



В книге изложены основные положения теории износостойкости и антифрикционности деталей машин. Дан анализ физических, химических и механических процессов, происходящих в зоне трения и зависящих от условий нагружения, смазочных сред, материалов и методов их обработки. Описаны пути устранения недопустимых видов износа и воздействия на износостойкость и антифрикционность с помощью конструктивных, технологических и эксплуатационных средств.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся изготовлением, экс-

плуатацией и ремонтом машин.

Рецензент докт. техн. наук Г. А. Прейс

Редакция литературы по вопросам машиностроения и транспорта

Заведующий редакцией инж. М. А. Василенко

КИЕВСКАЯ КНИЖНАЯ Ф-КА «ОКТЯБРЬ»

С увеличением мощности и быстроходности машин, с ростом автоматизации, усложнением условий эксплуатации задача повышения качества машин становится особенно важной. В общей проблеме надежности и долговечности машин основная роль принадлежит вопросам трения, смазки и износа.

На долговечность, надежность и точность работы машины в первую очередь влияет состояние и свойства тончайших слоев металла, граничащих с поверхностями трения. Поэтому вопросам качества поверхностей трения, их форме, степени шероховатости, волнистости, твердости, химической стойкости, теплостойкости и напряженному состоянию уделяется такое большое внимание. Постоянно разрабатываются оптимальные геометрические и микрогеометрические формы поверхностей трения, новые методы упрочняющей технологии и новые материалы.

Большая роль в борьбе с износом деталей машин принадлежит жидким и консистентным смазочным материалам с различными легирующими добавками, а также твердым смазочным материалам.

Рациональное применение существующих средств и разработка новых путей борьбы с износом машин требует строгого учета условий эксплуатации машин и характера разрушения поверхностей трения. Повышение надежности и долговечности работы машин может быть достигнуто в результате применения комплекса конструктивных, технологических и эксплуа-

тационных мероприятий.

Приведенные в книге материалы представляют собой в основном результаты многолетних исследований вопросов трения, смазки и износа. В исследовательских работах были применены современные методы, приборы и испытательные машины; использованы данные передовых машиностроительных заводов СССР по решению практических вопросов увеличения сроков службы и надежности работы машин, материалы обсуждений и дискуссий по вопросам трения, а также основные работы по этим вопросам, опубликованные в последнее время за рубежом.

Замечания и пожелания просим направлять по адресу Киев, 4, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

radba

ФИЗИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МЕТАЛЛА ПРИ ВНЕШНЕМ ТРЕНИИ

взаимодействие их поверхностных связей, их работа и разрушение. Это взаимодействие приводит к упруго-пластической деформации поверхностных слоев трущихся деталей, которая в свою очередь способствует возникновению и развитию вторичных физических, химических и механических процессов. Для анализа процессов упруго-пластической деформации и всех вызванных ими вторичных явлений необходимо рассмотреть взаимодействие поверхностей при трении, установить причину возникновения поверхностных связей и механизм их работы и разрушения в процессе трения.

Исследования этих вопросов делятся на три группы. В исследованиях первой группы взаимодействие поверхностей при внешнем трении объясняется как результат механического зацепления или внедрения микрошероховатостей трущихся поверхностей (Д. Лесли, Л. Гюмбель, Г. И. Епифанов).

В исследованиях второй группы взаимодействие поверхностей объясняется как результат действия атом-

Большая роль в борьбе с износом деталей машин принадлежит жидким и консистентным смазочным материалам с различными легирующими добавками, а также твердым смазочным материалам.

Рациональное применение существующих средств и разработка новых путей борьбы с износом машин требует строгого учета условий эксплуатации машин и характера разрушения поверхностей трения. Повышение надежности и долговечности работы машин может быть достигнуто в результате применения комплекса конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий.

Приведенные в книге материалы представляют собой в основном результаты многолетних исследований вопросов трсния, смазки и износа. В исследовательских работах были применены современные методы, приборы и испытательные машины; использованы данные передовых машиностроительных заводов СССР по решению практических вопросов увеличения сроков службы и надежности работы машин, материалы обсуждений и дискуссий по вопросам трения, а также основные работы по этим вопросам, опубликованные в последнее время за рубежом.

Замечания и пожелания просим направлять по адресу Киев, 4, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

ragea

ФИЗИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МЕТАЛЛА ПРИ ВНЕШНЕМ ТРЕНИИ

в основе внешнего трения деталей машин лежит взаимодействие их поверхностей, т. е. образование поверхностных связей, их работа и разрушение. Это

взаимодействие приводит к упруго-пластической деформации поверхностных слоев трущихся деталей, которая в свою очередь способствует возникновению и развитию вторичных физических, химических и механических процессов. Для анализа процессов упруго-пластической деформации и всех вызванных ими вторичных явлений необходимо рассмотреть взаимодействие поверхностей при трении, установить причину возникновения поверхностных связей и механизм их работы и разрушения в процессе трения.

Исследования этих вопросов делятся на три группы. В исследованиях первой группы взаимодействие поверхностей при внешнем трении объясняется как результат механического зацепления или внедрения микрошероховатостей трущихся поверхностей (Д. Лесли, Л. Гюмбель, Г. И. Епифанов).

В исследованиях второй группы взаимодействие поверхностей объясняется как результат действия атом-

но-молекулярных сил притяжения между трущимися поверхностями (И. Дезагюлье, В. Гарди, Г. Томплинсон, Ф. Боуден и Д. Тейбор, Б. В. Дерягин, В. Д. Кузнецов).

В исследованиях третьей группы причиной возникновения поверхностных связей считается одновременное действие атомно-молекулярных сил и механического зацепления микрошероховатостей (Ш. Кулон, Г. Ернст

и М. Мерчент, И. В. Крагельский).

Анализ работ всех групп показал, что не всегда в основу гипотезы или точки зрения было положено экспериментальное исследование. Во многих случаях та или иная трактовка причин возникновения поверхностных связей при трении была результатом умозрительных заключений. Почти во всех исследованиях главное внимание уделялось количественной стороне явления, т. е. регистрации сил или моментов трения и, как правило, отсутствовали качественный анализ явлений, происходящих на поверхностях контакта и обусловливающих возникновение поверхностных связей, а также экспериментальные исследования сущности процесса взаимодействия поверхностей при трении. В ряде работ принимались во внимание шероховатости поверхностей, т. е. их микрорельеф, обусловленный технологической обработкой, а также делались попытки учета неоднородности поверхностей по твердости.

Поверхности деталей машин после окончательных операций технологической обработки имеют вполне определенные геометрические характеристики — микрорельеф и волнистость (рис. 1). При контакте таких поверхностей площадь фактического соприкосновения обычно составляет очень небольшую часть площади номинального контакта (рис. 2).

Технологический микрорельеф и волнистость поверхностей сказываются на характеристиках трения в начальный период работы сопряжения. Микрорельеф и волнистость определяют в начале работы пары трения площадь фактического контакта, величину напряжений на участках фактического контакта и время приработки.

влияния Исследования технологического микрорельефа и волнистости на величину силы трения показали, что влияние этих характеристик ограничивается периолом приработки и не является систематическим и закономерным влиянием на процессы установившегося тре-

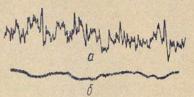


Рис. 1. Микрорельеф и волнистость поверхности:

а — профилограмма шлифованной поверхности стали (600 × 30);
 б — волнограмма шлифованной поверхности стали (300 × 5).

В некоторых работах авторы предлагают в основу трактовки атомно-молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей положить идеализированные схемы внутреннего строения материалов, например модели идеальной атомной кристаллической решетки, идеального молекулярного строения (Г. Томлинсон, Б. В. Дерягин).

Обращает на себя внимание тот факт, что в большинстве работ, связанных с изучением взаимодействия поверхностей при трении, ре-Рис. 2. Схема контакта двух альная внутренняя структушлифованных поверхностей, ра трущихся материалов, а также структура их поверх-

ностей, определяемая реальным строением, не учитываются. Очевидно, что в основу анализа взаимодействия поверхностей трения должны быть положены, кроме внешних параметров зоны контакта, характеристики внутреннего строения твердых тел с учетом влияния реального строения в объеме на строение поверхности

и поверхностных слоев.

Современное представление о реальном строении твердых тел хорошо раскрывается теорией дислокаций [15, 60, 118]. 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 о их дислокационном строении. Объяснение резкого различия между прочностью реального и идеального металлов основывается также на наличии дислокаций.

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. Эту шероховатость называют тонким рельефом, или субмикрорельефом. Особенности строения поликристаллических тел и различных сплавов, имеющих гетерогенную структуру, вызывают при нагружении и деформации 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 образуется наряду с субмикрорельефом своеобразный рельеф, имеющий выступы и впадины на несколько порядков большие, чем у субмикрорельефа. Таким образом, при нагружении и деформации поликристаллических неоднородных сплавов в процессе трения образуется сложный рабочий рельеф, составленный из впадин и выступов, образованных движением и взаимодействием дислокаций и их групп, перемещением блоков и фрагментов, частей и целых зерен. Необходимо заметить, что указанный рельеф не имеет ничего общего с микрорельефом, полученным в результате технологической обработки поверхности. Происхождение этого рельефа связано с внутренним строением твердых тел и может варьироваться в связи с пластической деформацией поверхностных слоев и всего объема металла. Обычный микрорельеф обусловлен технологией изготовления деталей. Его значение ограничивается характеристиками, оказывающими определенное влияние на начальный период работы узла трения.

Взаимодействие трущихся поверхностей связано с наличием рабочего рельефа на поверхностях контакта, величина и характер которого обусловлены внутренним строением твердых тел и процессом пластической дефор-

мации, возникающим при внешнем трении.

Основной причиной, обусловливающей образование поверхностных связей и возникновение сил внешнего трения, является взаимодействие рабочих рельефов поверхностей контактирующих тел.

При изучении сущности процесса внешнего трения следует рассматривать рельеф кристаллических тел в его исходном состоянии перед началом контакта, изменение

рельефа при трении движения и остаточное состояние рельефа после снятия нагрузки.

Изменения рельефа при статическом нагружении и при трении движения обусловлены в основном движением

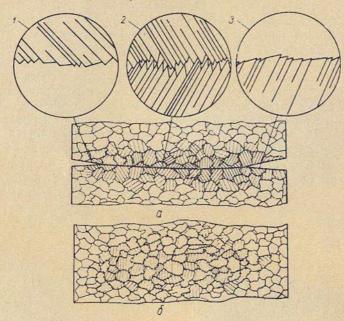


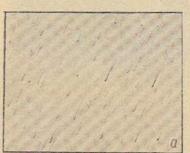
Рис. 3. Схемы взаимодействия субмикрорельефов контактирующих поверхностей:

a — вид контакта в сечении; 1, 2, 3 — сечения отдельных участков поверхностей; δ — вид контакта на поверхности в плане.

и взаимодействием дислокаций. Механизм этих изменений чрезвычайно чувствителен.

В отдельных точках фактического контакта трущихся

поверхностей при встрече субмикрошероховатостей, даже при малых фактических напряжениях, мгновенно возникает лес дислокаций в поверхностном слое и соответственно этому огромное количество новых неровностей



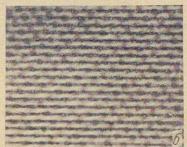


Рис. 4. Исходная поверхность металла: $a-\text{вяд в плане (}\times340\text{);}$ 6-интерферограмма исходной поверхности металла.

(ступенек и впадин). Новые дислокационные образования охватывают не только места фактического контакта, но и соседние участки поверхности металла, прилегающие к местам контакта.

Следовательно, при перемещении трущихся поверхностей пятна контакта всегда встречают впереди себя новый субмикрорельеф.

На рис. 3 приведены схемы описанного взаимодействия поверхностей при наличии исходного микрорельефа и возникновении текущих изменений его [61, 62].

Рис. 4, 5 и 6 иллюстрируют рельеф поверхностей реальных кристаллических тел в исходном состоянии и его изменения в процессе внешнего трения.

Таким образом, анализ процесса взаимодействия поверхностей при трении, исходя из теории дислокаций,



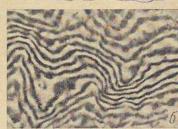


Рис. 5. Поверхность после приложения нормального давления $150~\kappa\Gamma/c$ м 2 :

a — вид в плане (\times 340);

б — интерферограмма поверхности (Н. Ф. Колесниченко).

особенностей внутреннего строения и пластической деформации, дает основания утверждать, что, по-видимому,



Рис. 6. Электронная фотография ($\times 1800 \cdot 2,5$) поверхности трения (Н. Ф. Колесниченко).

наиболее реальным объяснением природы взаимодействия поверхностей при внешнем трении является взаимодействие рабочих рельефов. Механическое взаимодействие субмикрорельефов трущихся поверхностей является главной причиной образования поверхностных связей, вызывающих упругопластическую деформацию

поверхностного слоя и дальнейшие производные процессы окисления, схватывания, усталостного и абразивного разрушения.

Важной дополнительной составляющей в формировании сил трения являются так называемые адгезионномолекулярные силы. Как показали опыты, эти силы при некоторых условиях достигают значительных величин и могут рассматриваться как дополнительный фактор, влияющий на формирование силы внешнего трения.

ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ И ИХ СКОРОСТИ

В результате образования поверхностных связей и последующего относительного перемещения контактирующих поверхностей под действием внешних сил в поверхностном слое металла возникает упруго-пластическая деформация, которая является первым и основным процессом работы внешнего трения. В свою очередь процесс упруго-пластической деформации инициирует возникновение гаммы производных физических, химических и механических процессов на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся тел (рис. 7).

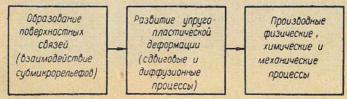


Рис. 7. Схема возникновения физико-химико-механических процессов при внешнем трении.

В зависимости от условий внешнего трения и связанных с ними параметров и особенностей упруго-пластической деформации производные процессы, возникающие в поверхностных слоях металла, могут получать различные возможности для своего развития, а следовательно,

иметь различную скорость, или интенсивность. В одних условиях преобладающее значение могут иметь химикомеханические процессы, к которым относятся упругопластическая деформация поверхностного слоя металла и окисление его. В других условиях максимальное развитие могут получать теплофизические процессы и явления термического схватывания. Могут возникать механико-физические процессы, приводящие к развитию явлений контактного холодного схватывания или такие условия, которые будут благоприятными для развития механических процессов усталости, абразивного разрушения

Исследования процессов трения и износа деталей машин в условиях эксплуатации, а также лабораторные исследования трения, износа и смазки показали, что основными процессами, протекающими в поверхностных слоях при трении металлических поверхностей, являются процессы схватывания, обусловленные атермической или термической пластичностью металла, окисления, уста-

лостные и абразивные процессы.

Условия для преобладающего развития тех или иных ведущих процессов в поверхностных слоях металла определяются следующими факторами: внешними механическими воздействиями, средой и материалом трущихся пар.

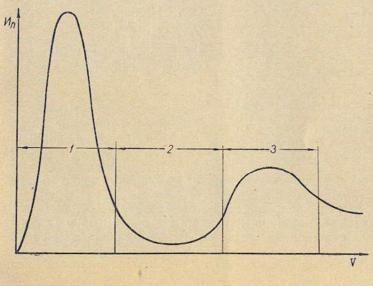
К внешним механическим воздействиям относятся скорость относительного перемещения трущихся поверхностей и удельное давление. Важнейшей производной этой группы факторов является теплота трения, так как механическая работа при внешнем трении почти полностью трансформируется в тепловую энергию.

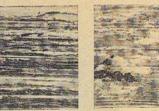
На рис. 8 и 9 приведены принципиальные схемы влияния внешних механических воздействий на процессы, про-

текающие при трении и износе.

Рис. 8. Принципнальная схема зависимости приведенного износа от скорости скольжения при постоянном удельном давлении (сухое трение):

1 — область износа схватываннем 1-го рода; 2 — область окнелительного износа; 3 — область теплового износа.









17

Скорость скольжения контактирующих поверхностей (рис. 8) оказывает большое влияние на износ. При различных скоростях скольжения характер и интенсивность пластической деформации и температура поверхностных

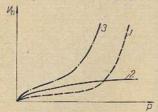


Рис. 9. Принципиальная схема зависимости приведенного износа от удельного давления (сухое трение):
1 — износ схватыванием 1-го рода; 2 — окислительный износ; 3 — тепловой износ.

слоев будут способствовать развитию различных процессов. При малых скоростях скольжения максимальную скорость будет иметь процесс атермического схватывания, при средних скоростях скольжения— процесс окисления, а при больших скоростях— процесс термического схватывания.

Удельное давление (рис. 9) оказывает большое влияние на скорость процессов атермического и термического схватыва-

ния и незначительно влияет на скорость процесса окисления.

Среда, заполняющая зону трения, может быть газообразной, жидкой и твердой. На рис. 10, 11 и 12 приведены принципиальные схемы влияния различных сред на скорости ведущих процессов внешнего трения.

Как видно из схемы на рис. 10, при наличии кислорода в газовой среде максимальную скорость имеет процесс окисления, обеспечивающий минимальную интенсивность износа, а при отсутствии его — различные процессы контактного схватывания, приводящие к значительному росту износа.

На рис. 11 для сравнения приведены принципиальные кривые зависимости приведенного износа от скорости скольжения для сухого трения и трения с граничной смазкой. Влияние жидкой среды на развитие процессов

(рис. 12) при трении с граничной смазкой связано с многими обстоятельствами. Наиболее важным из них является условие перехода от нормального к катастрофическому износу, при котором максимальную скорость имеет

процесс контактного схватывания, наступающий при меньших или больших скоростях скольжения в зависимости от состава жидкой среды.

Твердая смазка главным образом влияет на температурную границу перехода от нормального к катастрофическому износу (рис. 13).

На рис. 14 дана схема классификации металлов и сплавов по их износостойкости [71]. Наиболее высокой износостойкостью обладают металлы, которые не имеют склонности к



развитию процессов схватывания. Дополнительным условием высокой износостойкости является образование на поверхности трения прочных плэнок окислов.

Так как скорость процессов схватывания и окисления зависит от упруго-пластической деформации поверхностных слоев, то наряду с выбором материалов важное значение приобретает технология обработки трущихся деталей.

Наряду с указанными тремя факторами, влияющими на возможность развития тех или иных основных процессов, сопровождающих внешнее трение, в некоторых слу-

чаях большое влияние на возникновение и развитие этих процессов оказывают относительные размеры и форма трущихся деталей (масштабный фактор) и напряженное состоя-



Рис. 11. Принципиальная схема зависимости приведенного износа от скорости скольжения:

I — сухое трение; 2 — трение с граничной смазкой.

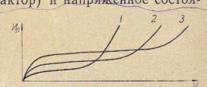


Рис. 12. Принципиальная схема зависимости приведенного износа от скорости скольжения и состава жидкой среды (трение с граничной смазкой):

пичной смакка с добавлением веществ, препятствующих процессам окисления;
 пейтральная смазка;
 смазка с добавлением веществ, способствующих окислительным процессам.

ние поверхностных объемов металла (растяжение, сжа-

тие, кручение).

Одним из важных факторов, влияющих на развитие Упроцессов, протекающих при трении и износе, является продолжительность работы. По данным многих исследователей существует три периода износа в работе деталей

машин (рис. 15): 1) период начального износа (1), или период приработки, когда происходит переход от исходного состояния трущихся поверхностей к установившемуся рабочему состоянию. В этот период скорость износа все время изменяется, приближаясь к постоянной величине, характерной для периода установившегося износа;

2) период установившегося износа (2), отличающийся относительным постоянством условий работы трения, по-

стоянной скоростью износа, характерной для данных условий трения;

3) период усиленного (аварийного) износа (3). На рис. 16 приведено

семейство кривых, характеризующих износ сопряженных поверхностей в зависимости от продолжительности процесса трения. Кривая 2 характеризует наиболее общий случай развития износа во

2 50

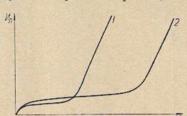


Рис. 13. Принципиальная схема зависимости приведенного износа от температуры трущейся пары и рода смазочной среды: 1 — жидкая смазка; 2 — твердая смазка.

времени. При неблагоприятных условиях приработки износ соответствует кривой 1. В этом случае в процессе

Группа металлоб и сплавов	Склонны к схватыванию	Не склонны к схбатыбанию	Склонны и окислению			
			более износо-	Пленки вкислов менее износо- стойкие, чем метолл	Не склонны и окислению	Примечание
1-9						Износостойние в условиях окисли- тельного взноса
2-я						Износостойние
3-я						Износостойние в условиях трения, исключающих окисли- тельные процессы
4-8		4				Неизносостойкие

Рис. 14. Схема классификации металлов и сплавов по износостой-

приработки возникает интенсивное схватывание. При резком улучшении процесса приработки характер износа сопряженной пары будет соответствовать кривой 3. Тог-

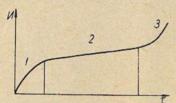


Рис. 15. Принципиальная схема износа деталей машин в зависимости от времени их работы;

 период начального износа, или приработки; 2— период установившегося износа; 3 период усиленного (аварийного) износа.

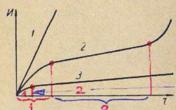


Рис. 16. Семейство кривых, характеризующих износ деталей машин в зависимости от времени их работы.

да период начального износа сокращен, интенсивность износа и силы трения малы, явления схватывания не получают развития.

СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ТРЕНИЯ

В результате протекания на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся металлов физических, химических и механических процессов, обусловленных работой поверхностных связей, исходная структура поверхностных объемов металла изменяется, претерпевая структурные и фазовые превращения. Направление и характер этого изменения определяется скоростью ведущего процесса. Структурные и фазовые превращения возникают

и развиваются во время работы и после снятия нагрузки трением фиксируются в виде остаточных изменений. Таким образом, в связи с процессом трения и износа необходимо рассматривать три состояния поверхностей и поверхностных слоев металла узлов трения: исходное, рабочее и остаточное.

Схема перехода в процессе трения от исходного состояния поверхностей и поверхностных слоев к рабочему, обусловленному текущими изменениями, и к остаточному состоянию приведена на рис. 17.

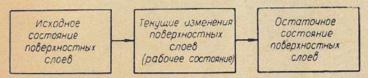


Рис. 17. Схема перехода в процессе трения от исходного состояния поверхностей и поверхностных слоев к рабочему и остаточному.

Исходное состояние поверхностей и поверхностных слоев определяется материалами элементов узла трения и технологией их обработки. От этих факторов зависят основные свойства поверхностных слоев трущихся металлов, влияющие на процесс образования поверхностных связей и их работу при перемещении контактирующих поверхностей. К этим свойствам относятся:

1) степень химического сродства металлов элементов узла трения с кислородом;

2) свойства пленок окислов, образующихся при взаимодействии металла с кислородом;

3) склонность металлов узла трения к контактному схватыванию при нормальных и повышенных температурах;

4) механические свойства металлов;

5) теплоустойчивость металлов;

6) способность металлов взаимодействовать со смазкой.

Перечисленные свойства оказывают большое влияние на характер процессов в зоне трения и их скорости. Определенное сочетание этих свойств в поверхностных слоях может способствовать развитию различных процессов в зоне трения.

Кроме свойств материалов трущихся пар, на характер и скорости развивающихся процессов влияют условия эксплуатации трущейся пары (скорость скольжения, удельная нагрузка, температурный режим) и среда, заполняющая зону трения. Поэтому процессы, происходящие в зоне трения, и возникающие изменения состояния поверхностных слоев следует рассматривать в связи с действием всей совокупности этих групп факторов.

В зависимости от исходных свойств трущихся поверхностей, условий эксплуатации узла трения и среды, заполняющей зону трения, могут происходить текущие изменения в поверхностных слоях, обусловленные процессами деформации, адсорбционными, диффузионными, термическими процессами, процессами химических реакций, образованием и разрушением узлов схватывания, усталостными явлениями.

Под действием текущих изменений формируется рабочее состояние поверхностного слоя. В рабочем состоянии материал поверхностных слоев имеет фазовый состав, структуру, а следовательно, и свойства, отличные от исходного состояния. В поверхностном слое, находящемся в рабочем состоянии, возникают процессы, возможности развития которых обусловлены исходным состоянием поверхностного слоя и условиями эксплуатации.

В связи с тем, что при трении происходит переход от исходного состояния поверхностных слоев к рабочему

состоянию, становится совершенно очевидным, что износостойкость, антифрикционность и фрикционность деталей машин определяются не только характеристиками
исходного состояния поверхности и поверхностных слоев
узлов трения, но и данными, характеризующими состояние поверхностного слоя в процессе трения и износа.
В связи с этим изучение текущих изменений, происходящих в зоне трения, представляет большой интерес.

Подавляющее число машин и механизмов, как правило, не работают непрерывно. Работа машин по времени обычно состоит из рабочих циклов и остановок. Поэтому все характеристики зоны трения, т. е. характеристики поверхности, поверхностных слоев и среды, заполняющей зону трения, изменяются и могут быть обратимыми и необратимыми.

Микрорельеф, структура и прочностные характеристики испытывают необратимые изменения при трении. В результате этих изменений и формируется своеобразное остаточное состояние поверхности и поверхностных слоев после снятия нагрузки трением. Остаточное состояние, так же как и исходное состояние поверхностного слоя, оценивается комплексом геометрических характеристик поверхности и комплексом механических, физических и химических характеристик поверхностных слоев.

В зависимости от характера процессов, происходящих во время работы узла трения, после прекращения его работы могут произойти следующие остаточные изменения в поверхностном слое: механическое упрочнение; механическое разупрочнение; фазовое упрочнение без изменения или с изменением химического состава; фазовое разупрочнение без изменения или с изменением химического состава; изменение микрорельефа поверхностей трения и напряженного состояния поверхностного слоя.

ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И АНТИФРИКЦИОННОСТИ И ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Изменения в поверхностном слое зоны трения вызываются действием факторов, зависящих от исходного состояния поверхностного слоя и условий эксплуатации. Максимальную скорость в зоне трения получает тот процесс, возможность возникновения которого обусловлена исходным состоянием поверхностного слоя, а условия эксплуатации трущейся пары благоприятствуют развитию этого процесса. Так, например, недостаточная твердость и повышенная пластичность поверхностных слоев в исходном состоянии, особенно когда материал контактирующих поверхностей однородный, является предпосылкой для возникновения процесса схватывания. Большие удельные нагрузки в зоне трения и малые скорости перемещения трущихся поверхностей способствуют развитию этого процесса.

При высокой твердости и ограниченной пластичности поверхностного слоя в исходном состоянии в первую очередь могут возникнуть окислительные процессы, особенно в том случае, когда материал трущихся поверхностей обладает повышенной химической активностью. Умеренные удельные нагрузки, относительно большие скорости скольжения контактирующих поверхностей, а также наличие в зоне трения среды, содержащей кислород, способствуют развитию окислительных процессов, приобретающих в этих условиях максимальную скорость и подавляющих все другие процессы.

Исходя из того, что износостойкость, антифрикционность и фрикционность определяются главным образом характером ведущего процесса, который обусловливается рабочим состоянием поверхностей и поверхностных слоев

узла трения, а в свою очередь формирование рабочего состояния поверхностных слоев зависит от исходных (первичных) свойств поверхностных слоев и условий эксплуатации узла трения, становится очевидным, что первичной предпосылкой износостойкости, антифрикционности и фрикционности является исходное состояние поверхности и поверхностных слоев узла трения, формирование которого происходит под действием конструктивных и технологических факторов. При этом главная роль принадлежит свойствам материалов элементов трущейся пары.

Формирование исходного состояния поверхностных слоев завершается при окончательной технологической обработке. Поэтому все свойства трущихся поверхностей металлов должны быть оценены с учетом влияния на них примененного комплекса методов технологической обработки. Благоприятной первичной предпосылкой износостойкости, антифрикционности и фрикционности является такое исходное состояние поверхностных слоев элементов узла трения, при котором в конкретных условиях эксплуатации обеспечивается образование вторичных (рабочих) структур, обладающих высоким комплексом прочностных свойств.

Наиболее важная первичная предпосылка высокой износостойкости, антифрикционности и фрикционности обеспечивается применением таких материалов, которые в исходном состоянии не склонны к схватыванию. Это обусловливается определенным комплексом механических, физических и химических свойств трущихся поверхностей.

Все виды термической и химико-термической обработки, приводящие к повышению твердости и предела текучести материала поверхностных слоев, а также виды химико-термической обработки, снижающие склонность трущихся поверхностей к схватыванию, являются важными мероприятиями, обеспечивающими первичные предпосылки высокой износостойкости, антифрикционности

и фрикционности.

