным воздействием нормальных и тангенциальных напряжений вначале покрываются сеткой трещин, а затем хрупко отслаиваются с поверхностей трения (рис. 103, а, б, в). Поверхности, обнажающиеся после отслаивания хрупких

пленок, обладают специфическим бугристым рельефом, образование которого, по-видимому, связано с процессами деформации и диффузии. Эти поверхности расположены ниже несущей поверхности пленок и постепенно по-

Таблица 16

Износостойкость металлов в связи с процессом окисления поверхностных слоев

| Группа металла | Металл | Приведенный износ $U_{II}$ , $\frac{мм^3}{1000 м \cdot см^2}$ |          |        |
|----------------|--------|---|----------|--------|
|                |        | Среда, в которой проводился испытание                         |          |        |
|                |        | Воздух  | Кислород | Аргон  |
| I              | Ст. 45 | 11,29   | 1,20     | 40,80  |
|                | Cu     | 22,40   | 6,72     | 17,50  |
|                | Fe     | 214,00  | 52,07    | 298,80 |
| II             | Sb     | 114,90  | 1002,10  | 1,73   |
|                | Cd     | 11,26   | 542,40   | 1,34   |
|                | Bi     | 1954,21   | 2176,87  | 28,04  |

мере разрушения пленок входят в контакт с контртелом (рис. 103, г, д). Образовываются новые пленки вторичных

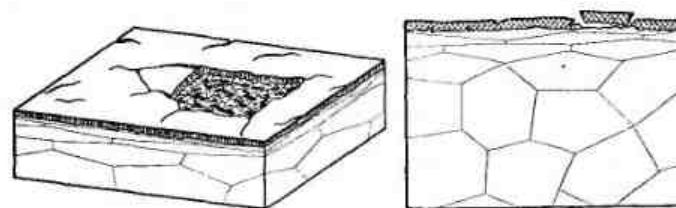


Рис. 104. Образование и разрушение вторичных хрупких структур при окислительном трении.

структур, и процесс периодически повторяется. Схема образования и разрушения вторичных структур такого типа представлена на рис. 104.



### Рельеф поверхностей деталей машин, возникающий при недопустимых процессах трения и износа

При нарушениях нормальных условий эксплуатации узлов трения и сопряжений в машинах процесс разрушения защитных пленок вторичных структур начинает преобладать над процессами их восстановления. Возникают недопустимые явления схватывания 1-го и 2-го рода. Такие явления могут возникать при перегрузках в зоне контакта



Рис. 105. Макрофотография поверхности детали при схватывании 1-го рода.

и разрывах смазочной пленки при нарушении теплового режима трения, при явлениях десорбции и потере свойств смазки, при недостаточной граничной смазке и контакте свежих (ювенильных) участков металлических поверхностей, при работе в нейтральных и восстановительных газовых и жидких средах [51]. При

недостаточной защите зоны контакта от абразива могут возникать абразивные процессы с интенсивным деформированием и разрушением поверхностных объемов. При перегрузках в условиях трения качения могут возникать недопустимые процессы усталости в поверхностных слоях металла и разрушения, связанные с образованием трещин, отслаиваний металла, впадин.

Изучение состояния поверхности при недопустимых видах износа представляет интерес в связи с диагностикой этих явлений и может служить дополнительным материалом для разработки средств по устранению этих видов разрушения поверхности. В нормальных условиях эксплуатации работа поверхностей трения с таким качеством недопустима. Качество поверхности при недопустимых видах трения обусловлено в основном специфической процессом разрушения.

**Развитие процесса схватывания 1-го рода.** Схватывание 1-го рода (холодный задира) возникает при трении скольжения с малыми скоростями относительного перемещения трущихся поверхностей и удельными давлени-

ями, превышающими предел текучести металла на участках фактического контакта, при отсутствии защитных пленок, адсорбированной смазки и окислов (рис. 105). Схватывание 1-го рода особенно четко проявляется при трении металлов, обладающих атермической пластичностью.

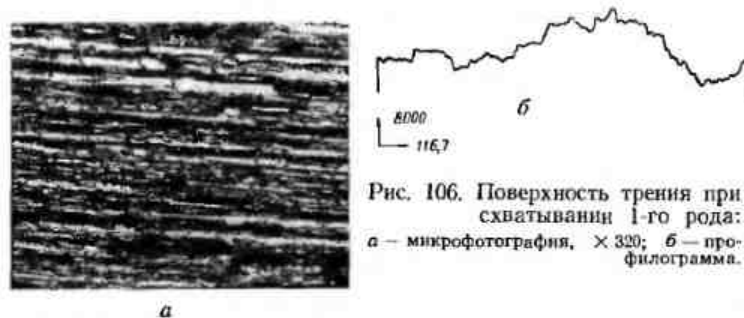


Рис. 106. Поверхность трения при схватывании 1-го рода: а — микрофотография,  $\times 320$ ; б — профилограмма.

Основным содержанием процесса схватывания 1-го рода является пластическая деформация, обнажение и

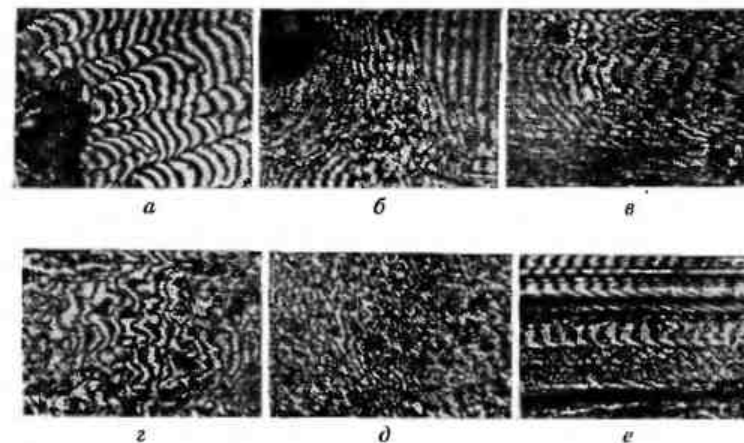


Рис. 107. Интерферограммы,  $\times 290$ , поверхностей трения металлов, испытанных в условиях вакуума: а, б — олово; в — хром; г — медь; д — сурьма; е — цинк.

контакт ювенильных поверхностей, возникновение металлических связей и их разрушение. Эти явления и определяют состояние поверхности во время работы сопряжения

и после снятия нагрузки трением. Микрофотография и профилограмма поверхности трения показаны на рис. 106.

Для иллюстрации рельефа поверхности, возникающего при диспертировании в условиях схватывания, различных по своему строению металлов, на рис. 107 показаны рельефы поверхности металлов, испытанных в условиях вакуума при  $P = 10 \text{ кг/см}^2$ ,  $v = 0,068 \text{ м/сек}$ . Рабочий рельеф поверхностей имеет резкие различия в зависимости от кристаллического строения металла.

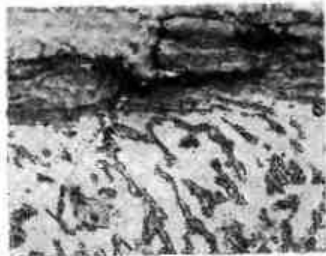


Рис. 108. Структура сечения поверхностных слоев при схватывании 1-го рода,  $\times 320$ .

Одним из важных следствий пластической деформации, вызывающей схватывание 1-го рода, является упрочнение. На рис. 108 показана в сечении структура поверхностных слоев деталей машин, работающих в условиях возникновения схватывания 1-го рода, отчетливо обнаруживается остаточная деформация металла поверхност-

ных слоев и изменение твердости, характеризующее явление упрочнения с постепенным переходом в структуру неизменного металла. Механизм разрушения поверхностных слоев при схватывании 1-го рода следующий. При относительном перемещении поверхностные слои пластически деформируются, обнажаются ювенильные поверхности и на локальных участках контактируемых поверхностей возникают металлические связи. Дальнейшее перемещение приводит к упрочнению металла в местах схватывания и вырыванию его в виде стружки с поверхности менее прочного металла или к повреждению упрочненным местом поверхности вследствие вдавливания ее в менее прочный металл. Вырывание металла в виде стружки или повреждение вдавливанием зависит от рельефа поверхностей впереди узла схватывания. Недопустимость работы деталей машин в условиях схватывания 1-го рода очевидна. Силы трения, формирующиеся в этих условиях, отличаются большой неравномерностью. Коэффициенты трения могут находиться в пределах от 0,5—0,6 до 4—10. Геометрическое состояние поверхно-

стей, испытывавших схватывание 1-го рода, весьма условно может быть отнесено к 1—3 классам чистоты (ГОСТ 2789—59). Упрочненные объемы металла поверхностных слоев расположены крайне неравномерно по поверхности трения. Твердость упрочненных объемов по отношению к исходной твердости увеличивается в 2—3 раза. Остаточные напряжения также неравномерно распределены по поверхности трения как по величине их, так и по знаку.

*Развитие процесса схватывания 2-го рода.* Схватывание 2-го рода (горячий задир) — это процесс интенсивного разрушения поверхностей деталей машин при трении скольжения, обусловленный нагревом зоны трения до температур размягчения металла и выражающийся в возникновении металлических связей и разрушении их путем интенсивного деформирования, переноса металла и отделения микрочастиц с поверхностей трения (рис. 109).

Схватывание 2-го рода возникает при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения трущихся поверхностей и большими удельными давлениями. При этих условиях возникает интенсивный рост температуры с высоким градиентом ее в поверхностных слоях трущихся металлов, вызывающих состояние термической пластичности металла. Схватывание 2-го рода может возникать при трении металлов с различными механическими свойствами. Однако оно наиболее характерно для деталей машин, изготовленных из закаленных сталей, в связи с резко выраженным переходом их к состоянию термической пластичности.

Схватывание 2-го рода возникает при сухом трении и граничной смазке. В последнем случае вследствие высоких температур, развивающихся на поверхностях трения, происходит десорбция смазки, ее сгорание и в конечном счете контактирование твердых поверхностей.



Рис. 109. Макрофотография поверхности тарелки клапана двигателя, работающей при схватывании 2-го рода.

Процесс схватывания 2-го рода происходит в результате пластической деформации размягченных объемов металла, возникновения металлических связей и их разрушения. Эти явления и определяют состояние поверхности во время работы узлов трения и после снятия нагрузки.

Геометрические характеристики состояния поверхности при схватывании 2-го рода иллюстрируются микро-

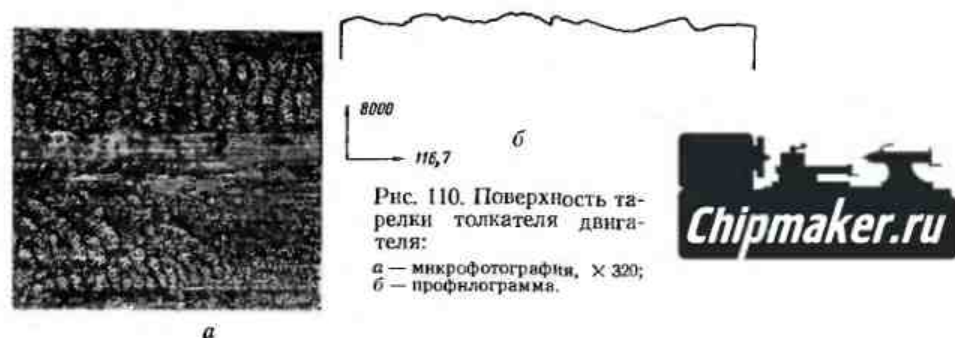


Рис. 110. Поверхность тарелки толкателя двигателя:  
а — микрофотография,  $\times 320$ ;  
б — профилограмма.

фотографией и профилограммой, приведенными на рис. 110. Состояние поверхностных слоев, их свойства и напряжения в них определяются характеристиками своеобразного термического процесса, возникающего в поверхностных слоях металла при трении и характеризующегося скоростью нагрева, достигнутой температурой, выдержкой при этой температуре и скоростью охлаждения.

В зависимости от начального состояния металла поверхностных слоев при схватывании 2-го рода могут происходить явления отпуска, неполной закалки, вторичной закалки и другие процессы, связанные с действием теплоты трения. На рис. 111 показаны в сечении структуры поверхностных слоев деталей машин, работающих в условиях возникновения схватывания 2-го рода. Механизм разрушения поверхностных слоев при схватывании 2-го рода следующий:

1. В интервале температур, мало снижающих прочность трущихся металлов, поверхности трения покрыты надрывами, чередующимися через определенные промежутки. Разрушение при этом происходит путем отрыва частиц менее прочного металла в местах возникновения металлических связей.

2. В интервале температур, вызывающих большое снижение прочности поверхностных слоев металла, поверхности трения характеризуются контактным схватыванием и пластическим разрушением узлов схватывания с налипанием и размазыванием металла на трущихся поверхностях. Разрушение поверхностей при этом происходит путем отделения частиц сильно размягченного металла и налипания их на более прочную поверхность.

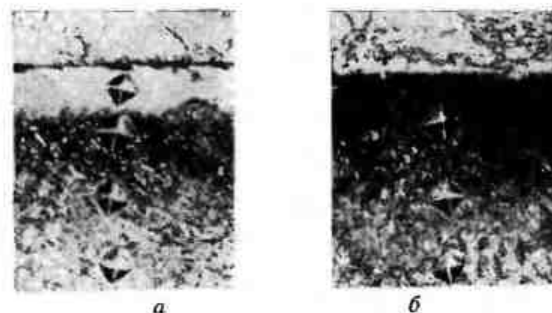


Рис. 111. Микрофотография сечения поверхностных слоев тарелки толкателя двигателя,  $\times 320$ :  
а — вторичная закалка с отпуском; б — отпуск.

3. В интервале температур плавления контакт поверхностей осуществляется через тонкие пленки расплавленного металла. Разрушение при этом происходит путем уноса тончайших пленок расплавленного металла. Характер изменения сил трения, формирующихся в условиях схватывания 2-го рода, соответствует условиям образования и разрушения фрикционных связей. Коэффициент трения при схватывании 2-го рода находится в пределах 0,3—1. Геометрическое состояние поверхностей, работавших при схватывании 2-го рода, весьма специфично и условно может быть отнесено к 3—6 классу чистоты. Поверхностные слои с измененной структурой металла имеют большие остаточные напряжения, происхождение которых связано с изменением удельных объемов при структурных превращениях.

*Абразивный износ* — это процесс интенсивного разрушения поверхностей деталей машин, обусловленный наличием абразивной среды в зоне трения и выража-

ющийся в местной пластической деформации, микроцарапани и микрорезании абразивными частицами поверхностей трения (рис. 112). Так как существование абразивного износа связано с наличием абразивной среды в зоне трения, то он может существовать в самом широком диапазоне скоростей скольжения и при различных удельных давлениях. Абразивный износ может возникать при трении металлов с различными механическими свойствами при условии, что соотношение между твердостью металла и абразива будет ниже определенной критической величины.



Рис. 112. Макрофотография поверхности детали при абразивном износе.

Сущность абразивного износа заключается в скольжении и внедрении твердых абразивных частиц на поверхностях контакта, деформирующих, разрушающих и срезающих микрообъемы металла в поверхностных слоях. Развитие абразивного износа связано с изменением:

1) глубины и интенсивности деформации микрообъемов металла поверхностных слоев;

2) глубины внедрения абразивных частиц в металл поверхностных слоев;

3) соотношения между деформируемыми и разрушаемыми объемами металла в поверхностных слоях.

Абразивный износ имеет свои особенности при наличии внешних абразивных частиц, частиц, которые образуются из продуктов износа и твердых частиц металла трущихся поверхностей.

Фотография, профилограмма и интерферограмма поверхности, работающей при абразивном износе, показаны на рис. 113. Изменение структуры и свойств поверхностных слоев при абразивном трении связано с пластической деформацией и упрочнением металла. Изменение структуры поверхностных слоев крайне неравномерно как по поверхности трения, так и в сечении поверхностных слоев.

Механизм разрушения поверхностных слоев при абразивном износе следующий. Твердые абразивные частицы при трении контактируют с поверхностью металла и скользят по ней. В тот момент, когда совместное действие нормальных и тангенциальных усилий превышает определенную критическую величину, характерную для данного металла, абразивное зерно внедряется и начинает разрушать поверхность, как правило, без снятия микростружки. Последующие абразивные частицы продолжают

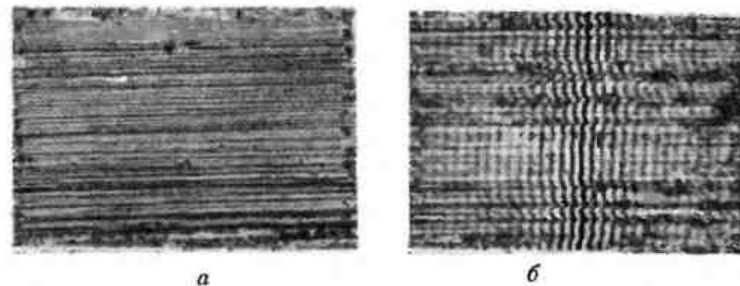
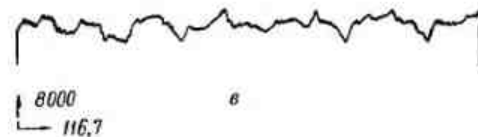


Рис. 113. Поверхность стали при абразивном износе:

а — микрофотография,  $\times 320$ ; б — интерферограмма; в — профилограмма.



разрушение вплоть до отделения микрочастиц металла. Если при абразивном износе преобладает проскальзывание и деформирование поверхностей контакта абразивными частицами, то большое значение приобретают сопутствующие явления взаимодействия активизированного деформированного металла и кислорода воздуха. На поверхностях трения образуются вторичные структуры. Дальнейшее взаимодействие таких вторичных структур с абразивными частицами приводит к их разрушению. Процесс образования и разрушения пленок вторичных структур периодически повторяется.

Такой характер абразивного износа, аналогичный характеру обычного окислительного износа, особо распространен при работе почвообрабатывающих органов сельскохозяйственных машин.

Формирование сил трения при абразивном износе обусловлено процессом взаимодействия абразивных частиц

и металла поверхностных слоев. Величина коэффициентов трения находится в интервале 0,2—0,6. Геометрическое состояние поверхностей, испытавших абразивное действие, в зависимости от условий трения и характеристик абразивов может находиться в интервале от 3 до 7—8 класса чистоты. В некоторых случаях чистота может достигать 9—10 класса.

*Развитие усталостных явлений.* Усталостный износ — это процесс периодического интенсивного разрушения поверхностей деталей машин при трении качения, обусловленный пластическими деформациями, внутренними напря-



Рис. 114. Макрофотография детали, работающей при усталостном износе.



Рис. 115. Микрофотография сечения поверхности детали при усталостном износе, X 320.

жениями и особыми явлениями усталости металла, выражающимися в образовании микротрещин, трещин, единичных и групповых впадин на поверхностях трения (рис. 114).

Усталостный износ возникает при трении качения. Окислительные процессы при трении качения всегда сопутствуют усталостным явлениям. В тех случаях, когда усталостное разрушение не получает развития, окислительный износ становится ведущим. Усталостное разрушение возникает при сухом трении качения и в присутствии смазки при удельных давлениях на контакте, превышающих предел текучести металла поверхностных слоев. Усталостное разрушение может возникать при трении качения металлов, обладающих различными свойствами, и имеет свои особенности при трении твердых,

мало пластичных и мягких металлов, обладающих большой пластичностью.

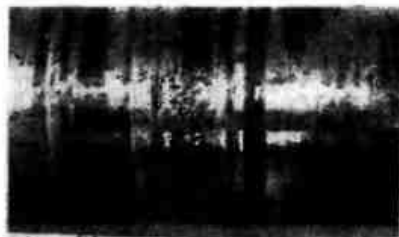
Механизм усталостного износа определяется сложным напряженным состоянием активных объемов металла поверхностных слоев и особыми явлениями усталости при повторно-переменных нагрузках, вызывающих деформацию металла в поверхностных слоях. Пластические



а



б



в

Рис. 116. Макрофотографии поверхностей деталей с явлениями: а — коррозии; б — эрозии; в — кавитации.

деформации локальных объемов металла поверхностных слоев вызывают его упрочнение. Упрочнение поверхностных слоев сопровождается увеличением удельного объема в них и возникновением остаточных напряжений сжатия 1-го рода. Разрушение при усталостном износе характеризуется появлением микро- и макроскопических трещин, расположенных под небольшими углами к поверхности трения с последующим выкрашиванием металла и развитием единичных и групповых впадин. Эти

явления и определяют состояние поверхности, формирующейся при усталостных разрушениях (рис. 115). Состояние поверхностных слоев, их свойства и напряжения зависят от пластической деформации, возникающей при трении качения.

*Другие недопустимые процессы.* При трении и изнашивании деталей машин в зависимости от условий их эксплуатации на поверхностях трения и в поверхностных слоях могут возникать явления, прямо не связанные с трением и износом. К таким явлениям относятся: различные виды коррозии и эрозии металлов, явления кавитации и др.

Поверхности с типичными признаками таких повреждений показаны на рис. 116. Разграничение процессов, протекающих при внешнем трении, и указанных явлений необходимо для правильного понимания и правильной организации борьбы с этими явлениями в машинах и механизмах.



Описанные в предыдущих главах представления об основных процессах, определяющих содержание внешнего трения и данные о качестве поверхностей, формирующиеся при обработке металлов и непосредственно при эксплуатации машин, являются основой для разработки теоретических положений о роли качества поверхностей деталей машин в процессах внешнего трения. Эти положения необходимы для решения основных задач проблемы антифрикционности и фрикционности в машинах и борьбы с износом машин.

## **10. Качество поверхности, формирование сил внешнего трения и задачи обеспечения антифрикционности и фрикционности в машинах**

Влияние качества поверхности на формирование сил внешнего трения деталей машин зависит от многих факторов, определяющих состояние рабочих поверхностей и их поверхностных слоев. Установить определенные закономерности формирования сил трения и зависимость их от тех или иных характеристик качества поверхности при одновременном действии всей суммы факторов, определяющих качество поверхностей деталей машин, практически невозможно. Для понимания закономерностей формирования сил внешнего трения в наиболее сложном случае при эксплуатации машин и механизмов необходимо отдельно рассмотреть влияние отдельных составляющих, участвующих в образовании и развитии поверхностей.

Закономерности формирования сил трения при раздельном влиянии факторов, определяющих качество

поверхностей, были изучены для поверхностей с различным физическим рельефом, обусловленным статической деформацией растяжения и сжатия, циклической деформацией, вызывающей явления усталости, для поверхностей с окисными пленками, с пленками адсорбированной смазки разного состава, для текстурированных поверхностей, для поверхностей с различной технологической обработкой, для поверхностей с разным характером диспергирования поверхностных слоев — износа.

Ранее было показано, что при взаимодействии трущихся поверхностей могут возникать четыре типа поверхностных связей [50]:

1) механические — обусловленные наличием и взаимодействием микронеровностей технологического происхождения;

2) механические деформационного происхождения — обусловленные дислокационными механизмами пластической деформации и возникающей в результате этого достройкой и взаимодействием субмикронеровностей контактирующих поверхностей;

3) физико-химические — вызванные развитием диффузионных процессов в зоне контакта и возникающими металлическими связями между сопряженными поверхностями;

4) физические (адгезионные) — обусловленные силами Ван дер Ваальса.

Сила трения — это сумма сопротивлений, вызванных действием этих связей:

$$F = F_{M_1} + F_{M_2} + F_D + F_A, \quad (16)$$

где  $F_{M_1}$ ,  $F_{M_2}$ ,  $F_D$ ,  $F_A$  — составляющие силы трения соответственно механического технологического, механического деформационного, диффузионного и адгезионного происхождения.

Качество поверхности контактируемых тел будет оказывать огромное влияние на характер взаимодействия поверхностей и тип поверхностных связей. Поэтому анализ влияния отдельных параметров качества поверхностей на формирование сил внешнего трения необходимо проводить в самой тесной связи с указанными причинами, вызывающими сопротивление движению при трении, т. е. в связи с механо-физическим, диффузионным и адгезионным взаимодействием поверхностей контакта.

## Микротрибометр для изучения сил трения

Для изучения раздельного влияния характеристик качества поверхности на силы трения был сконструирован и изготовлен микротрибометр (рис. 117). На рис. 118 представлена его кинематическая схема.

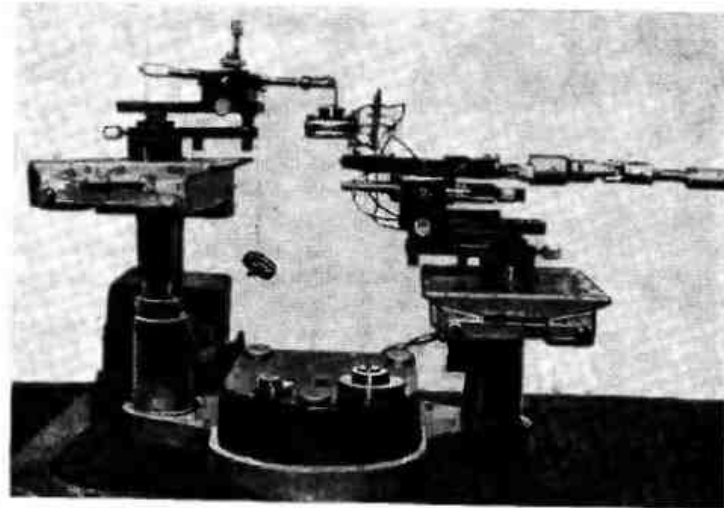


Рис. 117. Общий вид микротрибометра.

Узел трения микротрибометра смонтирован на основе выпускаемого отечественной промышленностью микроманипулятора ММ-1, предназначенного для проведения различных манипуляций над микроскопическими объектами.

Все подвижные сочленения этого прибора позволяют осуществить юстировку рабочей поверхности исследуемого образца в фокальной плоскости объектива микроскопа МБС-2, установить в необходимое положение выбранный участок поверхности образца, изменить положение рабочей поверхности в азимутальном направлении. Рабочая плоскость образца относительно контртела устанавливается путем вертикального перемещения одной части манипулятора относительно другой с помощью механизмов грубой и тонкой подачи. Дополнительно образец может перемещаться в фокальной плоскости микроскопа; также

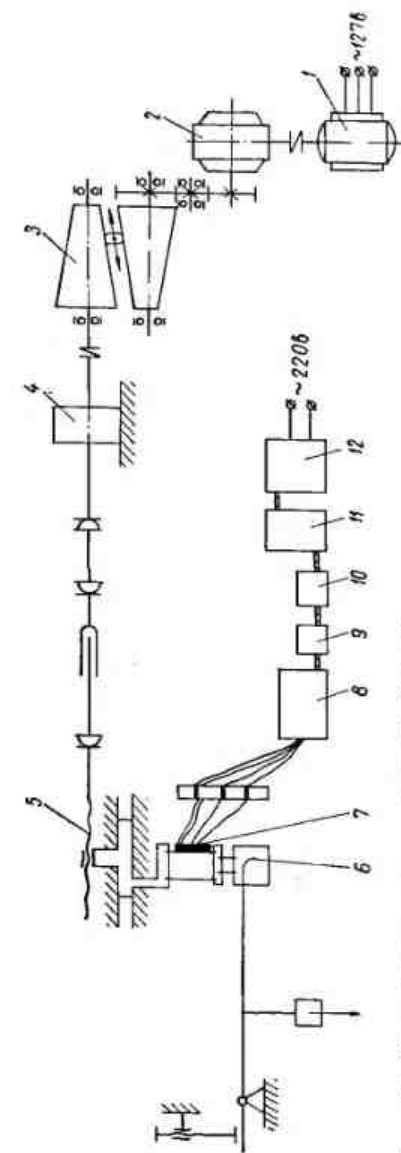


Рис. 118. Кинематическая схема микротрибометра.

1 — электродвигатель; 2—5 — система редукции; 6 — рычаг нагружения с индентором; 7 — консоль с тензометрическими датчиками; 8—12 — измерительная и регистрирующая аппаратура.

предусмотрен наклон образца.

Трение рабочей поверхности осуществляется путем перемещения единичного сферического индентора. Такой индентор может быть изготовлен из различных материалов. Материал индентора помещается в специальную цилиндрическую оправку из кварцевого или молибденового стекла диаметром 1—3 мм. Капилляр оправки заполняется расплавленным металлом и затем подвергается рекристаллизационному отжигу. Рабочая часть индентора освобождается от оправки и электрополируется в соответствующих растворах до необходимого радиуса закругления (5 мкм — 3 м).

Для удобства смены, установки и крепления индентора в оправке держатель манипулятора имеет цангу с точным направлением по конусу. Индентор зажимается в цанге при помощи призмы и пружины. Так же, как и образец, индентор с держателем можно точно устанавливать в избранном участке поля зрения микроскопа.

Сам манипулятор, в котором крепится индентор с оправкой, представ-

ляет собой рычаг, вращающийся на подвижном шарнире. Точка опоры при работе всегда устанавливается на уровне рабочей плоскости образца. С помощью зажимного винта индентор можно оставлять в фиксированном положении.

Во время работы индентор прижимают к образцу с усилием, пропорциональным подвешенному на манипулятор грузу. На другом штативе прибора крепят образец с устройством для измерения силы трения, которое представляет собой площадку — держатель образца, закрепленную на двух консольных балочках. Консоли изготовлены из высококачественной закаленной и низкоотпущенной стали толщиной 0,08 мм. При возникновении силы трения консоли прогибаются в горизонтальной плоскости. Прогиб этой системы регистрируется с помощью независимо укрепленной плоской пружины. На пружину наклеены тензометрические датчики, изменение сопротивления которых усиливается (усилитель 8АНЧ) и регистрируется прибором с одновременной записью сигнала на осциллографе типа Н-700.

Держатель образца имеет магнитное основание, на которое устанавливается железная пластинка с укрепленным на ней испытуемым образцом. Это дополнительно дает возможность поворачивать образец в азимутальной плоскости поля зрения микроскопа.

Преимущество предложенного узла трения заключается в том, что крепление держателя образца на двух опорных балках обеспечивает необходимую жесткость системы и вместе с тем чрезвычайно легкую подвижность в направлении силы трения без выхода рабочей поверхности из данной плоскости (фокальной плоскости микроскопа).

Взаимное перемещение контактируемых поверхностей осуществляется со скоростью от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-7}$  м/сек. В качестве привода используют электродвигатель со скоростью вращения 1425 об/мин с системой редукции. Для устранения возможной вибрации привод установлен на отдельной подставке.

### Статическая деформация и силы трения

Пластическая деформация является основным процессом внешнего трения. Она протекает по определенным вну-



триобъемным механизмом, вызывающим на поверхности деформируемого металла изменения рельефа. Эти изменения связаны с внутренним строением деформируемого материала и степенью деформации.

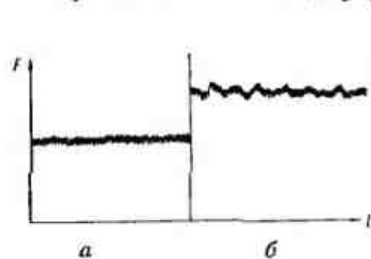


Рис. 119. Осциллограммы записи силы трения, полученные при движении индентора по поверхности алюминия: *a* — полированная поверхность; *b* — предварительно деформированная поверхность алюминия на 15%.

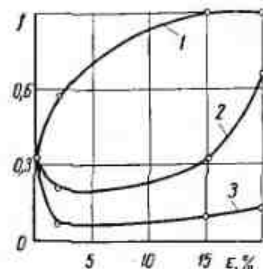


Рис. 120. Кривые изменения коэффициента трения в зависимости от степени деформации образца алюминия (индентор индий): 1 — движение индентора перпендикулярно линиям скольжения; 2 — движение параллельно линиям скольжения; 3 — движение в обратном направлении перпендикулярно линиям скольжения.

Рельеф, возникающий на линиях скольжения, характеризуется следующими параметрами: высота ступенек — 200—300 нм; расстояние между ними в зависимости от степени деформации — 8—25 мкм.

Величина сил и коэффициентов трения очень существенно зависит не только от различной степени развития рельефа на линиях скольжения (рис. 119, 120), но и от направления движения индентора при трении (рис. 121).

Характерный случай формирования сил трения на поверхности с рельефом, вызванным разориентировкой зерен и фрагментов, показан на рис. 122.

Следует также отметить, что в зависимости от особенностей физического рельефа характер формирования сил трения также меняется. На рис. 121, 123 показаны фотографии физического рельефа и соответственно приведены осциллограммы сил трения. В одних слу-

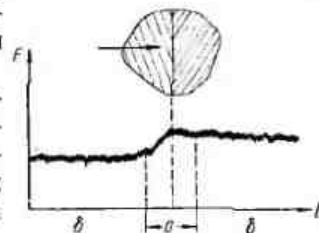


Рис. 122. Особенности формирования сил трения на деформированных поверхностях: *a* — граница зерна; *δ* — фрагменты зерен.

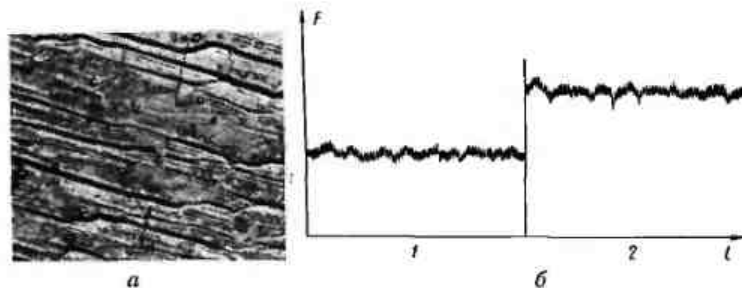


Рис. 121. Изменение величины силы трения в зависимости от направления движения индентора по деформированной поверхности алюминия: *a* — микрофотография поверхности с указанием направления движения индентора; *b* — осциллограммы процесса трения в направлении А(1) и в направлении В(2).

На поверхностях деформированных металлов на линиях скольжения и при разориентировке границ блоков, фрагментов, зерен возникает физический рельеф.

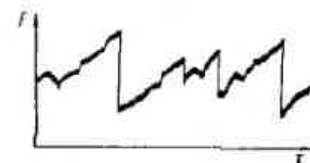
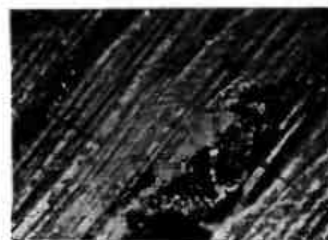


Рис. 123. Поверхность алюминия (*a*) и осциллограмма записи силы трения (*b*) при движении индентора (стрелками указаны места переноса материала индентора на поверхность алюминия).

чаях осциллограмма подчеркивает плавный характер изменения сил трения (рис. 121), в других случаях фиксируются резкие и частые скачки (рис. 123).

Необходимо отметить, что закономерности формирования сил трения на физическом рельефе, образованном растяжением и сжатием, существенно не отличаются.

### Динамическая деформация и силы трения

В главе 3 было показано изменение физического рельефа, образующегося при циклическом нагружении. Характеристики рельефа в этом случае имеют существенные отличия. На поверхностях с таким рельефом были исследованы силы трения. Формирование сил трения на рельефах, вызванных циклическим нагружением, зависит от интенсивности деформации и существенно изменяется при испытаниях на циклическое нагружение в разных рабочих средах (рис. 124).

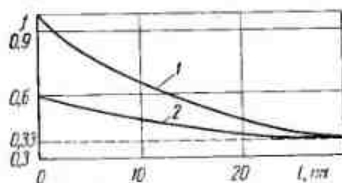


Рис. 124. Кривые изменения коэффициента трения на рельефе, возникающем при циклическом нагружении алюминия: 1 — на воздухе; 2 — в окислительно-активной среде ( $l$  — расстояние от места разрушения к головке образца).

стике рельефа в этом случае имеют существенные отличия. На поверхностях с таким рельефом были исследованы силы трения. Формирование сил трения на рельефах, вызванных циклическим нагружением, зависит от интенсивности деформации и существенно изменяется при испытаниях на циклическое нагружение в разных рабочих средах (рис. 124).

### Пленки окислов и силы трения

Наличие пленок окислов на поверхности металла при деформации существенно меняет не только геометрию поверхности, но и ее физические свойства. Соответственно этому существенно изменяются условия взаимодействия поверхности и формирования сил внешнего трения. На рис. 125 приведены данные о величине сил трения, формирующихся на участках без окисных пленок, на границах перехода и на участках с окисными пленками. Величина сил трения, как правило, на участках с окисными пленками значительно ниже (в 3—4 раза), чем на участках без окислов. Различие в силах трения больше на деформированных поверхностях, чем на поверхностях металла, не подвергавшихся деформации. Приведенные данные относятся к трению индентора по поверхности алюминия. Внешнее трение в этих условиях идет без повреждения поверхности алюминия. В других условиях испытания — при трении латунного индентора по поверхности алюминия с наличием и отсутствием пленок окислов — заметного различия в величине силы тре-

ния не обнаруживается. Латунный индентор повреждает поверхность алюминия. В первом случае трения — пара индий — алюминий — основной составляющей сопротивления движению при трении были связи, обусловленные адгезией и диффузией. Механическая составляющая не имела существенного значения. Пленки окислов существенно снижали суммарную величину сил внешнего трения.

Во втором случае трения — пара латунь — алюминий — механическая составляющая была главной при формировании сил внешнего трения. Поэтому наличие или отсутствие окисных пленок для этих условий трения не имело существенного значения.

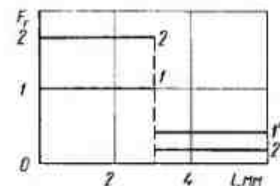


Рис. 125. Графики изменения силы трения в зависимости от наличия окисных пленок на поверхности алюминия: 1 — полированной без пленки; 1' — то же, с окисной пленкой; 2 — на деформированной без пленки; 2' — то же, с окисной пленкой.