2) Вторичной предпосылкой, обусловливающей износостойкость, антифрикционность и фрикционность деталей машин, являются условия эксплуатации, при которых происходят определенные текущие изменения в зоне трения и соответственно им формируется рабочее состояние поверхности и поверхностных слоев. Износостойкость, антифрикционность и фрикционность в конечном итоге определяются свойствами поверхностных слоев трущейся пары, находящихся в рабочем состоянии. К факторам эксплуатации, влияющим на формирование рабочего состояния поверхностных слоев, относятся:

1) внешние механические воздействия (скорость пере-

мещения и нагрузка на трущиеся поверхности);

2) среда, в условиях которой работает узел трения; 3) температурный режим работы узла трения.

Под действием этих факторов с максимальной скоростью будут протекать такие процессы, для которых данные условия эксплуатации наиболее благоприятны, а следовательно, будет формироваться определенное рабочее состояние поверхностных слоев, обусловливающее износостойкость, антифрикционность и фрикционность.

В зависимости от сочетания конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов узел трения будет иметь высокие или низкие показатели износостойкости, антифрикционности и фрикционности. Высокими показателями износостойкости, антифрикционности и фрикционности узел трения будет характеризоваться тогда, когда он будет обладать благоприятными первичными и вторичными предпосылками для них. Это может

быть в том случае, когда под действием определенных условий эксплуатации исходное состояние поверхности и поверхностных слоев узла трения будет изменяться в сторону упрочнения за счет образования слоя, имеющего фазовый состав и структуру с большим сопротивлением разрушению при трении. В противном случае первичные предпосылки не являются гарантией для высоких показателей износостойкости, антифрикционности и фрикционности узла трения во время его работы.

Под износостойкостью, антифрикционностью и фрикционностью надо понимать состояние поверхностей трения и поверхностных слоев, определяющее поведение контактирующих деталей машин в процессе их трения.

Износостойкость — общая характеристика такого состояния трущихся поверхностей деталей машин, при котором достигается наиболее высокое сопротивление раз-

рушению этих поверхностей.

Антифрикционность и фрикционность являются частными случаями этого состояния, усложненного дополнительными условиями. Антифрикционность характеризуется высокой износостойкостью и, кроме того, хорошей прирабатываемостью и малым коэффициентом трения. Фрикционность характеризуется износостойкостью и большими и стабильными коэффициентами трения.

Исследования явлений износа деталей конкретных машин, работающих в различных условиях нагружения, лабораторные исследования трения и износа материалов при различных режимах и в разных средах позволили сделать заключение о том, что износостойкость и другие частные случаи этого состояния деталей машин определяются характеристиками вторичных, или эксплуатационных, свойств их поверхностных слоев, формирование которых зависит от первичных, или исходных, свойств и условий эксплуатации машин.

Состояние высокой износостойкости, обусловленное определенным сочетанием свойств вторичных структур поверхностных слоев, может сформироваться только в результате протекания определенных физико-химико-механических процессов, зависящих от первичных свойств трущихся поверхностей и условий эксплуатации машин.

2 основные положения теории износа

ТЕОРИИ ИЗНОСА

при трении и износе деталей машин поверхности и в поверхностных слоях металла под влиянием факторов внешних механических воздействий, сре-

ды, материала и трущихся пар и исходного состояния поверхности и поверхностных слоев, а также под влиянием важнейшего фактора, производного от внешних механических воздействий, — теплоты трения — возникают и развиваются многие физические, химические и механические процессы. Из этих процессов наиболее существенными для развития механизмов износа являются процессы окисления, образования металлических связей, абразивные, усталостные и др. Обозначим эти процессы P_1 ; P_2 ; P_3 ; . . .; P_n .

В зависимости от условий трения сочетание перечисленных факторов складывается более благоприятно для развития одного процесса и менее благоприятно для развития других. Поэтому процессы имеют различные скорости: V_{P_1} ; V_{P_2} ; V_{P_3} ; ...; V_{Pn} и, следовательно, премущественно развивается тот процесс, для которого складывается наиболее благоприятное сочетание факто-

ров. Скорость этого процесса превышает скорости всех других процессов и по мере развития его со временем все другие процессы им подавляются. Из этого вытекает важный вывод о том, что в любых условиях трения существует процесс, протекающий с наибольшей скоростью V_P , т. е. ведущий (доминирующий).

Основная роль в возникновении различных видов износа, в их развитии, ускорении и торможении принадлежит скоростям процессов, протекающим на контактирующих поверхностях при трении. Это позволяет теоретически обосновать существование ведущих видов износа и сформулировать первое положение теории износа [63]: вид износа определяется процессом P, протекающим с максимальной скоростью V_P на поверхностях трения.

Такое условие необходимо, но оно недостаточно. Для стабильного протекания ведущего вида износа должно быть соблюдено дополнительное условие, которое вытекает из анализа скоростей разрушения трущихся поверхностей, т. е. скоростей износа.

Дополнительное условие к первому положению теории износа можно сформулировать так: при установившемся ведущем износе скорость разрушения трущихся поверхностей, или скорость износа, не должна превышать скорости процессов, определяющих вид износа:

$$V_{
m pasp} < V_P$$
 .

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Для разработки научных методов воздействия на процессы, протекающие при различных видах износа, и методов устранения нежелательных видов износа, необходимо изучить условия возникновения и закономерности разви-

тия основных видов износа деталей машин. Решение этой задачи возможно только при четкой классификации видов износа деталей машин по главным процессам, протекающим в поверхностных слоях металла трущихся пар.

Основной теоретической предпосылкой классификации видов износа деталей машин по процессам является первое положение теории износа, согласно которому, как уже известно, вид износа определяется процессом, протекающим с максимальной скоростью. Это положение объясняет преобладание только одного вида износа и является теоретическим основанием для определения ведущего износа [63] Проведенные исследования показали, что в широком диапазоне возможных условий трения в разных масштабах и с различной интенсивностью происходят вполне определенные процессы.

В результате исследований деталей многих типов машин сформулировано положение о ведущем и сопутствующих видах износа. Сущность этого положения сводится к тому, что в зависимости от факторов внешних механических воздействий, среды, свойств трущихся металлов и состояния трущихся поверхностей каждая пара сопряженных работающих деталей имеет четко выраженный ведущий износ, лимитирующий срок службы ее при эксплуатации, и может иметь сопутствующий износ, мало

влияющий на процесс износа.

Было установлено, что некоторые пары сопряженных деталей имеют несколько видов износа. Это объясняется прежде всего тем, что поверхности трения в пределах одной детали нагружены неравномерно, например поверхности профиля зуба шестерни, кулачка распределительного вала и др. Однако каждая деталь имеет наиболее изнашиваемый участок поверхности, где преобладает только один вид износа. Этот вполне определенный

и отчетливо выраженный вид износа лимитирует износостойкость всей детали и определяет скорость ее износа.

Основными видами износа деталей машин являются: 1) схватывание 1-го рода; 2) окислительный; 3) тепловой (схватывание 2-го рода); 4) абразивный и 5) осповидный (усталостный) [63].

Износ схватыванием 1-го рода (мод стр 65)

Износ схватыванием 1-го рода — это процесс интенсивного разрушения поверхностей деталей машин при трении, выражающийся в пластической деформации поверхностных слоев, возникновении местных металлических связей на трущихся поверхностях и разрушении их с отделением частиц металла или налипанием их на поверхностях трения.

При этом виде износа скорость процессов, обусловливающих явление схватывания, $V_{\rm cxb}$ (образование металлических связей в результате взаимодействия субмикрорельефов контактирующих ювенильных поверхностей), превышает скорость других процессов, протекающих на поверхностях трения, и становится преобладающей.

Дополнительное условие существования доминирующего износа, согласно которому скорость разрушения поверхностей при определенном виде износа $V_{\rm разр}$ не должна превышать скорость его протекания, всегда выполняется при схватывании 1-го рода, так как процесс разрушения поверхностей при этом виде износа является одним из этапов его развития и необходимым условием его существования.

Внешний вид деталей машин, работавших при схватывании 1-го рода, показан на рис. 18. Микрофотографии

поверхности трения и микроструктуры сечения поверхностных слоев деталей машин, работавших в условиях износа схватыванием 1-го рода, показаны на рис. 19.

Износ схватыванием 1-го рода возникает при трении скольжения с малыми скоростями относительного переме-

щения трущихся поверхностей и при удельных давлениях, превышающих предел текучести на участках фактического контакта, при отсутствии смазки и защитной пленки окислов. Температура, возникающая при трении, до определенного предела заметного влияния на развитие этого вида износа не оказывает.

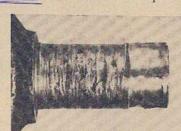


Рис. 18. Внешний вид деталей машин, работавших при схватывании 1-го рода.

Сущность процесса схватывания заключается в образовании металлических связей между двумя контактирующими поверхностями.





Рис. 19. Микрофотографии поверхности трение (a) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (б) деталей машин, работавших при схватывании 1-го рода.

Образование этих связей главным образом зависит от природы контактирующих металлов и способности их образовывать в условиях трения защитные оксидные пленки, препятствующие контакту металлов.

Металлические связи образуются в том случае, когда расстояния между контактирующими участками поверхностей металлических тел равны размеру атомных решеток этих тел и участки поверхностей свободны от

адсорбированных пленок.

Выполнение указанных условий практически достигается при интенсивной пластической деформации поверхностных слоев при трении скольжения, сопровождающейся выходом на поверхность трения «новых» ювенильных поверхностей металла, текстурированием и максимальным сближением контактирующих поверхностей.

Большую склонность к образованию металлических связей проявляют контактирующие при трении детали из однородных металлов, химически чистых металлов и металлов, обладающих атермической пластичностью.

Коэффициент трения при износе схватыванием 1-го рода максимальный по сравнению с другими видами износа и может достигать величины порядка 4—6

носа и может достигать величины порядка 4—6. (Разрушение поверхностей при этом виде износа про- исходит следующим образом: а) при относительном перемещении возникает металлическая связь на определенном участке контактирующих поверхностей; б) дальнейшее перемещение поверхностей приводит к упрочнению металла в месте образования узла схватывания и вырыванию металлических частиц с поверхности менее прочного металла или царапанию упрочненным местом поверхности. Вырывание металлических частиц или царапание вдавливанием зависит от рельефа поверхностей, лежащих впереди места схватывания. Интенсивность износа при

схватывании 1-го рода максимальная по сравнению с другими видами износа. Она выражается величинами порядка 10—15 мк/ч.

Из всех видов износа деталей машин износ схватыванием 1-го рода является наиболее нежелательным.

Окислительный износ (мод стр во)

Окислительный износ — процесс постепенного разрушения поверхностей деталей машин (металлов) при трении, выражающийся в сложном сочетании явлений адсорбции кислорода на поверхностях трения и диффузии кислорода в поверхностных слоях, одновременном протекании пластической деформации металла с образо-

ванием химически адсорбированных пленок, пленок твердых растворов и химических соединений металла с кислородом и отделением их с поверх-

ностей трения.

При этом виде износа скорость процесса окисления $V_{\rm ок}$ превышает скорости других процессов, протекающих на поверхностях трения, и становится преобладающей. Прочность образующихся пленок окислов обеспечивает дополнительное условие существования данного вида износа, т. е. $V_{\rm ок} > V_{\rm pasp}$.



Рис. 20. Внешний вид деталей машин, работавших при окислительном износе.

Внешний вид деталей машин, работавших при окислительном износе, показан на рис. 20, а микрофотографии

поверхности трения (a) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (б) деталей машин, работавших в условиях окислительного износа,— на рис. 21.

Окислительный износ возникает при трении скольжения или качения и при этом может быть ведущим как

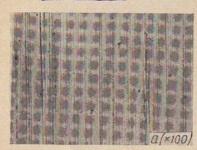




Рис. 21. Микрофотографии поверхности трения (a) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (б) деталей машин, работавших при окислительном износе.

при сухом трении, так и при граничной смазке. Диапазон скоростей скольжения при окислительном износе при сухом трении небольшой и находится в пределах 1,5—4,0 м/сек (нормализованная сталь по стали), для закаленных сталей этот диапазон шире и находится в пределах от минимальных скоростей до скоростей порядка 6—7 м/сек.

При граничной смазке интервал скоростей еще больше увеличивается и окислительный износ развивается от самых малых скоростей до скоростей порядка 20 м/сек. Сущность окислительного износа заключается в явлениях хемосорбции и образовании на поверхностях трения слоев пластически деформированного и насыщенного кислородом метадла.

Развитие окислительного износа определяется свой-

ствами адсорбированных пленок и новых вторичных структур, возникающих в ультрамикроскопических и микроскопических объемах поверхностных слоев металла при пластической деформации с одновременным образованием твердого раствора и химических соединений кислорода и металла.

Для окислительного износа характерна одновременность протекания двух процессов: микропластической деформации поверхностных слоев и диффузии кислорода в пластически деформируемые объемы металла.

Диффузии кислорода в металл способствует пластическая деформация. В свою очередь пластическая деформация резко усиливается при одновременном протекании диффузии.

Исследованиями окислительного износа деталей машин в лабораторных условиях было установлено, что в зависимости от условий трения изменяется характер и интенсивность окислительных процессов, вследствие чего окислительный износ проявляется в нескольких формах.

Первая форма окислительного износа характеризуется процессом возникновения и удаления с поверхностей трения ультрамикроскопических пленок химически адсорбированных окислов. Эта форма окислительного износа чрезвычайно распространена в деталях машин, работающих при небольших скоростях скольжения и малых удельных давлениях в условиях устойчивой граничной смазки.

2) Вторая форма окислительного износа характеризуется образованием неупорядоченных твердых растворов и эвтектик химических соединений кислорода и металла в тонких поверхностных слоях. При этом поверхностные слои приобретают большую подвижность, перемещаются по поверхности трения и уносятся в виде микропленок.

& They

3) Третья форма окислительного износа характеризуется периодическим образованием и выкрашиванием сплошных твердых и хрупких слоев химических соединений кислорода с металлом. Эта форма износа многообразна, что объясняется существованием различных типов хими-

ческих соединений металла с кислородом.

Трение деталей машин, изготовленных из мягких сталей, при увеличенных нагрузках характеризуется преобладающим развитием второй формы окислительного износа (образование твердых растворов кислорода в металле).

При трении деталей машин, термически обработанных на большую твердость, преобладает третья форма окислительного износа (образование сплошных слоев химических соединений кислорода с металлом).

Трение деталей машин, работающих без смазки, характеризуется образованием высших типов химических

соединений кислорода и металла.

Для подтверждения гипотезы об окислительном износе и его различных формах, вызываемых образованием химически адсорбированных пленок, пленок твердых растворов кислорода в металле, пленок различных химических соединений металла с кислородом, были проведены:

1) исследование химического состава поверхностных

слоев стали при разных видах износа [64];

2) исследование структуры и свойств железа Армко и стали 45 при высокотемпературном окислении [65];

3) термический анализ новых структур, возникающих на поверхности трения деталей машин [66];

4) рентгеноструктурное исследование поверхностей

трения металлов [67];

5) исследование влияния адсорбции кислорода на процессы трения и изнашивания металлических поверхностей [68];

6) исследование изнашивания сталей при сухом трении в газовых средах (воздухе, кислороде, аргоне, углекислоте и азоте) [100, 101].

Важные результаты о роли кислорода в процессах трения и износа были получены при испытаниях в ва-

кууме [69].

Основные количественные характеристики окислительного износа - интенсивность и коэффициент трения - при различных его формах имеют особенности, зависящие от специфики качественных изменений. Коэффициент сухого трения в третьей форме окислительного износа значительно больше, чем во второй форме. Коэффициент сухого трения во второй форме — порядка 0,3— 0,4 (сталь по стали), а в третьей форме — порядка 0,5—

0.7 (сталь по стали).

Интенсивность окислительного износа деталей машин выражается величиной 0,1-0,5 мк/ч. Изучение износа деталей машин показывает, что явление окислительного износа имеет наиболее широкое распространение при реальных условиях работы машин. Этот вид износа единственно допустимый, все же другие виды износа являются аварийными и нежелательными. Поэтому необходимо всеми средствами (конструктивными, технологическими и эксплуатационными) обеспечить работу узлов трения таким образом, чтобы не допускать развития и протекания аварийных видов износа.

Приведенные данные относятся главным образом к трению скольжения. При трении качения окислитель-

ные процессы имеют особенности.

Исследованиями [81] установлено, что при работе подшипников качения в большинстве случаев окислительный износ является ведущим.

Газовый химический анализ металла тончайших поверхностных слоев подшипников качения свидетельствует об увеличении содержания кислорода в металле работавших подшипников в 100—200 раз по сравнению с металлом неработавших подшипников.

Рентгеновский анализ поверхностей трения работавших подшипников качения показывает наличие больших деформаций поверхностных слоев. Все это дает возможность описать механизм окислительного износа при тре-

нии качения следующим образом.

Процесс окислительного износа при трении второго рода имеет сложную физико-химико-механическую природу. Главная роль в нем принадлежит диффузии и химическому взаимодействию кислорода с пластически деформирующимися тончайшими поверхностными слоями металла. Пластически деформированный и насыщенный кислородом слой под действием многократного повторного деформирования хрупко разрушается, а в процесс вступают новые слои нижележащего металла.

(2) Процесс окислительного износа при трении второго рода происходит периодически. При малой номинальной площади контакта и высоком классе чистоты поверхности периоды образования и разрушения пластически деформированных и насыщенных кислородом слоев металла наблюдаются особенно четко. При большой площади контакта и недостаточно хорошо обработанной поверхности, а также в условиях приработки периодический процесс окисления обнаруживается менее четко [81].

Тепловой износ (моу отр 74)

Тепловой износ, или износ схватыванием 2-го рода, процесс интенсивного разрушения поверхностей деталей машин при трении скольжения, обусловленный нагревом

зоны трения до температур размягчения металла, десорбцией и резким изменением свойств смазки. Тепловой износ выражается в возникновении местных металлических связей на трущихся поверхностях и разрушении их путем размазывания, переноса металла и отделения макрочастиц с поверхности трения. При этом виде износа скорость процессов, обусловливающих явления схватывания 2-го рода $V_{\rm тепл}$ (нагрев, размягчение, деформация и контактирование ювенильных поверхностей), превышает скорость других процессов, протекающих на поверхностях трения, и становится преобладающей. Процесс разрушения поверхностей при этом виде износа является одним из этапов его развития и необходимым условием существования. Поэтому дополнительное условие существования ведущего износа, согласно которому скорость разрушения поверхностей при определенном виде износа не должна превышать скорости его протекания, выполняется во всех случаях. Внешний вид деталей

машин, работавших при тепловом износе, показан на рис. 22. Микрофотографии поверхностей трения (а) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (б), характерных для деталей машин, работавших в условии теплового износа, показаны на рис. 23.



Рис. 22. Внешний вид деталей машин, работавших при тепловом износе.

Тепловой износ возникает при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения трущихся поверхностей и большими удельными давлениями, обусловливающими высокий градиент и интенсивный рост температуры в поверхностных слоях трущихся металлов. Последние вызывают состояние термической пластичности металла.

Сущность процесса схватывания 2-го рода заключается в образовании металлических связей между размяг-

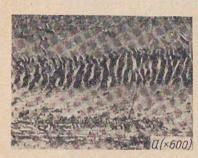




Рис. 23. Микрофотографии поверхности трення (a) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (6) деталей машин, работавших при тепловом износе.

ченными нагревом контактирующими поверхностями. Условия возникновения этих связей такие:

1) расстояние между контактирующими участками поверхностей металлических тел должно быть порядка размеров атомных решеток этих тел;

контактирующие участки должны быть свободными от адсорбированных пленок, пленок окислов и загрязнений;

3) кристаллическая структура контактирующих поверхностей должна способствовать возникновению металлических связей.

Термический режим теплового износа деталей машин характеризуется следующим:

1) при трении происходит мгновенный нагрев тонких поверхностных слоев металла;

2) мгновенность нагрева создает большую концентрацию теплоты в тончайших поверхностных слоях металла. Температура на трущихся поверхностях при тепловом износе может превышать 800—900°С (для стали), максимальная температура при тепловом износе может достигать температуры плавления трущихся металлов;

3) охлаждение поверхностных слоев трущихся металлов происходит в основном вследствие теплоотвода в глубь металла. Скорость охлаждения всегда выше критической скорости закалки для всех исследованных сталей:

4) расположение тепловых полей соответствует расположению поверхностей трения в деталях машин. Интенсивность и глубина тепловых полей соответствует условиям нагружения поверхностей при трении.

Скорость скольжения и нормальное давление по-разному влияют на интенсивность и глубину теплового поля. При увеличении скоростей скольжения (при постоянном давлении) температура в тепловом поле растет быстрее, чем глубина теплового поля.

При большой скорости скольжения тепловое поле характеризуется большой концентрацией теплоты в поверхностных слоях металла и резкими изменениями микроструктуры.

и При увеличении нормального давления (при постоянной скорости скольжения) температура в тепловом поле растет медленнее, чем глубина теплового поля.

Глубина изменений структуры при различных условиях теплового износа в деталях машин находится в пределах 0,005—0,080 мм.

Коэффициент трения при тепловом износе переменный, с ростом скорости скольжения он увеличивается, достигает своего максимума и затем плавно снижается. Коэффициент трения находится в пределах 0,1—0,5. Раз-

витие теплового износа может проходить такие три стадии:

1. В интервале температур, мало снижающих прочность трущихся металлов (для стали до 600° С), тепловой износ характеризуется -контактным схватыванием и разрушением мест схватывания с малыми пластическими деформациями. Поверхности трения при этой стадии износа покрыты надрывами, чередующимися через правильные промежутки. Разрушение происходит путем отрыва частиц менее прочного металла в местах возникновения металлических связей.

2. В интервале температур, вызывающих большое снижение прочности трущихся поверхностных слоев металла (для стали — от 600° С и выше), тепловой износ характеризуется контактным схватыванием и пластическим разрушением точек схватывания с налипанием и размазыванием металла на трущихся поверхностях. Разрушение поверхностей происходит путем отделения частиц очень размягченного металла и налипания их на более прочную поверхность.

3. В интервале температур плавления металла (для стали 1400—1500° С) износ происходит при контакте трущихся деталей, осуществляемом через тонкие пленки расплавленного металла. Разрушение при этом происходит путем уноса тонких пленок расплавленного металла.

Интенсивность теплового износа деталей машин выражается величинами порядка 1—5 мк/ч.

В последних стадиях теплового износа при очень высоких температурах увеличивается роль окисления трущихся поверхностей, при этом схватывание металлов вначале постепенно, а затем резко уменьшается.

Абразивный износ(ир Ж)

Абразивный износ — процесс интенсивного разрушения поверхностей деталей машин при трении скольжения, обусловленный наличием абразивной среды в зоне трения и выражающийся в местной пластической деформации, микроцарапании и микрорезании абразивными частицами поверхностей трения.

При этом виде износа скорость процесса $V_{\rm абр}$ превышает скорость других процессов, протекающих на поверхностях трения, и становится преобладающей.

Разрушение поверхностей трения входит в процесс абразивного износа как его основной элемент, поэтому дополнительное условие существования ведущего вида износа, заключающееся в том, что скорость разрушения поверхностей при определенном виде износа не должна превышать скорости его протекания, выполняется во всех случаях. Внешний вид деталей машин, работавших при абразивном износе, показан на рис. 24. Микрофотографии поверхности трения (а) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (б) деталей машин, работавших в условиях абразивного из-

носа, показаны на рис. 25. Так как абразивный износ связан с наличием абра-

нос связан с наличием абразивной среды в зоне трения, в отличие от других видов износа при трении скольжения, характеризующихся оп-



Рис. 24. Внешний вид деталей машин, работавших при абразивном износе.

ределенными диапазонами скоростей и давлений, он может существовать в самом широком диапазоне скоростей скольжения и удельных давлений.

Температура, возникающая в результате работы трения, может влиять на абразивный износ постольку,

поскольку она влияет на механические свойства металла и абразива

Абразивный износ может возникать при трении металлов, обладающих различными механическими свой-

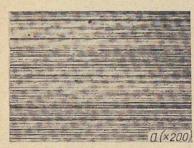




Рис. 25. Микрофотографии поверхности трения (a) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (δ) деталей машин, работавших в условиях абразивного износа.

ствами, при условии, что соотношение между твердостями металла и абразивов ниже определенной критической величины.

Абразивный износ — наиболее простой вид разрушения поверхностных слоев при трении. Анализ его сущности необходимо связывать с физической теорией прочности и пластичности металла, с теорией резания металла, учитывая при этом геометрические характеристики абразивных частиц и их размеры. Зависимость абразивного износа от констант прочности металлов косвенно подтверждается результатами, полученными В. Тонном [154], М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым [137, 140], данными работ по линейной зависимости между объемным абразивным износом и твердостью гомогенных металлов. Связь между абразивным износом и прочностными свой-

ствами металлов установлена также В. Д. Кузнецовым, Н. А. Бессоновым и Н. Ф. Пичениным [80].

Интенсивность износа при наличии абразивной среды зависит от размеров, формы и свойств абразивов и металлических поверхностей, от скоростей скольжения и удельных давлений.

Если при абразивном износе преобладает процесс проскальзывания и деформирования поверхностей контакта абразивными частицами, то большое значение приобретают сопутствующие явления взаимодействия металла с кислородом воздуха (окисление) и влияние влажности и химического состава среды. Интенсивность абразивного износа деталей машин выражается величинами порядка 0,5—5 мк/ч.

Коэффициент трения при абразивном износе зависит от размеров и формы абразивных частиц, соотношения механических свойств абразивов и металла трущихся поверхностей, определяющих характер абразивного действия, и может изменяться в весьма широких пределах.

Характер абразивного износа существенно отличается в случае трения металлических поверхностей по абразивной массе (работа лемеха плуга, рабочих органов строительных машин и т. п.). Особенности такого износа выявлены С. Л. Наумовым [99].

При трении поверхности лемеха плуга, ножей экскаватора, шипов гусеницы трактора и других подобных деталей о грунт абразивные частицы грунта, перемещаясь по трущейся поверхности со средней скоростью около 1,5 м/сек, могут разрушать ее только в том случае, если совместное действие нормальных и тангенциальных напряжений при движении абразивных зерен превзойдет предел прочности материала трущейся поверхности детали. При отсутствии этого условия действие абразивных зерен вызывает интенсивную макропластическую дефор-

мацию поверхностных слоев, что создает весьма благоприятные условия для возникновения окислительного износа.

Анализ поверхности трения рабочих органов машин, работавших непосредственно в абразивной массе при указанных выше условиях, показывает, что на поверхностях трения возникает не абразивный износ, как это можно было бы ожидать, а окислительный — исключительно высокой интенсивности. Такой интенсивный темп развития и протекания окислительного износа объясняется тем, что поверхности трения работают в химически активной среде, соприкосновение с которой при одновременном протекании микропластической деформации способствует интенсивному образованию пленок окислов, которые обладают невысокой механической прочностью и легко разрушаются и удаляются абразивными зернами, перемещающимися по поверхности трения.

Осповидный (усталостный) износ

Осповидный износ — процесс интенсивного разрушения поверхностей деталей машин при трении качения, обусловленный пластической деформацией, внутренними напряжениями, особыми явлениями усталости металла и выражающийся в образовании на поверхности трения микротрещин, трещин, единичных и групповых впадин. При этом виде износа скорости процессов, обусловливающие явление усталости металла, превышают скорости других процессов, протекающих на поверхностях трения, поэтому процессы усталостного разрушения становятся преобладающими.

Окислительные процессы при трении качения всегда сопутствуют осповидному износу. В тех случаях, когда

осповидный износ не получает развития, становится ведущим окислительный износ.

Внешний вид деталей машин, работавших в условиях

осповидного износа, показан на рис. 26. Микрофотографии поверхности трения (а), микроструктуры сечения поверхностных слоев (б) деталей машин, работавших в условиях осповидного износа, приведены на рис. 27.

Осповидный износ возникает при сухом трении качения и со смазкой при удельных давлениях, превышающих предел текучести металла поверхностных слоев.

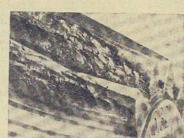


Рис. 26. Внешний вид деталей машин, работавших в условиях осповидного износа.

Основными причинами осповидного износа являются напряжения сжатия и сдвига, возникающие под действием передаваемого усилия при одновременном качении





Рис. 27. Микрофотографии поверхности трения (a) и микроструктуры сечения поверхностных слоев (б) деталей машин, работавших при осповидном износе.

и скольжении и достигающие величины $100-150~\kappa\Gamma^*/\text{м}\text{m}^2$, а также остаточные напряжения 1-го рода, образующиеся, во-первых, в результате механической обработки поверхностей деталей (достигают при некачественном шлифовании $150-200~\kappa\Gamma/\text{m}\text{m}^2$) и, во-вторых, вследствие пластического динамического деформирования металла поверхностных слоев деталей. В этом случае напряжения достигают приблизительно $200~\kappa\Gamma/\text{m}\text{m}^2$.

Механизм осповидного износа определяется сложным напряженным состоянием активных объемов металла у поверхностей трения и особыми явлениями усталости при повторно-переменных нагрузках, вызывающих тече-

ние металла в поверхностных слоях.

Общие закономерности и характеристики осповидного

износа следующие:

✓ 1. Осповидный износ, выражающийся в образовании макротрещин, трещин и впадин на поверхностях контакта, происходит при трении качения с нагрузками, вызывающими пластические деформации в поверхностных

слоях трущихся деталей.

2. Основные характеристики осповидного износа: а) глубина пластически деформированного слоя на поверхностях трения; б) интенсивность пластической деформации металла поверхностных слоев. Глубина деформированного слоя определяет глубину распространения трещин и осповидных впадин. Интенсивность деформации характеризует темп развития осповидного износа.

3. Количественные изменения основных характеристик осповидного износа зависят от величины удельных давлений при контакте, количества и частоты циклов на-

гружения, размеров и формы контактирующих деталей, а также от механических свойств металла деталей.

4. Развитию начальных стадий осповидного износа (образование трещин) способствует постепенное накапливание пластических деформаций в поверхностных слоях, вызывающих увеличение удельного объема в них и возникновение больших остаточных напряжений сжатия. При многократных повторных нагрузках в условиях напряженного состояния поверхностных слоев деталей, при котором предельное состояние определяется касательными напряжениями в плоскостях, расположенных под углами 30° к поверхности, разрушение поверхностных слоев вызывается явлениями усталости металла, развивающимися в плоскостях действия касательных напряжений. Первичные трещины, как правило, расположены под углом около 30° к поверхности трения.

5. Дальнейшее развитие зарождающихся трещин и образование впадин происходит вследствие концентрации напряжений при участии явлений коррозии металла и расклинивающего действия смазки. Образующиеся осповидные впадины являются очагами интенсивного

разрушения.

6. Сущность осповидного износа принципиально не изменяется при работе подшипников качения (шариковых или роликовых), зубчатых колес (в зоне начальной окружности) и других деталей, работающих при трении

второго рода.

7. Для осповидного износа характерно наличие сопутствующего окислительного износа, развивающегося в тончайших поверхностных слоях деталей. Ведущий осповидный и сопутствующий ему окислительный износы протекают одновременно на одних и тех же участках поверхности.

^{*} По ГОСТ 9867—61 единица напряжения 1 н/м². 1 кГ/мм²=9,80665 · 106 н/м².

и скольжении и достигающие величины $100-150 \, \kappa \Gamma^*/\text{мм}^2$, а также остаточные напряжения 1-го рода, образующиеся, во-первых, в результате механической обработки поверхностей деталей (достигают при некачественном шлифовании 150—200 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$) и, во-вторых, вследствие пластического динамического деформирования металла поверхностных слоев деталей. В этом случае напряжения достигают приблизительно 200 кГ/мм2.

Механизм осповидного износа определяется сложным напряженным состоянием активных объемов металла у поверхностей трения и особыми явлениями усталости при повторно-переменных нагрузках, вызывающих тече-

ние металла в поверхностных слоях.

Общие закономерности и характеристики осповидного

износа следующие:

1. Осповидный износ, выражающийся в образовании макротрещин, трещин и впадин на поверхностях контакта, происходит при трении качения с нагрузками, вызывающими пластические деформации в поверхностных

слоях трущихся деталей.

2. Основные характеристики осповидного износа: а) глубина пластически деформированного слоя на поверхностях трения; б) интенсивность пластической деформации металла поверхностных слоев. Глубина деформированного слоя определяет глубину распространения трещин и осповидных впадин. Интенсивность деформации характеризует темп развития осповидного износа.

3. Количественные изменения основных характеристик осповидного износа зависят от величины удельных давлений при контакте, количества и частоты циклов нагружения, размеров и формы контактирующих деталей, а также от механических свойств металла деталей.

4. Развитию начальных стадий осповидного износа (образование трещин) способствует постепенное накапливание пластических деформаций в поверхностных слоях, вызывающих увеличение удельного объема в них и возникновение больших остаточных напряжений сжатия. При многократных повторных нагрузках в условиях напряженного состояния поверхностных слоев деталей, при котором предельное состояние определяется касательными напряжениями в плоскостях, расположенных под углами 30° к поверхности, разрушение поверхностных слоев вызывается явлениями усталости металла, развивающимися в плоскостях действия касательных напряжений. Л Первичные трещины, как правило, расположены под углом около 30° к поверхности трения.

5. Дальнейшее развитие зарождающихся трещин и образование впадин происходит вследствие концентрации напряжений при участии явлений коррозии металла и расклинивающего действия смазки. Образующиеся осповидные впадины являются очагами интенсивного

разрушения.

6. Сущность осповидного износа принципиально не изменяется при работе подшипников качения (шариковых или роликовых), зубчатых колес (в зоне начальной окружности) и других деталей, работающих при трении

второго рода.

7. Для осповидного износа характерно наличие сопутствующего окислительного износа, развивающегося в тончайших поверхностных слоях деталей. Ведущий осповидный и сопутствующий ему окислительный износы протекают одновременно на одних и тех же участках по-

^{*} По ГОСТ 9867—61 единица напряжения 1 н/м². $1 \kappa \Gamma / M M^2 = 9,80665 \cdot 10^6 \mu / M^2$

МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Исследования процессов трения и износа деталей машин, изучение строения поверхностных слоев металла деталей, работавших при различных видах износа, а также лабораторные исследования по трению металлов и сплавов в условиях различных видов износа позволяют достоверно представить в виде моделей строения поверхностных слоев металла узлов трения машин, формирующихся в процессе трения при различных видах износа.

Исходное состояние поверхностных слоев, определившееся природой металла и примененными технологическими операциями при изготовлении деталей, изменяется в процессе трения и износа под воздействием сопровождающих их факторов (упругая и пластическая деформации, диффузия, физико-химические и термические процессы, связанные с упрочнением или разупрочнением и т. п.). В результате этого поверхностные слои приобретают вторичные структуры с остаточными фазовыми и структурными изменениями в поверхностных слоях металла, вызванными процессами, сопровождающими трение и износ. Так как на формирование вторичных структур большое влияние оказывает исходное состояние поверхностных слоев металла узлов трения, то рассмотрение моделей строения поверхностных слоев целесообразно начать с исходного состояния, т. е. с такого состояния, в каком находятся поверхностные слои металла деталей машин после их окончательной обработки.

При построении и обосновании реальности моделей строения поверхностных слоев принималось во внимание то важное обстоятельство, что эти вопросы относятся к проблеме граничного состояния вещества, при котором

свойства и особенно поведение молекул (атомов) на границах фаз резко отличаются от объемного состояния. Изучение этих вопросов началось еще в период становления классической теории капиллярности (П. Лаплас, М. В. Ломоносов, К. Гаус, Д. Гибс и Ван-дер-Ваальс).

В настоящее время имеются два основных направле-

ния в учении о граничном состоянии:

1. Изучение свойств тонких пленок и слоев на поверхности жидкости, главным образом на границе с газовой фазой (Н. Қ. Адам, Н. Дево, Р. Марселен, А. Н. Фрумкин, П. А. Ребиндер, Б. В. Дерягин).

2. Изучение свойств граничных слоев на внешних и внутренних поверхностях твердых тел, в частности ме-

таллов, и их влияние на свойства твердых тел и взаимодействие последних при контакте и трении (В. Гарди, Б. В. Дерягин, П. А. Ребиндер, А. С. Ахматов, Ф. Боуден).

На рис. 28 представлена модель строения поверхностных слоев узла трения в исходном состоянии перед началом процесса сухого трения скольжения. () Первый слой физически адсорбированного кислорода и 2второй слой химически адсорбирослой химически адсорбиро-

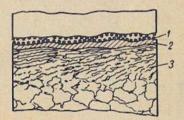


Рис. 28. Строение поверхностных слоев узла трения в исходном состоянии перед началом процесса сухого трения:

1 — слой физически адсорбированного кислорода; 2 — химически адсорбированного кислорода; 3 — дластически деформированного металла.

ванного кислорода образовались в результате взаимодействия металла с кислородом воздуха.

Изучением процессов взаимодействия металлов с кислородом воздуха занимались многие исследователи. В настоящее время в литературе имеется достаточно сведений о механике и результатах этого взаимодействия. В монографиях Б. Трепнела [131], Н. К. Адама [1], В. И. Архарова [2] подробно описаны процессы физической и химической адсорбций кислорода на различных металлах. Исследование состава и толщины первичной пленки окислов на железе производилось У. Эвансом [146], который определил толщину пленки порядка 30Å. Н. Фрейдлих с сотрудниками [147] установил, что после соприкосновения с воздухом образуется пленка окислов толщиной в 10Å. Л. Тронстэд [150] определил, что толщина первичтой

ной пленки окислов на железе не менее 20Å.

Электронографические исследования, проведенные П. Д. Данковым, Д. В. Игнатовым и Н. А. Шишаковым [40], позволили с несомненностью установить, что на поверхности металлов при комнатной температуре возникает пленка окислов кристаллической природы. У неблагородных металлов, в отличие от благородных, наблюдается две стадии окисления. В начальной стадии окисления осуществляется непосредственный контакт кислородных молекул с химически несвязанными атомами металла, и кислород внедряется в пространственные решетки металла. Во второй стадии процесс окисления осуществляется в основном за счет диффузии ионов металла к границе окись металла—газ.

В процессе начальной стадии окисления железа на его поверхности образуется кристаллическая пленка окислов, состав и строение которой соответствует окиси у — Fe₂O₃. Такие же данные были получены Г. Милем и У. Эвансом [152], Т. Имори [149], Г. Нельсоном [153] и др. Электронографические измерения [40] позволили сделать заключение о том, что предельная пленка окислов, образовавшаяся в начальной стадии окисления железа, по толщине состоит примерно из двух элементар-

ных ячеек $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$, т. е. толщина ее должна быть близка к 16—18Å. Образование этой пленки происходит настолько быстро, что только при помощи специальной методики можно проследить за ходом этого явления.

Характерной особенностью второй стадии процесса окисления при комнатной температуре есть предел утолщения пленки окислов в области субмикроскопических толщин (до 150Å). Время, необходимое на протекание второй стадии процесса окисления, определяется скоростью диффузии ионов металла и электронов наружу и, в меньшей мере, ионов кислорода внутрь металла (ввиду их сравнительно больших размеров). Согласно опытам А. А. Кочеткова [87] образование пленки окислов на железе в присутствии сухого воздуха при нормальной температуре завершается в течение 2 ч. При этом окисление примерно на 80—90% протекает менее чем за 15 мин. Эти данные подтверждаются электронографическими исследованиями П. Д. Данкова.

з) Третий слой, слой пластически деформированного металла, возникает при обработке резанием и шлифованием. Исследования П. Е. Дьяченко [50], А. А. Маталина [91] и Б. И. Костецкого [70] показали, что этот слой имеет неодинаковые свойства в связи с различной сте-

пенью и величиной его деформации.

В табл. 1 даны сведения по упрочнению поверхностного слоя стальных изделий при различных методах механической обработки (по данным А. А. Маталина [91]).

На рис. 29 представлена модель строения поверхностных слоев узла трения в исходном состоянии перед началом процесса граничного трения, а на рис. 30—такая же модель перед началом процесса жидкостного трения.

Граничное трение в отличие от жидкостного осущест-

вляется при такой малой толщине смазочного слоя, когда трение становится зависящим от рода трущихся поверхностей и взаимодействия их со смазочным слоем. Причи-

Таблица 1

Гаолица Т							
Метод обработки	Степень поверхнос сердцевин	наклепа <u>ги</u> × 100%	Глубина наклепа, мк				
	Среднее зпачение	Наиболь- шее значение	Среднее значение	Наиболь- шее значение			
Точение обычное и ско-							
ростное	120-150	200	30-50	200			
Точение тонкое	140-180	220	20-60	200			
Фрезерование торцовое цилиндри-	140—160	200	40-100	200			
ческое	120—140	180	40-80	110			
Сверление и зенкерование	160—170	-8	180-200	250			
Развертывание	-	_	_	300			
Протягивание	150-200	-	20-75				
Зубофрезерование и зубо-	160 000		100 150				
	160-200		120—150				
Шлифование круглое:			До 100				
незакаленная углеродис-							
тая сталь	140—160	200	30-60				
малоуглеродистая сталь	160-200	250	30-60	1			
закаленная сталь*	125—130	_	20-40				
Шлифование плоское	150		16-35				
Притирка пастами ГОИ	112-117	Francis .	3-7				

на этого заключается в том, что граничные слои масла, взаимодействуя молекулярно с металлической поверх-

ностью, приобретают структуру и свойства, отличные от имеющихся в объеме. В то же время микроскопически тонкий слой металла у поверхности трения в результате адсорбционного действия поверхностно-активных веществ, находящихся в смазке, изменяет свои механиче-

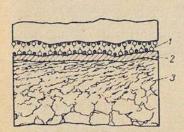


Рис. 29. Строение поверхностных слоев узла трения перед началом процесса граничного трения:

Г — слой физически адсорбированного кислорода и молекул смазки;
 2 — химически адсорбированного кислорода;
 3 — пластически деформированного металла.

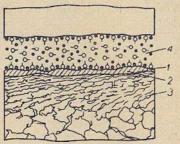


Рис. 30. Строение поверхностных слоев узла трения перед началом процесса жидкостного трения:

 слой физически адсорбированного кислорода и молекул смазки;
 химически адсорбированного кислорода;
 пластически деформированного мислорода;
 — пластически деформированного металла;
 4 — смазки.

ские свойства, что значительно влияет на механизм и параметры процесса трения. Таким образом, изменяя размеры смазочного слоя или, что то же самое, изменяя величину зазора между трущимися поверхностями, можно осуществить два противоположных предельных случая трения.

т) При минимальном зазоре между трущимися поверхностями, который допускает образование жидкостного клина, обеспечивающего подчинение трения законам гидродинамики, осуществляется жидкостное трение.

Другой противоположный предельный случай трения, т. е. граничное трение, осуществляется при такой малой

^{*} При тяжелых режимах шлифования и плохом охлаждении может иметь место отпуск закаленной стали, понижающий ее микротвердость. Глубина распространения отпуска может достигать 200~мк.

толщине смазочного слоя или при скорости скольжения настолько низкой, что клиновое гидродинамическое действие смазки перестает играть заметную роль. В этом случае решающее значение получает взаимодействие поверхностей трения между собой и с прослойкой смазочной жидкости, которая приобретает свойства квазитвердого тела.

В прослойке смазочной жидкости, как показано на моделях, имеются поверхностно-активные вещества и кислород, поступающий в смазку из воздуха, которые, взаимодействуя с поверхностными слоями металла, изменяют их фазовый состав, структуру и свойства. Следовательно, при граничном трении его закономерности определяются свойствами граничного смазочного слоя и тонкого поверхностного слоя металла, находящегося под воздействием поверхностно-активных веществ и кислорода.

Разрушение граничного смазочного слоя (вытеснение, десорбция, сгорание и т. п.) приводит к переходу граничного трения в сухое. Очевидно, что критерии этого перехода (нагрузка, скорость скольжения, а следовательно, и температура поверхностного слоя металла) в момент перехода граничного трения в сухое в первую очередь зависят от строения, состава и свойств граничного смазочного слоя.

Строение граничного слоя, состоящего из полярных молекул, изучено достаточно хорошо, но строение граничных слоев, образованных растворами полярных веществ в неполярном растворителе, взаимодействие полярных и неполярных молекул смазки между собой и атомами кислорода в настоящее время еще остаются неясными.

Изучением строения и свойств граничного смазочного слоя занимались многие исследователи. Одним из первых строение и свойства граничного смазочного слоя изучал Уильямс Харди [148]. Исследуя граничное трение

стальной линзы по стеклянной пластинке, он установил, что если смазочное вещество имеет структурную молекулу, состоящую из цепи углеводородных атомов с присоединенной на одном конце карбоксильной (СОСН) или гидроксильной (ОН) группой, то происходит определенная ориентировка таких молекул в первичной пленке. Изучая зависимость коэффициента статического трения [148] от природы смазывающего вещества, Харди сделал заключение, что уменьшение этого коэффициента с увеличением молекулярного веса смазывающего вещества является следствием удаления углеводородной цепи молекулы смазки, приводящей к увеличению расстояния между трущимися поверхностями.

Согласно теории И. Ленгмюра [151] адсорбированные атомы химически соединены с атомами поверхности твердого тела (или жидкости). В случае поверхностно-активной смазки активные группы ее (СООН или ОН) располагаются у металлических поверхностей, а углеводородные хвосты неактивных групп молекул оттесняются и располагаются перпендикулярно поверхности металла. 1

Если минеральная смазка содержит активное вещество, например олеиновую кислоту, то смазочная прослойка состоит из двух примарных микрослоев, адсорбированных из активного вещества непосредственно на самих трущихся металлических поверхностях, и из макроскопической промежуточной прослойки минеральногомасла, которая является упругой прокладкой, устраняющей возможность взаимного непосредственного трения шероховатостей металлических поверхностей. Длинные прямые углеводородные цепи способствуют ориентации, а боковые цепи ей препятствуют.

Фундаментальные исследования в области теории граничного трения были проведены Б. В. Дерягиным [41, 42, 43, 44]. Им установлено, что активные смазочные

вещества могут обнаруживать статическое расклинивающее давление, уравновешивающее внешнюю нагрузку и обеспечивающее определенную толщину граничного смазочного слоя, являющуюся убывающей функцией нагрузки. По мнению Б. В. Дерягина [45] статическое и кинетическое расклинивающее действие граничных полимолекулярных пленок объясняется ориентацией удлиненных активных молекул, входящих в состав масел в граничных полимолекулярных пленках у поверхности раздела с твердой стенкой. Введение в неполярное масло полярных молекул способно вызвать радикальные изменения свойств смазочной прослойки неполярного масла за счет образования ориентированной слоистой структуры его молекул.

Из работы О. Бика и др. [145] следует не только самый факт ориентации молекул граничных пленок толщиной 10^{-6} — 10^{-5} см, но и появление этой ориентации в граничных слоях неполярного масла при добавлениях

к нему полярных молекул жирной кислоты.

Изучению роли поверхностно-активных веществ в адсорбционном и химическом взаимодействии смазки с поверхностями трения посвящены многочисленные работы П. А. Ребиндера. Смазочное действие в условиях граничного трения П. А. Ребиндер расценивает как результат насыщения мономолекулярного слоя ориентированными молекулами поверхностно-активного вещества на поверхности металла. По известной схеме полярная группа фиксирована на поверхностных атомах металла, а углеводородная цепь, направленная нормально к поверхности, обеспечивает наибольшее смазочное действие [112, 115].

Прочность связи смазочной прослойки с поверхностями металла определяется адсорбционным взаимодействием, которое может быть усилено чисто химической

связью полярных групп с атомами металла. Эта прочность связи может соответствовать прочности связи в

твердых телах [113].

Поверхностно-активные вещества, находящиеся в смазке, адсороируясь на поверхностях металла, могут воздействовать на понижение коэффициента трения и износа. Кроме того, действие поверхностно-активных веществ, находящихся в граничном слое смазки, в значительной степени заключается в адсороционном размягчении тонкого поверхностного слоя и облегчении деформации и разрушения, т. е. диспергирования поверхностных слоев металла как при износе, так и при резании.

Адсорбционный эффект, непосредственно проявляющийся в смазочном действии при граничном трении, всегда вызывает понижение обычного эксплуатационного износа, что широко применяется в практике и лежит в основе использования достаточно поверхностно-активных смазочных материалов при режимах граничного

трения.

Адсорбирующиеся компоненты смазки, например жирные кислоты, могут, особенно в присутствии кислорода, химически взаимодействовать с тонким поверхностным слоем металла, переводя его прежде всего на наиболее активных микронеровностях (выступах) в мягкое химическое соединение — мыло данного металла. [33].

Исследования, проведенные Л. В. Елиным [56], показали, что толщина граничной масляной пленки сохраняется в пределах 0,4—1 мк даже при значительных изменениях давления и скорости. Наименьшая толщина граничной пленки в момент наибольшего сближения поверхностей колеблется в пределах 0,15—0,4 мк.

А. С. Ахматов [7], рассматривая свойства граничного смазочного слоя как молекулярного коллектива, высказывается в пользу того, что первичный монослой смазки,

вещества могут обнаруживать статическое расклинивающее давление, уравновешивающее внешнюю нагрузку и обеспечивающее определенную толщину граничного смазочного слоя, являющуюся убывающей функцией нагрузки. По мнению Б. В. Дерягина [45] статическое и кинетическое расклинивающее действие граничных полимолекулярных пленок объясняется ориентацией удлиненных активных молекул, входящих в состав масел в граничных полимолекулярных пленках у поверхности раздела с твердой стенкой. Введение в неполярное масло полярных молекул способно вызвать радикальные изменения свойств смазочной прослойки неполярного масла за счет образования ориентированной слоистой структуры его молекул.

Из работы О. Бика и др. [145] следует не только самый факт ориентации молекул граничных пленок толщиной 10^{-6} — 10^{-5} см, но и появление этой ориентации в граничных слоях неполярного масла при добавлениях

к нему полярных молекул жирной кислоты.

Изучению роли поверхностно-активных веществ в адсорбционном и химическом взаимодействии смазки с поверхностями трения посвящены многочисленные работы П. А. Ребиндера. Смазочное действие в условиях граничного трения П. А. Ребиндер расценивает как результат насыщения мономолекулярного слоя ориентированными молекулами поверхностно-активного вещества на поверхности металла. По известной схеме полярная группа фиксирована на поверхностных атомах металла, а углеводородная цепь, направленная нормально к поверхности, обеспечивает наибольшее смазочное действие

Прочность связи смазочной прослойки с поверхностями металла определяется адсорбционным взаимодействием, которое может быть усилено чисто химической связью полярных групп с атомами металла. Эта прочность связи может соответствовать прочности связи в

твердых телах [113].

Поверхностно-активные вещества, находящиеся в смазке, адсорбируясь на поверхностях металла, могут воздействовать на понижение коэффициента трения и износа. Кроме того, действие поверхностно-активных веществ, находящихся в граничном слое смазки, в значительной степени заключается в адсорбционном размягчении тонкого поверхностного слоя и облегчении деформации и разрушения, т. е. диспергирования поверхностных слоев металла как при износе, так и при резании.

Адсорбционный эффект, непосредственно проявляющийся в смазочном действии при граничном трении, всегда вызывает понижение обычного эксплуатационного износа, что широко применяется в практике и лежит в основе использования достаточно поверхностно-активных смазочных материалов при режимах граничного

трения.

Адсорбирующиеся компоненты смазки, например жирные кислоты, могут, особенно в присутствии кислорода, химически взаимодействовать с тонким поверхностным слоем металла, переводя его прежде всего на наиболее активных микронеровностях (выступах) в мягкое химическое соединение — мыло данного металла [33]. Исследования, проведенные Л. В. Елиным [56], пока-

зали, что толщина граничной масляной пленки сохраняется в пределах 0,4-1 мк даже при значительных изменениях давления и скорости. Наименьшая толщина граничной пленки в момент наибольшего сближения поверхностей колеблется в пределах 0,15-0,4 мк.

А. С. Ахматов [7], рассматривая свойства граничного смазочного слоя как молекулярного коллектива, высказывается в пользу того, что первичный монослой смазки, взаимодействуя с металлом, обнаруживает ионно-дипольную связь, особенностями которой являются правильное чередование знаков металлических ионов и соответственное чередование позитивной и негативной конфигураций радикалов, несущих электрический момент. Энергия связи первичного мономолекулярного слоя с металлом максимальна.

Работа, необходимая для удаления одной из молекул из первичного монослоя, зависит от энергии адсорбционного взаимодействия, энергии связи между смежными дипольными группами и связи углеродных цепей. Все это обусловливает достаточно высокую механическую и тепловую прочности граничного смазочного слоя, что под-

яверждается экспериментально.

В результате взаимодействия поверхностей металлов при трении, как уже известно, происходит переход от исходного структурного и фазового состояния поверхностей и поверхностных слоев к рабочему состоянию. После снятия нагрузки трением фиксируется остаточное состояние поверхностного слоя, это характерно для процесса приработки узлов трения и перехода к установившемуся износу, а также остается в силе и для всех последующих интервалов работы узлов трения машин.

Направление развития процессов, происходящих при трении на поверхностях и в поверхностных слоях, зависит от распределения работы сил трения, которая в зависимости от конкретных условий эксплуатации может расходоваться (рис. 31) на упрочнение, тормозящее развитие износа, на разупрочнение, способствующее развитию износа, и непосредственно, незначительная ее часть,— на

разрушение, диспергирование (износ).

Упрочнение поверхностных слоев металла узлов трения в зависимости от условий трения может быть не-

скольких видов:

1) механическое, обусловленное пластической деформацией и связанным с ней изменением тонкой структуры (движение и развитие дислокаций, измельчение блоков);

2) фазовое упрочнение без изменения химического

состава поверхностных слоев, обусловленное термическими процессами;

3) фазовое упрочнение с изменением химического состава поверхностных слоев, обусловленное термодиффузионными процессами.

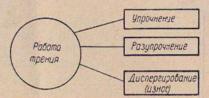


Рис. 31. Схема распределения работы сил трения.

Природа и механизмы

разупрочнения также связаны с механическими, термическими и термохимическими явлениями, возникающими в поверхностных слоях в процессе трения и износа.

Схема перехода от исходного состояния к рабочему, а затем к остаточному и схема распределения работы трения конкретны для каждого вида износа, так как связаны с протеканием вполне определенных процессов, в результате которых формируется определенный структурный и фазовый состав поверхностных слоев металла (рис. 32—36).

Для моделей строения поверхностных слоев металла при всех видах износа характерным является слой пластически деформированного металла. С процессом пластической деформации связаны возникновение поверхностных связей контактирующих поверхностей, упрочнение и разупрочнение металла поверхностных слоев, образование теплоты трения и изменение констант диффузии, особые процессы усталости металла и т. д.

В большинстве деталей машин, работающих при схв 1-р износе схватыванием 1-го рода (рис. 32), пластическая

64

деформация распространяется на глубину до 200 мк [30] и обеспечивает максимальную скорость ведущего процесса образования узлов схватывания, который может быть объяснен с позиций теории несовершенных кристаллов [15, 60].

Процесс схватывания осуществляется в результате диффузии на глубину порядка десятков ангстрем в зоне соединения. Для протекания его необходимо:

1) сближение ювенильных поверхностей металла на

расстояния порядка межатомных;

2) увеличение плотности точечных дефектов (вакансий и дислоцированных атомов) в свариваемых участках металла:

3) перемещение точечных дефектов. Точечные дефекты образуются также при пластической деформации в результате движения дислокаций со ступеньками; неполной аннигиляции сегментов дислокаций противоположных знаков, лежащих в близких плоскостях скольжения; рекомбинации отрезков дислокаций противоположных знаков, проходящих близко друг от друга в соседних плоскостях скольжения; поперечного скольжения дисло-

каций [15].

Доказательством того, что при низкотемпературной деформации образуются точечные дефекты, в частности вакансии, является тот факт, что около половины увеличения сопротивления, возникающего при деформации, снимается в процессе отжига в четко ограниченном интервале температур и со строго определенной энергией активации. Например, было установлено [26], что около половины прироста электросопротивления, возникающего при деформации кристаллов меди в жидком гелии, снималось при температуре 300° K, за что ответственны вакансии, так как дислоцированные атомы становятся подвижными при температуре 77° К.

Между степенью пластической деформации и числом созданных при деформации точечных дефектов существует определенное соотношение. Ф. Зейтц и Н. Мотт [26] высказали предположение, что при степени пластической деформации, равной Е, создается концентрация вакансий с величиной $C \approx 10^{-4} E$.

Вакансии и дислоцированные атомы в металлах обладают чрезвычайно высокой подвижностью. При средних температурах дефекты, образовавшиеся в процессе де-

формации, рассеиваются почти мгновенно [15].

Имеются многочисленные данные [26], свидетельствующие о том, что в меди дислоцированные атомы становятся подвижными при 40° K, причем энергия их перемещения составляет 0,1 эв. Энергия активации перемещения вакансий в меди, серебре, золоте примерно равна 0,7 эв, в алюминии — 0,44 эв; вакансии становятся подвижными при температуре выше 300° К [15].

Вследствие взаимного передвижения поверхностей трения образовавшиеся узлы схватывания разрушаются, а в других местах — образуются. Таким образом, при этом виде износа происходит беспрерывное образование

и разрушение узлов схватывания.