### Адсорбция смазки и силы трения

Принципиальное значение имеет исследование формирования сил трения в присутствии различных рабочих сред в зоне контакта. При этом важно различать условия трения с повреждением поверхностей и без повреждения. При трении в воздухе (кривая 3, рис. 126) силы трения для пары индий — алюминий имеют большие значения, чем для пары латунь — алюминий (кривая 5). Это объясняется преобладающим влиянием диффузионных и адгезионных составляющих при указанных условиях трения для пары индий — алюминий. Механическая составляющая сил трения даже при наличии существенных повреждений при трении пары латунь — алюминий оказала меньшее влияние на формирование силы трения. При трении в инертной среде (вазелиновое масло) индентор, не повреждающий поверхность, дает резкое уменьшение силы трения (кривая 4, рис. 126) по сравнению с трением в воздухе. Это объясняется снижением роли диффузионной и адгезионной составляющих при почти полном отсутствии механической составляющей. При испытании пары трения латунь — алюминий в этой же рабочей среде (кривая 1) сила трения намного увеличивается. Анализ поврежденной алюминиевой поверхности латунным индентором пока-

зывает, что в этом случае заметно возрастает механическая составляющая силы трения (рис. 127). При трении в поверхностно-активной среде (вазелиновое масло + 0,2% олеиновой кислоты) пары индий — алюминий сила трения имеет минимальные значения. Более высокие адсорбционные характеристики этой среды еще в большей степени подавляют диффузионную и адгезионную составляющую (кривая 6, рис. 126). При трении пары латунь — алюминий в условиях повреждения поверхности алюминия (кривая 2, рис. 126) механическая составляющая является основной в формировании силы трения. Меньшие объемы металла, вовлеченные в деформацию, и разрушение за счет пластифицирующе-

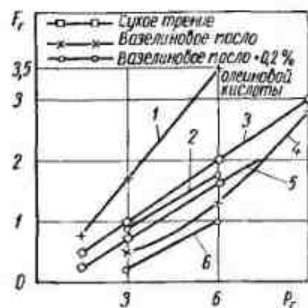


Рис. 126. Графики изменения силы трения в зависимости от величины нагрузки и рабочей среды:

1, 2, 3 — индиевый индентор; 4, 5, 6 — латунный индентор.

В силу особенностей сложного напряженного состояния поверхностных слоев при одновременном действии нормальных и тангенциальных напряжений, деформация поверхностных слоев происходит, главным образом, в направлении действия тангенциальных усилий. При этом в местах непосредственного контакта имеет место своеобразное текстурирование поверхностных слоев металла с выходом линий скольжения на поверхность металла поворотом зерен и фрагментов в направлении движения. Линии скольжения при этом характеризуются очень малой высотой, а их расположение также связано с направлением движения при трении.

Явление текстурирования неизбежно возникает при трении металлических поверхностей. При изучении причин и механизмов формирования сил внешнего трения было выполнено исследование величины трения на образцах, текстурированных в разных условиях.

Испытание производили на оттоженной и электрополированной α-латуни. Текстурирование выполнялось при трении скольжения на машине КЕ-1 с помощью стального полированного ползуна при однократном проходе. Величина давления при трении изменялась от 20 до 71 кг. Текстурирование проводилось в условиях сухого трения, а также при неактивной и активной смазках. После текстурирования поверхности латуни испытывали на трение с помощью чувствительного микротрибометра\*.

Интерферограмма и профилограмма поверхности латуни, подвергнутой текстурированию при трении, показаны на рис. 128. Как видно из рисунка, профилографирование и интерференция не обнаруживают какого-либо специфического рельефа.

При больших увеличениях с помощью электронного микроскопа удается обнаружить строение поверхностей с текстурированным металлом (рис. 129). Результаты измерения сил трения на полированной и текстурированной поверхностях приведены в табл. 17.

\* Экспериментальная часть исследования выполнена с участием инж. Р. М. Мазура.

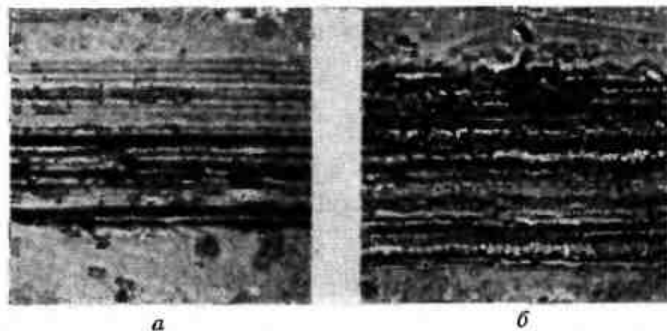


Рис. 127. Поверхность трения алюминиевого образца при движении латунного индентора, × 290:

а — сухое трение; б — трение в среде вазелинового масла.

го и диспергирующего действия поверхностно-активных веществ приводят к снижению силы трения по сравнению с трением в неактивной среде (вазелиновое масло).

Эффект текстурирования состоит в том, что силы трения, измеренные против хода ползуна, превышают силы, измеренные по ходу, примерно в 2 раза, а по полированной нетекстурированной поверхности — примерно в 1,5 раза. Это наблюдалось при испытаниях с индиевым индентором.

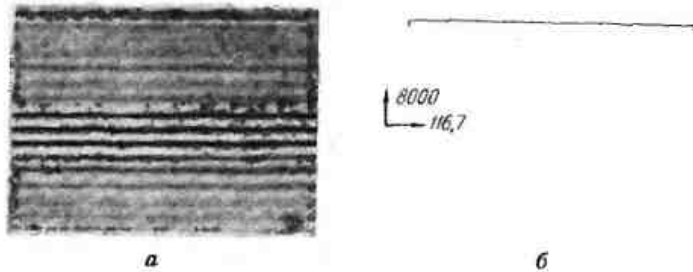


Рис. 128. Текстурированная поверхность латуни: а — интерферограмма,  $\times 290$ ; б — профилограмма.

При трении твердосплавной иглой, повреждающей текстурированную поверхность латуни, разницы в силах трения не обнаруживается.

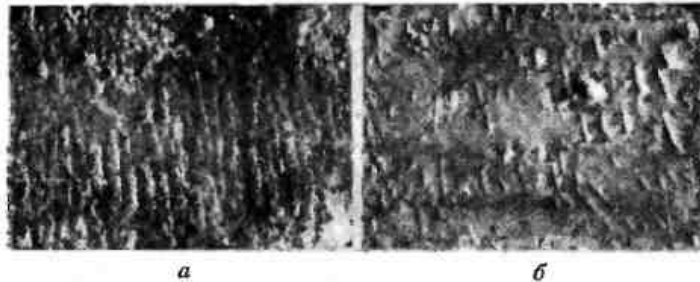


Рис. 129. Электронные микрофотографии текстурированных поверхностей  $\alpha$ -латуни,  $\times 25\ 000$ : а — равномерно распределенные субмикрощероховатости; б — отдельные субмикрощероховатости на поверхности трения.

При трении твердосплавной сферы по текстурированной латуни с малыми нагрузками, т. е. без повреждения, эффект текстурирования проявляется в полной мере. Необходимо отметить, что эффект текстурирования проявляется исключительно при испытаниях в условиях

Таблица 17  
Коэффициенты трения на предварительно текстурированных поверхностях  $\alpha$ -латуни в зависимости от условий текстурирования и повреждаемости поверхностей при трении

| Испытание на трении  | Условия текстурирования |       |                                       |       |  |       |              | Примечание |       |   |
|--|-------------------------|-------|---------------------------------------|-------|--|-------|--------------|------------|-------|---|
|  | Сухое трение            |       | Инактивная смазка (вазелиновое масло) |       | Активная смазка (вазелиновое масло + 0,2% олеиновой кислоты) |       | Нагрузка, кг |            |       |   |
|  | 20                      | 34    | 71                                    | 20    | 34   | 71    |              |            | 20    | 34  |
| По текстуре $\mu_1$ . . . . .  | 0,139                   | 0,131 | 0,150                                 | 0,176 | 0,154  | 0,147 | 0,293        | 0,161      | 0,151 | Индентор не повреждает текстурированную поверхность |
| Против текстуры $\mu_2$ . . . . .  | 0,256                   | 0,263 | 0,300                                 | 0,285 | 0,268  | 0,299 | 0,330        | 0,346      | 0,270 |   |
| $\mu_2/\mu_1$ . . . . .  | 1,82                    | 2,01  | 2,00                                  | 1,61  | 1,74   | 2,03  | 1,12         | 2,15       | 1,78  |   |
| Индентор — индиевая игла; $P=5,9$ Г; $S=0,48$ мм <sup>2</sup> ; $N=1,3$ кг/см <sup>2</sup> |                         |       |                                       |       |  |       |              |            |       |   |
| По текстуре . . . . .  | 0,250                   |       |                                       | 0,290 |  |       | 0,270        |            |       | Индентор повреждает текстурированную поверхность    |
| Против текстуры . . . . .  | 0,270                   |       |                                       | 0,260 |  |       | 0,260        |            |       |   |
| $\mu_2/\mu_1$ . . . . .  | 1,07                    |       |                                       | 0,92  |  |       | 0,97         |            |       |   |
| Индентор — твердосплавная игла; $r=50$ мкм; $P=7,6$ Г                                      |                         |       |                                       |       |  |       |              |            |       |   |
| По текстуре . . . . .  | 0,027                   |       |                                       |       |  |       | 0,022        |            |       | Индентор не повреждает текстурированную поверхность |
| Против текстуры . . . . .  | 0,046                   |       |                                       |       |  |       | 0,053        |            |       |   |
| $\mu_2/\mu_1$ . . . . .  | 2,2                     |       |                                       |       |  |       | 2,4          |            |       |   |
| Индентор — твердосплавная сфера; $r=3$ мм; $P=7,7$ Г                                       |                         |       |                                       |       |  |       |              |            |       |   |

сухого трения. Уже при граничной смазке он полностью исчезает, что объясняется соизмеримостью размеров слоя смазки с высотой дислокационных образований при текстурировании и сглаживании возникающего субмикрорельефа.

Приведенные данные свидетельствуют о большом значении текстурирования в формировании сил внешнего трения.

Очевидно, что максимальное влияние текстурирования на силы внешнего трения будет в том случае, когда текстуры образуются на более твердых поверхностях. В этом случае возникают дополнительные механические связи за счет достройки субрельефа более мягкого контртела.

Приведенные результаты еще раз подтверждают значение тонкого субмикрорельефа в формировании сил внешнего трения.

### Виды разрушения поверхностей (износ) и силы трения

При эксплуатации машин их подвижные сочленения изнашиваются. Качество поверхности трения при этом в большой мере зависит от особенностей процесса разрушения (износа) поверхностных слоев. Существуют допустимые процессы разрушения (износа), возможны переходы к патологическим явлениям разрушения. Допустимый процесс износа — окислительный, при котором происходит постоянное образование и разрушение тончайших пленок вторичных структур, имеет две формы.

В первой форме износ происходит путем образования пластичных пленок вторичных структур, перемещения их на поверхностях трения и непрерывного уноса из зоны контакта. Вторая форма характеризуется образованием хрупких пленок вторичных структур и периодическим их выкрашиванием с отделением от поверхностей трения.

Патологические процессы разрушения поверхностных слоев возникают при явлениях схватывания, обусловленного атермической и термической пластичностью, при наличии абразивной среды в зоне трения, при явлениях усталости поверхностных слоев трущихся деталей.

Разные виды разрушения при трении создают различную топографию поверхностей трения со специфическими геометрическими параметрами и различными характери-

стиками механических и физико-химических свойств. Естественно поэтому, что взаимодействие поверхностей, величина и характер сил трения при разных видах износа будут иметь существенные различия. На рис. 91—116 показаны фотографии, профилограммы, схемы и интерферограммы поверхностей стали при различных видах износа.

Величина сил и коэффициентов трения при разных условиях контакта на этих поверхностях с типичными видами износа приведена в табл. 18.

Таблица 18

Коэффициенты трения на рабочих рельефах стали, возникающих при разных видах износа

| Вид износа                             | Качество поверхности | Материал и форма индентора                                |   |  |
|--|----------------------|---|---|--|
|  |                      | Индиевая игла<br>$P=8 \text{ г};$<br>$S=0,4 \text{ мм}^2$ | Твердосплавная игла<br>$F=50 \text{ мкм};$<br>$P=8 \text{ г}$ | Твердосплавная сферическая<br>$F=3 \text{ мм};$<br>$P=8 \text{ г}$ |
|  |                      | Коэффициент трения  |   |  |
|  |                      | $\mu_1$   | $\mu_2$   | $\mu_3$  |
| Схватывание 1-го рода                  | $\nabla 3$           | 1,12  | 2,31  | 0,034  |
| Окислительный износ I форма . . . . .  | $\nabla 11$          | 0,11  | 0,28  | 0,010  |
| Окислительный износ II форма . . . . . | $\nabla 9$           | 0,14  | 0,39  | 0,012  |
| Схватывание 2-го рода                  | $\nabla 6$           | 0,27  | 0,46  | 0,016  |
| Абразивный износ . . . . .             | $\nabla 8$           | 0,22  | 0,37  | 0,014  |

Испытания на трение производили с помощью высокочувствительного трибометра индиевым и твердосплавными инденторами. В первом случае испытываемые поверхности стали не повреждались, во втором случае — повреждались. При трении по поверхности стали с характерным рельефом схватывания коэффициент трения наибольший.

Взаимодействие поверхностей при трении индия по стали заключалось в образовании механических связей, обусловленных грубым рельефом и субмикрорельефом, более резко выраженным в связи с большей степенью деформации поверхностных объемов металла, возникающей в процессе образования и разрушения мест схватывания. Естественно также наличие адгезионных связей. Силы

трения в этом случае формировались за счет деформации и разрушения индиевого индентора. Взаимодействие поверхностей при трении твердосплавного индентора было связано с повреждением стальной поверхности. Главной причиной формирования сил трения в этом случае была деформация и разрушение поверхности стали.

При трении по поверхности, покрытой окислами, образовавшимися при нормальных условиях эксплуатации, индиевый индентор показал минимальные значения коэффициентов трения. На поверхности с первой формой вторичных структур окислов значения коэффициента трения ниже, чем на поверхностях со второй формой окисления. Это объясняется более выраженным субмикрорельефом при второй форме окисления.

Взаимодействие поверхностей в этом случае заключалось, кроме неизбежной адгезии, в образовании тонких механических связей, обусловленных субмикрорельефом поверхностей трения. При трении твердосплавным индентором стальные поверхности, покрытые тонкой пленкой окислов, повреждались. Взаимодействие поверхностей выражалось в образовании механических связей. Силы трения формировались за счет деформации и разрушения поверхностей стали.

При трении индиевого индентора по поверхности стали, образованной в процессе схватывания 2-го рода (теплого износа), коэффициенты трения небольшие. Поверхностные слои стали, работавшей в условиях теплового трения, сильно деформированы и значительно окислены. Крупные выступы и впадины, образующиеся на поверхности стали, хорошо сглажены и не могут служить причиной сопротивления движению, субмикрорельеф слабо выражен, его влияние на формирование сил трения также незначительно. Главной причиной возникновения сил трения для исследуемой пары являются только силы адгезии.

При трении твердосплавным индентором поверхность стали повреждается, однако и в этом случае коэффициенты трения небольшие. Это объясняется спецификой микро- и субмикрорельефа, образованного при тепловом трении, и упрочнением поверхностных объемов стали. Говоря о силах трения на поверхностях, образованных при тепловом износе, необходимо иметь в виду, что характеристики состояния поверхности при развитии схва-

тывания 2-го рода во время самого процесса и его остаточное состояние резко отличаются. Это связано прежде всего с влиянием температуры процесса и теми эффектами изменения свойств поверхностных слоев и специфики взаимодействия поверхностей, которые возникают во время работы сопряжений.

При трении индиевого и твердосплавного инденторов на поверхности стали, работавшей при абразивном разрушении, силы и коэффициенты трения по своим значениям близки к силам трения, характерным для соответствующих поверхностей, обработанных шлифованием.

Данные табл. 18 иллюстрируют прямую связь между характеристиками качества поверхности, образующимися при разных видах износа в своем остаточном состоянии, и силами внешнего трения. Эти данные следует дополнить результатами исследования сил трения, формирующихся непосредственно при рабочем состоянии поверхностей трения в связи с разными видами изнашивания. На рис. 130 показана осциллограмма силы трения, иллюстрирующая специфику формирования сил трения при схватывании и окислении. Переход от схватывания к окислению произошел самопроизвольно за счет приработки и упрочнения поверхностей контакта.

На рис. 131 показана осциллограмма трех видов взаимодействия поверхностей и изнашивания: участок *АВ* — окисление; *ВВ* — трение с абразивом; *ВГ* — схватывание и *ГД* — окисление. Абразивный порошок, поданный в зону контакта (точка *В*), вызвал интенсивное разрушение окисных пленок (*ВВ*) и развитие схватывания 1-го рода (*ВГ*). В дальнейшем при прекращении подачи абразива окисные пленки восстанавливались и процесс переходил к окислению. Приведенные осциллограммы характеризуют изменение сил трения в зависимости от процесса разрушения поверхностей и их качества.

Известно, что при трении несмазанных поверхностей и в условиях граничной смазки, силы трения изменяются скачкообразно. При этом значение силы трения определяется как средняя величина между минимальными и максимальными ее значениями.

На основании данных, полученных при осциллографировании силы трения в разных условиях, при различных процессах, протекающих на рабочих поверхностях, был разработан метод исследования характеристик трения

путем гармонического анализа спектра колебаний силы трения [55]. Колебания силы трения носят сложный характер, характеристики спектра колебаний зависят не только от конструктивных параметров системы (ее жесткости), но и от процессов, возникающих на рабочих поверхностях при трении [33].

Одной из главных задач проблемы трения, смазки и изнашивания является разработка критериев для определения ведущего процесса в зоне трения. Результаты

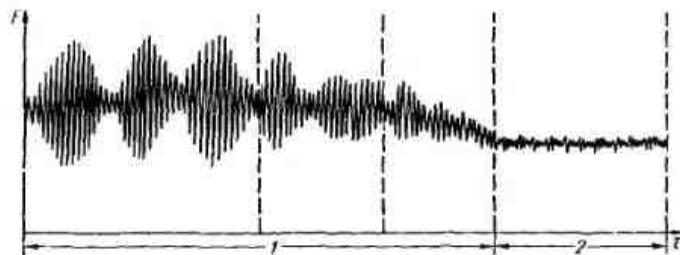


Рис. 130. Оциллограмма силы трения при переходе от схватывания (1) к окислению (2) в координатах сила  $F$  — время  $t$ .

проведенных опытов свидетельствуют о том, что одним из таких критериев может служить анализ спектра колебаний силы трения. Например, на рис. 132 приведены ре-

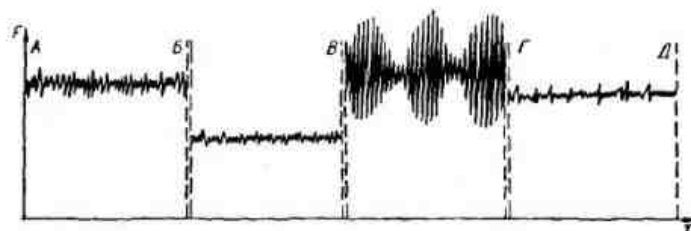


Рис. 131. Оциллограмма силы трения в зависимости от вида взаимодействия поверхностей и износа в координатах сила  $F$  — время  $t$ .

зультаты гармонического анализа спектра колебаний силы трения для пары: сталь У8 (закаленная) — сталь 45. Металлографический анализ образцов показал, что при незначительных явлениях схватывания 1-го рода и удельных нагрузках 1; 2,5 и 4,5  $\text{кг/см}^2$  преобладающим видом износа является окислительный. При нагрузке

4,5  $\text{кг/см}^2$  интенсивность окислительного изнашивания была максимальной. Переход к нагрузке 20  $\text{кг/см}^2$  при всех прочих равных условиях привел к возникновению процесса схватывания.

Рассматривая результаты гармонического анализа спектра колебаний силы трения, можно заметить, что в случае протекания на рабочих поверхностях окислительных процессов преобладающие по величине гармоники находились в области средних частот (2—5  $\text{кгц}$ ).

При возникновении процессов схватывания 1-го рода величина этих гармоник уменьшалась, но возрастали низкочастотные гармоники (300—1000  $\text{гц}$ ).

Описанный способ исследований процессов трения успешно применяется для исследования надежности работы узлов трения, влияния поверхностно-активных веществ на процессы трения и т. д. [33, 35].