Первичные слои физически и химически адсорбированного кислорода беспрерывно разрушаются. Поэтому слой химически адсорбированного кислорода не получает развития и при помощи металлографического, рентгеновского и химического анализов не обнаруживается

На модели поверхностных слоев (рис. 32) слева показан момент образования узла схватывания, а справа момент разрушения узла схватывания с отделением ча-

стицы металла.

Фотографирование узла трения в процессе его работы при помощи кинофотокамеры [30] показывает, что представленная и описанная здесь модель строения поверхностных слоев металла в узлах трения при износе схватыванием 1-го рода соответствует действительности.

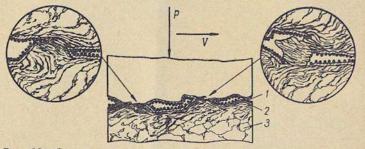


Рис. 32. Строение поверхностных слоев металла в узле трения при износе схватыванием 1-го рода:

1 — слой физически адсорбированного кислорода;
 2 — химически адсорбированного кислорода;
 3 — пластически деформированного металла.

В формировании вторичных структур поверхностных слоев металла при окислительном износе главную роль играют процессы пластической деформации и диффузии кислорода из окружающей атмосферы. При граничном трении наблюдаются не только процессы диффузии кислорода, но и процессы диффузии продуктов распада смазки, главным образом углерода.

Процессы пластической деформации и диффузии при окислительном износе протекают одновременно, что приводит к взаимной их интенсификации. Благодаря этому скорость процесса окисления приобретает максимальное значение и процесс окисления становится ведущим.

Увеличение коэффициента диффузии при пластической деформации можно объяснить увеличением концентрации вакансий при деформации и характером их взаимодействия с дефектами типа дислокаций [27]. Диффузионные процессы в металлах обусловлены способностью дефектов типа вакансий и дислоцированных атомов благодаря тепловым флуктуациям относительно легко мигрировать в кристалле.

В настоящее время дефекты этого типа привлекаются теорией для объяснения явлений диффузии. С этой точки зрения пластическая деформация, способствующая увеличению числа вакансий и дислокаций, безусловно, будет интенсифицировать диффузионные процессы.

С. Г. Конобеевский [88] показал, что в деформированном тонком слое меди коэффициент диффузии никеля в медь возрастает более чем в 1000 раз. Я. С. Уманский [134] нашел, что толщина карбидного слоя на поверхности деформированной танталовой пластинки возрастает в 50 раз по сравнению с толщиной слоя на недеформированной пластинке при температуре цементации 900° С, причем время диффузионного насыщения значительно уменьшается.

Примером влияния искажения кристаллической решетки на скорость диффузии является интенсивная диффузия (при комнатной температуре) первых слоев цинка, конденсированных на поверхности полированной медной пластинки. Как известно, полированный слой характеризуется сильными искажениями кристаллической структуры [27].

С. Д. Герцрикен и З. П. Голубенко [28] изучали влияние деформации на скорость диффузии цинка из а-латуни. Деформация создавалась в результате различия в коэффициентах расширения латуни и никеля. По сравнению с недеформированной латуныю коэффициент диффузии цинка из а-латуни при температурах 560, 600 и 640° С увеличивался соответственно в 1,7; 4 и 5 раз.

Исследованию влияния пластической деформации на диффузию посвящена работа Н. П. Пустоваровой [111],

в которой закономерности диффузионных процессов рассматривались как в предварительно пластически деформированном металле, так и при одновременном протекании процессов пластической деформации и диффузии, причем источником диффундирующих в металл элементов были взяты различные твердые, жидкие и газообразные среды, имеющие определенную физико-химическую активность по отношению к железу. Исследования показали, что пластическая деформация в очень большой степени интенсифицирует процессы диффузии, особенно при трении, когда эти процессы протекают одновременно.

Многими исследованиями [63, 64, 67, 100, 132] было установлено, что основным элементом, диффундирующим зв пластически деформирующиеся слои металла при тре-

нии, является кислород.

Диффузия кислорода в сталь без образования химических соединений кислорода с железом происходит только до предела насыщения. После этого из пересыщенного твердого раствора кислорода в железе происходит выпадение окислов железа различного химического состава.

Пластическая деформация поверхностных слоев металла и диффузионные процессы, приводящие к образованию слоев продуктов химического взаимодействия кислорода с железом, являются основными факторами, определяющими закономерности развития окислительного износа. Границы протекания окислительного износа в первую очередь определяются важнейшим производным от внешних механических воздействий фактором — теплотой трения, так как от количества тепла, выделяющегося при трении, зависят коэффициент диффузии и скорость процесса окисления.

Описанные процессы находят отражение на моделях строения поверхностных слоев (рис. 33, 34). Слой пла-

стически деформированного металла распространяется на относительно небольшую глубину (30—40 мк). Этот слой граничит со слоем твердого раствора кислорода в железе очень малых размеров. Концентрация кислорода в этом слое переменна. Очевидно, минимальное количество кислорода содержится на границе этого слоя с пластически деформированным слоем. Надо полагать, что резкой границы между этими слоями не существует, так как пластически деформирующийся металл постепенно насыщается кислородом. Максимальное количество кислорода содержится на границе между слоем твердого раствора и слоем химических соединений (для железа FeO; Fe₃O₄; Fe₂O₃).

Процесс образования химических соединений происходит скачкообразно: в тот момент, когда достигается пересыщение твердого раствора, образовываются самостоятельные зерна химических соединений железа с кислородом, которые отделяются четкой границей от слоя твердого раствора и обладают большим удельным объемом, большей твердостью и хрупкостью по сравнению

с железом.

Слой химических соединений имеет толщину 15—30 мк. Источником диффундирующих атомов кислорода является слой физически адсорбированного кислорода, где по мере диффузии ионов кислорода в глубь металла их место занимают новые атомы кислорода из окружающей среды.

Окислительный износ при трении, как показано на модели на рис. 33, происходит за счет выкращивания участков пленки окислов. Дисперсность выкращивающихся частиц окислов зависит от внешних механических воздействий.

Модель строения поверхностных слоев металла в узле трения при протекании окислительного износа и наличии

5*

граничной смазки усложняется (рис. 34) присутствием сложного физически адсорбированного слоя атомов кислорода и молекул поверхностно-активных веществ

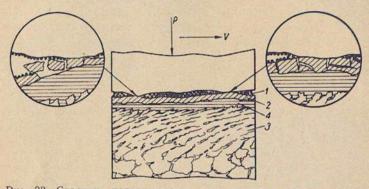


Рис. 33. Строение поверхностных слоев металла в узле трения при окислительном износе (сухое трение): I—слоя физически адсорбированного кислорода; 2—химических соединений кислорода с металлом; 3—твердого раствора кислорода в металле; 4—пластически деформированного металля.

смазки. В результате взаимодействия поверхностно-активных веществ смазки с поверхностным слоем металла, а также вследствие диффузии кислорода и продуктов диссоциации молекул смазки в этот слой фазовый состав твердого раствора и слоя химических соединений будет более сложным, чем в случае сухого трения.

Ощутимый износ поверхностного слоя при граничном трении происходит при вытеснении граничного смазочного слоя (рис. 34) и десорбции, сгорании когда граничное трение переходит в сухое.

Износ поверхностного слоя металла при граничной смазке без разрушения смазочного слоя происходит при предельной деформации этого слоя и его охрупчивании. Интенсивность износа в этом случае чрезвычайно мала. Исследование свойств поверхностных слоев металла,

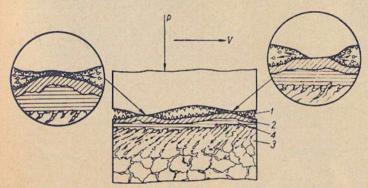


Рис. 34. Строение поверхностных слоев металла в узле трения при окислительном износе (граничная смазка):

1— слой физически адсорбированного кислорода и молекул смазки; 2— химических сосдинений кислорода с металлом; 3— твердого расгвора кислорода в металле; 4— пластически деформированного металла.

образовавшихся в процессе окислительного износа деталей машин [63, 66, 100], показало, что микротвердость слоя, состоящего из смеси химических соединений, при его образовании в нормализованной стали 45 находится в пределах от 1200 до 1400 κΓ/мм²; при его образовании в легированной термически обработанной стали — в пределах от 1300 до 1600 кГ/мм² и при образовании в железе Армко — в пределах от 900 до 1100 кГ/мм².

Нижележащий слой твердого раствора переменной концентрации кислорода по глубине в среднем имеет микротвердость; для случая образования его в нормализованной стали 45 650 кГ/мм² (при микротвердости перлита основного металла 230 кГ/мм² и феррита 130 кГ/мм²),

при образовании его в легированной термически обработанной стали 810 кГ/мм² (при микротвердости основного металла 720 $\kappa\Gamma/mm^2$), при образовании его в железе Армко 830 кГ/мм² (при микротвердости основного металла 120 кГ/мм2).

Слои, состоящие из новых фаз, образующихся в процессе окислительного износа, очень плохо травятся.

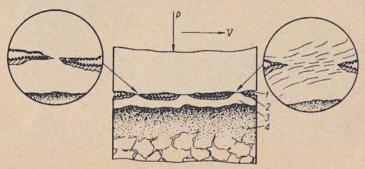


Рис. 35. Строение поверхностных слоев металла в узле трения при тепловом износе: (сквс 2 рест) I—слой физически адсорбированного кислорода; 2—химически адсорбированного кислорода; 3—пторичной закалки; 4—отпущенного металла.

Тем. «Зпос Модель строения поверхностных слоев металла в узск 2 роздах трения при тепловом износе характеризуется наличием слоя физически адсорбированного кислорода и очень тонкого, во многих местах (в местах фактического контакта) разрушенного слоя химически адсорбированного кислорода; слоя вторичной закалки толщиной 15-20 мк и отпущенного слоя толщиной до 35 мк (рис. 35).

Предпосылкой для образования слоя вторичной закалки и отпущенного слоя является резкое повышение температуры за счет пластической деформации металла поверхностных слоев. С увеличением температуры в зоне трения изменяются свойства контактирующих поверхностей, возникает состояние термической пластичности, вызывающее тепловой износ.

Слой вторичной закалки фиксируется при прекращении относительного движения трущихся поверхностей, так как быстрый нагрев создает большую концентрацию теплоты в тончайших поверхностных слоях металла, в результате чего температура превышает критическую, а быстрый отвод тепла в глубь металла создает предпосылки для процесса закалки и приводит к образованию отпущенного слоя.

Износ поверхностного очень размягченного слоя металла вследствие нагрева до высоких температур происходит за счет образования узлов схватывания и вырыва металла при разрушении узлов схватывания в местах фактического контакта, где пленка окислов разрушена

(рис. 35).

Тры При абразивном износе происходит внедрение тверизи дых абразивных частиц и скольжение их по поверхностям контакта, а также срезание этими абразивными частицами микрообъемов металла поверхностных слоев, вследствие чего пластическая деформация (рис. 36) распространяется на большую глубину — от 60 до 100 мк. Интенсивная пластическая деформация при абразивном износе объясняется тем, что абразивные зерна, имея, как правило, тупые углы и небольшую высоту выступающих частей, не режут, а скользят с большими усилиями по поверхности трения, пластически деформируя при этом поверхностные слои металла (рис. 36, слева).

Более острые абразивные зерна (рис. 36, справа), выступающие на большую величину от поверхности, в которой закреплены, также перед каждым циклом снятия стружки проскальзывают по поверхности трения. Врезание и снятие стружки происходит в те моменты, когда напряжение от совместного действия тангенциального и нормального усилий при трении превышает предел прочности изнашиваемого металла.

Интенсивная пластическая деформация способствует развитию диффузионных процессов и образованию тон-

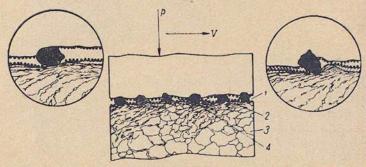


Рис. 36. Строение поверхностных слоев металла в узле трения при абразивном износе:

1 — слой физически адсорбированного кислорода; 2 — химически адсорбированного кислорода; 3 — пластически деформированного металла; 4 — абразивное зерно.

кой пленки окислов. При наличии твердых частиц абразива, способных снимать стружку, пленка окислов не сплошная, она разрушена в местах, где снималась стружка, что видно на модели.

При трении металлических поверхностей по абразивной массе, состоящей из абразивных частиц, твердость которых меньше твердости металла, срезания стружки не происходит, а образуется более толстая, чем в первом случае, сплошная пленка окислов. Тогда разрушение поверхностей трения происходит, как при окислительном износе.

СЛЕДСТВИЯ ПЕРВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ИЗНОСА

Из анализа первого положения теории износа и изучения строения поверхностных слоев металла в узлах трения при различных видах износа вытекает ряд следствий, имеющих важное практическое значение в борьбе с износом машин, которая может проводиться по двум направлениям:

1) устранение нежелательных видов износа (схватывания 1-го рода, теплового, абразивного и осповидного);

2) обеспечение устойчивых условий существования окислительного износа, отличающегося минимальной скоростью разрушения контактирующих поверхностей. Для этого необходимо, чтобы скорость окисления превышала скорости других нежелательных процессов на поверхностях трения, а прочность пленок окислов обеспечивала меньшую скорость износя по сравнению со скоростью окисления [63].

Из основного положения теории износа вытекает четыре следствия, которые формулируются следующим образом:

$$1 V_{\text{cyb}} < V_{\text{ok}}; \tag{1}$$

$$2 V_{\text{тепл}} < V_{\text{ок}}; \tag{2}$$

$$3 V_{a6p} < V_{o\kappa};$$
 (3)

1
$$V_{\text{Cyb}} < V_{\text{OK}};$$
 (1)
2 $V_{\text{TeII,7}} < V_{\text{OK}};$ (2)
3 $V_{\text{a6p}} < V_{\text{OK}};$ (3)
4 $V_{\text{OCI}} < V_{\text{OK}}.$ (4)

Для всех четырех неравенств дополнительным условием, обеспечивающим существование окислительного износа, служит неравенство

$$V_{\text{ок}} > V_{\text{разр}}$$
.

Выполнение условий неравенств (1), (2), (3), (4), очевидно, может быть осуществлено двумя путями: во-первых, уменьшением скорости процесса, обусловливающего нежелательный износ при постоянной скорости процесса окисления, во-вторых, увеличением скорости процесса окисления при постоянной скорости процесса, обусловливающего нежелательный износ. Большинство мероприятий, проводимых в практике борьбы с износом машин, направлено на уменьшение скоростей процессов нежелательных видов износа. Однако выполнение условий неравенств может быть осуществлено обоими путями при помощи изменений трех групп факторов: внешних механических воздействий, среды и факторов, связанных с материалом трущихся пар.

Влияние внешних механических воздействий на скорости процессов при трении и износе

Внешние механические воздействия (скорость скольжения и давление на трущихся поверхностях) оказывают большое влияние на скорости процессов, возникающих на поверхностях трения. Это объясняется прежде всего изменением температуры поверхностей трения и ее градиентами, зависящими от величины скорости скольжения и удельного давления. Температура в зоне трения определяет основные параметры адсорбционных, диффузионных процессов и изменения структуры и свойств поверхностных слоев трущихся элементов.

Скорости скольжения и удельное давление зависят от скорости, величины и интенсивности деформации металла поверхностных слоев и времени контакта трущихся

поверхностей.

В зависимости от внешних механических воздействий может преобладать или скорость процесса схватывания $V_{\rm cxb} > V_{\rm ok}$, или скорость процесса окисления $V_{\rm ok} > V_{\rm cxb}$.

На рис. 37 приведены пространственные диаграммы зависимости ведущих видов износа от скорости скольжения и удельного давления [30]. Из диаграмм следует, что существуют критические скорости скольжения, при которых интенсивность износа и его характер скачкообразно изменяются. Изменение скорости относительного перемещения трущихся поверхностей вызывает качественные изменения металла поверхностных слоев, скачкообразно переходящие, при определенных значениях скорости скольжения, в коренные изменения состояния и свойств.

При изменении скорости скольжения ведущие виды износа чередуются. При малых скоростях скольжения (рис. 37, а) происходит интенсивный износ схватыванием 1-го рода, дальнейшее увеличение скорости вызывает окислительный износ, который переходит в схватывание 2-го рода (тепловой износ), отличающееся интенсивным разрушением поверхностей трения. Индексами на диаграммах обозначены области развития различных видов износа: А — область окислительного износа; В — область одновременного протекания двух видов износа (окислительного и схватывания), причем в этой области окисление сопутствует схватыванию; С и D — области развития соответственно процессов схватывания 1-го и 2-го рода.

При трении некоторых пар схватывание 1-го рода может отсутствовать, что указывает на большое влияние материалов трущихся пар на скорость процессов при трении и износе. Изменение ведущих видов износа в первую очередь объясняется влиянием скоростей процессов

окисления и схватывания.

Изменение свойств металла зависит в свою очередь от скорости его окисления и температуры, степени разупрочнения, пластичности металла и температуры, а также способности металла к схватыванию.

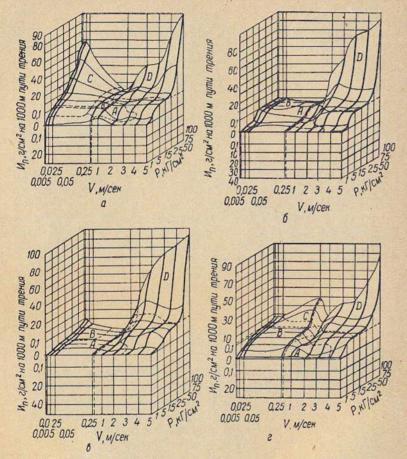


Рис. 37. Диаграммы изменения износа в зависимости от скорости скольжения и удельного давления:

a — при трении образцов (сталь 45) по валу (сталь 10); δ — образцов (сталь V8 закаленная) по валу (сталь V8 закаленная); s — образцов (сталь V8 закаленная) по валу (сталь 10); s — образцов (сталь 45) по валу (сталь V8 закаленная).

График зависимости температуры от скорости скольжения приведен на рис. 38 [79], а графики изменения скорости окисления металла в зависимости от темпера-

туры [2] и данные об изменении механических свойств (разупрочнении стали) под действием температуры — на рис. 39 и 40.

Если учесть, что при трении металлических поверхностей изменение температуры адекватно изменению скорости скольжения, то простым совмещением кривых зависимости скорости окисления от температуры и разупрочнения металла от температуры (обратной по величине зависимости прочно-

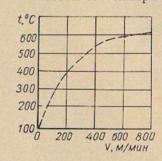
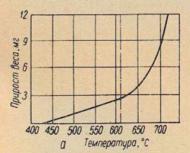


Рис. 38. График зависимости температуры от скорости скольжения при трении стали по стали.

сти от температуры) можно получить принципиальную схему изменения скоростей процессов окисления и схватывания при изменении скорости скольжения (рис. 41).



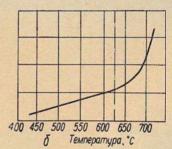


Рис. 39. График зависимости прироста веса при окислении от температуры для двух сортов железа (а и б)

Эта схема вполне соответствует экспериментальным данным о чередовании видов износа при изменении скорости скольжения.

Изменение величины удельного давления при трении в меньшей степени влияет на изменение скоростей про-

цессов схватывания и окисления, чем скорость скольжения, так как это влияние связано в основном

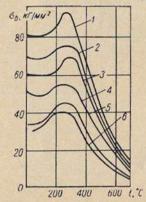


Рис. 40. График зависимости предела прочности стали при растяжении от температуры:

1— сталь с 0,9% С; 2— 0,7% С; 3—0,5% С; 4— 0,3% С; 5—0,1% С; 6— железо Армко.

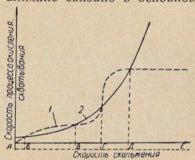


Рис. 41. Схема изменения скоростей процессов окисления и схватывания в зависимости от скорости скольжения:

$I-V_{\rm CXB};$	$2-V_{OK}$;
$A-V_{OK}=0;$	$V_{\rm cxs}=0;$
$AE-V_{OK}\rightarrow min;$	$V_{\rm CXB} < V_{\rm OK};$
БВ-V _{ок} → малая;	$V_{\rm CXB} > V_{\rm OK};$
ВГ-V _{ОК} -средняя;	V CXB < VOK;
ГД-Vок → большая;	$V_{\rm CXB} > V_{\rm OK};$
$AE-V_{OK} \rightarrow max;$	V CXB < VOK.

с изменением величины и интенсивности пластической деформации поверхностных слоев металла, а не с изменением температуры.

Изменение величины удельного давления может оказать резкое влияние на скорости процесов главным образом в зонах критических величин скоростей скольже-

Как уже отмечалось, температура трущихся поверхностей металла является наиболее важным фактором, влияющим на скорости процессов окисления и схватывания, а следовательно, на возникновение и развитие

того или иного вида износа. Изменяя температуру поверхностей трения, можно в широком диапазоне скоростей скольжения добиваться протекания только окислительного износа, при котором

 $V_{\text{ок}} \rightarrow \text{max}, \ V_{\text{схв}} \rightarrow 0.$ На рис. 42 приведены данные исследования влияния температуры на скорости процессов окисления и схватывания, происходящих при трении и износе [102].

При испытании образцы нагревались до заданных температур (150, 250,

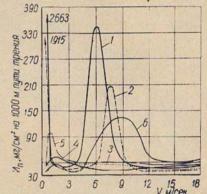


Рис. 42. График зависимости приведенного износа от скорости скольжения и температуры подогрева образцов: $1-25^{\circ}$ C; $2-50^{\circ}$ C; $3-150^{\circ}$ C; $4-250^{\circ}$ C; $5-350^{\circ}$ C; $6-500^{\circ}$ С.

350 и 500°С) и во время испытания подогрев их не прекращался. Таким же образом производились испытания с охлаждением образцов до -50° С.

Повышение температуры поверхности трения приводило к увеличению интенсивности диффузионных процессов и химической активности трущихся слоев металла, в результате чего возрастала скорость окислительных процессов. В широком диапазоне скоростей скольжения протекал только окислительный износ.

При переходе от контактного схватывания при подогреве образцов к окислительному износу резко снижался износ. Так, например, при скорости скольжения 0,5 м/сек в результате подогрева образцов от 150 до 500° С износ уменьшился в 100—130 раз, а при скорости 6 м/сек—в 15 раз (при подогреве до 150—350° С). Чрезмерный нагрев образцов (до 500° С и выше) приводил к развитию в диапазоне скоростей скольжения от 6 до 11 м/сек теплового износа [102].

Понижение температуры поверхностных слоев трущихся металлов сопровождается сдвигом критических скоростей перехода от окислительного износа к тепловому и от теплового к высокотемпературному окислительному в сторону больших скоростей, а также к уменьшению интенсивности изнашивания в областях атермического и термического схватывания в результате уменьшения

пластичности и повышения прочности металла.

Влияние среды (газовой, жидкой и твердой) на скорости процессов при трении и износе

Значительное влияние на изменение скоростей процессов, протекающих на поверхностях трения, оказывает газовая среда. Это обусловлено прежде всего большой ролью кислорода в процессах трения и износа металлов. На поверхностях трения вследствие адсорбции и диффузии кислорода развиваются окислительные процессы, которые в определенных условиях приобретают большие скорости; при этом возникает ведущий окислительный износ [63, 68, 69, 100, 101].

При отсутствии кислорода в газовой среде зоны трения окислительные процессы исключаются ($V_{ok} \rightarrow 0$), раз-

виваются процессы схватывания и ведущими становятся износы схватыванием 1-го и 2-го рода.

В связи с большим влиянием кислорода на процессы трения и износа важно было установить, какие процессы возникают при трении металлических поверхностей и постоянием изменении солержания кислорода в зоне тре-

стоянном изменении содержания кислорода в зоне трения, а также при каком количестве кислорода они полу-

чают развитие.

В результате исследований установлено, что в зависимости от содержания кислорода (степени разрежения воздуха), начиная от 10^{-1} мм рт. ст. немедленно развиваются процессы схватывания, причем развитие этих процессов в большой мере зависит от внешних механических воздействий (скорости скольжения и удельного давления).

Дальнейшее увеличение разрежения воздуха (более 10^{-1} мм рт. ст.) не вносит существенных изменений в протекание процессов схватывания и не вызывает появления

новых процессов (рис. 43).

Исследования процессов трения и износа различных металлов в газовых средах показали, что кислород по-разному влияет на интенсивность этих процессов. Износ одних металлов в среде кислорода значительно меньше, чем в газовых средах, не содержащих кислород, а для других металлов трение в атмосфере кислорода вызывает значительное увеличение интенсивности износа. Таким образом, в зависимости от природы металлов наблюдается инверсия во влиянии кислорода на интенсивность процесса износа.

На рис. 44 показан износ образцов из стали 45 в среде различных газов [100, 101]. Во всем диапазоне скоростей скольжения в среде кислорода ведущим износом является окислительный. В среде аргона — износ схватыванием

1-го или 2-го рода.

На рис. 45 и 46 приведены фотографии образцов, испытанных на трение в среде кислорода и аргона, а в табл. 2— данные об износе образцов железа, сурьмы и кадмия в среде воздуха, кислорода и аргона [71].

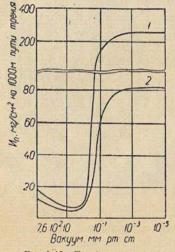


Рис. 43. График зависимости приведенного износа закаленной стали 45 от степени разрежения воздуха (удельное давление $10~\kappa\Gamma/cm^2$; сухое трение скольжения):

1— скорость скольжения 0,377 м/сек; 2—0,068 м/сек (И.Г. Носовский, Л.В. Ни-китин).

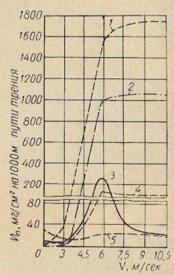


Рис. 44. График зависимости весового износа стали 45 в различных газовых средах от скорости скольжения:

1 — аргон; 2 — углекислота; 3 — воздух; 4 — азот; 5 — кислород.

При трении железа в среде кислорода скорость процесса окисления приобретает максимальное значение. Образующиеся при этом на поверхности трения пленки окислов, обладающие достаточно высокой прочностью и твердостью, обусловливают малую интенсивность окислительного износа.

В аргоне (при отсутствии кислорода) максимальное

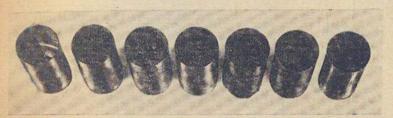


Рис. 45. Внешний вид образцов из нормализованной стали 45 после испытания в среде кислорода с различными скоростями скольжения (постоянное удельное давление $10~\kappa\Gamma/c$ м²).



Рис. 46. Внешний вид образцов нормализованной стали 45 после испытания в среде аргона при прежних условиях (рис. 45).

значение приобретает скорость процесса схватывания, поэтому износ железа становится максимально большим.

Сурьма и кадмий при трении в кислороде изнашиваются с очень большой скоростью вследствие того, что образующиеся на поверхностях трения пленки окислов крайне непрочны, плохо связаны с основным материалом

и способствуют быстрому износу. При трении в среде аргона износ становится очень малым, так как скорость процессов окисления сводится к нулю, а процессы схва-

тывания не получают развития вследствие особенностей атомного строения этих металлов.

Интенсивность окислительного износа в большой

Таблица 2

	И _п , + г/см² на 1000 м пути трения					
Металл	Воздух	Кислород	Аргон			
Fe	1690,00	411,32	2960,55			
Sb	760,66	6634,10	11,46			
Cd	97,22	7690,66	11,57			

степени зависит от количества кислорода в зоне трения, т. е. от степени вакуума, как при трении скольжения, так и при трении качения. Минимальная интенсивность

окислительного износа наблюдается при некотором опти-

мальном количестве кислорода в зоне трения. На рис 47 представлены крупрые изреса де

На рис. 47 представлены кривые износа деталей шариковых подшипников в зависимости от количества кислорода в зоне трения (давления воздуха) [69]. При давлении воздуха от 10^{-1} до 10^{-2} мм рт. ст.) наблюдается мини-

мальный износ деталей, т. е. износ в сотни раз меньший, чем в воздухе при нормальном атмосферном давлении. Это объясняется тем, что количества кислорода при таком давлении воздуха достаточно для образования тончайшей поверхностной пленки окислов, способной предотвратить схватывание металла, но недостаточно для интенсивного образования вторичных структур, которые подвержены отслаиванию и разрушению. По-видимому, при недостатке кислорода в поверхностных слоях при трении качения образуются ненасыщенные твердые растворы кислорода в металле и вторичные пленки окислов, хорошо связанные с основным металлом.

Дальнейшее увеличение вакуума резко меняет процесс трения— начинается интенсивное схватывание. Материал обойм налипает на шарики и переносится ними. Происходит интенсивная деформация всей поверхности

беговой дорожки.

Несмотря на деформацию поверхности трения, износ деталей подшипников небольшой, он в несколько раз меньше, чем при нормальном давлении воздуха. Это объясняется отсутствием хрупких пленок, интенсивно разрушающихся при трении.

При давлении воздуха 5 · 10 - 5 мм рт. ст. происходит

заедание и сварка деталей подшипников.

При трении скольжения минимальная интенсивность окислительного износа также соответствует определенному оптимальному содержанию кислорода в зоне тре-

ния (рис. 43).

При трении в условиях недостатка кислорода, когда химические процессы не получают развития, интенсивность износа определяется механическими свойствами трущихся металлов, и в первую очередь их твердостью (рис. 48). При этом основным фактором, влияющим на процессы трения, является теплота трения.

-30

-20

-10

10-3

Давление воздуха,мм от ст

Рис. 47. График зависимости

износа деталей шариковых подшипников от давления окру-

жающего воздуха (нагрузка

100 кГ; скорость вращения

1440 об/мин; количество цик-

1- шарики; 2- малая обойма; 3- сепаратор; 4- большая обойма.

лов нагружения — 120 000):

На рис. 49 показаны кривые приведенного износа стали 45 в зависимости от скорости скольжения и удельного давления, т. е. от работы трения, а следовательно, и от различных условий теплообразования при разреже-

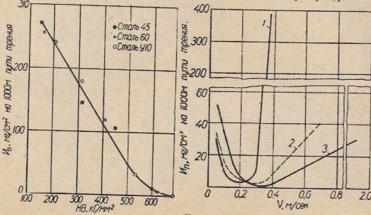


Рис. 48. График зависимости приведенного износа углеродистых сталей от их твердости; разрежение воздуха до $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. (И. Г. Носовский, Л. В. Никитин).

Рис. 49. График зависимости приведенного изпоса закаленной стали 45 от скорости скольжения в условиях разрежения воздуха до $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. (сухое трение скольжения):

I — удельное давление 10 $\kappa \Gamma/c m^2$; 2 — $5 \kappa \Gamma/c m^2$; 3 — $2 \kappa \Gamma/c m^2$ (И. Г. Носовский, Д. В. Накитии).

нии воздуха до $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Анализ этих кривых показывает, что при недостатке кислорода, вследствие отсутствия химических процессов, теплота трения оказывает непосредственное влияние на механические свойства поверхностных слоев металла и закономерности протекания в них теплофизических процессов. При определенных значениях работы трения создаются такие оптимальные условия термического состояния поверхностных

слоев, когда интенсивность износа приобретает минимальное значение.

Таким образом, проведенные исследования показали, Таким ооразом, проведенные песьменто теплота при трении в вакууме является более важным фактором, чем при трении в обычных условиях. Это связано с отсутствием химических процессов и прямым влиянием теплоты на изменение механических свойств

трущихся поверхностей.

Есть еще одна важная особенность влияния теплоты на процессы, происходящие при трении. Эта особенность связана с интенсификацией окислительных процессов при малых и средних степенях разрежения воздуха, когда количество кислорода в зоне трения все еще ощутимо. При значительных увеличениях температуры в этих условиях процессы окисления протекают достаточно интенсивно и на поверхностях трения образуются устойчивые защитные пленки ненасыщенных твердых растворов и химических соединений кислорода с металлом, способствующие значительному снижению интенсивности износа (рис. 43, 47).

Большое влияние на изменение скоростей процессов на поверхностях трения оказывают также некоторые другие газы, пары воды и жидкая среда (смазка).

Одной из основных функций смазки является разде-ление трущихся поверхностей. Предполагают, что при идеальных условиях жидкостного трения возможность непосредственного контакта трущихся поверхностей совершенно устраняется. Смазка образует между трущимися поверхностями промежуточный слой, при этом процесс сухого трения двух твердых тел заменяется процессом внутреннего трения в самом смазочном веществе.

Во всех случаях, когда между трущимися позерхностями деталей машин отсутствуют условия гидродинамической смазки (большие удельные давления, малые

скорости относительного перемещения, недостаточный подвод смазки), основные характеристики трения и износа определяются состоянием и свойствами тонкой, адсорбированной на поверхностях трения масляной пленки. Устойчивость тонких граничных слоев смазочного вещества при трении зависит от свойства, называемого маслянистостью.

Роль смазочного слоя при граничном или жидкостном трении не ограничивается только разделением трущихся металлических поверхностей. Смазка является средой, в которой находятся поверхностно-активные вещества, кислород воздуха и ряд специальных присадок, взаимодействующих с поверхностными слоями металла и влияющих на скорости процессов, происходящих в поверх-

ностных слоях металлов при трении и износе.

В работах П. А. Ребиндера [114], Б. В. Дерягина [46], П. В. Елина [57] и других указывается, что во многих случаях смазка достаточно эффективно снижает силу трения, значительно уменьшает износ, и наоборот. Исследования показали, что двойная роль смазки находит достаточно определенное теоретическое объяснение, а именно: смазочное действие проявляется всегда как на наружной поверхности металла, на границе металла с окружающей средой, так и внутри металла в его наружном слое.

При граничной смазке повышение ее качества с помощью присадок всегда ведет к уменьшению износа вследствие эффекта расклинивающего действия. По мере повышения активности смазки даже при большом удельном давлении в местах контакта получается достаточная толщина смазочной пленки между поверхностями трения и в результате износ снижается. Но наряду с этой функцией смазки при увеличении ее активности под влиянием введения присадок возрастает и новая функция смазки, а именно то, что может быть названо внутренней смазкой. Активные полярные компоненты смазки способствуют резкому повышению возможности масел проникать в металл, но не в жесткую пористость, которая

всегда есть в металле, а в те микротрещины, что образуются в пластически деформированной зоне металла. Смазка тем активнее проникает по микротрещинам, чем выше ее масля-

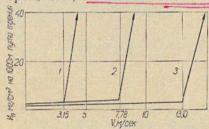


Рис. 50. График зависимости износа стали от скорости скольжения (образцы из стали 10, диск из стали 40X): I— при сухом трении; 2— при трении со смазкой; AB— область окислительного износа при работе со смазкой; BB— теплового износа при работе со смазкой.

8.0

-A5

40

58

0,500

0,400

0,300

0,200

€ 0,100

2/CM2

Рис. 51. Влияние различных присадок к смазочному маслу на скорость скольжения, при которой происходит переход к тепловому износу стали 45:
1— масло МС-20; 2— масло МС-20 + 5% дитизоната кобальта; 3— масло МС-20 + 5% роданида меди.

нистость. Это внутреннее действие смазки всегда усиливает пластический или даже хрупкий износ.

Рядом исследований [16, 68] установлено, что кислород воздуха играет большую роль в процессе трения и износа не только при сухом трении, но и при устойчивой смазке. Кислород, адсорбируясь на поверхностях трения, обеспечивает развитие окислительных процессов

со скоростью, превышающей скорость процессов схватывания.

На рис. 50 приведены сравнительные данные по износу стали в условиях сухого трения и смазки. При граничном трении в интервале скоростей от 0 до 12 м/сек скорость процесса схватывания практически равна нулю $(V_{\text{схв}} \rightarrow 0)$. Ведущим является окислительный износ. При этих же условиях трения без смазки ведущим износом, как видно на рис. 48, является схватывание 1-го рода $(V_{\text{схв}} \rightarrow \text{max})$.

Скорости окислительных процессов при трении со смазкой зависят от состава смазки и, главным образом, от наличия в ней присадок [3, 17, 18]. На рис. 51 приведены данные о влиянии различных присадок к смазочному маслу на величину предельной допустимой скорости перехода к аварийному тепловому износу [76].

Влияние материала трущихся поверхностей на скорости процессов при трении и износе

Скорости процессов, происходящих на поверхностях трения, в первую очередь зависят от свойств поверхностных слоев металлов при трении. Поверхностные слои металла в процессе трения в зависимости от внешних механических воздействий и среды приобретают строение, фазовый состав, а следовательно, и свойства, характерные для рабочего состояния узла трения.

Формирование при трении поверхностных слоев металла, т. е. вторичных поверхностных рабочих структур, зависит от первичных, или исходных, свойств металлов и условий эксплуатации узла трения. На формирование вторичных поверхностных рабочих структур большое влияние оказывают механические, теплофизические и хи-

мические свойства исходного металла, которые определяются не только природой металла, но и способом его обработки.

Одной из важнейших механических характеристик, влияющих на скорости почти всех процессов, возникаю-

щих при трении, является предел текучести σ_s материала.

Увеличение σ_s при постоянном давлении приводит к уменьшению $V_{\rm cx}$ в при трении скольжения. При определенной величине σ_s скорость схватывания становится минимальной, процесс схватывания практически прекращается.

Увеличение σ_s материала при трении качения приводит к уменьшению скорости усталостных процессов (V_{ycr}). Экспериментально в лабораторных условиях и в практике работы машин установлено, что изменением σ_s можно добиться при трении скольжения уменьшения скорости схватывания ($V_{cxb} \rightarrow 0$) и в связи с этим

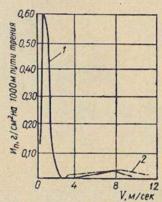


Рис. 52. График зависимости вида износа от механических свойств трущихся поверхностей:

1 — образцы из стали 10; 2 — образцы из стали У10А, термически обработанной.

устранения износа схватыванием, а при трении качения— уменьшения скорости усталостных процессов $(V_{\rm yet} o 0)$ и устранения осповидного износа.

На рис. 52 показано, что при прочих равных условиях вид износа зависит от механических свойств трущихся поверхностей.

На скорость развития процессов схватывания 2-го рода большое влияние оказывает теплоустойчивость метал-

ла, о которой можно судить по характеристикам изменения предела прочности от температуры (рис. 53), а также по характеристикам изменения ударной вязкости при изменении температуры (рис. 54). Эти данные свиде-

тельствуют о резком снижении предела прочности и коренных изменениях пластичности углеродистых сталей в интервале температур 400—800° С.

Определенное представление об изменении ударной вяз-

Определенное представление об изменении ударной вязкости при повышенных температурах дает также измерение твердости металла в горячем состоянии и испытание металлов на длительную твердость.

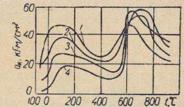


Рис. 54. График зависимости ударной вязкости сталей от температуры:

I- сталь с 0,08% C; 2-0,15% C; 3-0,25% C; 4-0,40% C (Рейнгольд).

Рис. 53. График зависимости предела прочности металлов от температуры: $I-C\tau$. 2; $2-C\tau$. 4; $3-C\tau$. 6; $4-c\tau$ аль У12A; $5-c\tau$ аль У8A; $6-c\tau$ аль У10A (М. А. Зайков).

Некоторые из этих данных приведены в табл. 3 [36].

Механические свойства различных металлов при повышении температуры изменяются с неодинаковой интенсивностью.

	Температура испытания, °С						
Марка стали	300	400	500	600	650	700	Выдерж- ка, <i>мин</i>
PK10	0,65 0,65 0,65	0,65 0,65 0,65	0,65 0,65 0,65	0,80 1,00 1.00	1,40 1,65 1,65	1,75 1,75 1,75	15 60 120
РФ1	0,65 0,65 0,65	0,65 0,65 0,65	0,75 0,80 0,80	0,95 0,95 1,10	1,10 1,30 1,40	1,80 1,70 1,70	15 60 120
ЭИ262	=	=	=	1,05 1,05 1,05	1,15 1,25 1,35	Ē	15 60 120
ЭИ381	0,70 0,70 0,70	0,80 0,80 0,80	0,85 0,90 1,20	1,00 1,10 1,50	1,35 1,55 2,00	2,25 3,40 -	15 60 120
ЭИ382	0,68 0,68 0,68	0,68 0,68 0,68	0,80 0,82 0,92	1,00 ,05 1,05	1,40 1,45 1,45	1,35 2,85 2,85 2,85	15 60 120
ЭИ184	0,80 0,80 0,80	0,80 0,80 0,80	0,92 0,92 0,95	1,20 1,20 1,35	1,75 2,00 2,00	2,70 4,00	15 60 120

В металлах, обладающих низкой теплостойкостью, термическая пластичность начинает проявляться при относительно низких температурах нагрева, а это способствует увеличению скоростей процессов схватывания 2-го рода и развитию ведущего теплового износа. Повы-

шение теплостойкости металла приводит к уменьшению скоростей нежелательных процессов схватывания 2-го рода и создает предпосылки к развитию окислительных

В результате проведенных исследований [71, 72] подтвердились предположения о резко различных способностях металлов и сплавов схватываться и окисляться и очень важной особенности их при окислении — образовывать на поверхностях трения вторичные структуры, предохраняющие от усиленного износа или способствующие увеличению скорости износа. Анализ данных этих исследований позволил разработать классификацию металлов и сплавов по их износостойкости. Принципиальная схема этой классификации представлена на рис. (4)

В металлах и сплавах, относящихся к первой и второй группам (железо и его сплавы, медь и ее сплавы, олово и сплавы на его основе, свинец и др.), скорость процесса окисления при определенных режимах трения (в металлах второй группы в очень широком диапазоне скоростей скольжения) превышает скорость процесса схватывания. При трении этих металлов выполняются первое положение теории износа и дополнительное условие, способствующее протеканию окислительного износа (скорость окисления больше скорости разрушения вторичных структур, образовавшихся в процессе трения). Выполнение дополнительного условия объясняется образованием вторичных структур, состоящих из различного рода окислов, обладающих более высокой износостойкостью, чем исход-

При трении металлов и сплавов третьей и четвертой групп (висмут, сурьма, кадмий, никель, цинк, магний, кобальт и др.) дополнительное условие протекания окислительного износа не обеспечивается, так как образующиеся в процессе трения пленки окислов менее износостойкие, чем основной металл. В результате этого скорость разрушения (износа) образовавшихся пленок становится равной скорости их образования.

Так как металлы этих групп характеризуются боль-

шой скоростью протекания окислительных процессов, то интенсивность их разрушения при окислительном износе чрезвычайно большая.

В табл. 4 приведены данные о величинах износа некоторых металлов третьей и четвертой групп при окислительном износе и при износе схватыванием [71].

Проведенный анализ влияния основных факторов на скорости процессов, происходящих при трении и изно-

Таблица 4 $M_{\rm H}^{}$, мг/см 2 на 1000 ж пути трения Окисление Схватывание Bi 454,55 -5 21333,33 Sb 6634,10 11,46 Cd 4690,66 440,55 4995,83 5832,20 Ni 563,15 Zn 1969,00 50,00 41.40

се деталей машин, позволяет сделать ряд важных, вытекающих из этого анализа, обобщающих выводов.

Внешние механические воздействия на поверхности Выстрения составляют важнейшую группу факторов, определяющих процесс износа. Это влияние обусловлено тем, что изменение рода трения, скорости относительного перемещения трущихся поверхностей и удельного давления вызывает коренные изменения скоростей процессов, происходящих при трении и износе металлов (окисление, схватывание и др.). Изменения же скоростей процессов приводят к качественно различным видам износа, различным стадиям их и изменениям количественных показателей.

2 Внешняя среда — газовая, жидкая и твердая — оказывает также огромное влияние на трение и износ метал-

лов. Существование наиболее широко распространенного окислительного износа деталей машин связано с воздушной средой и наличием в ней кислорода. Роль газовой среды значительна как в условиях сухого трения, так и в

условиях граничной смазки.

Качественные и количественные характеристики трения и износа большинства деталей машин определяются жидкой средой — смазкой трущихся поверхностей. При некоторых условиях трения большое значение имеет применение твердых смазочных материалов (графита, двусернистого молибдена и др.). Возникновение абразивного износа многих деталей связано с наличием твердой абра-

зивной среды в зоне трения.

3 Влияние материалов и способов их обработки на скорости развития различных процессов, происходящих на поверхностях трения, связано с исходными механическими, теплофизическими и химическими свойствами и с изменениями этих свойств в процессах трения и износа. Изменение материалов трущихся поверхностей вызывает изменение интенсивности ведущего износа, пределов его существования и может вызвать переход от одного вида износа к другому.

К основным факторам, связанным со свойствами тру-

щихся металлов, относятся:

1) степень химического сродства металла с кислородом и природа образующихся при трении химических соединений;

2) способность металла к контактному схватыванию

при нормальных и повышенных температурах;

3) механические свойства металлов (пределы текучести и прочности, твердость, ударная вязкость, пластичность, усталостная прочность);

4) теплоустойчивость металла;

5) способность металла взаимодействовать со смазкой.

. С этой группой факторов неразрывно связаны основные характеристики качества поверхностей трения, оцениваемые микрорельефом, структурой поверхности и тонких поверхностных слоев и напряженностью.

При помощи всех этих факторов можно управлять скоростями процессов, происходящих при трении и износе, исключая условия для развития нежелательных видов износа и создавая условия для протекания окислительного износа.

Окислительный износ является единственно допустимым, так как при благоприятных условиях на трущихся поверхностях образуются вторичные структуры, обладающие максимальной износостойкостью. Практически такие условия можно обеспечить при помощи конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий.

ВТОРОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ИЗНОСА

Устранение нежелательных видов износа (схватывания 1-го рода, теплового, абразивного и осповидного) и переход к окислительному износу удовлетворяют не всем требованиям борьбы с износом и являются только первой частью решения проблемы. При всех случаях окислительного износа снижение его скорости, сведение его к минимуму представляет необходимую и важную вторую часть общей проблемы. Тем более, что окислительный износ может проходить с большой скоростью и давать нежелательные результаты. Это особенно относится к трению металлов третьей и четвертой групп (рис. 14).

При окислительном износе главной задачей является определение условий максимальной износостойкости и расширение границ существования этого вида износа. Износостойкость при окислительном износе определяется интенсивностью образования и свойствами вторичных структур, возникающих на поверхностях трения [63]. Основная зависимость, к выполнению которой надо стремиться при окислительном износе, $V_{\text{ок}} \rightarrow 0$.

Так как сущность окислительного износа заключается в одновременном протекании пластической деформации и окислительных процессов (адсорбции и диффузии), то, очевидно, выполнение зависимости $V_{
m ok}
ightarrow 0$ может и должно осуществляться двумя путями: во-первых, повышение износостойкости при окислительном износе за счет изменения свойств пластичности трущихся металлов



Рис. 55. График зависимости величины окислительного износа конструкционных сталей от их твердости: 1 — величина износа; 2 — твердость.

2 во-вторых, повышение износостойкости изменением химической природы вторичных

ноя ЗОХГСЯ ванная в результате адсорбции намоги шенная и диффузии на прина пр ностях и в поверхност-

ных слоях трущихся металлов.

Как уже говори-

теристики окислительного износа, определяющие интенсивность образования новых вторичных структур на поверхности трения, зависят главным образом от исхолных свойств пластичности трущихся металлов, характеризуемых о, д. Таким образом, вторичные предлосылки износостойкости при окислительном износе в большой мере зависят от свойств основного металла. Чем

пластичнее трущиеся металлы, тем, при прочих нас равных условиях, интенсивнее будет протекать окислительный износ. При вторичных 40 однородных структурах (например, 30 для сталей) интенсивность или скорость окислительного износа является функцией предела пластичности трущихся металлов:

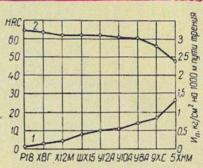


Рис. 56. График зависимости величины окислительного изпоса инструментальных сталей от их тверпости:

1 — величина износа; 2 — твердость.

Практика эксплуатации машин и лабораторные

 $V_{\rm ok}=f(\sigma_s).$

исследования [89] подтверждают справедливость этой за-

висимости (рис. 55 и 56).

Основные характеристики окислительного износа, связанные с адсорбцией и диффузией кислорода на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся металлов, определяют главным образом свойства новых вторичных структур на поверхностях трения. Образующиеся при этом пленки химических соединений обладают различными свойствами твердости, прочности, различной хрупкостью и сцеплением с основным металлом.

В зависимости от вторичных структур, возникающих в процессе износа на поверхностях трения, металлы и сплавы могут быть разделены на две группы.

4) Первую группу образуют металлы и сплавы, пленки окислов которых обладают увеличенной износостой-костью по сравнению с износостойкостью основного металла. В этом случае пленки окислов имеют увеличенную твердость, малую хрупкость и хорошее сцепление с основным металлом.

2) Ко второй группе относятся металлы и сплавы, пленки окислов которых имеют меньшую износостойкость по сравнению с износостойкостью основного металла. Пленки окислов этих металлов и сплавов отличаются малой твердостью и прочностью, большой хрупкостью и недостаточным сцеплением с основным металлом.

БОРЬБА С ИЗНОСОМ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

М ногообразие видов износа деталей машин и условий их возникновения и развития определяют и многообразие методов устранения или локализации износа.

Каждому виду износа соответствует определенная группа средств, позволяющих управлять скоростями процессов данного износа и, таким образом, устранять его или значительно снижать его интенсивность. В связи с этим первым этапом в разработке мероприятий по снижению износа конкретных пар трения является установление ведущего износа, что осуществляется по внешним признакам, характерным для данного вида износа (внешний вид поверхностей трения, температура и др.), или в результате более детального изучения узла трения методом паспортизации [31].

После установления вида износа, а следовательно, и природы процессов, сопровождающих его, можно вполне обоснованно применить метод устранения или подавления нежелательного процесса или разработать новый

метод борьбы с нежелательным процессом.

Завершающим этапом является проверка эффективности предложенного метода повышения износостойкости трущихся пар.

Таким образом, методика борьбы с износом деталей машин состоит из трех основных этапов:

1) установление вида износа;

2) подбор и применение метода подавления нежелательного процесса, протекающего при работе трущейся

3) проверка эффективности примененного метода. Правильное сочетание конструктивных и технологических средств, используемых при проектировании и выполнении узлов трения, является первичной предпосылкой износостойкости деталей машин.

Условия эксплуатации узлов трения, при которых обеспечивается протекание окислительного износа, являются вторичной предпосылкой износостойкости деталей машин.

Для устранения недопустимых видов износа и обеспечения высокой износостойкости деталей необходимо подбирать такой материал для трущихся нар, чтобы послс соответствующей технологической обработки образовывать первичные структуры, которые бы в процессе работы узла трения под воздействием условий эксплуатации изменялись в сторону повышения износостойкости (упрочнения). Это требование может быть выполнено в тех случаях, когда внешние механические воздействия и физико-химическое действие рабочей среды позволяют развиваться процессам, приводящим к образованию пленок окислов, обладающих высокой износостойкостью. Однако в условиях эксплуатации не всегда имеются возможности 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 инертных сред. Износостойкость трущихся поверхностей в этих условиях обеспечивается конструктивными и технологическими средствами: образованием такой первичной структуры поверхностей трения, свойства которой существенно не изменяются

в сложных условиях работы.

Особо важными мероприятиями, обеспечивающими устранение недопустимых видов износа, являются правильный выбор материалов для деталей узла трения и применение различных технологических методов упрочнения поверхностей трения. В настоящее время разработано много технологических методов упрочнения поверхностей трения. Однако существующие методы не всегда правильно назначаются и применяются для конкретных пар трения. Поэтому они дают очень малый эффект, а в некоторых случаях даже увеличивают износ.

КОНСТРУКТИВНЫЕ СРЕДСТВА БОРЬБЫ С ИЗНОСОМ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Возникновение и развитие того или иного ведущего вида износа трущихся поверхностей деталей машин зависит от внешних механических воздействий (скорость перемещения, удельные нагрузки), материала и среды, в которой работает трущаяся пара. Важнейшими дополнительными факторами, влияющими на процессы трения и износа, являются температура поверхностей трения, их форма и размеры.

Очевидно, что уже при конструировании трущихся узлов и сопряжений машин можно предопределить возникновение и развитие при эксплуатации определенного допустимого вида износа, т. е. конструктивными средствами способствовать обеспечению первичной предпо-

сылки износостойкости.

При расчете и конструировании машин определяются пределы, в которых могут изменяться величины внешних механических воздействий на трущиеся поверхности.

Трущиеся узлы машин необходимо конструктивно разрабатывать таким образом, чтобы в процессе эксплуатации удельные нагрузки на трущихся поверхностях обеспечивали условия устойчивого процесса окислительного износа и не переходили за предельные значения, при которых может возникать схватывание, смятие и усталостное разрушение.

<u>К</u> конструктивным средствам повышения износостойкости и антифрикционности деталей машин относятся:

1) выбор вида трения в опорах (скольжение или качение);

2) определение формы и размеров поверхностей трения;

разработка мероприятий по регулированию температуры в узлах трения;

4) рациональное сочетание материалов элементов узлов трения;

5) выбор системы смазки узлов трения;

6) конструктивное оформление агрегатов и устройств для очистки воздуха и смазочного масла, а также уплотнительных устройств;

7) обеспечение технологичности ремонта и замены

изношенных деталей и узлов трения;

8) разработка мероприятий по защите узлов трения

от попадания абразива и прочих загрязнений.

К важным конструктивным средствам борьбы с износом деталей машин относится также выбор материала для трущихся пар.

Выбор вида трения (скольжение или качение) при проектировании трущихся узлов машин зависит от многих технологических и эксплуатационных факторов, а так-

же от компоновки и конструкции проектируемых узлов.

Во многих случаях можно с одинаковым результатом работы узла трения применить как скольжение, так и качение. Однако при этом необходимо учитывать, что только при соблюдении особых условий конструкции и смазки, обеспечивающих жидкостный режим трения, потери на трение в установившемся периоде работы машин в опоре скольжения будут не больше тех, какие имел

бы при тех же условиях подшипник качения.

Жидкостный режим работы сообщает подшипнику скольжения ценное эксплуатационное качество: чем выше скорость вращения вала, тем больше грузоподъемность (долговечность при заданном значении нагрузки) подшипника. В опорах качения вследствие очень малой величины поверхностей контакта рабочих элементов трение оказывается более жестким. Это является одной из причин шума, а иногда и вибраций узла, которыми может сопровождаться работа подшипников качения, особенно при больших числах оборотов.

При невозможности обеспечения жидкостного режима работы узла трения скольжения потери на трение увеличиваются, кроме того, в результате непосредственного контакта, особенно в периоды пуска машины, будет

наблюдаться износ трущихся поверхностей.

При работе узла трения качения даже в пусковые периоды потери на трение остаются весьма незначительными, а износ шейки или пяты вала полностью исключается.

Смазка узлов трения качения может производиться с большими перерывами, поэтому такие узлы не требуют сложных смазочных устройств, которые приходится применять для узлов с подшипниками скольжения.

Основным принципом, который должен быть положен в основу проектирования и расчета формы и размера трущихся деталей, является сохранение в определенном

гарантированном, с некоторым коэффициентом запаса, диапазоне скоростей скольжения и нагрузок на поверхности трения режима окислительного износа. Наряду с этой основной задачей должно быть обеспечено решение смежного вопроса о равномерном распределении износа на контактирующих поверхностях трения.

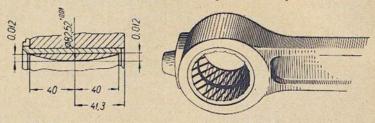


Рис. 57. Профиль втулки главного шатуна двигателя, расточенной по гиперболе.

Рис. 58. Поршневая головка шатуна с подшипником, имеющим большое количество канавок для смазки.

Для решения этих вопросов в процессе конструирования необходимо руководствоваться известными зависимостями видов износа от скоростей скольжения и удельных давлений для конкретных материалов и сред, а также данными о закономерностях влияния размеров трущихся пар (масштабного фактора) на вид износа и его интенсивность [58, 73].

Для сохранения постоянной величины удельной нагрузки на поверхностях трения и исключения возможности появления локальных перегрузок разработаны типовые конструкции самоустанавливающихся подшипников скольжения и качения и подшипников с гиперболической расточкой поверхностей трения [125]. На рис. 57 показан профиль втулки главного шатуна авиационного двигателя, расточенной по гиперболе. Подобная расточ-

ка способствует ускорению приработки и предотвращает возможность возникновения чрезмерных удельных нагрузок на кромках подшипника при изгибе вала.

Для предотвращения перегрузок в опорных пятах в результате неравномерного износа их опорной поверх-

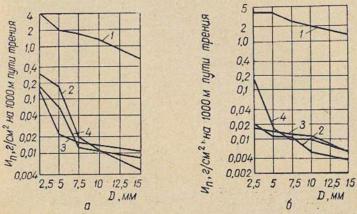


Рис. 59. Графики зависимости величины износа образца от его диаметра: a- нетирающий диск из стали 10; 6- истирающий диск из стали У8A; I- скорость скольжения 0,5 м/cek; 2-2 м/cek; 3-4 м/cek. 4-8 м/cek.

ности в радиальном направлении центральная часть ее удаляется.

Оригинальная конструкция подшипника скольжения приведена на рис. 58. Наличие большого количества смазочных канавок обеспечивает нормальную работу трущейся пары в условиях граничного трения.