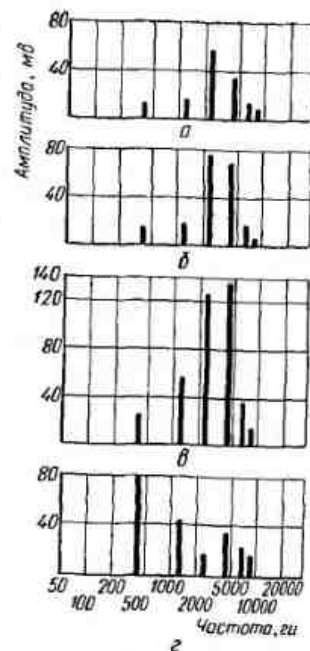


Рис. 132. Графики гармонического анализа спектра колебаний силы трения для сопряжения сталь У8 (закаленная) — сталь 45 при сухом трении, скорости 3,28  $\text{м/сек}$ , давлении: а — 1  $\text{кг/см}^2$ ; б — 2,5  $\text{кг/см}^2$ ; в — 4,5  $\text{кг/см}^2$ ; г — 20  $\text{кг/см}^2$ .

### Технологический рельеф и силы трения\*

Самостоятельное и принципиальное значение представляет исследование сил и коэффициентов трения поверхностей с различной технологической обработкой и соответствующими ей разными классами чистоты поверхности.

\* Экспериментальная часть выполнена с участием инж. Р. М. Мазура.

Поверхность стали У8А после отжига обрабатывали различными методами (табл. 19). Профиллограммы и интерферограммы обработанных поверхностей приведены на рис. 133. Сечения поверхностей иллюстрируют их геометрическое состояние без каких-либо искажений. Они

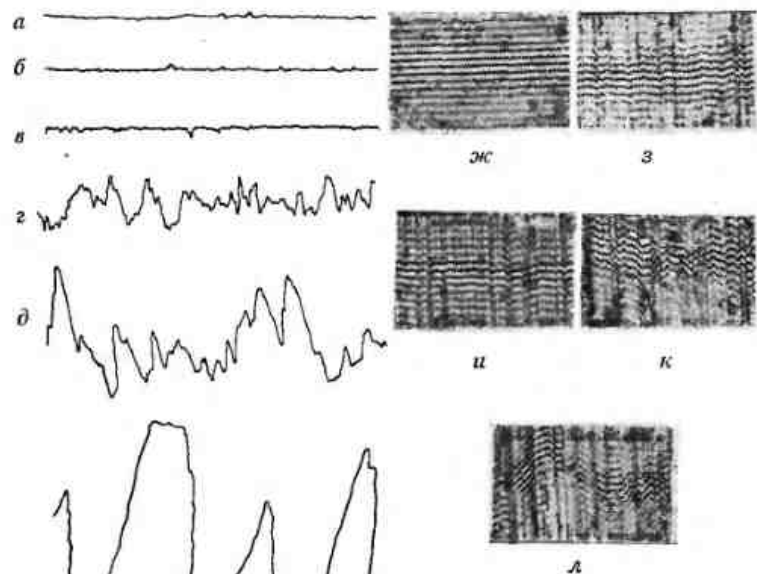


Рис. 133. Профиллограммы и интерферограммы,  $\times 290$ , поверхности отожженной стали У8А после различных видов технологической обработки:

а, ж — полированная поверхность; б, з — ручная доводка; в, и — тонко шлифованная; г, к — грубо шлифованная; д, л — токарная чистая; е — токарная грубая.

получены с помощью специального метода блокирования напылением с последующим гальваническим покрытием и показаны на рис. 134.

Электронные фотографии исследуемых поверхностей представлены на рис. 135.

Трение изучали с помощью чувствительного микротрибометра при единичном и плоскостном контакте, а также с повреждением и без повреждения поверхности стали.

Индентором (контртелом) служили индий и твердый сплав Т15К6. Результаты испытания на трение приведены в табл. 20.

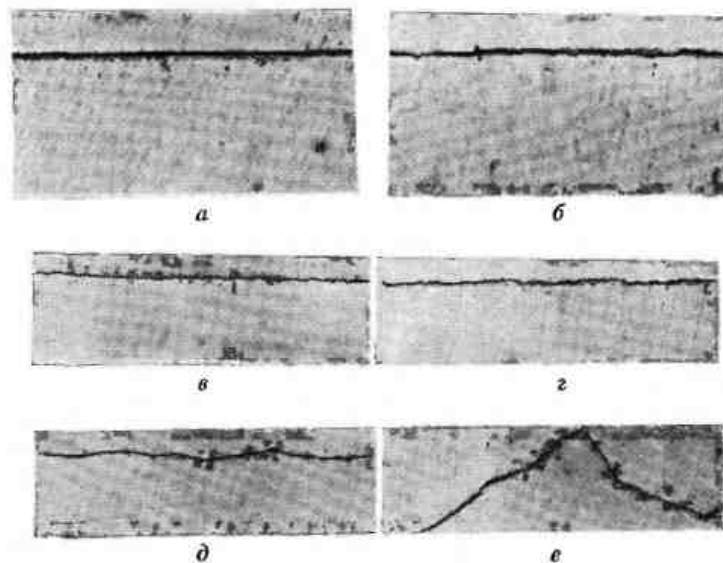


Рис. 134. Сечение поверхностей отожженной стали У8А после различных видов технологической обработки:

а — полированная; б — ручная доводка; в — тонко шлифованная; г — грубо шлифованная; д — токарная чистая; е — токарная грубая.

Таблица 19

Чистота поверхности при технологической обработке стали У8А

| Метод технологической обработки | Режим обработки  | Чистота поверхности ГОСТ 2789-59 |
|---------------------------------|--|----------------------------------|
| Полировка на шайбе              | Скорость круга — 20 м/сек  | ▽ 13                             |
| Доводка ручная                  | Микронная бумага, окислы хрома и алюминия  | ▽ 11                             |
| Тонкое шлифование               | $t = 0,005 \text{ мм}; I_{\text{прод}} = 0,2 \text{ мм/ход}$                     | ▽ 9                              |
| Грубое шлифование               | $t = 0,15 \text{ мм}; I_{\text{прод}} = 2 \text{ мм/ход}$                        | ▽ 6                              |
| Тонкое точение                  | $t = 0,15 \text{ мм}; I = 0,11 \text{ мм/об}; R_{\text{резца}} = 0,8 \text{ мм}$ | ▽ 6                              |
| Грубое точение                  | $t = 1 \text{ мин}; I = 1,2 \text{ мм/об}$                                       | ▽ 3                              |



При трении индия по стали повреждаемости стали не обнаружено. Силы трения в этом случае формировались за счет деформации и разрушения поверхности индиевого

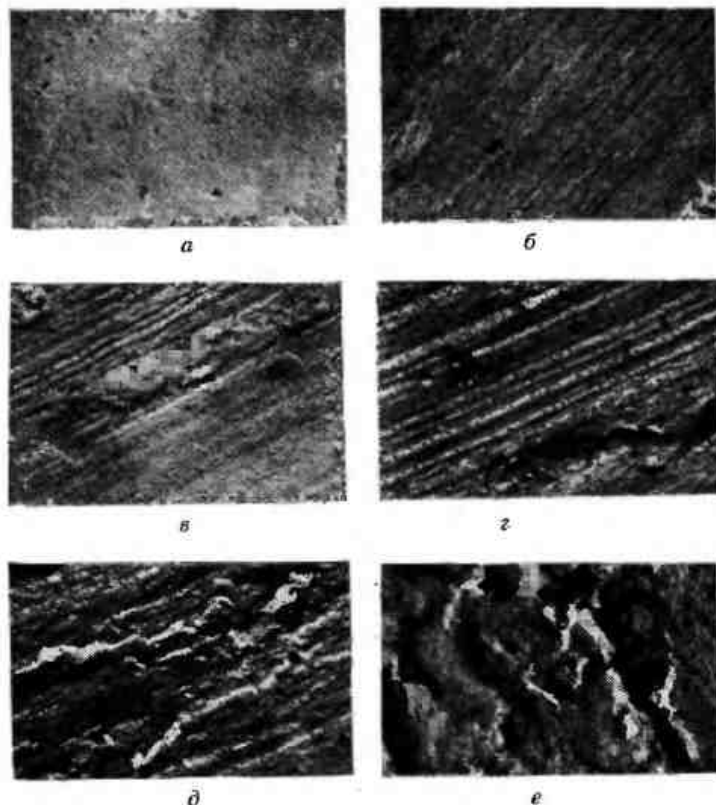


Рис. 135. Электронные микрофотографии поверхностей отожженной стали У8А после различных видов технологической обработки:

а — полированная; б — ручная доводка; в — тонко шлифованная; г — грубо шлифованная; д — токарная чистая; е — токарная грубая.

индентора. Взаимодействие поверхностей при трении заключалось в образовании механических и адгезионных поверхностных связей.

В пределах 13—9 классов чистоты механические связи образовывались за счет субмикрощероховатостей поверхности стали и соответствующей достройки субмикрощеро-

ховатостей поверхности индия. Для 6—3 классов чистоты механические связи возникали, главным образом, за счет микрощероховатостей, хотя значение субмикрорельефа также возрастало.

Таблица 20

Зависимость характеристик трения от вида технологического рельефа и повреждаемости поверхностей при трении

| Вид технологической обработки стали У8А | Качество поверхности | Материал и форма индентора                           |       |   |       |  |       |
|---|----------------------|--|-------|---|-------|--|-------|
|   |                      | Индиевая игла $P=6,5 \Gamma$ ; $S=0,35 \text{ мм}^2$ |       | Твердосплавная игла $r=50 \text{ мкм}$ ; $P=0,5 \Gamma$ |       | Твердосплавная сфера $r=3 \text{ мм}$ ; $P=6,5 \Gamma$ |       |
|   |                      | Характеристики трения                                |       |   |       |  |       |
|   |                      | $F_{M_1}$  | $\mu$ | $F_{M_1}$   | $\mu$ | $F_{M_1}$  | $\mu$ |
| Полировка на шайбе . . . . .            | $\nabla 13$          | 0,95   | 0,146 | 2,52  | 0,378 | 0,09   | 0,014 |
| Ручная доводка . . . . .                | $\nabla 11$          | 1,69   | 0,260 | 2,85  | 0,440 | 0,09   | 0,014 |
| Тонкое шлифование . . . . .             | $\nabla 19$          | 1,38   | 0,212 | 2,79  | 0,430 | 0,09   | 0,014 |
| Грубое шлифование . . . . .             | $\nabla 6$           | 4,20   | 0,650 | 4,65  | 0,715 | 0,12   | 0,019 |
| Тонкое точение . . . . .                | $\nabla 6$           | 6,10   | 0,940 | 4,95  | 0,760 | 0,18   | 0,028 |
| Грубое точение . . . . .                | $\nabla 3$           | 8,80   | 1,350 | 16,60   | 2,550 | 0,33   | 0,051 |

При трении твердосплавного индентора с единичным контактом поверхность стали имела повреждения. Для 13—9 классов чистоты коэффициенты трения имели близкие значения, величина их была в 2—2,5 раза выше, чем при трении индия по стали. В данном случае субмикрорельеф не оказывал влияния на силу трения. Для 6—3 классов чистоты повреждаемость стали увеличилась и соответственно возросли значения коэффициентов трения. Формирование сил трения осуществлялось за счет деформации и разрушения поверхности стали, а поверхностными связями являлись механические и адгезионные.

При трении твердосплавной сферы, благодаря большой площади контакта, повреждения поверхности стали не обнаружено. Причиной возникновения сил трения, по видимому, была только адгезия; механическая и диффузионная составляющие практически отсутствовали и поэтому силы и коэффициенты трения были минимальными.

Результаты этого исследования подчеркивают большую роль технологического рельефа в начале работы

сопряжений, причем это особенно важно для сопряжений, работающих в условиях повреждаемости поверхностей трения. В этих условиях с увеличением величины шероховатостей резко возрастает сила трения и увеличивается разрушение — износ. При работе без повреждений поверхностей сопряженной пары трения сила трения на порядок меньше, роль грубых шероховатостей значительно снижается.

### Структура поверхности при трении покоя и движения [69]

Представляет большой интерес исследование силы трения покоя и движения в связи с дислокационной структурой и ее изменениями на поверхностях трущихся тел. Сила трения покоя, как правило, больше силы трения

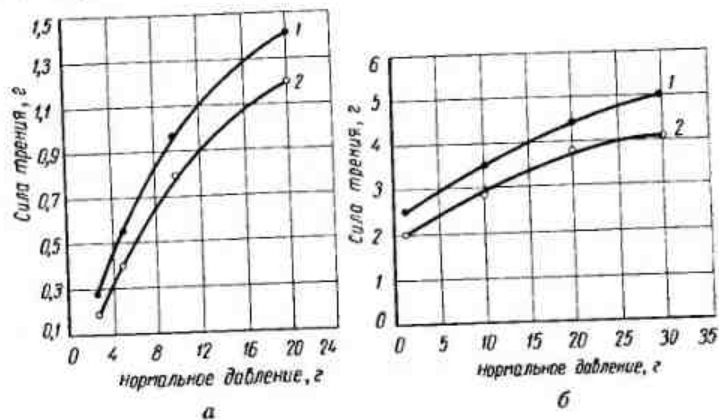


Рис. 136. Кривые зависимости статической и динамической силы трения от нормального давления при трении единичным индентором по кристаллу LiF:

а — в плоскости (1000) и направлении [100]; б — по кристаллу Zn в плоскости (0001) (*1* — статическая сила трения; *2* — динамическая сила трения).

движения. На щелочногаллоидных кристаллах NaCl, KCl, KBr, KJ, LiF, а также на кристаллах цинка была исследована статическая сила трения и сила трения движения. Трение осуществляли на машине, позволяющей изменять нормальную нагрузку и скорость скольжения в широком диапазоне. Силу трения измеряли от начала движения до

остановки образца. Опыты проводили при трении единичным индентором (корундовой иглой с радиусом при вершине 50 мкм) по плоскостям (100) кристаллов. Скольжение осуществлялось в направлениях [100] и [110]. Исследования вели при различных скоростях скольжения — от долей микрона до нескольких метров в секунду.

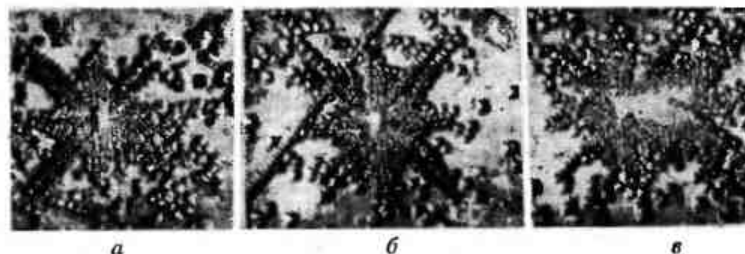
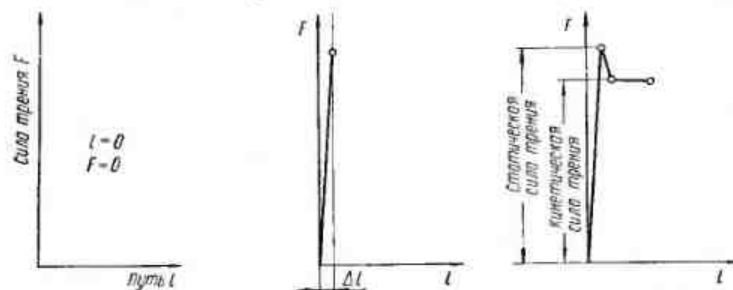


Рис. 137. Расположение дислокаций и изменения силы трения при покое и движении. Сухое трение (корундовая игла с радиусом при вершине 50 мкм) в плоскости (100) кристалла LiF в направлении [100]: а — *N* = 20 г; *l* = 0; *F* = 0; б — *N* = 20 г; *l* = 7 мкм; *F* = 1,4 Г; в — *N* = 20 г; *l* = 50 мкм; *F* = 1,2 Г.

На рис. 136 приведены графики зависимости статической и динамической сил трения от нормального давления для LiF и Zn при скорости трения 0,0001 м/сек с однократным прохождением индентора. Из графиков видно, что для всех давлений на индентор, при которых проводились опыты, статическая сила трения оказывалась больше динамической.

Применяя дислокационную теорию для объяснения этого явления, можно указать следующие причины повышения статической силы трения:

1) особенности расположения дислокаций при действии только нормального усилия и сочетания нормального и тангенциального усилий;

2) различие полей напряжений вокруг стационарной и движущейся дислокации;

3) взаимодействие дислокаций с примесями;

4) диффузионные явления в зоне контакта.

На рис. 137 показано расположение дислокаций в кристаллах вокруг отпечатка индентора при действии нормального напряжения и при смещении индентора на несколько микрон под действием тангенциального усилия. Выявление дислокаций производили методом травления [19]. Из рисунка видно, что даже при перемещении индентора на некоторую величину, равную нескольким микронам, форма «розетки» не изменилась, так как движения дислокаций не произошло. При дальнейшем приложении тангенциального усилия к индентору начинают двигаться дислокации, расположенные в двух крайних ветвях, прилегающих к направлению движения. Когда приложенное напряжение превосходит напряжение, необходимое для преодоления сопротивления неподвижных дислокаций (сила трения при этом максимальная), начинается быстрое движение дислокаций (рис. 137). Сила трения уменьшается и становится равной силе трения движения.

Исследование силы трения движения и покоя в связи с изменением дислокационной структуры раскрывает очень важную зависимость между внешними параметрами трения и внутренними изменениями, связанными с тонким строением кристаллического тела. Имеются и другие причины, существенно влияющие на силу трения покоя и движения.

### Качество поверхности, антифрикционность и фрикционность в машинах

Приведенные результаты изучения сил трения при раздельном влиянии основных параметров качества поверхности (физического рельефа, пленок окислов, пленок адсорбированной смазки, текстуры металла, характера повреждений — диспергирования, особенностей технологического рельефа) позволяют сделать некоторые обобщения и сформулировать принципиальные общие положения проблемы антифрикционности и фрикционности

машин и механизмов.. Прежде всего необходимо указать, что величина и характер сил внешнего трения коренным образом зависят от типа поверхностных связей, возникающих при работе конкретной пары трения. В зависимости от преобладания механических, диффузионных или адгезионных составляющих силы трения могут изменяться в очень широком диапазоне. С другой стороны совершенно очевидно, что типы возможных связей между контактируемыми телами в первую очередь зависят от характеристик качества их поверхностей.

Наибольшие по величине силы трения формируются при преобладающем развитии диффузионной составляющей (схватывание металлов). Меньшее, но достаточно существенное значение могут иметь механические составляющие. При всех условиях трения присутствует адгезионная составляющая, имеющая минимальное значение.

Антифрикционность является характеристикой такого состояния трущихся поверхностей деталей машин, при котором достигается высокое сопротивление разрушению этих поверхностей (износу) при минимальных коэффициентах трения. Минимальные значения коэффициентов трения могут быть получены при следующих условиях.