В зависимости от размеров элементов трущихся пар при прочих равных условиях может значительно изменяться износ детали (рис. 59, 60). Исследования

показали, что размеры образцов влияют на развитие видов износа и на положение критических точек перехода от одного вида износа к другому (рис. 61).

В связи с масштабным фактором и скоростью пере-

мещения трущихся поверхностей важнейшее значение приобретает температура трущихся поверхностей, которая является функцией от

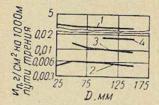


Рис. 60. График зависимости износа образцов от их диаметра (истирающий диск из стали У8А, отожженной):

1 — скорость скольжения 0,5 м/сек; 2 — 2 м/сек; 3 — 4 м/сек; 4 — 8 м/сек.

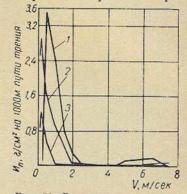


Рис. 61. Влияние размеров образцов на критические переходы в развитии износа (сухое трение; диск из стали 10); $1-D^{\circ}$ образца 2,5 мм и D диска 150 мм; 2—соответственно 7,5 и 150 мм; 3—15 и 150 мм.

скорости скольжения. При малых скоростях скольжения температура поверхностей низкая, она не превышает 100° С, поэтому процессы диффузии кислорода и образования пленок окислов на поверхностях трения затруднены. Отсутствие воспроизводства в процессе трения пленок окислов приводит к интенсивному развитию износа атермическим схватыванием.

При увеличении скорости скольжения повышается температура трущихся поверхностей. При температуре свыше 100° С начинает развиваться окислительный износ,

а при 400—500° С окислительный износ переходит в теп-

ловой [63, 102].

Исследования [102] показали, что нагрев или охлаждение поверхностей трения, без изменения скоростей их относительного перемещения, влияет на вид износа. Повышение температуры поверхностей трения приводит к развитию окислительного износа в широком диапазоне скоростей скольжения. Исходя из этого, в трущихся узлах теплоотвод должен быть организован таким образом, чтобы поверхности трения нагревались до температуры, при которой интенсивно протекают диффузионные и окислительные процессы. Чрезмерный нагрев трущихся поверхностей также вреден, как и чрезмерное их охлаждение.

В организации соответствующего теплоотвода конструктивные средства играют первостепенную роль. Поверхности трущихся узлов могут охлаждаться при помощи предусмотренных систем охлаждения (жидкостных и воздушных), а также маслом из системы смазки.

Важной задачей при конструировании узлов трения является также рациональное сочетание и расположение материалов трущихся элементов в паре трения.

Одним из главных условий, обеспечивающих выбор пары трения с наиболее высокой характеристикой антифрикционности, является сочетание в паре трения материалов, которые по своей природе не расположены к вза-

имному схватыванию.

Известно, что материалы и сплавы при сочетании их в различных вариантах пар трения проявляют неодинаковую склонность к схватыванию и имеют различные характеристики антифрикционности, часто колеблющиеся в широком диапазоне. Минимальную склонность к схватыванию, как показала практика, проявляют пары при сочетании предельно твердых поверхностей с мягкими,

обладающими большой пластичностью, например закаленная шейка вала и вкладыш, залитый сплавом на основе олова.

В условиях работы узла трения при недостаточной или несовершенной смазке для обеспечения высокой износостойкости и особенно антифрикционности трущейся пары необходимо, чтобы в состав материала одного из элементов пары трения входила твердая смазка (графит, нитрид бора, двусернистый молибден и т. п.). Такого же принципа следует придерживаться в случаях конструирования машин, узлы трения которых работают в условиях повышенных температур или в средах с малым содержанием кислорода.

При некоторых видах покрытий трущихся поверхностей (например, хромирование) необходимо обеспечить условия нормальной смачиваемости этих поверхностей.

Следует обращать внимание на условия теплоотвода в зависимости от сочетания материалов трущихся элементов и их места в трущейся паре (прямые и обратные пары). Это особенно важно при применении в качестве трущихся элементов полимеров.

В случаях работы узлов трения с повышением температур в зоне контакта выбор материалов трущихся элементов должен производиться с учетом их теплостойкости.

Подача смазки к трущимся поверхностям может быть индивидуальной и централизованной, без принудительного давления и под принудительным давлением. По характеру циркуляции масла системы смазки делятся на проточные, циркуляционные и смешанные.

Смазочные устройства выбираются по специальным таблицам в зависимости от условий работы трущих-

При определенных условиях трения правильное кон-

структивное оформление трущихся узлов обеспечивает условия гидродинамической смазки, которая является основой для расчета и профилирования их рабочих поверхностей.

Такой научной теории, которая могла бы явиться основой конструирования наиболее оптимальных по размерам и формам рабочих поверхностей трущихся пар, работающих при граничной смазке и при сухом трении, еще нет. Но практика показывает, что профили поверхностей трения оказывают значительное влияние как на прирабатываемость, так и на последующую износостойкость деталей машин.

Для нормальной работы трущихся пар, главным образом работающих в условиях гидродинамической смазки, имеет большое значение степень очистки масла от продуктов износа, распада и посторонних частиц, попадающих из атмосферы. Масло можно очищать в маслосистеме отстаиванием, фильтрованием и центрифугированием. Все эти устройства для очистки масла конструктивно разработаны и стандартизированы [127].

При помощи конструктивных средств решаются также вопросы уплотнения узлов трения с целью их гермети-

зации и удержания смазки.

При конструировании машин необходимо предусматривать возможность удобного демонтажа узлов трения для замены их изношенных элементов, а также достаточную технологичность их ремонта и восстановления.

Снижение износа узлов трения машин, работающих в средах, содержащих абразив (сельскохозяйственные машины, горно-рудной промышленности, дорожно-строительные и др.), в первую очередь заключается в совершенствовании конструктивных средств по защите узлов трения от попадания абразива и прочих загрязнений.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУЩИХСЯ ПАР МАШИН

Правильный выбор материалов для изготовления элементов трущихся пар машин является важным фактором повышения их надежности и сроков службы.

В настоящее время известно большое количество металлических сплавов на основе железа, меди, алюминия, магния, олова, применяющихся для изготовления трущихся пар. Кроме того, широкое распространение в машиностроении получают металлокерамические материалы и пластмассы.

Металлические сплавы

Износостойкие сплавы обладают такими основными свойствами: высокой твердостью, теплоустойчивостью, вязкостью, химической стойкостью.

Сплавы на основе железа — стали и чугуны — в первую очередь характеризуются высокой твердостью, что зависит от их фазового состава и структурного строения.

Наименьшую твердость имеет феррит, поэтому стади и чугуны с ферритной основой отличаются невысокой износостойкостью.

Аустенит при сравнительно невысокой твердости обладает способностью очень упрочняться при холодной пластической деформации и поэтому может служить основой сплавов, износостойких в условиях ударов, смятия и интенсивной пластической деформации.

Мартенсит обладает высокой твердостью и прочностью и служит основой многих износостойких сплавов.

Большое влияние на повышение износостойкости сплавов оказывают карбиды. Так, с увеличением количества карбидов значительно повышается износостойкость фер-

ритно-цементитных структур. В чугунах высокой износостойкостью обладает эвтектика, содержащая большую долю карбидной фазы.

Особое место в износостойких сплавах принадлежит структурно свободному графиту, образовывающему между поверхностями трения тонкую прослойку твердой смазки.

Твердость, а значит, и износостойкость структурных составляющих повышается с увеличением их легированности. В особенности это относится к карбидной фазе, твердость которой значительно увеличивается при растворении в ней хрома, вольфрама, молибдена, ванадия и других карбидообразующих элементов.

Согласно теории легирования стали [13, 38, 96], высокая твердость сплавов достигается сплавлением основного металла с компонентами, входящими в твердый раствор на базе решетки основного металла, и получением высокодисперсной смеси фаз путем закалки многофазного сплава на пересыщенный однофазный твердый раствор. Кроме того, к значительному повышению твердости сплавов приводит введение компонентов, образующих уже при кристаллизации новую, более твердую фазу, лучше всего в форме сетки по границам зерен основной фазы или в виде скелетного каркаса.

За счет большого содержания и более высокой твердости карбидов износостойкие легированные стали 9ХС, P18, X12M, X12Ф, X12ФА и др. [29, 30] превосходят по износостойкости углеродистые стали У8—У13.

При абразивном износе, включающем микропластическую деформацию, срез и отрыв частиц, износостойкость материалов связана не только с твердостью, но и с вязкостью. В этом случае внимание заслуживают аустенитные стали, отличающиеся высокой вязкостью и способностью упрочняться за счет наклепа в самом про-

цессе износа. К этим сталям относятся стали Г12 (сталь

Гадфильда), Г13, Г13Л [38].

Высокой износостойкостью обладают графитизированные стали ЭИ293, ЭИ336, молибденовая, вольфрамомолибденовая, алюминиевая, сталь для литых коленчатых валов, сталь для тормозных барабанов, сталь для поршней и др. [34, 35, 143].

<u>Шарикоподшипниковые стали</u> марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ [92] отличаются высокой износостойкостью при работе в условиях трения качения, так как они обладают высокой твердостью и сопротивляемостью

контактной усталости.

Износостойкость и антифрикционность чугуна, так же как его механические свойства, в особенности твердость, зависят от структуры основной металлической массы, от количества и формы включенного графита, эвтектики и избыточной карбидной фазы [12, 138].

Износостойкие сплавы, работающие в условиях теплового износа, должны обладать теплостойкостью. Это сплавы [29] на основе устойчивых твердых растворов, содержащих большой процент карбидной фазы (X12Ф1,

X12M, PK5, P18Φ, P9ΦK5).

Особо теплостойкие и износостойкие сплавы были разработаны на основе таких металлов, как кобальт, вольфрам, хром. В этих сплавах большой процент структурных составляющих принадлежит легированной карбидной фазе. К этим сплавам относятся стеллит, сормайт, вокар.

При разработке износостойких сплавов в наименьшей степени учитывалась возможность уменьшения интенсивности окислительного износа, сопровождающегося химическими процессами. Это объясняется, с одной стороны, тем, что окислительный износ наиболее распространенный и допустимый вид износа деталей машин,

а, с другой стороны, тем, что существование этого износа

долгое время ставилось под сомнение [117].

В настоящее время разработано большое количество антифрикционных сплавов, основными свойствами которых являются малое значение коэффициента трения и высокая износостойкость. Величина коэффициента трения зависит главным образом от сочетания свойства трущихся металлов сопряженных деталей.

При трении по стали малый коэффициент трения имеют сплавы на основе меди, алюминия, цинка, кадмия,

олова, свинца.

Малым значением коэффициента трения отличаются

также серые антифрикционные чугуны.

Из антифрикционных сплавов на основе меди наиболее широко применяются оловянистые бронзы (Бр. 010-1; БР. ОЦ10-2; Бр. ОНС11-4-3; Бр. ОЦН5-2-5; Бр. ОЦС6-6-3; Бр. ОЦО3-5-6-5 и др.), алюминиевые бронзы (Бр. А7; Бр. АМц9-2; Бр. АЖН10-4-4), кремнистые бронзы (Бр. КЦ4-4), свинцовистые бронзы (Бр. С30) и др. [13, 38, 124, 126].

Из алюминиевых антифрикционных сплавов находят применение так называемые алюминиевые баббиты (АСС6-5, АСМ, АН25, алькусин Д). Перспективными антифрикционными алюминиевыми сплавами являются сплавы, содержащие 6—30% олова с небольшими присадками меди или других компонентов [13, 38, 103].

Из цинковых антифрикционных сплавов [19, 38] применяются цинковые баббиты (ЦАМ-10-5 и ЦАМ-5-10).

Давно известными антифрикционными подшипниковыми сплавами на основе олова [14, 38] являются оловянистые баббиты (Б83, Б89). К свинцовистым баббитам относятся сплавы Б6, БТ, БН, Б16, БС, БК [123].

цессе износа. К этим сталям относятся стали Г12 (сталь

Гадфильда), Г13, Г13Л [38].

Высокой износостойкостью обладают графитизированные стали ЭИ293, ЭИ336, молибденовая, вольфрамомолибденовая, алюминиевая, сталь для литых коленчатых валов, сталь для тормозных барабанов, сталь для поршней и др. [34, 35, 143].

Шарикоподшипниковые стали марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ [92] отличаются высокой износостойкостью при работе в условиях трения качения, так как они обладают высокой твердостью и сопротивляемостью.

контактной усталости.

Износостойкость и антифрикционность чугуна, так же как его механические свойства, в особенности твердость, зависят от структуры основной металлической массы, от количества и формы включенного графита, эвтектики и избыточной карбидной фазы [12, 138].

Износостойкие сплавы, работающие в условиях теплового износа, должны обладать теплостойкостью. Это сплавы [29] на основе устойчивых твердых растворов, содержащих большой процент карбидной фазы (X12Ф1,

X12M, PK5, P18Φ, P9ΦK5).

Особо теплостойкие и износостойкие сплавы были разработаны на основе таких металлов, как кобальт, вольфрам, хром. В этих сплавах большой процент структурных составляющих принадлежит легированной карбидной фазе. К этим сплавам относятся стеллит, сормайт, вокар.

При разработке износостойких сплавов в наименьшей степени учитывалась возможность уменьшения интенсивности окислительного износа, сопровождающегося химическими процессами. Это объясняется, с одной стороны, тем, что окислительный износ наиболее распространенный и допустимый вид износа деталей машин,

а, с другой стороны, тем, что существование этого износа

долгое время ставилось под сомнение [117].

В настоящее время разработано большое количество антифрикционных сплавов, основными свойствами ксторых являются малое значение коэффициента трения и высокая износостойкость. Величина коэффициента трения зависит главным образом от сочетания свойства трущихся металлов сопряженных деталей.

При трении по стали малый коэффициент трения имеют сплавы на основе меди, алюминия, цинка, кадмия,

олова, свинца.

Малым значением коэффициента трения отличаются

также серые антифрикционные чугуны.

Из антифрикционных сплавов на основе меди наиболее широко применяются оловянистые бронзы (Бр. 010-1; БР. ОЦ10-2; Бр. ОНС11-4-3; Бр. ОЦН5-2-5; Бр. ОЦС6-6-3; Бр. ОЦО3-5-6-5 и др.), алюминиевые бронзы (Бр. А7; Бр. АМц9-2; Бр. АЖН10-4-4), кремнистые бронзы (Бр. КЦ4-4), свинцовистые бронзы (Бр. С30) и др. [13, 38, 124, 126].

Из алюминиевых антифрикционных сплавов находят применение так называемые алюминиевые баб-биты (АСС6-5, АСМ, АН25, алькусин Д). Перспективными антифрикционными алюминиевыми сплавами являются сплавы, содержащие 6—30% олова с небольшими присадками меди или других компонентов [13, 38, 103].

Из цинковых антифрикционных сплавов [19, 38] применяются цинковые баббиты (ЦАМ-10-5 и ЦАМ-5-10).

Давно известными антифрикционными подшипниковыми сплавами на основе олова [14, 38] являются оловянистые баббиты (Б83, Б89). К свинцовистым баббитам относятся сплавы Б6, БТ, БН, Б16, БС, БК [123].

Металлокерамические материалы

Металлокерамические материалы получают методом

порошковой металлургии.

В настоящее время разработано несколько композиций пористых металлокерамических материалов, успешно применяющихся для изготовления подшипников. Эти материалы обладают высокими антифрикционными свойствами, большой износостойкостью и малым коэффициентом трения. Коэффициент трения металлокерамических подшипников меньше, чем у некоторых баббитов, а износ значительно ниже.

Металлокерамические подшипники почти не изнашивают шейки вала. Эти свойства объясняются тем, что в керамических материалах имеется от 15 до 30% (по объему) пор, которые в процессе изготовления заполняются маслом. Графит, входящий в состав металлокерамического материала, образует с маслом маслографитную смесь, благодаря чему подшипники могут работать в тяжелых условиях в течение длительного времени без введения дополнительной смазки. Самосмазываемость пористых подшипников основана на том, что во время работы, по мере нагрева подшипника, масло, удерживаемое в порах капиллярными силами, постепенно вытесняется наружу и образует смазочную пленку на рабочей поверхности.

К числу достаточно исследованных пористых металлокерамических подшипниковых материалов относятся железные, железографитовые (1—3% С, 99—97% Fe) и бронзографитовые (88—86% Си, 9—10% Sn, 2—3% С) материалы. Для повышения их физических, химических и антифрикционных свойств в состав этих материалов иногда дополнительно вводятся хром, цинк, никель, нитрид бора и др. Прочность, твердость и пористость метал-

локерамических материалов зависят от условий прессо-

вания и режима спекания.

Механические и эксплуатационные свойства некоторых антифрикционных материалов приведены в табл. 5, а металлокерамических антифрикционных материалов — в табл. 6 [93].

Таблица 5

Пористость, %	Плотность, г/см³	Твердость НВ, кГ/мм ²	Прочность на растяже- ние, кГ/мм²	pV, KF. M* cM² cm² cek	Средняя пре- дельная на- грузка, кГ/см²
20	6,20	58	14	170	66
23	6,00 8,82	60	15	270 120	110 45 101
	20	20 6,20 23 6,00	20 6,20 58 23 6,00 50—80 — 8,82 60	20 6,20 58 14 23 6,00 50—80 12—19 — 8,82 60 15	20 6,20 58 14 170 20 6,20 58 14 170 23 6,00 50—80 12—19 270 — 8,82 60 15 120

Металлокерамические подшинники обрабатывают для получения нужных размеров калиброванием в пресс-формах, расточкой резцом на токарных станках и развертыванием [93]. Время приработки пористых металлокерамических подшипников примерно такое же, как и баббитовых. Пористые подшинники могут работать в паре с закаленными и пезакаленными валами.

Перспективными металлокерамическими материалами для изготовления подшипников, работающих при повышенных температурах в коррозийных средах, являются

материалы на основе карбида хрома.

Исходным материалом для изготовления металлокерамических твердых сплавов (ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6)

^{*} По ГОСТ 9867—61 единица энергии 1 дж. $\kappa\Gamma\cdot M=9,80665$ дж.

Марка	Твердость НВ, кГ/мм²	Предел прочности при изгибе, кГ/мм ³	Предел прочности на срез, кГ/жи²	Предел прочности при растижении, к Г/мм²	Коэффи- пиент трения
ЖГр1-20пф ЖГр2-20п ЖГр3-20п ЖГр3-20п ЖГр3К1-20п ЖГр2Д2,5-20п ЖГр2Д2,5-20пс ЖГр2Д7,5-20пф	85—97 70—81 60—70 100—110 140—150 150—165 120—130	23-26 20-23 18-20 17-20 33-39 36-40 38-42	18-20 16-18 15-16 14-16 24-28 25-32 26-32	17—20 16—19 15—17 16—18 27—30 24—26 24—27	0,06 0,07 0,04 0,03 0,05 0,03 0,037

Примечание. Буква Ж обозначает железо, Гр — графит, Д — медь, К — сера; цифра, следующая за наименованием элемента, показывает его процентное содержание в шихте; п — перлитная структура, ф — ферритная, пф — перлитно-ферритная.

являются порошки карбидов вольфрама, титана и металлического кобальта. Структура этих сплавов представляет собой твердый раствор вольфрама и кобальта, который образует сплошную сетку вокруг высокодисперсных и равномерно распределенных карбидов. Эти сплавы обладают очень высокой твердостью и красностойкостью и применяются главным образом для изготовления режущего инструмента [38].

Материалы на основе высокомолекулярных соединений

Для изготовления узлов трения машин (подшипников, вкладышей, направляющих, втулок и т. п.) широко применяются антифрикционные пластмассы — древеснослоистые пластики, текстолит, полиамиды, политетрафторэтилен и др.

К числу первых пластмасс, примененных в машино-

строении, относятся древесно-слоистые пластики и текстолит. Текстолит с различным наполнителем при смазке водой допускает удельные давления до $300-350~\kappa\Gamma/cm^2$, а максимальную скорость скольжения — $5-8~m/ce\kappa$. Вкладыши из древесно-слоистых пластиков при смазке водой допускают удельные давления до $200~\kappa\Gamma/cm^2$, при смазке маслом — до $20-40~\kappa\Gamma/cm^2$. Коэффициент трения текстолита и древесно-слоистых пластиков при смазке водой — 0.002-0.015, а при смазке минеральным маслом — 0.03-0.1 [5].

Для изготовления подшипников скольжения в настоящее время все более <u>широко</u> применяют полиамиды

и особенно капроны (поликапролактамы).

Грузоподъемность и диапазон рабочих температур у капрона (нейлона) примерно те же, что и у баббита, а износостойкость значительно выше. При работе капрона по стали без смазки коэффициент трения равен 0,17—0,20; со смазкой маслом—0,014—0,020; со смазкой водой—0,02—0,05. Хорошие антифрикционные свойства капрона обусловливают возможность применения его при небольших нагрузках без смазки или при недостаточной смазке.

Лучшей смазкой для капрона и всех полиамидов

является не вода, а минеральное масло.

Для получения наилучших эксплуатационных показателей целесообразно применять капроновые втулки или тонкие покрытия и облицовки, нанесенные на металли-

ческие корпуса подшипников.

Чаще применяются капроновые подшипники с толщиною стенок 1,5 мм. Они надежно работают при удельных давлениях до $80-120~\kappa\Gamma/cm^2$ и скоростях скольжения до 3,5 м/сек при температурах не выше $100-120^{\circ}$ С. При сухом трении капроновые подшипники могут работать при удельном давлении до $5~\kappa\Gamma/cm^2$.

Прочностные характеристики капрона в значительной степени зависят от содержания в нем влаги. Насыщение капрона влагой приводит к улучшению его свойств.

Весьма перспективным является применение вкладышей, покрытых тонкой капроновой пленкой. В этом случае не требуется увеличивать зазоры, учитывающие влагопоглощение и тепловые расширения, которые у капрона значительно больше, чем у стали; а меньшие зазоры обеспечивают большую грузоподъемность. Вкладыши, облицованные капроном, не деформируются под влиянием внутренних напряжений и не дают остаточных деформаций при длительном воздействии нагрузки, чего нельзя сказать о толстостенных капроновых подшипниках. В большинстве случаев покрытия имеют толщину 0,2-0,5 мм, и лишь иногда -- 0,05-0,08 мм. Более тонкие покрытия обладают большей износостойкостью и допускают удельные нагрузки до 200 кГ/см2.

Капроновую пленку на вкладыш подшипника можно нанести вихревым напылением, наклеиванием, литьем

под давлением и т. д.

Наиболее производительным является метод вихревого напыления, при котором металлический вкладыш, нагретый до температуры, превышающей температуру плавления капрона, погружается в среду капронового порошка, взвихренного струей воздуха.

Кроме капрона, металлические вкладыши облицовывают текстолитовой крошкой толщиной 2,5-6 мм. Эти вкладыши применяются в прокатном и гидротехническом оборудовании при смазке водой и эмульсией и нагруз-

ках до 300 кГ/см² [104].

Как материал для изготовления элементов узлов трения [4, 9, 141, 142] может с успехом применяться политетрафторэтилен или фторопласт-4, представляющий продукт замещения фтором водородных атомов у полиэтилена, полученного полимеризацией этилена при высокой

температуре и давлении.

Фторопласт-4 — кристаллический полимер, в исходном состоянии — рыхлый волокнистый порошок, который не плавится, даже не переходит в вязкое состояние, но легко прессуется в таблетки и затем спекается при 360-370° С в плотную массу. В спрессованных образцах политетрафторэтилена рядом с кристаллической структурой существуют аморфные участки. Обычно степень кристалличности образцов — 50—70%. Механические свойства тетрафторэтилена зависят от термической обработки. Закаленный тетрафторэтилен имеет предел прочности при растяжении $160-315~\kappa\Gamma/cm^2$, относительное удлинение — 250-500%, твердость по Бринеллю $3-4~\kappa\Gamma/mm^2$. Фторопласт-4 может работать в интервале температур от 260 до -269° С.

Из всех характеристик тетрафторэтилена целесообразно наиболее подробно остановиться на коэффициенте трения, который имеет сложную зависимость от скорости и нагрузки. При малой скорости скольжения коэффициент сухого трения политетрафторэтилена совсем незначительный и соответствует коэффициенту трения металлов при жидкостной смазке [4]. При высоких скоростях скольжения происходят необратимые изменения поверхностей и коэффициент трсния увеличивается, но при снижении скорости не уменьшается до первоначального

Повышение давления при трении в условиях низких скоростей скольжения вызывает уменьшение коэффи-

циента трения [4, 142].

Фторопласт-4 применяется без смазки или с ограниченной смазкой при удельных давлениях до 4—5 кГ/см². При больших удельных давлениях материал деформируется. Для использования всех высоких антифрикционных свойств фторопласта-4 его усиливают стеклотканью, введением тонкоизмельченного порошка наполнителя или

применяют с металлокерамикой.

Из применяемых порошкообразных наполнителей наилучшим является порошок бронзы. Для изготовления подшинников скольжения используется материал, состоящий из смеси фторопласта-4 и свинца с добавкой в качестве наполнителя волокнистой бронзы. Вместо свинца может быть введен графит и кадмий.

Фторопласт-4 может применяться в качестве добавок к обычным феноло-формальдегидным пластмассам для

улучшения их антифрикционных свойств.

Иногда на поверхности трения наносят тонкий антификционный слой термореактивного лака, содержащего

от 20 до 70% фторопласта-4Д.

Разработан метод нанесения на поверхность подшипника тонкого антифрикционного слоя, состоящего из смеси фторопласта-4 с 45—50% дисульфида молибдена. Слой, наносимый на углеродистые и легированные стали, составляет 0,038—0,006 мм, на остальные материалы—0,013—0,051 мм [110, 122]. Наибольший эффект фторопласт-4 как антифрикционный материал дает при использовании его для пропитки металлокерамических подшипников, при этом частицы фторопласта заключаются в пористую оболочку и лишаются возможности течь. Износ и коэффициент трения у таких материалов мало отличаются от этих же качеств чистого фторопласта.

Из металлокерамических материалов на основе порошков железа, нержавеющей стали, никеля, меди, свинцовистой бронзы, пропитанных фторопластом-4, наибольшей износостойкостью обладает металлокерамика из свинцовистой бронзы со сфероидальным зерном [110]. Износостойкость этого материала увеличивается при введении в пористую бронзу до 32% смеси фторопласта со

свинцом. Вообще материалы с добавкой свинца не рекомендуется применять при давлении выше $700~\kappa\Gamma/cm^2$ и скорости вращения 1000~o6/мин. Однако в Англии вышеуказанный материал успешно применяется в узлах навески реактивного двигателя ($P\!=\!2810~\kappa\Gamma/cm^2$) и в самолетных шасси ($P\!=\!2110~\kappa\Gamma/cm^2$). В текстильной промышленности подшипники из такого материала работают при 50~000~o6/мин с гидродинамической пленкой воздуха и окружной скоростью $4,97~m/ce\kappa$.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БОРЬБЫ С ИЗНОСОМ ДЕТАЛЕЙ МАШИН. СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Упрочнение поверхностным наклепом

Упрочнение поверхностным наклепом осуществляется несколькими методами: обкаткой поверхности роликом или шариком, чеканкой, дробеструйной обработкой, обработкой поверхности на особых режимах резания с подбором определенных углов режущего инструмента, гидрополированием и др.

Упрочняющий эффект поверхностного наклепа — увеличение усталостной прочности и износостойкости деталей машин — объясняется, во-первых, повышением механических характеристик поверхностного слоя металла и, во-вторых, возникновением в поверхностном слое значи-

тельных сжимающих остаточных напряжений.

Современные методы обкатки поверхности роликом и чеканки ударниками различных конструкций пластически деформируют поверхностный слой деталей на глубину, измеряемую десятками миллиметров. Этими

методами эффективно упрочняют детали любых размеров [82, 83, 84, 85].

Режим упрочнения обкаткой зависит от вида используемого станка. Крупные токарные станки допускают поперечные усилия около 6000 $\kappa\Gamma$, что позволяет получить, в зависимости от обрабатываемого материала, наклепанный слой толщиной от 5 до 14 мм и повысить

поверхностную твердость на 30-60% [84].

При дробеструйной обработке в зависимости от ее режима (количество и диаметр дроби, число оборотов дробемета) и обрабатываемого материала глубина наклепанного слоя достигает 0,25—1,0 мм. а твердость поверхности повышается на 25—65%. Предел выносливости некоторых сталей повышается на 37—60% [94, 119].

Упрочнение гидрополированием заключается в том, что струя жидкости с добавкой к ней абразива разной зернистости или мелких стальных шариков при помощи специальной форсунки направляется на поверхность обрабатываемой детали. Степень упрочнения зависит от скорости и величины абразивных частиц, угла встречи их с обрабатываемой поверхностью и расстояния от форсунки до обрабатываемой поверхности [120].

Хорошие результаты дает сочетание методов механического упрочнения с закалкой и химико-термической обработкой, закалкой токами высокой частоты, а также

с некоторыми видами покрытий.

Упрочнение термической обработкой

Наиболее распространенными методами термического упрочнения являются: закалка с нагревом в обычных печах, с нагревом токами высокой частоты, с нагревом

в электролите, а также закалка с нагревом тонкого поверхностного слоя детали облучением электронами или дейтронами. Эти методы подробно описаны в литературе

[24, 37, 144].

Сравнительные испытания износостойкости стали 45, закаленной при нагреве в печи и при нагреве токами высокой частоты, показали, что в условиях окислительного износа с небольшой скоростью скольжения, когда несколько проявляется атермическое схватывание, высокочастотная закалка повышает износостойкость почти вдвое.

При окислительном износе с большими скоростями скольжения высокочастотная закалка повышает износостойкость значительно меньше — всего на 20—25%.

<u>При тепловом</u> износе высокочастотная закалка не имеет преимуществ перед закалкой с нагревом в печи [109].

Закалка при помощи облучения электронами базируется на том, что энергия электронов преобразуется в тепловую и выделяется в слое, толщина которого равна величине пробега электронов. Обеспечив достаточную плотность пучка электронов, можно за очень короткое время оплавить тонкий поверхностный слой металла. Поскольку общее количество тепла небольшое вследствие малой величины слоя (0,1—0,01 мм), оно очень быстро поглощается остальной массой образца. При этом получается такая резкость закалки, которую нельзя достичь ни при каком другом способе нагрева.

Облучение дейтронами приводит к таким же результатам, как и облучение электронами, т. е. эффект в основном является тепловым. Микротвердость поверхности в результате облучения возрастает в 2—3 раза на глу-

бине до 1 мм [55].

Упрочнение химико-термической обработкой

Наиболее распространенными методами химико-термической обработки, применяющимися для упрочнения поверхностного слоя, являются: цементация, азотирование, цианирование и диффузионная металлизация [24, 37, 144].

Повышение износостойкости деталей машин при обработке этими методами происходит главным образом за счет увеличения твердости поверхностного слоя вследствие изменения его фазового состава. Возникновение в поверхностном слое больших остаточных напряжений сжатия способствует повышению усталостной прочности.

Цементацию стали производят чаще всего на глубину 0,5—2 мм. Твердость поверхностного слоя легированных цементированных сталей достигает НВ 570—660 кГ/мм².

<u>При азотировании применяют главным образом сталь</u> $38 \overline{\text{M}} \overline{\text{M}} \overline{\text{M}} \overline{\text{A}}$, толщина азотированного слоя которой достигает 0,5 мм, а твердость HB 1100-1200 $\kappa \Gamma/\text{м} M^2$.

Толщина слоя при цианировании стали зависит от режима процесса и состава ванны. Она может находиться в пределах 0,15—1,6 мм, а твердость приближается

к твердости азотированной стали.

Из диффузионных методов для упрочнения поверхностей деталей машин с целью повышения их твердости и износостойкости применяются: хромирование, борирование, ниобирование, ванадирование, силицирование и др. Эти методы дают наибольшую твердость и износостойкость поверхностного слоя.

Диффузионное хромирование производят в порошкообразных смесях, керамической массе, газовой среде, а также вакуумным методом. Глубина слоя зависит от температуры процесса, времени выдержки и состава стали [48]. Наибольшая глубина хромированного слоя (до 0,20 мм) получается при хромировании в порошкообразных смесях и вакуумным методом. ?

В состав порошкообразных смесей входят металлический хром или феррохром, глинозем и хлористый аммоний. При вакуумном методе процесс ведется в вакууме (10⁻²—10⁻³ мм рт. ст.) в порошкообразном хроме. Микротвердость хромированного слоя достигает 1620 кГ/мм².

Процесс борирования [11] ведется в порошкообразной смеси бора (или ферробора), глинозема и хлористого аммония или в жидких ваннах, в состав которых входит бура, карбид бора или ферробор.

<u>Ультразвуковое</u> борирование [98] позволяет сократить время процесса, повысить твердость и глубину бори-

рованного слоя.

При ультразвуковом борировании на образец, погруженный в расплавленную смесь, подают ультразвуковые колебания. Воздействие ультразвука позволяет в 4—5 разбыстрее получить слой заданной глубины. За 30 мин при ультразвуковом борировании получается слой глубиной до 35 мк, обладающий микротвердостью до 2200 кГ/мм².

Ниобирование производят в порошке феррониобия при наличии газовой среды (H_2+HC1). Твердость слоя до-

стигает HB 2000 кГ/мм² [49].

Ванадирование производят в порошке феррованадия, глинозема и хлористого аммония. Твердость достигает HB 1800 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ [49].

Процесс силицирования [97] может осуществляться в порошкообразных смесях (ферросилиций, глинозем, хлористый аммоний), в жидкой среде (смесь хлористых солей бария и натрия с порошком ферросилиция) и в газовой среде (SiCl₄). В результате силицирования получают слой глубиной 0,5—1 мм. Этот слой не твердый (H_{Pso} 200 $\kappa \Gamma/\text{мм}^2$), но обладает особыми физико-химическими свойствами.

Упрочнение термодиффузионной обработкой

Повышение антифрикционных свойств и износостойкости трущихся деталей машин, в том числе подшипников скольжения, термодиффузионной обработкой основано на использовании диффузионных процессов и химических реакций, происходящих в поверхностных слоях металла. Аналогичные принципы широко применяются в смазочной технике при разработке присадок к маслам, содержащим соединения химически активных элементов (серы, хлора, фосфора). Термодиффузионной обработкой металлов, при которой создаются поверхностные слои, состоящие из химических соединений, добиваются повышения эксплуатационных качеств деталей при работе с обычной смазкой, а также без нее.

При термодиффузионной обработке поверхности черных металлов обогащаются сульфидами, хлоридами, селенидами. В результате этого прежде всего повышается стойкость металлов против схватывания, ускоряется и улучшается процесс приработки.

Из методов термодиффузионной обработки наиболее

широко применяется сульфидирование [20, 105].

Разработано много рецептов соляных ванн для сульфидирования. Наибольший эффект дает сульфидирование в соляной ванне НИИХИММАШ 2/6 № 1 при температуре 560° С в течение 1 ч. При этом поверхностный слой металла обогащается сульфидами FeS и серой. Слой сульфидов составляет 0,03—0,04 мм, а содержание серы,

превышающее исходное, отмечается при послойном химическом анализе на глубине до 0,3—0,4 мм.

Селенирование и хлорирование в соляных ваннах по сравнению с сульфидированием менее эффективны для повышения антифрикционных свойств трущихся деталей машин [21].

Упрочнение нанесением износостойких металлических покрытий

Металлические покрытия трущихся поверхностей деталей машин создаются главным образом осаждением металла при помощи электрического тока, т. е. гальва-

ническим путем.

Для повышения износостойкости деталей машин широко применяется электролитическое хромирование. Фундаментальные работы в области износостойкого хромирования выполнены Г. С. Левицким [90]. В этих работах впервые был поставлен вопрос о теоретическом обосновании качества покрытия в зависимости от вида разрушения поверхности при износе деталей машин.

В 1942 г. Н. М. Антоновым был разработан процесс пористого хромирования, детально освещенный в монографии М. Л. Перцовского [107]. Хромовые покрытия отличаются большой твердостью (HV 1200 кГ/мм²). Толщина хромовых покрытий зависит от режима процесса хромирования и назначения деталей и может быть в пределах 0,005—0,4 мм. Применяется твердое хромирование и пористое двух типов — канальчатое (трещины) и точечное.

Большая твердость и высокий предел текучести электролитического хрома делают этот метод покрытия важным средством борьбы с явлениями схватывания 1-го

рода при малых и средних нагрузках и с абразивным износом. Высокие механические и особенно химические свойства электролитического хрома способствуют резкому уменьшению темпа окислительного износа, а несколько увеличенная теплоустойчивость позволяет рекомендовать хромирование для борьбы с тепловым износом.

При правильном выборе условий электролиза износостойкость деталей в результате их хромирования возрастает в 5—10 раз. Однако этот эффективный метод защиты поверхностей трения в некоторых случаях применяется без учета видов износа и сочетания материалов

трущихся пар [30, 108, 109].

Исследования показали, что при сопряжении деталей с хромированными поверхностями трения с омедненными деталями происходит интенсивное схватывание

металлов.

Нанесение хромового покрытия на поверхность стальных деталей вызывает в слое хрома и в тонких поверхностных слоях стали, граничащих со слоем хрома, значительные растягивающие остаточные напряжения, величина которых достигает нескольких десятков килограммов на квадратный миллиметр. Эти напряжения могут увеличиваться в результате шлифовки и термообработки деталей и превысить предел прочности стали, вследствие чего возникают трещины. Существенным недостатком электролитического хромирования является снижение на 20—30% предела выносливости хромированной стали.

При трении хромового слоя по бронзе при неблагоприятном сочетании удельных давлений на поверхностях трения $(0,5-10~\kappa\Gamma/cm^2)$, скоростей относительного перемещения $(2-6~m/ce\kappa)$ и несовершенной смазки интенсивность износа гладкого электролитического хрома в 8 раз превышает интенсивность износа цементированных и азо-

тированных сталей.

Испытания износостойкости электролитического хрома при трении о закаленную сталь показали, что в условиях атермического схватывания и развивающегося окислительного износа износостойкость электролитического хрома примерно вдвое выше, а в условиях окислительного износа примерно втрое выше износостойкости закаленной стали.

Особенно велико превосходство электролитического хрома над закаленной сталью при таких условиях, когда сталь испытывает тепловой износ, а хром в результате значительно более высокой тепловой устойчивости — окислительный износ. В этом случае износостойкость электролитического хрома в десятки, а в некоторых случаях и в сотни раз выше износостойкости закаленной

стали [109].

Как показывают исследования, хромовые покрытия деталей машин, инструментов, штампов следует применять в тех случаях, когда температура в поверхностном слое не превышает 500° С. Наиболее полно используются положительные свойства хромового покрытия при температуре поверхностного слоя не выше 300° С.

Износостойкость электролитического хромового покрытия можно значительно увеличить карбидизацией. Впервые об этом было указано в работе В. И. Архарова.

По методике, разработанной Д. С. Плишко, обработку покрытия производят в карбюризаторе, состоящем из 50% (весовых) древесного угля, 20% Na₂CO₃ и 30% Fe, в течение 3 ч при температуре 950° С. Поверхностные слои после такой обработки представляют собой сложные карбиды хрома. Микротвердость слоя—1800 кГ/мм².

Сравнение величины износа гладкого электролитического хрома и карбидов хрома при сухом трении по чугуну и бронзе дано на рис. 62 [108]. Из сравнения видно,

что карбидизированное хромовое покрытие имеет значительно более высокую износостойкость в тяжелых условиях трения.

Испытания карбидов хрома на жаростойкость и кислотоупорность показали также значительное преимуще-

ство их по сравнению с обычным электролитическим хромом.

Анализ процессов трения и износа деталей машин и изучение работ, посвященных износостой-кости хромовых покрытий, дают возможность сделать такие же выводы.

Электролитическое хромовое покрытие нельзя рассматривать как унцверсальное средство борьбы с износом. В зависимости от вида износа в конкретных условиях трения электролитическое покрытие хромом поверхностей трения может давать или большой эффект, или не оказывать существенного влияния на величину износа, или да-

же увеличивать интенсив-

ность износа.
В условиях окислительного износа электролитическое хромовое покрытие увеличивает износостойкость трущихся поверхностей в несколько раз.

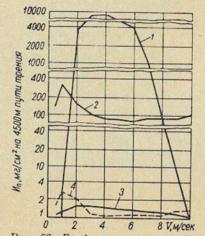


Рис. 62. График зависимости величины износа гладкого электролитического хрома и карбидов хрома при сухом трении по чугуну и бронзе от скорости скольжения $(P=4,5 \ \kappa\Gamma/cm^2)$:

 1 — хром по бронзе;
 2 — хром по чугуну;
 3 — карбиды хрома по бронзе;
 4 — карбиды хрома по чугуну. При схватывании 1-го рода электролитическое покрытие хромом может быть успешно применено для защиты поверхностей трения от схватывания до удельных давлений в зоне контакта, не превышающих 160 κΓ/см².

При схватывании 2-го рода (тепловой износ) электролитическое покрытие хромом может успешно применяться как средство, устраняющее тепловой износ до температур в зоне трения 300—400° С.

В условиях абразивного износа электролитическое покрытие хромом можно рекомендовать только в тех случаях, когда допускаемый абразивный износ не превышает величин, сопоставимых с толщиной слоя хрома.

В условиях возникновения основидного (усталостного) износа при трении второго рода электролитическое покрытие хромом применять вообще нецелесообразно, так как одной из основных причин разрушения поверхностей трения является напряженное состояние поверхностных слоев, а электролитическое хромовое покрытие еще больше увеличивает неблагоприятные напряжения в поверхностном слое.

Кроме хромирования, трущиеся поверхности подвергают также никелированию и железнению.

Электрохимическое и химическое никелирование— это покрытие не чистым металлом никелем, а фосфорникелевым сплавом.

В последнее время все шире распространяется твердое никелирование в сульфоновокислой ванне. Твердость получаемого покрытия достигает HV 600 кГ/мм². Несмотря на такую высокую твердость, внутренние напряжения покрытия низкие, что исключает его хрупкость. Толщина осаждаемого никеля достигает 1,3—2 мм. Никелевые осадки способны наклепываться; это улучшает свойства трущихся поверхностей.

Никелевые покрытия обладают рядом преимуществ по сравнению с хромовыми. Они имеют большую вязкость и сравнительно легко обрабатываются. Коэффициент линейного расширения никеля близок к коэффициенту линейного расширения стали, в то время как для хрома этот коэффициент в несколько раз выше. Расход электроэнергии при никелировании в 20-30 раз меньше, чем при хромировании.

Твердость осадков никеля может быть повышена совместным осаждением его с фосфором и кобальтом

и последующей термической обработкой.

При нагреве и выдержке в течение 1 ч при температуре 400° С твердость осадков может быть повышена до HV 900 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ при содержании 6—7% фосфора и до HV 1100 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ при содержании 13—14% фосфора [32].

Коэффициент трения твердого никелевого покрытия по стали и чугуну на 30% ниже коэффициента трения

хромовых покрытий.

В последнее время для упрочнения поверхностей деталей машин все шире применяют химическое никелирование [10, 23]. Благодаря высокой твердости никеля после термообработки, это покрытие можно использовать как износостойкое. Оно содержит 90-95% никеля и 5—10% фосфора. Осаждение никеля происходит при погружении деталей в горячий (85—95° C) раствор, содержащий соль никеля, гипофосфит и буферные добавки (обычно органические кислоты или их соли).

Твердость покрытия увеличивается с повышением концентрации гипофосфита до 15 г/л и составляет $HV~450-600~\kappa\Gamma/{\rm MM}^2$. Повышение твердости до HV~900-950 кГ/мм² достигается термической обработкой покрытия при температуре 400° С. С повышением температуры твердость никель-фосфорного покрытия снижается в меньшей степени, чем хромового. При температуре

600° С микротвердость никель-фосфорного покрытия равна 650-700 кГ/мм², в то время как хромового покрытия —400—450 кГ/мм².

Испытания никель-фосфорных покрытий показали, что при работе в паре со сталью 45, бронзой и баббитом они по износостойкости сравнимы с хромовыми. При работе же в паре с серым чугуном их износ несколько выше.

Никель-фосфорное покрытие хорошо прирабатывается и выдерживает почти вдвое большие удельные нагруз-

ки, чем гладкие хромовые покрытия.

Усталостная прочность никелированных деталей не снижается, так как во время термообработки напряжения в осажденном слое снимаются.

Большим преимуществом химического никелирования является возможность покрывать детали сложной конфигурации, а также детали из алюминия и его сплавов.

Широкое распространение в промышленной практике получает метод электролитического осаждения железа на рабочих поверхностях деталей машин, называемый в литературе осталиванием, или железнением [95, 129].

Осадок металла, получаемый на катоде, по своему химическому составу близок к составу малоуглеродистой стали с содержанием 0,04-0,06% углерода и в зависимости от условий электролиза обладает повышенной микротвердостью $120-670~\kappa\Gamma/\text{мм}^2$. Износостойкость покрытий микротвердостью $200-220~\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ соответствует износостойкости стали такой же твердости. Более твердые покрытия характеризуются более высокой износостойкостью. Твердые покрытия (400-500 кГ/мм²) могут быть получены толщиной 0,8-1,5 мм и мягкие - толщиной 2-3 мм и более.

Перспективным способом упрочнения трущихся поверхностей следует считать электролитическое осаждение вольфрамсодержащих сплавов (W-Cr, W-Ni. W—Co, W—Fe), обладающих большой твердостью и химической стойкостью.

С целью повышения антифрикционности трущихся пар на трущиеся поверхности осаждают медь, свинец,

кадмий, олово, серебро, индий.

Разработаны методы электролитического осаждения сплавов типа Pb—Sn, а также антифрикционные покрытия двумя и тремя слоями последовательно осажденных мягких металлов [59].

Предложены новые методы гальванического латунирования, висмутирования, сурьмирования и кобальтирования [30] для защиты контактирующих поверхностей

деталей машин от схватывания 1-го рода.

Заслуживает внимания разработанный в 1960 г. метод твердого износостойкого покрытия марганцем [121]. Осаждение марганца производится в сернокислой ванне с добавками сернокислого аммония и сернистого ангидрида. Полученные таким путем покрытия представляют собой альфа-модификацию марганца и обладают микротвердостью 980—1100 кГ/мм². Покрытие содержит 0,3% серы (по весу).

Марганцевое покрытие при граничном трении по серому чугуну имеет такой же коэффициент трения и износостойкость, как пористое хромовое покрытие при работе

в паре с серым чугуном в тех же условиях.

Фрикционно-диффузионное упрочнение

Для повышения износостойкости деталей машин, и в частности для борьбы со схватыванием 1-го рода, представляют интерес разработанные в последнее время методы фрикционно-диффузионного упрочнения [74, 133], позволяющие значительно повысить твердость поверх-

ностных слоев (на глубину до 200 мк) за счет насыщения их в процессе трения кислородом, углеродом, азотом или другим элементом. Для этого детали обрабатываются трением в средах, содержащих указанные элементы. При трении происходит диссоциация молекул рабочей среды и диффузия кислорода, углерода или азота в поверхностные слои с образованием в них новых фази новых структурных форм.

Природа новых структурных форм и новых фаз, образующихся при трении, определяется главным образом природой рабочей среды и зависит от параметров трения. Характерными свойствами новых структур являются: высокая твердость, малая травимость, монолитность, большая концентрация метастабильных фаз, высокая дисперсность всех структурных составляющих и наличие

значительных внутренних напряжений.

Сравнение свойств фаз, образующихся при трении в различных средах, показывает, что наибольшей твердостью порядка HV 1150—1200 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ и наиболее высокой термической стабильностью (до 800° C) обладают слои, состоящие из фаз цементитного происхождения [133].

Упрочнение поверхностей наплавкой износостойкими сплавами

Наплавка износостойкими сплавами предназначается для повышения износостойкости и жаростойкости деталей машин и режущего инструмента или придания поверхностям деталей машин защитных свойств от действия сильных агрессивных сред. Для этого в наплавляемый металл вводят легирующие элементы, которые придают изделиям соответствующие свойства.

Наплавка износостойких покрытий представляет собой металлургический процесс, имеющий специфические особенности: высокую скорость расплавления и застывания расплава и интенсивное протекание химических и термических процессов.

Нанесение покрытия можно осуществлять дуговой наплавкой, газовой, атомно-водородной, скоростной автоматической и наплавкой токами высокой частоты.

В процессе нанесения покрытия основной металл изделия частично расплавляется и перемешивается с присадочным материалом. При этом в значительной степени изменяются как химический состав, так и физические и механические свойства наплавляемого металла.

Эксплуатационные свойства наплавленных поверхностей в значительной степени зависят от метода и режима наплавки, химического состава, физических и механических свойств основного металла изделия, состава и свойств присадочных материалов, термообработки основного изделия до и после наплавки.

Для получения качественных покрытий необходимо создавать условия, при которых уменьшается попадание газов в наплавляемый металл, т. е. создавать газовую и шлаковую защиты расплавленного металла.

Наплавку можно осуществлять металлическими электродами различного химического состава с простыми или сложными легирующими обмазками, полыми стержнями, заполненными соответствующей шихтой, порошкообразными и зернообразными материалами, пастами, металлокерамическими материалами, материалами для автоматической наплавки (флюсы и проволоки), сплавами дисперсного твердения, литыми карбидами.

В качестве электродов применяются высокомарганцовистые сплавы, стеллиты, сплав на основе хрома (вокар), сормайт № 1 и сормайт № 2 и другие твердые сплавы.

Толщина наплавленного слоя достигает 1—1,5 мм. При необходимости получения большей толщины наплавленного металла последовательно наплавляют несколько слоев. Твердость и теплостойкость наплавленного слоя зависят от присадочного материала. Твердость может находиться в пределах RC 45—65 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$, а теплостойкость — в пределах от 1000 до 3000° С [25].

Наплавку деталей машин чаще всего производят с целью повышения износостойкости трущихся поверхностей, работающих при абразивном и тепловом износе.

Кроме указанных материалов, в последнее время применяют новые наплавочные материалы в виде специальных обмазок для электродов из малоуглеродистой сварочной проволоки [106]. Значительный эффект повышения износостойкости дает наплавка этими электродами деталей сельскохозяйственных машин, работающих в абразивных средах. Так, например, наплавка катков гусениц тракторов электродами из малоуглеродистой сварочной проволоки с обмазкой, состоящей из 20% графита, 50% ферромарганца, 5% ферросилиция и 25% мела, повышает их износостойкость в 3—4 раза.

Значительное повышение износостойкости зубьев шестерен редукторов дает наплавка электродами из стали 40X с обмазкой, состоящей из 10% графита, 30% феррохрома, 5% ферромарганца, 5% ферросилиция, 15% полевого шпата, 15% плавикового шпата и 20% мела.

Наплавка зубьев ковшей экскаваторов новым износостойким наплавочным сплавом (1,5% углерода, 5% ванадия, 4% хрома и 7% вольфрама) повышает их износостойкость по сравнению с зубьями, наплавленными стандартным сплавом Т-590, в 4—6 раз [106].

Электроискровое упрочнение

Электроискровое упрочнение поверхностей деталей машин производится при полярности, обратной полярности размерной электроискровой обработки. Электроды для электроискрового упрочнения изготовляют из фер-

рохрома, сплава Т15К6 и др.

При электроискровом упрочнении <u>обрабатываемую</u> деталь присоединяют к катоду, а электрод (инструмент) — к аноду, и обработка ведется в среде жидкого диэлектрика (машинного масла, керосина и др.). Под воздействием следующих друг за другом электрических разрядов в поверхности электрода и упрочняемого металла происходят физические и химические изменения, которые обусловливаются электрической эрозией анода и катода, с преимущественным разрушением анода. В результате этого происходит перенос металла электрода на поверхность детали и легирование ее за счет материала электрода и поглощения разогретым металлом азота из воздуха.

При этом процессе наблюдается также образование ряда закалочных структур как в самом легированном слое, так и подслое за счет быстрого отвода тепла в глубь

металла.

Глубина и твердость упрочненного слоя главным образом зависят от мощности режима упрочнения. При мощности 1 $\kappa в \tau$ общая глубина упрочненного слоя достигает 0,12 m, а при 17 $\kappa в \tau$ — 5 m. Микротвердость поверхности, упрочненной феррохромовым электродом, достигает 650 $\kappa \Gamma/mm^2$ [8].

<u>ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ</u> И НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ИЗНОСА (ПРИРАБОТКА) ДЕТАЛЕЙ МАШИН

К числу важных характеристик первичных, или исходных, свойств поверхностей деталей машин относится их макро- и микрогеометрия, характеризующаяся волнистостью, шероховатостью и направлением следов механической обработки [51, 53, 128, 139].

Исходная макро- и микрогеометрия поверхностей устанавливается при окончательных операциях техноло-

гической обработки деталей.

Качеством поверхностей деталей машин, обусловленным величиной, формой и направлением шероховатостей, в значительной степени характеризуются важнейшие эксплуатационные свойства деталей: износостойкость, сохранение в процессе эксплуатации заданной неподвижной или подвижной посадок, величина сил трения и условия смазки сопрягаемых поверхностей, антикоррозийная стойкость, прочность изделий при знакопеременных нагрузках, способность теплопередачи и излучения, условия прохождения жидкостных потоков и парообразования и т. д.

Шероховатость поверхности оказывает большое влияние на трение и износ. Как при сухом, так и при граничном и жидкостном трении коэффициент трения у поверхностей с более высоким классом чистоты меньше. У поверхностей с меньшей шероховатостью реальная опорная поверхность больше, что дает возможность уменьшать удельные нагрузки при прочих равных условиях. Износ поверхностей тем меньше, чем меньше шероховатость поверхности. Однако в ряде случаев коэффициент трения и величина износа не уменьшаются с уменьшением высоты неровностей. При определенных условиях коэффи-

циент трения и износ оказываются меньшими при большей высоте неровностей, так как при этом улучшаются условия смазки.

Кроме того, на поверхностях высокого класса чистоты работа трения в значительной степени расходуется на преодоление сил молекулярного сцепления. В этом случае высокая гладкость поверхностей трущихся деталей не является оптимальной.

В результате исследований, проведенных с различными материалами для выяснения влияния микрогеометрии поверхности на процессы трения и износа [51, 128, 139], было установлено, что износ трущихся поверхностей будет минимальным для оптимальной шероховатости. Оптимальная же шероховатость устанавливается

> для каждого частного случая сочетания условий трення и материала трущихся поверхностей.

> На рис. 63 приведена предлагаемая П. Е. Дьяченко принципиальная схема зависимости количества изношенного материала от микрогеометрии поверхности [51]. Для легких условий эксплуатации (небольшое удельное давление, хорошая смазка) минимум кривой I - I, абсцисса Q_1 , располагается ближе к оси ординат и ниже, чем кривой ІІ-ІІ, абсцисса которой Q_2 соответствует тяже-

лым условиям эксплуатации (большое удельное давление, недостаточная смазка).

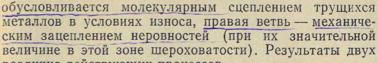
Шероховотость

Рис. 63. Принципиальная

схема зависимости изно-

са от микрогеометрии по-

В каждом частном случае имеется свой оптимум, который зачастую лежит в области поверхностей со значительной шероховатостью. Левая ветвь кривой $Q = f(R_{*})$



различно действующих процессов молекулярного сцепления и механического зацепления — дают оптимум кривых. Эта принципиальная схема подтверждена П. Е. Дьяченко экспериментально.

П. Е. Дьяченко приходит к выводу о том, что для различных условий износа необходимо находить оптимальную шероховатость поверхности, которая устанавливается после приработки. Если такую шероховатость сообщить поверхности в процессе механической обработки, то износ трущихся поверхностей бу-

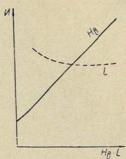


Рис. 64. График зависимости износа от высоты и длины волны (П. Е. Дьяченко).

дет минимальным. Чем труднее условия износа, тем более грубо нужно обрабатывать трущиеся поверхности для уменьшения износа, заменяя полировку обычной шлифовкой. Чем легче условия износа, тем лучше должна быть обработка трущихся поверхностей.

В работах [52, 53] изучено влияние волнистости на износ трущихся поверхностей. На рис. 64, 65 показана зависимость износа от высоты и длины волны.

Проведенные исследования [54] показали значительное влияние на процессы трения и износа направления

следов механической обработки.

Макро- и микрогеометрия трущихся поверхностей деталей машин, образовавшаяся при окончательных операциях технологической обработки их, главным образом

верхности.

влияет на начальный период работы, т. е. на период приработки. В процессе приработки для каждого режима работы трущейся пары устанавливается оптимальная шероховатость, которая не зависит от начальной мик-

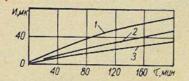


Рис. 65. Кривые износа баббитовых образцов, работающих в паре со стальными, имеющими различную волнистость (П. Е. Дьяченко и В. Э. Вайнштейн):

 $1-H_{\rm B}$ 15 мк и L=3 мм; 2- соответственно 10 мк и 3 мм; 3-8,5 мк и 2,5 мм.

рогеометрии. Оптимальная шероховатость является наиболее благоприятной для приработки. Если такую шероховатость будут иметь трущиеся поверхности сразу после их обработки, то длительность приработки и износ в процессе приработки будут минимальные.