В зависимости формирования сил внешнего трения, включающей всю сумму сопротивлений движению

$$F = F_{M_{1,2}} + F_D + F_A \quad (17)$$

общая механическая  $F_{M_{1,2}}$  и диффузионная  $F_D$  составляющие должны иметь минимальные значения:

$$F_{M_{1,2}} \rightarrow 0 \text{ и } F_D \rightarrow 0. \quad (18)$$

Для антифрикционной пары трения при отсутствии смазки силы трения будут формироваться за счет взаимодействия субмикрорельефов поверхностей  $F_M$ , и адгезии  $F_A$  между ними:

$$F_{\text{ант}} \approx F_{M_2} + F_A. \quad (19)$$

В условиях граничной смазки, когда  $F_{M_2} \rightarrow 0$ , силы трения будут формироваться только за счет адгезионной составляющей:

$$F_{\text{ант}} \approx F_A. \quad (20)$$

Практически антифрикционность обуславливается определенным комплексом механических, физических и

химических характеристик трущихся поверхностей, обеспечивающих минимальные значения диффузионной и механической составляющих силы трения. Такой комплекс достигается в парах трения при контакте твердых, практически не деформируемых поверхностей стали, обработанных до высоких классов чистоты с пластичными мягкими сплавами на основе меди, алюминия, олова. Такие поверхности после приработки защищены тончайшими слоями текстурированных вторичных структур — пленок окислов. Диффузионная составляющая  $F_d$  при этом практически отсутствует, а механическая, связанная с взаимодействием микрошероховатостей технологического происхождения  $F_{M_1}$ , также близка к нулю. Механическая составляющая, обусловленная субмикрошероховатостями деформационного происхождения  $F_{M_2}$ , при контакте текстурированных поверхностей, из которых одна обладает большой твердостью и высоким классом чистоты поверхности, не может иметь больших значений.

При граничной смазке эта последняя составляющая полностью исчезает, так как толщина граничных слоев смазки, обладающих свойствами квазитвердости и упругости, имеет такой же порядок, как и высота неровностей субмикрорельефа. При таком сочетании выполняется полное условие антифрикционности пары трения

$$F_{\text{внт}} = F_{\text{вдг}} \quad (21)$$

Вторичные структуры, устраняющие металлический контакт поверхностей, являются главным признаком антифрикционности. В силу специфики их образования вторичные структуры создают наибольшую гладкость на поверхностях трения (см. рис. 95, 96, 97). В связи с особенностями химического состава защитных пленок окислов диффузия между контактирующими поверхностями практически также отсутствует. Таким образом, при наличии вторичных структур при трении одновременно подавляются две главные составляющие сил внешнего трения — механическая, связанная с наличием шероховатостей, и составляющая, обусловленная диффузионными явлениями.

Наличие вторичных структур при сухом трении металлов не устраняет механическую составляющую сил трения, вызываемую взаимодействием субмикрорельефов. Эта составляющая устраняется пленками граничной

смазки. Примерами оптимальных решений создания антифрикционных пар трения являются классические сопряжения деталей машин: вал — подшипник, поршневой палец — втулка, зеркало цилиндра — поршневое кольцо и др., в которых выбор материалов трущейся пары, качество обработанных поверхностей и режимы эксплуатации удовлетворяют поставленному условию антифрикционности.

Под фрикционностью понимают такое состояние трущихся поверхностей, при котором достигается высокое



а

б  
Рис. 138. Рабочее состояние поверхности колодки тормозного устройства:  
а — микрофотография, X 320; б — профилограмма.

сопротивление разрушению этих поверхностей при максимальных и мало изменяющихся в процессе нагружения коэффициентах трения. Возможностей для получения больших коэффициентов трения в принципе достаточно много, однако условие высокой износостойкости фрикционных пар трения налагает ряд ограничений на эти возможности. Максимальные значения коэффициентов трения при условии сохранения достаточной износостойкости могут быть получены при следующих условиях.

В общей зависимости (17) формирования сил внешнего трения, включающей механические, диффузионную и адгезионную составляющие, составляющая  $F_{M_1}$ , обусловленная микрошероховатостями технологического происхождения, не может быть основой, обеспечивающей фрикционность, так как, во-первых, в процессе работы фрикционных пар трения ощутимые микрошероховатости быстро исчезают, поверхности становятся гладкими (рис. 138), а во-вторых, наличие такой составляющей вызвало бы большие износы. Составляющая  $F_{M_2}$ , обусловленная субмикрошероховатостями, чрезвычайно важна для фрикционных пар трения. Она дает большое увели-

чение силы трение при контакте несмазанных поверхностей и не вызывает больших износостойкостей.

Составляющая  $F_{\text{д}}$  также представляет важную величину в фрикционных парах трения. В результате развития высоких температур на трущемся контакте диффузионные процессы развиваются достаточно интенсивно, а градиент температур в сечении поверхностных слоев приводит к чрезвычайно дифференцированному изменению их свойств по нормали к поверхности трения. Это выводит деформацию в тончайшие поверхностные слои материала и устраняет возможности больших износостойкостей.

Таким образом, условие, обеспечивающее состояние фрикционности пар трения, может быть записано в виде

$$F_{\text{фр}} = F_{\text{м2}} + F_{\text{д}} + F_{\text{а}} . \quad (22)$$

Примерами оптимальных решений создания фрикционных пар трения являются различные конструкции и типы тормозных устройств.

## 11. Качество поверхности и износостойкость деталей машин

В проблеме увеличения износостойкости и долговечности деталей машин качество поверхности всегда имело большое значение. В более раннем периоде главное внимание уделялось вопросам технологической обработки деталей машин, связанным с геометрией поверхности. В последнем десятилетии в теоретических работах и особенно в практике машиностроения получают все большее развитие вопросы, связанные с технологическим упрочнением поверхностных слоев и изменением их свойств в нужном направлении. Создана и успешно развивается крупная область упрочняющей технологии.

Меньшее развитие, но не меньшие перспективы имеет направление, связанное с изменением свойств поверхностных слоев трущихся металлов непосредственно при эксплуатации машин за счет физико-химического действия рабочих сред, подаваемых в зону трения. Упрочнение и изменение свойств тончайших поверхностных слоев в самом процессе трения осуществляется прежде всего путем применения различных присадок к смазочным материалам.

Известно, что процессы трения, смазки и изнашивания деталей машин сопровождаются сложными явлениями, протекающими в тончайших поверхностных слоях металлов. Все показатели свойств поверхностных слоев металлов и сплавов могут резко изменяться в зависимости от параметров деформации, температуры, явлений адсорбции, диффузии, механического и фазового упрочнения, разупрочнения. Естественно, что износостойкость металлов коренным образом зависит от этих явлений.

В зависимости от внешних механических воздействий, среды, свойств и качества поверхности трущихся металлов при трении могут возникать допустимые нормальные процессы износа и недопустимые, патологические виды разрушения. Основным допустимым и широко распространенным износом в машинах является окислительный, связанный с образованием вторичных защитных структур на поверхностях трения. Недопустимые, патологические виды разрушения поверхностей трения связаны с явлениями схватывания, теплового разупрочнения, абразионными и усталостными процессами.

Основной задачей проблемы борьбы с износом машин является устранение нежелательных, патологических видов разрушения поверхностей трения (схватывания, теплового износа, абразивного и усталостного разрушения) и переход к допустимому окислительному износу.

Наиболее действенным путем решения этой задачи является такое управление качеством поверхности и в технологии изготовления деталей машин и при их эксплуатации, которое свело бы к минимальным значениям явления схватывания, тепловые, абразивные и усталостные процессы и обеспечило устойчивое существование и постоянное восстановление тончайших пленок вторичных защитных структур.

В результате анализа явлений, происходящих на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся металлов, можно сделать обобщения и сформулировать некоторые принципиальные положения теории износа, связанные с задачей качества поверхности деталей машин.

Износостойкость деталей машин зависит как от первичных характеристик качества поверхностей, формируемых при технологии обработки, так и от вторичных явлений изменения геометрии и свойств рабочих поверхностей, возникающих и развивающихся непосредственно

в процессе трения. Очевидно, что получение оптимальных характеристик вторичных или эксплуатационных свойств, обеспечивающих устойчивость окислительного износа, требует правильного сочетания первичных или исходных характеристик свойств поверхности и условий эксплуатации.

При решении основного вопроса определения первичных характеристик качества поверхности, формирующихся при технологической обработке, возможны два пути. Во-первых, при технологической обработке нужно создавать такую геометрию и такие первичные структуры и свойства поверхностных слоев, которые бы в конкретных условиях эксплуатации изменялись в сторону улучшения. Работа сил трения в зависимости от исходного качества поверхности и конкретных условий нагружения при эксплуатации может расходоваться на упрочнение и создание износостойких вторичных структур, тормозящих развитие износа, и на разупрочнение, вызывающее усиление износа, и на патологическим явлениям. Опыт эксплуатации износостойких пар трения показывает, что в процессе работы на поверхностях металла образуются упрочненные, хорошо сопротивляющиеся износу пленки и слои вторичных структур более износостойкие, чем первичные структуры, формирующиеся при изготовлении.

В других случаях поверхностные слои пар трения ослабляются вследствие распада структур твердых растворов, нежелательных изменений химического состава, недостаточной теплоустойчивости, явлений усталости и др.

Таким образом, первый путь решения вопроса о качестве поверхности заключается в таком сочетании его первичных характеристик и условий эксплуатации, которое бы привело к улучшению геометрии поверхностей трения и к дополнительному упрочнению поверхностных слоев в процессе нагружения трением. Улучшение геометрии поверхностей трения, как правило, связано с деформацией микрообъемов металла поверхностных слоев, их текстурированием и тонким диспергированием.

Дополнительное упрочнение поверхностных слоев происходит главным образом за счет пластической деформации микрообъемов металла и изменения его химического состава в направлении формирования прочных и пластичных вторичных структур, хорошо связанных с основ-

ным металлом и равномерно расположенных на поверхностях трения. Изменение химического состава металла поверхностных слоев, как правило, происходит путем взаимодействия металла с кислородом воздуха и активными компонентами смазки. Однако при этом могут иметь место элементы чисто механического или механо-термического упрочнения — наклепа, вызываемого пластической деформацией и нагревом поверхностных слоев. Ярким примером упрочнения поверхностей трения в процессе эксплуатации является образование вторичных пленок окислов (табл. 21) [51]. Особая эффективность вторичных структур наблюдается на мягких антифрикционных металлах. Например, исходная твердость оловянного покрытия составляет  $5 \text{ кг/мм}^2$ . Твердость вторичных износостойких окисных пленок, образующихся на поверхности олова при трении в кислородосодержащих средах, равна  $700 \text{ кг/мм}^2$ .

Окислы, образующиеся на поверхностях трения олова, баббита и антифрикционных бронз, обладают высокой твердостью, достаточной пластичностью, хорошей связью с основным металлом. Упрочнение в этих случаях происходит за счет деформации тонких поверхностных объемов металла, взаимодействия активизированного металла с кислородом воздуха и образования окисных пленок.

Характерным примером получения структуры поверхности с особыми свойствами являются сульфидирование и сульфоцианирование — методы технологической обработки, в процессе которых поверхностные слои стали насыщаются серой и одновременно серой, азотом и углеродом. Диффузионные слои при сульфоцианировании располагаются таким образом, что относительно мягкие сульфиды железа и легирующих элементов опираются на фазы высокой твердости: азотистого цементита и карбо-

Таблица 21  
Свойства материалов трущихся поверхностей и их упрочнение при эксплуатации

| Металл | Твердость металла НВ, кг/мм <sup>2</sup> | Твердость окислов, образовавшихся на поверхности трения металла Н <sup>10</sup> , кг/мм <sup>2</sup> |
|--------|--|--|
| Fe     | 90                                       | 800  |
| Cu     | 80                                       | 325  |
| Al     | 45                                       | 1200   |
| Sn     | 5  | 708  |
| Pb     | 4,5                                      | 49   |
| Bi     | 9,3                                      | 180  |
| Sb     | 30                                       | 515  |
| Cd     | 30                                       | 295  |
| Ni     | 60                                       | 320  |
| Mg     | 30                                       | 525  |

нитридных составляющих. Твердость этих фазовых составляющих 400—600 кг/мм<sup>2</sup>. Сульфидирование и сульфоцианирование осуществляется при температурах, которые не приводят к значительным деформациям деталей, требующим шлифования (560° С). Сульфидированные и сульфоцианированные поверхности в периоде приработки очень быстро достигают 10—12 классов чистоты (ГОСТ 2789—59) и обладают высокой стойкостью против

стей высокого качества является получение износостойких вторичных структур непосредственно в процессе трения в результате взаимодействия поверхностных слоев трущихся металлов с физически и химически активными смазочными средами.

При граничном трении смазка, взаимодействуя с поверхностными слоями металла, способна изменять их структуру и свойства, т. е. модифицировать металл. Изменения состояния поверхностных слоев проявляются в виде пластической деформации, механического упрочнения и изменений химического состава. В результате образуются своеобразные вторичные структуры на поверхностях трения.

Эффективность действия смазки в направлении создания оптимальных вторичных структур резко увеличивается благодаря различным присадкам.

Большой интерес представляют присадки поверхностно-активных веществ в смазки [98, 133]. Как показано впервые П. А. Ребиндером и его сотрудниками, действие смазки с адсорбционно-активными добавками заключается не только в экранировании поверхностей трения, но и в значительном увеличении сдвиговой деформации в тончайших поверхностных слоях трущихся металлов. Это первичное действие адсорбции обуславливает возникновение в этих слоях более высокой степени упрочнения. Можно полагать, что две стороны одного и того же явления — пластифицирование и вызванное им упрочнение являются основными и постоянно действующими при граничном трении с введением поверхностно-активных добавок, [97, 132].

Экспериментальные данные показывают, что введение поверхностно-активной среды оказывает существенное влияние на величину пластической деформации и вызванного ею упрочнения [56, 57, 98].

Влияние поверхностно-активных добавок проявляется в изменении величины блоков, искажений 2-го рода и величины твердости при деформациях, соответствующих условиям внешнего трения [56, 57].

Особенно ярко эффект действия поверхностно-активных смазок проявляется при трении металлов в средах, не содержащих кислород.

Роль кислорода в процессах трения, смазки и износа своеобразна и чрезвычайно велика [51, 72] и полностью

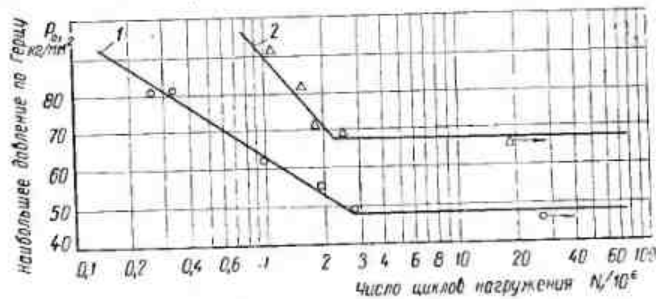


Рис. 139. Кривые усталостного выкрашивания стали 45 при смазке вязкостью  $\eta_{60} = 1,9E^6$ :  
1 — нормализованная; 2 — сульфидированная.

заедания. Эти обстоятельства резко увеличивают величину контактной выносливости деталей, упрочненных сульфоцианированием. На рис. 139 представлены сравнительные данные о контактной выносливости нормализованной и сульфидированной стали 45 [141].

Насыщение поверхностей трения серой и азотом позволяет в процессе приработки быстро уменьшить шероховатость до величин субмикрорельефа, соизмеримых с толщиной масляной пленки при граничном трении. При этом приработочный износ протекает без явлений схватывания и не выходит за пределы величин суммарной шероховатости. Вторичная защитная структура, образуемая при обычных условиях путем взаимодействия металла с кислородом воздуха, при сульфоцианировании представлена в виде тонких слоев металла, насыщенных серой, азотом и углеродом.

Увеличение контактной выносливости прямо связано с улучшением приработки и наличием оптимальных вторичных структур на поверхностях трения.

Весьма эффективным путем формирования поверхно-

сохраняется и в присутствии ПАВ. Это объясняется прежде всего тем, что скорость хемосорбционного взаимодействия кислорода воздуха с поверхностью металла значительно превышает скорость адсорбции ПАВ.

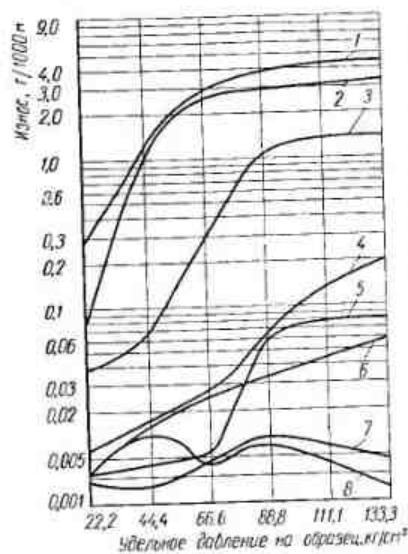


Рис. 140. Кривые влияния газовой среды на износ стали в присутствии поверхностно-активных смазок [63]:

1 — вазелиновое масло + 0,2% эпоксидной смолы (аргон); 2 — вазелиновое масло + 0,2% дибутилсебацата (аргон); 3 — вазелиновое масло + 0,2% олеиновой кислоты (аргон); 4 — вазелиновое масло (аргон); 5 — вазелиновое масло + 0,2% эпоксидной смолы (воздух); 6 — вазелиновое масло (воздух); 7 — вазелиновое масло + 0,2% олеиновой кислоты (воздух); 8 — вазелиновое масло + 0,2% дибутилсебацата (воздух).

Опыты выполняли при трении скольжения образцов типа вкладышей ( $S = 15 \times 15 \text{ мм}^2$ ) по цилиндрическому валу диаметром 166 мм. Материал образца — сталь 45 отожженная, а вала — сталь 45 (HRC 48—50). Скорость скольжения  $v = 0,02 \text{ м/сек}$ . Давление изменяли в пределах от 22,2 до 133,3 кг/мм².

В качестве смазывающей среды применяли чистое

Первый опыт в этом направлении показал справедливость гипотезы, высказанной Б. И. Костецким об экранирующем действии окисных пленок, возникающих в присутствии кислорода воздуха и резко снижающих эффективность действия ПАВ при трении и износе [75]. В результате были получены резкие отличия в действии ПАВ в процессах трения и износа в газовых средах, содержащих и не содержащих кислород.

В связи с принципиальным теоретическим и большим практическим значением этого вопроса было проведено систематическое исследование процесса трения и износа с поверхностно-активными смазками в кислородо-содержащих (воздух) и не содержащих кислород (аргон) газовых средах.

Опыты выполняли при трении скольжения образцов типа вкладышей ( $S =$

вазелиновое масло, вазелиновое масло с добавками 0,2% олеиновой кислоты, 0,2% дибутилсебацата, 0,2% эпоксидной смолы (ЭД-5).

Первая серия опытов была проведена на воздухе. Вторая — в герметической камере с продувкой технически чистым аргоном и избыточным давлением 0,2 атм. Износ измеряли взвешиванием образцов с точностью  $\pm 0,0001 \text{ г}$ .

Результаты исследования представлены на рис. 140.

Кривые износа, относящиеся к испытаниям в среде воздуха (5, 6, 7, 8), расположены в пределах величин, измеряемых сотыми долями грамма. Износ в неактивной смазочной среде (вазелиновое масло) возрастает с увеличением давления. Разность между величинами износа в неактивной среде (ВМ) и ПАВ (олеиновая кислота и дибутилсебацат) при увеличении давления возрастает. Исключение составляет ПАВ (эпоксидная смола). По мере увеличения давления величина износа при смазке вазелиновым маслом с добавкой 0,2% эпоксидной смолы становится больше, чем при смазке чистым вазелиновым маслом.

Результаты испытаний в среде воздуха находятся в соответствии с известными данными о некотором, сравнительно небольшом, влиянии ПАВ на величину износа [75]. Это влияние несколько возрастает при увеличенных давлениях. Абсолютные величины износа в неактивных смазках, содержащих ПАВ, изменяются для диапазона средних и малых давлений в 2—3 раза, причем, как правило, износ в средах, содержащих ПАВ, меньший, т. е. проявляется только эффект улучшения смазывающего действия.

Резкие отличия величины износа, характера взаимодействия и разрушения поверхностей обнаружены при испытаниях в среде аргона при отсутствии возможностей восстановления и развития на поверхности металла химически адсорбированных пленок окислов (кривые 1, 2, 3, 4). Износ в неактивной среде (вазелиновое масло) до давлений порядка 80 кг/см² не превышает соответствующих величин износа в среде воздуха (кривая 4).

Дальнейшее увеличение давлений приводит к разрушению защитных первичных пленок окислов, вызывает развитие явлений схватывания и разрушения поверхностей. Износ за 1000 м пути увеличивается до значений, равных десятым долям грамма. Эти данные также соответствуют известным представлениям [75].



Кривые 1, 2, 3 представляют износ стали в средах ПАВ (олеиновая кислота, дибутилсебацинат и ЭД-5), в газовой среде аргона, т. е. при отсутствии реальных возможностей хемосорбции кислорода на поверхностях трения и образования защитных вторичных структур окислов, хорошо экранирующих поверхности металла.

В этих условиях износ в присутствии ПАВ (дибутилсебацината и ЭД-5) во всем диапазоне давлений в 100—1000 раз превышает износ в присутствии этих же смазывающих сред в воздухе.

Поверхности трения представляют собой предельно деформированный и разрушенный металл.

В результате резко выраженного развития процесса пластифицирования, формирования физического рельефа и выхода свежих ювенильных поверхностей возникает особо интенсивно процесс схватывания контактирующих металлов.

В результате приведенных данных исследования роли кислорода в процессах трения и износа в присутствии органических ПАВ установлено, что эффект Ребиндера недостаточно четко проявляет себя при наличии кислорода воздуха. В этом случае хемосорбционное взаимодействие кислорода воздуха с поверхностью металла в кинетическом отношении значительно превышает скорость физической адсорбции ПАВ.

Действительные эффекты пластифицирования и разрушения обнаруживаются при отсутствии кислорода в зоне трения и характеризуются в сотни и тысячи раз большими величинами, чем при совместном действии хемосорбции кислорода и адсорбции ПАВ.

Эффект Ребиндера в наиболее чистом и ярком виде проявляется при отсутствии окислов на поверхности металла.

Учет экранирующего действия хемосорбционных окисных пленок позволит более полно и строго изучить и использовать различные стороны эффекта Ребиндера, что особенно важно для решения многих технических задач трения, смазки, износа, усталостной прочности и обработки металла резанием.

Большие возможности создания вторичных структур непосредственно в процессе трения открывает применение смазок, содержащих добавки химически-активных веществ.

В настоящее время в качестве смазочных присадок применяют зачастую триалкилтриниофосфиты, дитиофосфиты металлов, различные соли сульфокислот, ксантогенаты, эфиры трихлорфосфиновой кислоты и др. С химической точки зрения механизм действия этих присадок достаточно детально изучен [62]. Считают, что положительное влияние этих соединений обусловлено их разложением под влиянием высокой температуры, которая возникает на поверхности металла в процессе трения. При этом продукты разложения указанных соединений взаимодействуют с поверхностью трения, образуя на ней химически фиксированные адсорбционные слои, которые состоят из сульфидов, фосфидов или хлоридов металлов.

Ярким примером химической модификации поверхности металла в процессе трения могут служить результаты исследования присадок комплексных соединений металлов типа роданидов и дитизонатов.

Новыми высокоэффективными противоизносными присадками являются роданиды и дитизонаты меди, железа, кобальта и марганца, а также комплексные серо- и фторсодержащие соединения (КИГВФ-1 и КИГВФ-2) [73, 74]. Эти соединения образуют в смазочных маслах устойчивые коллоидные растворы, которые при больших скоростях скольжения и высокой температуре разлагаются на поверхностях трения, образуя сульфиды или фториды соответствующих металлов и благоприятствуют адсорбционному пластифицированию поверхностей. Поверхностные химические соединения, образующиеся при этом, обладают, по-видимому, низким напряжением сдвига, обуславливая тем самым понижение трения и ликвидацию характерных особенностей окислительного и теплового износов. В связи с этим износ при средних и больших скоростях и наличии противоизносных присадок типа роданидов, дитизонатов металлов, КИГВФ-1 и КИГВФ-2 в основном обусловлен не окислением поверхностей трущихся металлов и разрушением их по известной схеме окислительного износа, а непрерывным разрушением и возникновением соответствующих более тонких и прочных адсорбционных слоев.

В табл. 22 приведены результаты испытаний в условиях граничного трения железа Армко по железу Армко. Износ измерялся по изменению веса образца, работавшего в паре с валом. Испытание проводили по трем

критериям на предельную нагрузку, предельную скорость и на износостойкость, достаточно полно оценивающим процессы, происходящие в зоне контакта трущейся пары [73, 74].

Таблица 22

Характеристика трения и износа железа Армко при испытаниях по трем критериям

| Наименование присадки к маслу МС-20 | Количество, % | Установившийся износ при $n = 300$ об/мин; $P = 40$ кг/см <sup>2</sup> , г | Максимальная нагрузка, при которой происходит продавливание слоя смазки при $n = 150$ об/мин, кг/см <sup>2</sup> | Предельная скорость скольжения, при которой происходит схватывание 2-го рода при $P = 20$ кг/см <sup>2</sup> , $l = 22600$ м |
|-------------------------------------|---------------|--|--|--|
| Масло МС-20 . . . . .               | 0             | 0,0015   | 1330   | 3,15   |
| Роданид меди . . . . .              | 5             | 0,0008   | 2750   | 13,10  |
| Роданид железа . . . . .            | 5             | 0,0005   | 1760   | 9,43   |
| Дитизонат кобальта . . . . .        | 5             | 0,0016   | 945  | 7,87   |
| Дитизонат марганца . . . . .        | 5             | 0,0016   | 730  | 7,87   |
| Ортооксидиолят железа               | 5             | 0,0016   | 930  | 6,29   |
| КИГВФ-1                             | 0,2           | 0,0007   | 1300   | 5,24   |
|                                     | 0,5           | 0,0004   | 2440   | 14,20  |
|                                     | 1             | 0,0004   | 2800   | 14,20  |
|                                     | 1,5           | 0,0002   | 2120   | 14,20  |
|                                     | 3             | 0,0006   | 2260   | 14,20  |
| КИГВФ-2                             | 0,15          | 0,0007   | 1820   | 5,24   |
|                                     | 0,45          | 0,0005   | 2570   | 7,87   |
|                                     | 1,5           | 0,0017   | 1821   | 14,20  |
|                                     | 4,5           | 0,0008   | 2625   | 14,20  |

Как видно из приведенных данных, добавка роданида меди, а также присадки КИГВФ-1 и КИГВФ-2 к смазке МС-20 является высокоэффективной. Присадка роданида меди в два раза уменьшает износ, в два раза повышает предел максимальной нагрузки, при которой происходит продавливание, и в четыре раза увеличивает предельную скорость скольжения, при которой происходит схватывание по сравнению со значениями этих же критериев в случае применения чистого масла МС-20.

Такие же эффекты наблюдаются при добавлении к маслу МС-20 присадки КИГВФ-1. Оптимальные концентрации этой присадки соответствуют содержанию серы в масле от 0,5 до 1,5%. При этих концентрациях износ уменьшается от 4 до 7 раз, предел максимальной нагрузки, при которой происходит продавливание, повышается от 1,6 до 2,1 раза и в 4,5 раза увеличивается предельная скорость, при которой происходит схватывание 2-го рода по сравнению со значениями этих же критериев в случае применения чистого масла МС-20.

Присадка КИГВФ-2, добавленная к маслу МС-20 в интервале концентраций от 0,45 до 1,5%, уменьшает износ от 2 до 3 раз, повышает предел максимальной нагрузки, при которой происходит продавливание, в 1,3—1,9 раза и в 2—4 раза увеличивает скорость скольжения, при которой происходит схватывание 2-го рода по сравнению со значениями этих же критериев в случае применения чистого масла МС-20.

Полученные эффекты находятся в прямой связи с модификацией металла поверхностных слоев и химически активными компонентами соответствующих присадок и свойствами возникающих при этом вторичных структур.

Значительное влияние на формирование вторичных поверхностных структур непосредственно при трении оказывает не только жидкая, но и газовая среда. Металл деформируемых при трении поверхностных слоев активизируется и взаимодействует с газовой средой зоны трения. На первом месте по значению и по своему распространению в практике стоят процессы взаимодействия металла с кислородом воздуха и образования пленок окислов. Процессы окисления были изучены при сухом трении [71, 78, 153] и граничной смазке [52, 63, 79], при трении скольжения [52, 63, 79], качения [51, 52, 54, 79], при работе деталей машин [51, 52, 79] и в лабораторных условиях на образцах [51, 52, 78, 153].

Ярким примером, иллюстрирующим роль вторичных структур окислов, может служить исследование трения и износа подшипников качения при разном содержании кислорода в зоне трения [64]. Исследованию подвергались легкоразборные подшипники П36203Е при следующих условиях: осевая нагрузка 100 кг, число оборотов 1400 об/мин, число циклов 120 000. Испытания производи-

лись в воздушной среде при давлении 760 мм рт. ст. и при различных степенях разрежения ее от 760 до  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. При давлении воздуха 760 мм рт. ст. ведущим был окислительный износ. При этом на дорожках качения подшипников обнаружены пластические деформации тончайших поверхностных слоев, микротрещины и вторичные структуры. Разрушение поверхностей

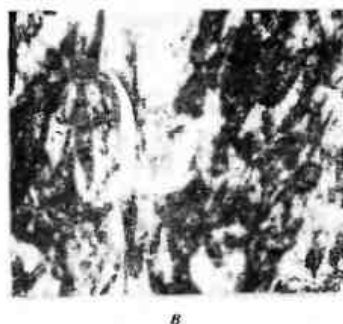
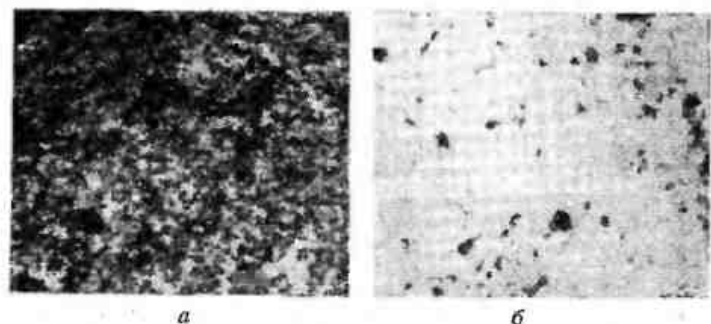


Рис. 141. Микрофотографии поверхности трения шарика подшипника качения,  $\times 250$ :

а — испытанного при давлении 760 мм рт. ст.; б — испытанного при давлении  $1 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст.; в — испытанного при давлении  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

происходит за счет отслаивания вторичных структур от основного материала и превращения их в процессе трения в черный порошок продуктов износа (рис. 141, а).

При испытании подшипников при давлении воздуха от 1 до  $10^{-1}$  мм рт. ст. поверхности качения становятся более гладкими по сравнению с исходными. Все неровности, оставшиеся после окончательной механической обработки, сглаживаются (рис. 141, б). Износ при этом давлении воздуха минимальный, в сотни раз меньше, чем износ при давлении воздуха 760 мм рт. ст. (рис. 142). При разрежении воздуха от 1 до  $10^{-1}$  мм рт. ст. количество

кислорода достаточно для образования тончайших поверхностных окисных пленок, способных предотвратить схватывание поверхностей, однако его недостаточно для интенсивного образования вторичных структур окисленного металла, которые подвержены отслаиванию и разрушению. По-видимому, в условиях недостатка кислорода в поверхностных слоях при трении качения образуются ненасыщенные твердые растворы кислорода в металле и тончайшие пленки окислов, хорошо связанные с основным металлом.

Дальнейшее увеличение вакуума резко меняет процесс трения — начинается интенсивное схватывание. Материал обойм налипает на шарики и переносится с одного места в другое (рис. 141, в). Происходит интенсивная деформация всей поверхности дорожки качения. Несмотря на деформацию поверхностей трения, весовой износ деталей подшипника небольшой — в несколько раз меньше, чем в воздухе. Это объясняется тем, что лет хрупких окисных пленок, интенсивно разрушающихся при трении. При давлении воздуха  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. происходит заедание подшипников.

Анализ количественных результатов износа и изучение структуры поверхностей трения дают возможность определить принципиальное значение окисных структур на поверхностях трения, показывают их двойственную роль и раскрывают возможности управления процессами формирования оптимальных вторичных структур.

Практические результаты в управлении процессом формирования оптимальных вторичных структур путем взаимодействия материала поверхностных слоев с газовой средой были получены в работе Е. А. Баканова [2], посвященной вопросам увеличения срока службы и эффективности работы тормозных устройств.

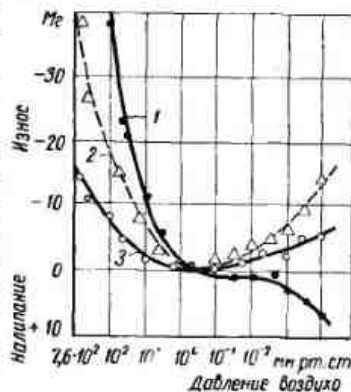


Рис. 142. Зависимость износа деталей подшипника качения от содержания кислорода в зоне трения (давления воздуха): 1 — шарик; 2 — внутреннее кольцо; 3 — внешнее кольцо.

В специфических условиях работы тормозных устройств (сухое трение, переменные скорости, большие нагрузки, высокие температуры) роль газовой среды особенно велика. Воздушная среда и естественно возникающие процессы окисления не обеспечивают в условиях работы тормозных устройств возникновения оптимальных вторичных структур. Окислительные процессы протекают весьма интенсивно, пленки окислов отличаются большой толщиной, повышенной хрупкостью, плохой связью с основным материалом. Все это снижает фрикционные характеристики и вызывает усиленный износ тормозных устройств.

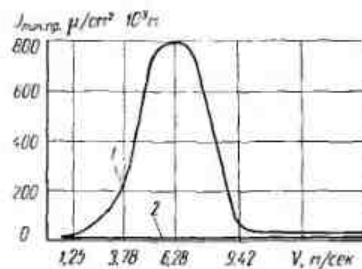


Рис. 143. Зависимость приведенного линейного износа материала ФМК-11 от скорости скольжения при испытании по чугуну ЧМХ в среде воздуха (1) и аммиака (2).

Решение вопроса о качестве поверхности связано также со следующими обстоятельствами. В сложных условиях эксплуатации не всегда имеется возможность для перехода от исходных состояний и свойств поверхностных слоев к вторичным упрочненным структурам. Это в первую очередь касается машин и механизмов новой техники, работающих в условиях сверхвысоких скоростей движения трущихся поверхностей, высоких или низких температур, глубокого вакуума, химически агрессивных или химически особо инертных сред. Для обеспечения износостойкости трущихся поверхностей в этих условиях следует предъявить иное требование к упрочняющей технологии. Возникает необходимость получения первичных структур с высокостабильными свойствами, структур со свойствами, мало или почти не изменяющимися в сложных условиях работы. В качестве примера получения стабильной и износостойкой первичной структуры поверхностного слоя при технологическом упрочнении можно

привести комплексную химико-термическую обработку — карбидизацию электролитического хромового покрытия. Впервые о возможности повышения износостойкости хромовых покрытий карбидизацией было указано в работе В. И. Архарова.

По методике, разработанной Д. С. Плышко [128], обработка производится в карбюризаторе из 50 вес. % древесного угля, 20 вес. %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 30 вес. % железа в течение 3 часов при температуре  $950^\circ\text{C}$ . Поверхностные слои после такой обработки представляют собой сложные карбиды хрома. Твердость слоя  $1800 \text{ кг/мм}^2$ . Карбидизированное хромовое покрытие имеет значительно более высокую износостойкость в тяжелых условиях трения (рис. 144). Испытания карбидов хрома на жаростойкость и кислотоупорность показали значительное преимущество их по сравнению с обычным электролитическим хромом.

В качестве другого примера получения весьма стабильной технологической структуры можно привести также метод электролитического борирования стали. При насыщении поверхности стали бором образуются соединения — бориды железа и карбиды бора.

Основным эффектом борирования является резкое повышение твердости поверхностного слоя, сохраняющееся при высоких температурах. В зависимости от режимов процесса и других факторов твердость борированного слоя находится в пределах  $HV = 1400 - 2500 \text{ кг/мм}^2$ , глубина упрочненного слоя — в пределах  $0,1 - 0,3 \text{ мм}$  [142]. Высокая исходная твердость и жаропрочность поверх-

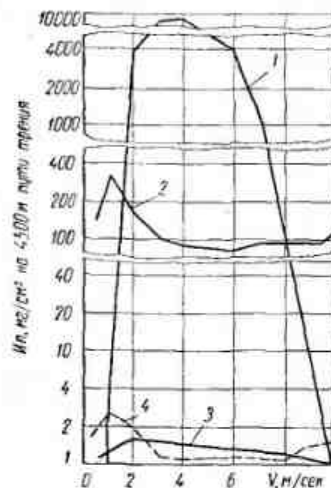


Рис. 144. График зависимости величины износа гладкого электролитического хрома и карбидов хрома при сухом трении по чугуну и бронзе от скорости скольжения, ( $P = 4,5 \text{ кг/см}^2$ ):

1 — хром по бронзе; 2 — хром по чугуну; 3 — карбиды хрома по бронзе; 4 — карбиды хрома по чугуну.

При насыщении поверхности стали бором образуются соединения — бориды железа и карбиды бора.

Основным эффектом борирования является резкое повышение твердости поверхностного слоя, сохраняющееся при высоких температурах. В зависимости от режимов процесса и других факторов твердость борированного слоя находится в пределах  $HV = 1400 - 2500 \text{ кг/мм}^2$ , глубина упрочненного слоя — в пределах  $0,1 - 0,3 \text{ мм}$  [142].

Высокая исходная твердость и жаропрочность поверх-

ностного слоя борированной стали позволяют с успехом применять этот метод для повышения сроков службы тяжело нагруженных изделий и деталей машин. На рис. 145 представлены сравнительные результаты измерения износа гладких вальцовочных штампов, изготовленных обычным методом из закаленной стали У8 и борированных штампов из этой же стали. Срок службы борированных вальцовочных штампов увеличился в 5—8 раз. Этот эффект связан с изменением

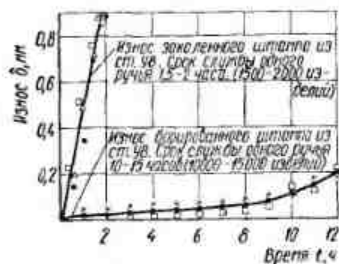


Рис. 145. Изменение износостойкости вальцовочных штампов из стали У8 в зависимости от способа технологической обработки поверхности.

вида износа при работе борированных штампов. Ведущим видом износа при работе штампов, изготовленных из углеродистой стали, был тепловой с явлениями окисления. Металл поверхностных слоев при нагружении в процессе штамповки интенсивно разупрочнялся, качество поверхности ухудшалось (рис. 146, а). При работе борированных штампов поверхностные слои сохраняли свои высокие механические и теплофизические

характеристики. Поверхность характеризовалась высокой чистотой, отсутствием микрповреждений (рис. 146, б) [142].

Необходимым условием обеспечения высокой износостойкости, антифрикционности и фрикционности является правильность выбора метода упрочнения применительно к конкретным условиям трения для защиты поверхностей трения от процессов разрушения при эксплуатации, вызываемых силовыми перегрузками, увеличенными температурами зоны контакта, наличием абразива, усталостью и другими недопустимыми явлениями. Существующие методы упрочнения не всегда правильно назначаются и применяются для конкретных пар трения. Во многих случаях методы упрочнения дают очень малые эффекты, иногда они даже увеличивают износ. Причем, это связано не с качеством упрочняющей технологии, а с несоответствием метода упрочнения задачам защиты от патологических процессов, возникающих при эксплуатации

Одним из наиболее распространенных методов технологического упрочнения поверхностей трения является электролитическое хромирование. Однако этот эффективный метод защиты поверхностей трения часто применяется без учета видов разрушения при трении.

Вопрос о теоретическом обосновании качества хромового покрытия в зависимости от вида разрушения поверхности при изнашивании изделий деталей машин впервые был поставлен Г. С. Левитским [96]. Большая твердость

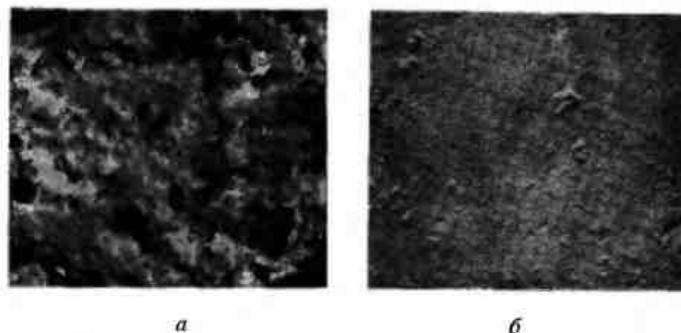


Рис. 146. Электронные микрофотографии рабочей поверхности закаленного вальцовочного штампа (а) и борированного (б),  $\times 10\,000$ .

и высокий предел текучести электролитического хрома делают этот вид упрочнения важным средством борьбы с явлениями схватывания 1-го рода при малых и средних нагрузках. В области увеличенных нагрузок хромовое покрытие не устраняет, а увеличивает интенсивность развития явлений схватывания. Хромовое покрытие является хорошим средством против абразивного износа. Высокие механические и особые химические свойства хромовых покрытий способствуют резкому уменьшению скорости окислительного износа. Увеличенная теплоустойчивость конструкционных сталей позволяет рекомендовать хромирование для борьбы с тепловым износом, однако при температурах в зоне трения, не превышающих  $400^{\circ}\text{C}$ .

Применение сульфидных, фосфидных и других неметаллических пленок, усиливающих интенсивность протекания химических процессов на поверхностях трения

металлов, получает все большее распространение. Считается что такого рода пленки способны разделять трущиеся поверхности и уменьшать их износ. Однако эти методы далеко не во всех условиях дают положительный эффект.

В результате исследований последних лет было показано, что неметаллические пленки следует применять прежде всего в условиях трения, вызывающих схватывание 1-го рода и тепловое изнашивание, чтобы не допустить развития этих аварийных видов износа. Лабораторные исследования влияния сульфидирования на износ в условиях окислительного трения при надежной граничной смазке и отсутствии явлений схватывания 1-го и 2-го рода показали значительное увеличение износа сульфидированных поверхностей по сравнению с несulfидированными. Эксплуатационные испытания деталей двигателя автомашины ГАЗ-51, работавших при окислительном изнашивании, также показали увеличение износа сульфидированных цилиндров двигателей и коленчатых валов по сравнению с несulfидированными в 2,3—3,5 раза.

Некоторые узлы трения работают в инертных, жидких и газовых средах, не содержащих кислород, или в условиях глубокого вакуума. Естественно, что в этих условиях после износа первичных пленок окислов интенсивно развиваются процессы схватывания.

Одним из новых и весьма эффективных средств обеспечения нормальной работы в указанных условиях является упрочнение поверхностных слоев металла кислородом. Поверхностный слой металла насыщается кислородом путем так называемого фрикционного упрочнения, которое осуществляется при соответствующих режимах трения в присутствии кислородосодержащих жидкостей или газов.

Правильное понимание природы вторичного упрочнения и разупрочнения поверхностных слоев при трении и выполнение вытекающих из этого требований к упрочняющей технологии будут способствовать значительному повышению надежности и сроков службы машин и механизмов.

Таким образом, задача об оптимальном эксплуатационном качестве поверхностей конкретных узлов трения машин и механизмов решается комплексно. В ее решении участвует выбор первичных характеристик качества поверхностей при технологии изготовления, управление про-

цессами перехода от исходного состояния поверхности к рабочему (приработка) и процессы вторичного эксплуатационного формирования геометрии поверхности и свойств поверхностных слоев.

Обоснованное решение этой комплексной задачи осуществляется с помощью теории износа при нормальных условиях трения, учета граничных условий перехода к патологическим процессам при трении, знания закономерностей формирования геометрического строения обработанных поверхностей, теории и практики упрочняющей технологии, теории физико-химического действия рабочих сред в зоне трения.



## Литература



1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиз, 1963.
2. Баканов Е. А., Германчук Ф. К. Методика и некоторые результаты испытания фрикционных материалов тормозных устройств самолетов в газовых средах. В сб.: «Вопросы технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей ГА», вып. 3, Киев, Изд-во КИИГА, 1966.
3. Барбалат Б. М. Изучение переходных процессов при изнашивании в условиях нормальных и аварийных режимов эксплуатации. В сб.: «Трение, смазка и износ деталей машин», вып. V, Киев, Изд-во КИИГА, 1964.
4. Блантер М. Е., Меташоп Л. В. и Арцибушева Э. Н. Методика выявления дислокационного строения аустенитной стали методом травления. «Заводская лаборатория», 1964, № 1.
5. Богомолов Г. И. Чистота поверхности при абразивной доводке металлов с различными механическими свойствами. «Труды семинара по качеству поверхности деталей машин», сб. 5, М., Изд-во АН СССР, 1961.
6. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка. М., Машгиз, 1960.
7. Бочвар А. А. О разных механизмах пластичности в металлических сплавах. «Известия АН СССР. ОТН», 1948, № 5.
8. Браун А. Ф. Поверхностные явления при пластической деформации металлов. «Успехи физических наук», т. LXII, вып. 3, июль, 1957.
9. Бучин М. Н. К вопросу о трении несмазанных тел. Исследования в области машиноведения. М., Изд-во АН СССР, 1944.
10. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
11. Векшинский С. А. Новый метод металлографического исследования сплавов. М., ОГИЗ, 1944.
12. Вейлер С. Я., Лихтман В. И. Действие смазок при обработке металлов давлением. М., Изд-во АН СССР, 1960.
13. Вуд У. А. Некоторые результаты исследования природы усталости металлов. Усталость и выносливость металлов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
14. Гардин А. И. Электронная микроскопия стали. М., Metallurgizdat, 1954.
15. Гордиенко Л. К., Одинг И. А. Изменение механических свойств и микроструктуры металлов в процессе ползучести. «Известия АН СССР. ОТН. Metallurgiya и toplivo», 1959, № 6.
16. Елизаветин М. А. и Сатель Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. М., «Машиностроение», 1964.
17. Дьяченко П. Е. Современные направления в области обеспечения высокого качества поверхностей деталей. М., НТО Машпром, Общественный университет, 1960.
18. Гребенчиков И. В. Роль химии в процессе полировки. «Сорена», 1935, № 2.
19. Гилман Дж., Джонстон В. Дислокации и механические свойства кристаллов. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
20. Дерягин Б. В. Что такое трение? М., Изд-во АН СССР, 1963.
21. Дерягин Б. В. Молекулярная теория трения скольжения. «Журнал физической химии», вып. 9, 1934, № 5.
22. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М., Изд-во АН СССР, 1962.
23. Дьяченко П. Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки. М., Изд-во АН СССР, 1949.
24. Дьяченко П. Е. Влияние шероховатости поверхности на ее износ. В сб.: «Качество поверхности деталей машин», Кн. 11, ЛОНИТОМАШ. М., Машгиз, 1950.
25. Дьяченко П. Е. и Вайнштейн В. Э. Волнистость стальной поверхности и ее влияние на износ подшипниковых материалов. В сб.: «Качество поверхности деталей машин», № 2, М., Изд-во АН СССР, 1953.
26. Дьяченко П. Е., Вайнштейн В. Э., Розенбаум Б. С. Количественная оценка неровностей обработанных поверхностей. М., Изд-во АН СССР, 1952.
27. Егоров В. А. Оптические и шуповые приборы для измерения шероховатости поверхности. М., «Машиностроение», 1965.
28. Егоров В. А. и Лабутина Т. С. Приборы для определения шероховатости поверхности. «Стандартизация», 1962, № 5.
29. Епифанов Г. И. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки. В сб.: «Сухое трение». Изд-во АН Латв. ССР, 1961.
30. Епифанов Г. И. Влияние адгезии на процесс внешнего трения чистых поверхностей. В сб.: «Сухое трение». Изд-во АН Латв. ССР, 1961.
31. Епифанов Г. И., Гляголев Н. И., Ребиндер П. А. Влияние поверхностно-активных сред на поверхностный наклеп металлов. «Доклады АН СССР», т. 123, 1958, № 4.
32. Зайцев О. В. Исследование упругой и пластической деформации их соотношения при внешнем трении. Автореферат диссертации. Киев, 1968.
33. Запорожец В. В. Исследование внешнего трения и износа путем анализа спектра колебаний. В сб.: «Трение, смазка и износ деталей машин», вып. V, Киев, Изд-во КИИГА, 1964.
34. Иванова В. С. Механизм пластической деформации при действии циклических нагрузок. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1960, № 4.
35. Иванова В. С. Исследование роли границ зерен в развитии процесса усталости. «Известия АН СССР. ОТН. Metallurgiya и toplivo», 1962, № 6.
36. Иванова В. С. Усталостное разрушение металлов. М., Metallurgizdat, 1963.
37. Иванова В. С. К вопросу о механизме зарождения усталостных трещин в металлах. «Известия АН СССР. ОТН. Metallurgiya и toplivo», 1961, № 3.
38. Иванова В. С., Гордиенко Л. К. Экспериментальное исследование некоторых положений структурной теории ползучести. «Металловедение и обработка металлов», 1958, № 6.

39. Иванова В. С., Гордиенко Л. К. О влиянии циклического нагружения на физические свойства металла. В сб.: «Прочность металлов при переменных нагрузках». М., Изд-во АН СССР, 1963.
40. Негер Д. Движущиеся источники тепла и температура трения. «Прикладная механика и машиностроение», 1952, № 6.
41. Инденбаум Г. В., Фишман Ю. М. Распределение дислокаций и примесей в монокристаллах Al, полученных в условиях неравномерного затвердевания, и их поведение при отжиге. «Физика металлов и металловедение», т. 17, вып. 3, 1964.
42. Каданер Л. И. Новейшие достижения гальваностегии. Харьков, Изд-во ХГУ, 1951.
43. Камнев Н. А. Выбор и получение оптимальной чистоты поверхности хромированных цилиндров двигателей. «Труды семинара по качеству поверхности деталей машин», М., Изд-во АН СССР, 1955.
44. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела. М., «Наука», 1965.
45. Кислик В. А. Износ деталей паровозов. М., Трансжелдориздат, 1948.
46. Клейменов Ю. В. Профилограф-профилометр блочной конструкции. «Труды семинара по качеству поверхности деталей машин», сб. 5, М., Изд-во АН СССР, 1961.
47. Конвисаров Д. В. Трение и износ металлов. М., Машгиз, 1948.
48. Конвисаров Д. В. Износ металлов. М., ОНТИ, 1938.
49. Копань В. С., Хименко М. В. Про скидоутворювання у золотому мікродроті. «Український фізичний журнал», 1965, № 10.
50. Костецкий Б. И. Основные задачи теории внешнего трения. Тезисы IV Киевской научно-технической конференции по вопросам повышения износостойкости и срока службы машин. Киев, НТО Машпром, 1966.
51. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. Киев, Машгиз, 1959.
52. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин. Киев, Машгиз, 1960.
53. Костецкий Б. И. Шлифование закаленной стали. Киев, Гостехиздат УССР, 1947.
54. Костецкий Б. И., Едигорьян Ф. С. Классификация основных видов износа и элементы теории износа при трении качения. В сб.: «Труды КИГВФ». Киев, Изд-во КИГВФ, 1964.
55. Костецкий Б. И., Запорожец В. В. Анализ спектра колебаний при внешнем трении. «Доклады АН УССР», 1964, № 10.
56. Костецкий Б. И., Колесниченко Л. Ф. Влияние поверхностно-активной среды на изменение тонкой кристаллической структуры железа при упрочнении пластическим деформированием. «Доклады АН СССР», т. 157, 1964, № 4.
57. Костецкий Б. И., Колесниченко Л. Ф. Изменение дислокационной структуры стали при деформации в присутствии поверхностно-активных веществ. «Доклады АН СССР», т. 157, 1964, № 3.
58. Костецкий Б. И., Колесниченко Н. Ф. Пластическая деформация и топография поверхностей трения. «Физико-химическая механика материалов», 1966, № 1.
59. Костецкий Б. И., Колесниченко Н. Ф., Шевеля В. В. Качество поверхности и эксплуатация машин. Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции по технологическим ме-

- тодам повышения точности, надежности и долговечности в машиностроении. Одесса, НТО Машпром, 1966.
60. Костецкий Б. И., Колесниченко Н. Ф. Изучение пластической деформации при трении I и II рода и построение дислокационных моделей. Тезисы докладов III Межвузовской конференции по проблеме прочности и пластичности металлов. Петрозаводск, Изд-во Петрозаводского госуниверситета, 1963.
61. Костецкий Б. И., Колесниченко Н. Ф. Исследование физического рельефа и структуры поверхностей при трении. Повышение износостойкости и срока службы машин. Тезисы докладов IV Киевской научно-технической конференции по вопросам износостойкости и срока службы машин. Киев, НТО Машпром, 1966.
62. Костецкий Б. И., Колесниченко Л. Ф., Островой Ю. Д., Натансон М. Э., Скарченков К. З., Топеха П. К. Присадки к смазочным маслам и их действие при трении. «Физико-химическая механика материалов», 1965, № 1.
63. Костецкий Б. И., Никулин Г. В. Роль кислорода при действии добавок поверхностно-активных веществ в процессах трения, смазки и износа металлов. «Доклады АН СССР», т. 182, 1968, № 3.
64. Костецкий Б. И., Мамин Г. Н. О двойственной роли кислорода при трении качения. «Доклады АН СССР», т. 162, 1965, № 4.
65. Костецкий Б. И., Кучерявый А. И., Колесниченко Л. Ф. О физической сущности процесса шлифования закаленной стали. В сб.: «Высокопроизводительное шлифование». М., Изд-во АН СССР, 1962.
66. Костецкий Б. И., Кучерявый А. И., Куюн А. И. Структура и свойства поверхности при шлифовании стали. «Труды семинара по качеству поверхности деталей машин», сб. 5, М., Изд-во АН СССР, 1961.
67. Костецкий Б. И., Назаренко П. В. Зависимость между силой внешнего трения и нормальным давлением в связи с изменением дислокационной структуры. «Доклады АН СССР», т. 159, 1965, № 1.
68. Костецкий Б. И., Назаренко П. В. Применение теории дислокации при исследованиях внешнего трения кристаллических тел. Тезисы докладов III Межвузовской конференции по проблеме прочности и пластичности металлов. Петрозаводск, Изд-во Петрозаводского госуниверситета, 1963.
69. Костецкий Б. И., Назаренко П. В. Исследование дислокационной структуры при трении покоя и движения. «Физико-химическая механика материалов», 1965, № 1.
70. Костецкий Б. И., Назаренко П. В. Взаимодействие поверхностей при внешнем трении твердых тел. «Доклады АН СССР», т. 160, 1965, № 1.
71. Костецкий Б. И. и др. Классификация металлов и сплавов по износостойкости. В сб.: «Трение и износ в машинах», № 1, М., Изд-во АН СССР, 1958.
72. Костецкий Б. И., Носовский И. Г. Износостойкость и антифрикционные свойства деталей машин. Киев, «Техніка», 1965.
73. Костецкий Б. И., Натансон М. Э., Скарченков К. З., Топеха П. К. О подборе присадок к смазочным маслам. Теория смазочного действия и новые материалы. М., «Наука», 1965.
74. Костецкий Б. И., Натансон М. Э., Скарченков К. З., Топеха П. К. Новый метод испытания смазочных масел. Тезисы



- докладов IV Киевской конференции по повышению износостойкости и срока службы машин. Киев, НТО Машпром, 1966.
75. Костецкий Б. И., Островой Ю. Д. Влияние газовых сред на действие поверхностно-активных присадок при граничном трении. В сб.: «Трение, смазка и износ деталей машин», вып. IV, Киев, Изд-во КИИГА, 1964.
76. Костецкий Б. И., Ивженко И. П. Исследование диффузионных процессов в поверхностных слоях металлов при трении и построение дислокационных моделей. Тезисы докладов III межвузовской конференции по проблеме прочности и пластичности металлов. Петрозаводск, Изд-во Петрозаводского государственного университета, 1963.
77. Костецкий Б. И., Ивженко И. П. Дислокационная модель процессов холодной сварки металлов. «Автоматическая сварка», 1964, № 5.
78. Костецкий Б. И., Топеха П. К., Носовский И. Г. Вторичные структуры при трении металлов. В сб.: «Трение и износ в машинах», № 1, М., Изд-во АН СССР, 1958.
79. Костецкий Б. И., Филиппук И. К. Контактная прочность машиностроительных материалов. М., «Наука», 1964.
80. Коттрел А. Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М., Металлургиздат, 1958.
81. Коттрел А. Х. Строение металлов и сплавов. М., Металлургиздат, 1961.
82. Конторова Т. А. и Френкель Я. И. К теории пластической деформации и двойничания. «Журнал экспериментальной и теоретической физики», т. 8, вып. 1, 12, 1938.
83. Крагельский И. В. Молекулярно-механическая теория трения. Вторая Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах. Доклады, т. III, М., Изд-во АН СССР, 1949.
84. Крагельский И. В. Влияние шероховатости поверхности на трение. М., Изд-во АН СССР, 1946.
85. Крагельский И. В. Влияние нагрузки на изменение шероховатости контактных поверхностей. В сб.: «Трение и износ в машинах», т. V, М., Изд-во АН СССР, 1950.
86. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. М., Изд-во АН СССР, 1956.
87. Крагельский И. В. Трение и износ. М., Машгиз, 1962.
88. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. М., Машгиз, 1962.
89. Крамер И. Р., Демер Л. И. Влияние среды на механические свойства кристаллов. М., Металлургиздат, 1964.
90. Курдюмов В. Г., Орлов Л. Г. и Усиков М. П. Утоньшение металлических образцов электролитической полировкой для исследования в просвечивающем электронном микроскопе. «Заводская лаборатория», 1961, № 12.
91. Курносов Д. Г., Тронина Н. М., Якутович М. В. О распределении деформации по объему металлических кристаллов при деформировании их скольжением. «Журнал технической физики», т. XVIII, вып. 2, 1948.
92. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, т. IV, Томск, Полиграфиздат, 1947.
93. Кушир И. П. Наблюдение дислокаций в микрокристаллах железа методом травления. «Кристаллография», т. 7, вып. 2, 1962.
94. Качество поверхности деталей машин. «Труды семинара по каче-

- ству поверхности деталей машин», сб. № 1, 2, 3, 4, 5, М., Изд-во АН СССР, 1951.
95. Лашко Н. Ф. Упрочнение и разупрочнение металлов. М., Оборонгиз, 1951.
96. Левитский Г. С. Хромирование деталей машин и инструмента. М., Машгиз, 1951.
97. Лихтман В. И., Ребиндер П. А., Карпенко Г. В. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов. М., Изд-во АН СССР, 1954.
98. Лихтман В. И., Шукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М., Изд-во АН СССР, 1962.
99. Лихтман В. И., Шукин Е. Д. Поверхностные явления в процессах деформации и разрушения металлов. «Успехи химии», т. 29, 1960, № 10.
100. Лихтман В. И., Островский В. С. О влиянии окисных пленок на механические свойства монокристаллов кадмия. «Доклады АН СССР», т. 93, 1953, № 1.
101. Лозинский М. Г. Строение и свойства металлов и сплавов при высоких температурах. М., Металлургиздат, 1963.
102. Лозинский М. Г., Перцовский Н. З. Основные виды деформационных микрорельефов, возникающих при повышенных температурах в поликристаллических металлах с гтк решеткой. «Известия АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1962, № 1.
103. Лозинский М. Г., Ференц В. Я. Экспериментальное определение роли границ зерен в общей деформации платины при растяжении с постоянной скоростью и нагреве от 20° до 1000°. В сб.: «Физика металлов и металловедение», т. 16, вып. 3, М., «Наука», 1963.
104. Лонгинов М. Ф. и Зверева В. А. Получение тонких пластин для изучения металлов в электронном микроскопе на просвет. «Заводская лаборатория», 1961, № 5.
105. Лукьянович В. М. Электронная микроскопия в физико-химических исследованиях. М., Изд-во АН СССР, 1960.
106. Любимова Т. Ю. и Ребиндер П. А. Возрастание упрочнения металлов при периодическом деформировании под влиянием поверхностно-активной смазки. «Доклады АН СССР», т. 63, 1948, № 2.
107. Любимова Т. Ю., Шрейнер Л. А., Ребиндер П. А. Развитие зоны пластической деформации и наклепа при деформировании металла в присутствии поверхностно-активных веществ. «Доклады АН СССР. Новая серия», т. 63, 1948, № 3.
108. Любимова Т. Ю. Влияние адсорбции из окружающей среды на степень наклепа металлов при периодическом деформировании. «Журнал технической физики», т. 20, 1950, № 11.
109. Мак Лин. Механические свойства металлов. М., Металлургиздат, 1965.
110. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М., Машгиз, 1956.
111. Махлин Е. С. Состояние поверхности и прочностные свойства. В сб.: «Механизмы упрочнения твердых тел». М., Металлургиздат, 1965.
112. Мортон К. Смит. Основы физики металлов. М., Металлургиздат, 1962.
113. Металловедение и термическая обработка. Справочник. М., Металлургиздат, 1957.
114. Одинг И. А. Современные представления о механизмах пла-

- стической деформации и разрушения при ползучести металлов. «Известия АН СССР», 1954, № 8.
115. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М., Машгиз, 1962.
116. Одинг И. А., Иванова В. С. Исследование локальности пластической деформации при активном растяжении. «Известия АН СССР. ОТН», 1953, № 1.
117. Одинг И. А. Теория дислокаций в металлах и ее применение. М., Изд-во АН СССР, 1959.
118. Орлов А. Н. К теории источников Франка-Рида. «Физика металлов и металловедение», т. 13, вып. 1, 1962.
119. Орлов А. Н. Кинетика дислокаций со ступеньками в простой кубической решетке. «Физика твердого тела», т. 4, вып. 4, 1962.
120. Орлов Л. Г., Усиков М. П., Утевский Л. М. Наблюдение дислокаций в металлах с помощью электронного микроскопа. «Успехи физических наук», т. LXXVI, вып. 1, 1962.
121. Павлов В. А. Физические основы пластической деформации металлов. М., Изд-во АН СССР, 1962.
122. Панченко Е. В. и др. Лаборатория металлографии. М., «Металлургия», 1965.
123. Пашков П. О., Братухина В. А. О распределении пластической деформации в поликристаллических металлах. В сб.: «Физика металлов и металловедение», т. VI, вып. 1, М., «Наука», 1958.
124. Пашков П. О. Периодичность деформации при пластическом растяжении и сжатии крупнозернистой стали. «Журнал технической физики», т. XIX, вып. 3, 1949.
125. Пилянкевич А. Н. Практика электронной микроскопии. М., Машгиз, 1961.
126. Попилов Л. Я. Технология электрополирования металлов. М., Машгиз, 1953.
127. Попилов Л. Я., Зайцева Л. П. Электрополирование и электро травление металлографических шлифов. М., Metallurgizdat, 1963.
128. Плишко Д. С. Износостойкость хромированных деталей авиационных двигателей. В сб.: «Труды КИГВФ». Киев, Изд-во КИГВФ, 1959.
129. Предводителев А. А., Бушуева Г. В., Степанова В. М. Исследование дислокационной структуры в кристаллах методом избирательного травления. «Физика металлов и металловедение», т. 14, вып. 5, 1962.
130. «Примеси и дефекты». Сб. М., Metallurgizdat, 1960.
131. Пузанков В. В. Исследование оптимальной чистоты поверхности трущихся пар. В сб.: «Качество поверхности деталей машин», М., Изд-во АН СССР, 1959, № 4.
132. Ребиндер П. А. Физико-химическое исследование процессов деформации твердых тел. Юбилейный сборник АН СССР к XXX-летию Великой Октябрьской социалистической революции, т. I, М.-Л., Изд-во АН СССР, 1947.
133. Ребиндер П. А., Физико-химическая механика. М., «Знание», 1958.
134. Регель В. Р., Урусовская А. А. и Коломийчук В. Н. Выявление выходов дислокаций на поверхность кристалла методом травления. «Кристаллография», т. 4, вып. 6, 1959.
135. Рид В. Т. Дислокации в кристаллах. М., Metallurgizdat, 1957.
136. Ровинский Б. М., Гальперин М. Я., Костюкова Е. П.

- О влиянии циклического нагружения на структуру деформированных чистых металлов. «Известия АН СССР. ОТН. Metallургия и топливо», 1959, № 4.
137. Розенберг В. М. Оценка вклада границ зерен в общую деформацию при ползучести. «Заводская лаборатория», 1959, № 1.
138. Розенберг В. М. Оценка величины и ориентировки субзерен, возникших при ползучести на поверхности и внутри образца. «Физика металлов и металловедение», т. IX, вып. 4, 1960.
139. Русев Р. Д. Субструктура и расположение дислокаций в деформированной мягкой стали. «Металловедение и термическая обработка», 1963, № 3.
140. Смит Д. Ж. Физическая сущность процесса усталости и разрушения металлов при переменных нагрузках. В сб.: «Усталость металлов», М., Изд-во иностр. лит., 1961.
141. Соловьев С. Н. Повышение контактной усталостной прочности стали сульфиданированием. Тезисы докладов IV Киевской конференции по повышению износостойкости и срока службы машин. Киев, НТО Машпром, 1966.
142. Собркин Л. М. Электролизное борирование вальцовочных штампов. «Вестник машиностроения», 1966, № 5.
143. Степанов А. В., Донской А. В. Тезисы совещания физической секции по вопросам физики прочности и пластичности твердых тел. М., Изд-во АН СССР, 1952.
144. Сб. «Элементарные процессы роста кристаллов». М., Изд-во иностр. лит., 1959.
145. Сб. «Физические основы прочности и пластичности металлов». М., Metallurgizdat, 1963.
146. Сб. «Дислокации и механические свойства кристаллов». М., Изд-во иностр. лит., 1960.
147. Тененбаум М. М. Исследование изменений микрогеометрии трущихся поверхностей в период приработки. В сб.: «Исследование автомобильных материалов и деталей», вып. 53, М., Машгиз, 1948.
148. Тененбаум М. М. Анализ изменений микрогеометрии при трении баббита о сталь. В сб.: «Трение и износ в машинах», т. VI, М., Изд-во АН СССР, 1950.
149. Тененбаум М. М. Анализ изменений шероховатости обработанных поверхностей. «Заводская лаборатория», 1950, № 2.
150. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. М., «Машиностроение», 1966.
151. Томас Г. Электронная микроскопия металлов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
152. Томпсон Н. О ранней стадии усталостного разрушения. «Усталость и выносливость металлов», М., Изд-во иностр. лит., 1963.
153. Топеха П. К. Основные виды износа металлов. Киев, Машгиз, 1952.
154. «Техника электронной микроскопии». Сб. М., «Мир», 1965.
155. Урусовская А. А. Образование областей с переориентированной решеткой при деформации моно- и поликристаллов. В сб.: «Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов». М., Изд-во АН СССР, 1960.
156. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М., «Мир», 1966.
157. Френкель Я. И. Введение в физику металлов. М., Физматгиз, 1958.
158. Федотьев Н. П., Грилихес С. Я. Электрохимическое трав-

- ление, полирование и оксидирование металлов. М.-Л., Машгиз, 1957.
159. Хрущов М. М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. М., Изд-во АН СССР, 1946.
160. Хемпель М. Р. Полосы сдвига, двойникование и процессы выпадания частиц при переменных нагрузках. Усталость и выносливость металлов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
161. Швецова Е. М., Крагельский И. В. Классификация видов разрушения поверхностей деталей машин в условиях сухого и граничного трения. Трение и износ в машинах, сб. VIII, Изд-во АН СССР, 1953.
162. Щедров В. С. Температура на скользящем контакте. В сб.: «Трение и износ в машинах», Изд-во АН СССР, 1955, № 10.
163. Щукин Е. Д. Критерий деформируемости кристалла и адсорбционные эффекты. «Доклады АН СССР», т. 118, 1958, № 6.
164. Щукин Н. Д., Ребиндер П. А. Образование новых поверхностей при деформировании и разрушении твердого тела в поверхностно-активной среде. «Коллоидный журнал», т. 20, 1958, № 5.
165. «Электрические методы обработки металлов». Сб. М., Машгиз, 1951.
166. Яковлева Э. С. Механизм пластической деформации и механические свойства алюминия. «Физика металлов и металловедение», т. IV, вып. 1, 1957.
167. Якутович М. В., Яковлева Э. С., Леринман Р. М., Буйнов Н. Н. Электронномикроскопическое изучение деформированных кристаллов алюминия. М., Изд-во АН СССР, 1950.
168. Adams M. A., Acta Met., 6, 1958, p. 327.
169. Berghezan A. and Fourdeux A., J. Appl. Phys., 30, 1959.
170. Boas W., Proc. Roy. Soc., v. 193, № 1032, 1948.
171. Bollmann W., Phys. Rev., 103, 1956.
172. Broom T., Ham R. K., Proc. Roy. Soc., A242, 166, 1957.
173. Bowden F. P. and Tubor D., The Friction and Lubrication of Solids, Part II, Oxford, 1964.
174. Block H., Proc. of the Genetal Discussion on Lubrication and Lubricants, v. 2, The inst. of Mech. Eng., London, p. 14—20, October, 1937.
175. Cottrell A. H., Inst. Met. Monograph and Report Series, 1957.
176. Cottrell A. H., Hull D., Proc. Roy. Soc., A242, 211, 1957.
177. Cottrell A. H., Gibbons D. F., Nature, 162, 1948, p. 488.
178. Ernst and Merchant, Chip formation, friction and high quality machined surfaces. Surface Treatment of Metals. Soc. of Metals, 1941.
179. Eshelby I. D., Frank F. C., Nabarro F. R., Phyl. Mag., 42, 351, 1951.
180. Ewing J., Humfrey S., Phil. Trans. Roy. Soc., A200, 241, 1963.
181. Forsyth P. J. E., Nature, v. 171, 172, 1953.
182. Forsyth P. J. E., Proc. Intern. Conference on Fatigue of Metals, London, 535, 1956.
183. Franks A., Holden J., Nature, 176, 1022, 1955.
184. Frank F. C. and Read W. T., Phys. Rev., 79, 1950.
185. Garstone J., Honeycombe R. W. K., Greetham G., Acta Met., 4, 1956, p. 485.
186. Gammon R. D. M., Rosenberg H. M., Phil. Mag., 10, 964, 1956; Proc. Roy. Soc., A242, 203, 1957.
187. Gilman, Nature, 169, 1952, p. 149.
188. Grosskreitz J. C., Shaw G. G., Phyl. Mag., 10, № 108, 1964.
189. Ham R. K., Symposium on Point Defects in Metals and Alloys Inst. Metals, 1957.
190. Heidenroich D., J. Appl. Phys., 20, 1949.
191. Hirsch P. B., Howie A. and Whelan M. G., Philos. Trans. Roy. Soc., London, 1960.
192. Hirsch P. B., Horn R. W. and Whelan M. G., Philos. Mag., 1, 1956.
193. Hull D. J., Phil. Mag., v. 3, № 29, 1958, p. 513.
194. Jaquet P. A., International Conference on Fatigue of Metals, Inst. Mech. Engrs., London, 506, 1956.
195. Kato N., J. Soc. Japan, 7, 1952; 8, 1953.
196. Kelly P. M. and Nutting G., J. Inst. Metals, 87, 1959.
197. King R., Nature, v. 169, 1952, p. 543.
198. Lyssitt F. R., King R., Proc. Phys. Soc., 1370, 6, 1957, p. 608.
199. Reimer L., Z. Metallkunde, 50, 1959.
200. Roscol R., Nature, 133, 1934, p. 912.
201. Rosi F. D., Acta Met., 5, 1957, p. 348.
202. Saulnier A., Bull. Microsc. Appl., 10, 1960.
203. Segall R. L., Partridge P. G., Phil. Mag., 4, 44, 912, 1959.
204. Takahashi H. and Kazato K., Compt. rend, 243, 1956.
205. Thompson N., International Conference on Fatigue of Metals, Inst. Mech. Engrs., London, 526, 1956.
206. Thompson N., Wadsworth N. J., Lonat N., Phil. Mag., 1, N. 2, 113, 1956.
207. Whelan M. G., J. Inst. Metals, 87, 1959.
208. Wadsworth N. J., Conference on Dislocations and Mechanical Properties of Crystals, 490, 1956.
209. Whelan M. G. and Hirsch P. B., Philos. Mag., 2, 1957.
210. Wilsdorf H. G. F., Structure and properties of thin film, New-Jork—London, J. Wiley, 1959.
211. Wilsdorf H., Kuhlmann-Wilsdorf D., Acta Metall., 1, 394, 1953.
212. Wilson R. N., Forsyth P. J. E., J. Inst. Met., 87, 336, 1958.
213. Wood W. A., Segall R. L., Proc. Roy. Soc., A242, 1229, 180, 1957.



## Содержание

|   |     |
|---|-----|
| Предисловие . . . . .   | 5   |
| <i>Глава 1. Понятие о качестве поверхности деталей машин</i>  | 7   |
| 1. Основные характеристики качества поверхности . . . . .   | 8   |
| Геометрия поверхности . . . . .   | 8   |
| Физико-химико-механические свойства поверхностных слоев и напряжения в них . . . . .  | 16  |
| 2. Исходное (технологическое), рабочее (эксплуатационное) и остаточное состояние поверхностей и поверхностных слоев деталей машин . . . . . | 24  |
| <i>Глава 2. Качество обработанных поверхностей, внешнее трение и период приработки деталей машин</i>  | 31  |
| 3. Внешнее трение . . . . .   | 32  |
| Теории внешнего трения . . . . .  | 32  |
| Физика процесса внешнего трения . . . . .   | 38  |
| Взаимодействие поверхностей при внешнем трении . . . . .  | 39  |
| Производные (вторичные) процессы при внешнем трении . . . . .   | 47  |
| 4. Качество поверхности при основных видах технологической обработки . . . . .  | 51  |
| 5. Приработка трущихся сопряжений . . . . .   | 59  |
| <i>Глава 3. Качество поверхности при эксплуатации деталей машин</i>   | 73  |
| 6. Теория несовершенств кристаллического строения и механизмы пластической деформации . . . . .   | 74  |
| 7. Экспериментальные методы изучения состояния поверхности металлов . . . . .   | 89  |
| Методика изучения топографии поверхностей на электронном микроскопе . . . . .   | 89  |
| Обнаружение дислокаций с помощью ямок травления . . . . .   | 95  |
| Прямое электронно-микроскопическое исследование дислокационной структуры металла . . . . .  | 98  |
| 8. Элементы формирования рабочего рельефа поверхностей деталей машин при действии отдельных факторов . . . . .                              | 101 |
| Рельеф поверхности при статической деформации растяжением и сжатием . . . . .   | 101 |
| Рельеф и структура поверхности при циклическом нагружении . . . . .   | 112 |
| Пленки окислов и рельеф поверхности . . . . .   | 115 |
| Адсорбция смазки и рельеф поверхности . . . . .   | 120 |
| Рельеф и структура поверхности при статическом контакте . . . . .   | 124 |
| Рельеф и структура поверхности при трении движения . . . . .  | 126 |
| 9. Классификация рабочего рельефа деталей машин . . . . .   | 130 |
| Рельеф поверхности при нормальных условиях эксплуатации . . . . .   | 131 |

|   |     |
|---|-----|
| Рельеф поверхностей деталей машин, возникающий при недопустимых процессах трения и износа . . . . .                                   | 144 |
| <i>Глава 4. Качество поверхности и закономерности внешнего трения и износа деталей машин</i>  | 155 |
| 10. Качество поверхности, формирование сил внешнего трения и задачи обеспечения антифрикционности и фрикционности в машинах . . . . . | 155 |
| Микротрибометр для изучения сил трения . . . . .  | 157 |
| Статическая деформация и силы трения . . . . .  | 159 |
| Динамическая деформация и силы трения . . . . .   | 162 |
| Пленки окислов и силы трения . . . . .  | 162 |
| Адсорбция смазки и силы трения . . . . .  | 163 |
| Текстурирование металла поверхностных слоев и силы трения . . . . .   | 165 |
| Виды разрушения поверхностей (износ) и силы трения . . . . .  | 168 |
| Технологический рельеф и силы трения . . . . .  | 173 |
| Структура поверхности при трении покоя и движения . . . . .   | 178 |
| Качество поверхности, антифрикционность и фрикционность в машинах . . . . .   | 180 |
| 11. Качество поверхности и износостойкость деталей машин . . . . .  | 184 |
| Л и т е р а т у р а . . . . .   | 204 |



**Костецкий Борис Иванович,**  
*докт. техн. наук*  
**Колесниченко Нина Федоровна,**  
*инж.*

**Качество поверхности  
и трение в машинах**

Редактор издательства инж. *М. Г. Ведмеденко*  
Переплет художника *В. Б. Лопарева*  
Художественные редакторы *Б. В. Валуенко, Н. Ф. Соловьева*  
Технический редактор *Н. И. Возный*  
Корректор *Г. Н. Захарченко*



Сдано в набор 3.VI 1968 г. Подписано к печати  
22.I 1969 г. Формат бумаги 84×108<sup>1/32</sup>. Объем: 6,75  
физ. л.; 11,34 усл. л.; 11,92 уч.-изд. л. Тираж 4800.  
Зак. № 197. БФ 01140. Цена 1 руб. 42 коп.  
Издательство «Техніка», Киев, 4, Пушкинская, 28.  
Книжная фабрика «Октябрь» Комитета по печати  
при Совете Министров УССР, Киев, Артема, 23-а.