На рис. 66 приведены результаты исследования [86], которые показывают зависимость изменения макрогеометрии трущихся поверх-

ностей и величины износа от времени приработки. Из графика (рис. 66, а) видно, что оптимальная шероховатость трущихся поверхностей для исследуемой пары (сталь 45—Бр. ОЦС5-5-5) устанавливается после 6 ч работы.

В связи с вышеизложенным необходимо более подробно остановиться на теории и механизме приработки деталей машин.

Известно, что интенсивность износа рабочих поверхностей деталей машин зависит от продолжительности их работы. По данным многих исследователей существуют три периода износа в работе деталей машин (рис. 15):

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. 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. Происходит изменение структуры поверхности

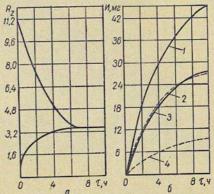


Рис. 66. График зависимости макрогеометрии (a) и износа (b) кольца и образцов от времени приработки при разных значениях R_z (П. А. Косенко):

I- кольно из стали 45 (HRC 22-27; $R_Z=6.3~{\rm MK}$); 2-образны из Бр.ОПС5-5-5($R_Z=6.3~{\rm MK}$); 3-сталь 45($R_Z-0.8~{\rm MK}$); 4-Бр.ОЦС5-5-5 ($R_Z=0.8~{\rm MK}$); $P=30~{\rm KI/cM^2}$; $V=5~{\rm M/cK}$.

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

З. Период усиленного износа, вызываемый изменениями зазоров в трущихся сопряжениях, изменениями геометрической формы деталей и связанными с этим

резкими изменениями условий работы поверхностей тре-

ния, 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 уси-

ленного, или аварийного, износа.

На рис. 16 приведено 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 характеризоваться кривой 1. В этом случае в процессе приработки возникает интенсивное схватывание; на поверхностях, не имеющих защитных пленок, при недостаточной смазке образуются задиры и другие повреждения. Состояние поверхности не допускает нормальной эксплуатации машины.

При резком улучшении процесса приработки характер износа сопряженной пары будет соответствовать кривой 3. 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 струк-

туры.

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 сопряжениях в период приработки, а также в последующие периоды возникают 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.

Условиям проведения приработки деталей должно быть уделено очень большое внимание. Для этого важное значение имеют:

✓ 1) точность изготовления и качество сборки деталей машин:

 2) класс чистоты поверхностей и характер шероховатостей;

у 3) физико-химико-механические свойства поверхностных слоев, от которых зависит пластичность и прирабатываемость поверхностей, адсорбция смазки, образозание пленок, вторичных структур и оптимального микро-

Металловедческий анализ и комплексные исследования процессов, происходящих при трении и износе,

показали, что при нормальной приработке образуется оптимальный микрорельеф поверхности, характерный для данных условий трения (рис. 67).

Независимо от исходного микрорельефа трущихся поверхностей в результате работы сопряжения в дан-

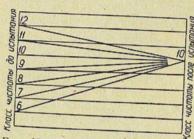


Рис. 67. Изменение микрорельефа поверхностей при испытании в течение 5 ч образцов, изготовленных из легированной закаленной стали, с различным исходным классом чистоты поверхности при трении скольжения в условиях граничной смазки со скоростью относительного перемещения 5 м/сек и удельной нагрузкой 5 кГ/см².

ных условиях образуется вполне определенный рельеф. Это объясняется тем, что при определенных условиях трения происходят строго определенные физико-химикомеханические процессы (тепловые, диффузионные, пластические деформации и т. п.), которые обусловливают характер микрорельефа.

Таким образом, пропесс приработки заключается в переходе от исходного к характерному оптимальному микрорельефу сопряженных по-

верхностей трения. Однако это только одна из сторон процесса приработки. Не менее важным является переход в процессе приработки от исходных структуры и свойств поверхностных слоев к характерным структуре и свойствам для данных условий трения.

При нормальных условиях приработки на поверхности и в поверхностных слоях образуются своеобразные вторичные структуры, происхождение которых связано с очень сложными процессами пластической деформации, а также насыщением поверхностей трения кислородом

воздуха и углеродом смазки. Вторичные структуры, как правило, обладают высокой износостойкостью, хорошей способностью адсорбировать смазку, изолирующими свойствами, препятствующими контакту чистых металлов, и способностью постоянно восстанавливаться в процессе трения.

Хорошо приработанная поверхность должна обладать оптимальным микрорельефом и иметь вторичную структуру, прочную и равномерно расположенную на поверхности контакта. Такая задача качественной приработки должна решаться двумя основными путями: во-первых, технологическим путем при изготовлении, доводке и сборке деталей и узлов, во-вторых, при обкатке и в начальный период эксплуатации машин.

Технологические мероприятия включают:

1) подбор материалов пары трения, не склонных к взаимному схватыванию, что очень важно потому, что в начальный период поверхности трения не защищены прочными пленками вторичных структур, а фактические удельные давления в период приработки очень большие и значительно превышают величину давления при установившемся износе;

2) получение технологического микрорельефа поверхности, наиболее близкого к оптимальному, образующемуся при работе данного сопряжения. Излишне грубая шероховатость будет вызывать пики удельных давлений, разрушение поверхностей и приводить к образованию больших зазоров; кроме того, увеличится время приработки. Чистота поверхности выше оптимальной может вызвать ухудшение условий смазки и экономически не целесообразна;

3) качественный монтаж сопряженных деталей и узлов, обеспечивающий отсутствие перекосов, при которых возникают повышенные удельные нагрузки, приводящие

к нежелательным явлениям. Необходимо также обеспечивать соответствующие зазоры в сопряжениях и исключать возможность попадания между трущимися поверхностями загрязнений и абразивных частиц.

При обкатке и начальном периоде эксплуатации

машин приработку можно улучшить:

1) правильным нагружением сопряжений и обеспечением плавного роста нагрузки на рабочие звенья во

времени;

2) применением смазок, способствующих образованию оптимального микрорельефа и свойств поверхностей трения, а также добавок к смазкам поверхностно-активных веществ, коллоидного графита, металлозолей, сернистых соединений и т. п.;

3) правильным выбором режима эксплуатации ма-

шин в установившемся периоде.

Выполнение мероприятий первой и второй групн позволяет сократить время приработки и возможность возникновения схватывания как в начальный, так и в

последующий периоды эксплуатации машины.

Проведение приработки в лучших условиях смазки и более быстрое образование вторичных структур способствуют переходу к установившемуся режиму при меньшем износе и повышенной износостойкости трущихся поверхностей.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА БОРЬБЫ С ИЗНОСОМ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В зависимости от условий эксплуатации машин можно существенно влиять на их износ, изменяя условия нагружения деталей, температурный режим зоны трения и т. д. Весьма существенно можно влиять на износостойкость металлов, изменяя режим смазки и подбирая смазочные материалы. Особая роль в развитии процессов трения и износа принадлежит газовой среде [63, 100]. Большое значение для сроков службы и надежности работы машин имеют эксплуатационные регламентные

работы, частота пусков и остановок машин.

При анализе износостойкости деталей машин в связи с условиями эксплуатации необходимо более подробно остановиться на вопросах надежности машин, работающих в условиях трения, смазки и износа, на основных критериях надежности и методах их определения [77].

Надежность деталей машин, работающих в условиях трения, смазки и износа

Можно выделить три основные направления, связанные с надежностью деталей машин, работающих в усло-

виях трения и износа.

4) К первому направлению относятся методы статистического анализа преждевременного выхода деталей машин из строя. При этом рассматривается различие в величинах расчетной износостойкости и фактического времени работы машин; предлагаются методы расчета фактической долговечности и разрабатываются системы учета и паспортизации износа деталей.

Результатом работ этого направления является увеличение надежности с помощью организационно-технических мероприятий при конструировании, изготовлении

и эксплуатации машин.

Второе направление работ связано с увеличением износостойкости использованием всех конструкторских, технологических средств и соответствующим выбором материала при изготовлении деталей машин. При этом особая роль принадлежит окончательным процессам об-

работки поверхности трения.

Оба направления включают мероприятия, обеспечивающие надежность деталей машин до их эксплуатации, т. е. увеличивающие только резерв надежности и долговечности.

Реальная надежность эксплуатируемых машин наряду с этими важными предпосылками определяется вероятностью нарушения нормальных условий трения, смазки и износа и возможностью перехода к аварийным процессам. При этом вероятность нарушения нормальных эксплуатационных условий в зоне трения, как пока-

зывает практика, очень велика.

3) Третье важнейшее направление работ связано с обеспечением надежности деталей машин в самом процессе эксплуатации, т. е. с обеспечением прежде всего заданных условий эксплуатации. Большую группу здесь составляют работы по локализации различного типа повреждений в зоне трения, возникающих при эксплуатации при нарушениях режима смазки, перегрузках, изменении теплового режима, попадании абразивных частиц и т. д. В связи с работами этого направления особое значение приобретают получение своевременной информации об изменениях, происходящих в зоне трения, и возможности контроля за восстановлением режимов нормальной эксплуатации.

Все процессы, связанные с износом рабочих поверхностей деталей машин при их трении, в связи с проблемой надежности могут быть разделены на две группы,

 К первой группе относятся допустимые виды износа, характеризуемые относительно малыми скоростями разрушения.

Вторая группа объединяет недопустимые, аварийные, процессы разрушения при износе, которые могут

быть квалифицированы как патологические (схватывание 1-го рода, обусловленное атермической пластичностью; схватывание 2-го рода, 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 качества поверхностей (микрорельефа) и поверхностных слоев (нежелательные изменения струк-

Допустимым и чрезвычайно распространенным при работе деталей машин является окислительный износ, представляющий собой непрерывный процесс образования и разрушения на поверхностях трения тончайших пленок окислов. Окислительный износ возникает при трении скольжения и трении качения в условиях сухого

контакта и при граничной смазке.

Основные положения физической теории износа для нормальных условий эксплуатации в настоящее время

можно считать сформулированными.

Основной задачей физической теории надежности является анализ и управление процессами перехода от нормальных условий трения к патологическим. В связи с этим главное внимание должно быть уделено роли кислорода. Понятие надежности деталей машин, работающих в условиях трения и износа, может рассматриваться следующим образом.

В общем случае определение надежности связано с вероятностью перехода системы от нормальной работы к аварийному состоянию. Для деталей машин, работающих в условиях трения и износа, это означает переход от допустимого (окислительного) износа к патологическим видам разрушения поверхности (рис. 68). Поэтому возникает необходимость изучения условий этих переходов.

Б. М. Барбалатом было проведено специальное исследование состояния и свойств рабочих поверхностей при переходе от окислительного износа к патологическим ви-

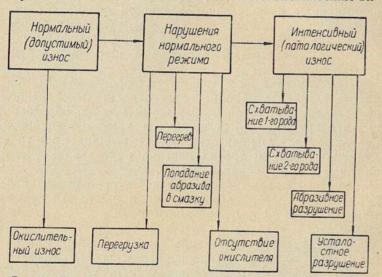


Рис. 68. Схема перехода от допустимых видов износа к недопустимым при нарушении режимов эксплуатации машин.

дам износа в результате изменения температурного режима в зоне трения, перегрузок, попадания абразивных частиц и изменения свойств рабочих сред. Изучалось изменение электрохимического потенциала, фиксирующего наличие или отсутствие пленок окислов на поверхностях трения. На рис. 69 показано изменение характеристик рабочей поверхности при переходе от нормальных

к аварийным видам износа в зависимости от длительности эксплуатации и перегрузок. Участок кривой а ха-

рактеризует отрицательное смещение электрохимического потенциала, разрушение исходных и образование вторичных пленок окислов при приложении в момент пуска нагрузки $50~\kappa\Gamma$; участок 6— при догружении до $100~\kappa\Gamma/cm^2$; участок 6— при догружении до $200~\kappa\Gamma/cm^2$.

На участке в происходит разрушение исходных пленок окислов без последующего развития вторичных окислительных процессов, что сопровождается развитием аварийных видов износа (схватывания).

Анализируя кривые, можно проследить динамику образования и разрушения пленок окислов на поверхностях трения. В пусковой период эксплуатации происходит разрушение исходных пленок

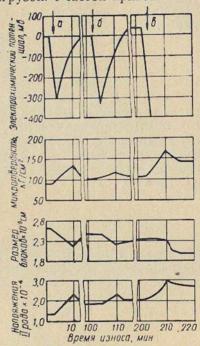


Рис. 69. Графики изменения характеристик рабочей поверхности при переходе к аварийным видам износа в зависимости от длительности эксплуатации и перегрузок.

окислов, сопровождающееся резким отрицательным смещением величины электрохимического потенциала. Дальнейшая эксплуатация в нормальных условиях приводит

к образованию вторичных пленок окислов, типичных для установившегося окислительного износа, к увеличению и стабилизации величины электрохимического потенциала.

При нарушении нормального режима эксплуатации происходит разрушение пленок окислов. При этом величина электрохимического потенциала смещается в отри-

цательном направлении.

Исследования изменений электрохимического потенциала поверхности трения сопровождались комплексным изучением состояния поверхности и поверхностных слоев методами электронографического анализа, рентгенографического изучения тонкой структуры, изучением фрикционных характеристик, микротвердости и микрорельефа. Во всех случаях после необратимых разрушений пленок окислов возникали патологические виды износа

(схватывание, абразивное разрушение).

Изложенное позволило Б. М. Барбалату определить основной критерий надежности работы деталей машин при трении и износе. Этим критерием является наличие пленок окислов, формирование которых происходит при своеобразном динамическом равновесии, заключающемся в постоянном разрушении и восстановлении пленок окислов на рабочих поверхностях. Наиболее чувствительными методами контроля выполнения такого критерия являются измерения электрохимического потенциала рабочей поверхности и гармонический анализ колебаний силы трения.

На рис. 70 показаны результаты контроля методом измерения электрохимического потенциала надежности работы подшипника скольжения (по данным Б. М. Бар-

балата).

Кривые (рис. 70, a) отражают разрушение исходных и образование вторичных пленок скислов при увеличе-

нии действующих нагрузок до 50, 100 и 200 $\kappa\Gamma/cm^2$ и температуре рабочей среды 50° С. После каждого догружения происходит регенерация пленок окислов. Комплекс-

ное изучение рабочих поверхностей после эксплуатации позволяет констатировать, что эксплуатация происходила в режимах допустимого (окислительно-

го) износа.

В условиях повытемпературы шенной (75° С) при догружении до 200 кГ/см² (рис. 70, б) происходит разрушение пленок окислов без последующей их регенерации, что можно наблюдать по отрицательному смещению потенциала, возникшему при догружении. При этом величина электрохимического потенциала не возвращается к более положительным значениям.

При дальнейшем повышении температуры до 100° С (рис. 70, в)

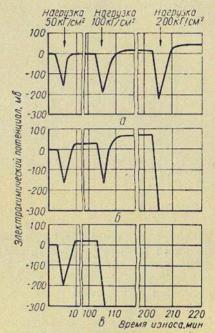


Рис. 70. Графики изменения электрохимического потенциала поверхностей трения при переходе к аварийным режимам эксплуатации в результате повышения температуры,

необратимое отрицательное смещение потенциала происходит при догружении до 100 $\kappa\Gamma/c m^2$. При дальнейшей эксплуатации машины оно сопровождается развитием

ярко выраженных патологических видов износа. Таким образом, контролируя состояние пленок окислов, например указанным путем, можно получить предварительную информацию о развитии в дальнейшем патологических

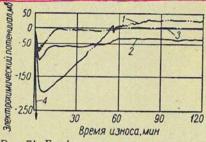


Рис. 71. График изменения электрохимического потенциала поверхности трения в зависимости от длительности эксплуатации при разных нагрузках: $I-60 \ \kappa\Gamma/cm^2$; $2-100 \ \kappa\Gamma/cm^2$; $3-150 \ \kappa\Gamma/cm^2$; $4-200 \ \kappa\Gamma/cm^2$;

видов износа, которые лимитируют надежность работы деталей машин.

На рис. 71 приведены кривые, зарегистрированные самописцем. Кривые 1, 2 и 3 характеризуют работу при допустимых условиях износа, кривая 4 — начало аварийного износа.

Одним из важнейших количественных

показателей процесса, возникающего в зоне трения, является коэффициент, или сила трения.

Известно, что при граничном, полусухом и сухом трении, т. е. в условиях, при которых работает большинство деталей машин, сила трения изменяется скачкообразно. При этом количественное значение силы трения принимается как средняя величина между минимальными и максимальными ее значениями.

В. В. Запорожец при исследовании процессов, протекающих при трении, использовал гармонический анализ спектра колебаний силы трения. Частота колебаний замерялась в герцах, амплитуда — в милливольтах и децибеллах. Образцы после опытов подвергались количественному и качественному анализам известными методами (металлографическим, спектральным, рентгеноструктур-

ным и др.). Опыты показали, что характеристики спектра колебаний силы трения зависят от процессов, возникающих на рабочих поверхностях при трении. При этом строжайше учитывались автоколебательные свойства

системы, например вал-подшипник-датчик.

Обязательным условием исследования процессов трения методом анализа спектра колебаний является возможность возбуждения в автоколебательной системе (узел трения—датчик) сложной периодической зависимости, состоящей из нескольких (низкочастотных и высокочастотных) гармоник. Тогда при преобладании окислительного износа основные гармоники спектра колебаний силы трения лежат в области средних и высоких частот (2—15 кгц), а при преобладании схватывания 1-го рода основные составляющие лежат в области низких частот и т. д.

В качестве примера на рис. 72 и 73 приведены результаты гармонического анализа спектра колебаний силы трения для двух узлов трения (вал—подшипник). Вначале оба узла работали в условиях окислительного износа (рис. 72,а и 73,а; основная составляющая спектра 11 кгц 20 мв). Затем было произведено резкое изменение режима работы узлов, увеличены скорости и нагрузки. Произошло разрушение пленок окислов на рабочих поверхностях (рис. 72, б и 73, б; основные составляющие спектра: 20 гц 24 мв и 450 гц 14 мв, высокочастотная составляющая уменьшилась до 5 мв).

Однако в первом узле (рис. 72, в, г) немедленно последовала резкая интенсификация окислительных процессов (высокочастотные составляющие: 11 кгц 26 мв и 14 кгц 30 мв). Узел продолжал работать в условиях преобладания окислительного износа.

Второй узел (рис. 73, в, г) перешел в аварийный режим работы. Наличие низкочастотных составляющих

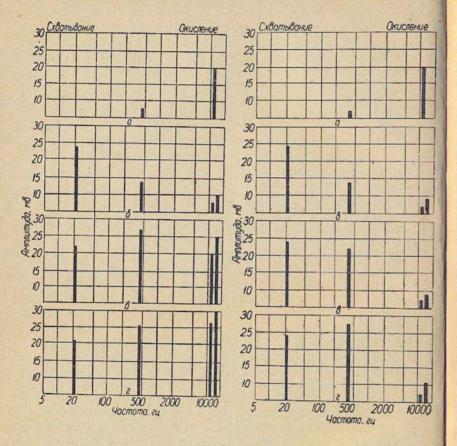


Рис. 72. Графики гармонического анализа спектра колебаний силы трения для узла, обеспечивающего надежность работы (трение граничное).

Рис. 73. Графики гармонического анализа спектра колебаний силы трения для узла, не обеспечивающего надежность работы.

(основные составляющие спектра: 20 гц 24 мв и 450 гц 26 мв) и отсутствие высокочастотных составляющих свидетельствуют о начале процесса схватывания 1-го рода.

Таким образом, основным критерием надежности машин, работающих в условиях трения, смазки и износа, является соблюдение условий окислительного износа и устранение вероятности перехода к патологическим процессам схватывания, абразивного и усталостного разрушения.

Получение своевременной информации при работе машин измерением электрохимического потенциала и частотноамплитудным анализом спектра колебаний позволяет вовремя устранять недопустимые процессы износа.

Смазка деталей машин

Общим назначением смазки деталей машин является замена сухого трения скольжения или качения трущихся пар внутренним жидкостным или граничным трением самой смазочной среды.

Наряду с созданной Н. П. Петровым гидродинамической теорией смазки, нашедшей широкое применение в технике, большое значение имеют работы по граничному трению [22, 116]. Современная техника выдвигает перед наукой новые требования по производству и применению смазочных материалов.

Для улучшения качества смазочных масел к ним добавляют различные присадки: моющие, вязкостные, противоокислительные, противокоррозионные, противозадирные, противоизносные, депрессорные, маслянистые.

Физико-химические явления, возникающие во время процесса трения при добавлении к маслам присадок, недостаточно изучены.

Выбор и применение смазочных материалов в узлах трения должны производиться в строгом соответствии с условиями трения и теми процессами, которые возни-

кают при трении и вызывают износ.

При трении металлических поверхностей происходит деформация тончайших граничных слоев металла и их активизация. Это создает благоприятные условия для возникновения и развития процессов схватывания металлов и окисления их поверхностных слоев. При малых скоростях скольжения и больших давлениях развиваются процессы схватывания 1-го рода, обусловленные атермической пластичностью, при средних — процессы окисления металлов и при больших скоростях — процессы схватывания 2-го рода, обусловленные возникновением высоких температур и явлениями термической пластичности. Эффективные смазочные материалы должны полностью устранить процессы схватывания 1-го рода, приблизить к нулевым значениям износ при окислительном трении и ликвидировать возможность возникновения схватывания 2-го рода.

При подборе присадок к смазочным маслам необходимо руководствоваться следующими критериями: вопервых, присадки должны резко уменьшать процессы схватывания 1-го рода при малых скоростях скольжения, во-вторых, они должны снижать развитие окислительных процессов в среднем диапазоне скоростей скольжения и, в-третьих, смещать начало теплового износа (схватывания 2-го рода) в сторону увеличения скоростей сколь-

жения [76].

Кроме лабораторных испытаний масел (определение вязкости, температуры вспышки, нагарообразования и т. п.), их оценка должна производиться также на основании указанных трех критериев, определяющих действие смазки непосредственно при трении.

В настоящее время достаточное внимание уделяется разработке присадок, способствующих предохранению поверхностей трения от развития схватывания 2-го рода (триалкилфосфиты, триалкилтритиофосфиты, дитиофосфиты металлов, соли сульфокислот, ксантогенаты, эфиры трихлорфосфиновой кислоты и др.). С химической точки зрения механизм действия этих присадок достаточно изучен [22, 116]. Полагают, что положительное влияние таких соединений обусловлено тем, что они разлагаются под влиянием высокой температуры на поверхности металла во время процесса трения. При этом продукты разложения соединений взаимодействуют с поверхностью трения, образуя на ней химически фиксированные адсорбционные слои, состоящие из сульфидов, фосфидов или хлоридов металлов. В данном случае имеет место своего рода модифицирование поверхности трения, предохраняющее металл от развития схватывания 2-го рода (теплового износа) и заедания. При этом, однако, недостаточно учитывают противонагрузочные и противоизносные свойства смазки.

Большой интерес представляют добавки поверхностно-активных веществ в смазки [116]. По нашему мнению механизм граничного трения в основном обусловлен

эффектом Ребиндера.

Поверхностно-активные вещества, адсорбируясь на поверхности металла, пластифицируют металл в поверхностном слое, снижают предел текучести и облегчают сдвигообразование в этом слое. Особенно ярко этот эффект проявляется при трении металлов в газовых безокислительных средах. На рис. 74 показаны характерные кривые износа для различных газовых сред. Кривые 1 и 2 соответствуют износу в зависимости от давления при активной и инактивной смазке. Как видно, при небольших давлениях износ в среде вазелинового масла выше,

repetit.

micecourse.

чем в активной среде. С повышением давления наблюдается обратная картина.

В среде аргона износ образцов, работавших при смазке вазелиновым маслом, резко повысился — произошло схватывание. В то же время в активной среде за счет

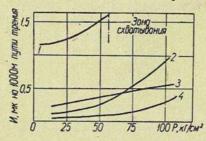


Рис. 74. График зависимости износа железа Армко при трении по стали У8 от давления в активной и инактивной смазке скольжения 2 м/сек):

1, 4 — аргон; 2, 3 — воздух.

пластифицирования поверхностного слоя и локализации сдвиговой деформации в этом слое износ резко понизился.

В результате взаимодействия молекул присадок с атомами металла должны образовываться на поверхности трения химически фиксированные адсорбционные слои, обладающие большой механической прочностью, что обусловливает эффективность той или иной при-

садки к смазочным маслам, благоприятствуя пластифицированию поверхностного слоя металла во время процесса трения.

Новыми высокоэффективными противоизносными присадками являются роданиды и дитизонаты металлов, главным образом меди, железа, кобальта и марганца, а также комплексные серу- и фторсодержащие соединения (КИГВФ-1 и КИГВФ-2) [76]. 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 пла-

стифицированию поверхностей. Поверхностные химические соединения, образующиеся при этом, обладают, по-видимому, низким напряжением сдвига, обусловливая 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 в результате тепловых явлений, а беспрерывным разрушением и возникновением соответствующих адсорбционных слоев.

Исследование влияния указанных присадок к азиационному смазочному маслу МС-20 на предельную скорость скольжения производили на машине трения КЕ-4 [63]. Некоторые из полученных результатов представле-

ны в табл. 7.

Как видно из приведенных данных, добавление к маслу М-20 присадки роданида меди в 2 раза уменьшает износ, в 2 раза увеличивает предел максимальной нагрузки, при которой происходит продавливание слоя смазки, и в 4 раза увеличивает предельную скорость скольжения, при которой происходит схватывание.

Так же эффективно добавление к маслу МС-20 присадки КИГВФ-1. Оптимальные концентрации этой присадки соответствуют содержанию в масле от 0,5 до 1,1% серы. При этих концентрациях износ уменьшается в 4-7 раз, предел максимальной нагрузки, при которой происходит продавливание слоя смазки, повышается в 1,6-2,1 раза и в 4,5 раза увеличивается предельная скорость, при которой происходит схватывание 2-го рода.

Присадка КИГВФ-2, добавленная к маслу МС-20 в интервале концентрации от 0,45 до 1,5%, уменьшает износ в 2-3 раза, повышает предел максимальной нагрузки, при которой происходит продавливание слоя смазки, в 1,3—1,9 раза и в 2—4 раза увеличивает пре-

Таблица 7

				,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
Наименование присадки к маслу МС-20	Коли- чество, %	Установившийся износ при n=300 06/мин; P=40 кГ/см²,	Максимальная на- грузка, при которой происходит продав- ленне слоя смазки при n=190 об/жим,	Предельня скор ость скольжения, при которой происходит скватывание 2-го рода, при P=20 кГ/см², г=22 600 м, м/сек
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
Ортооксихинолят железа	5	0,0016	930	6,29
КИГВФ-1	0,2 0,5 1 1,5	0,0007 0,0004 0,0004 0,0002 0,0006	1300 2440 2800 2120 2260	5,24 14,20 14,20 14,20 14,20
КИГВФ-2	0,15 0,45 1,5 4,5	0,0007 0,0005 0,0007 0,0008	1820 2570 1821 2625	5,24 7,87 14,20 14,20

дельную скорость скольжения, при которой происходит схватывание 2-го рода.

Высокая эффективность влияния исследованных присадок объясняется их взаимодействием с поверхностью

трения и образованием на этой поверхности химически фиксированных адсорбционных слоев [6].

Огромное влияние на возникновение и развитие основных процессов износа при внешнем трении имеет газовая

Наряду с жидкими смазочными материалами, в тех случаях когда жидкая смазка не удерживается или неже-

глательна, применяют консистентные смазки.

В особых условиях трения (высокие или низкие температуры, глубокий вакуум и др.) смазка маслом неприменима. Возникшая проблема может быть решена отысканием новых смазок и созданием новых антифрикционных материалов, работающих без смазки. В настоящее время широко развиваются оба направления. В связи с этим особый интерес представляют вещества, имеющие микропластинчатое (чешуйчатое) строение и поэтому обладающие способностью к самосмазываемости. К ним относятся графит, дисульфид молибдена и нитрид бора.

На основе графита разработано большое количество смазок и антифрикционных материалов. Графитовые материалы при трении по многим металлам обеспечивают низкий коэффициент трения, малый износ и отсут-

ствие износа металла.

Порошкообразный графит с успехом применяется как сухая смазка. Его элементарные пластинки (чешуйки), способные адсорбироваться на поверхности металла, образовывают сплошной слой, разделяющий контактирующие поверхности, а склонность графита к самосмазываемости обеспечивает скольжение этих поверхностей с минимальным коэффициентом трения.

Такой же механизм трения воспроизводится при наличии в качестве сухой смазки между контактирующими металлическими поверхностями дисульфида молибдена или нитрида бора. Эти вещества, обладая очень высокой химической стойкостью, теплостойкостью и высокой упругостью паров, обеспечивают малый коэффициент трения при минимальном износе поверхностей в тяжелых условиях трения.

Следует обратить внимание на такие вещества, как слюда, тальк и окислы некоторых металлов, которые могут быть использованы как составляющие твердых

смазок для определенных условий трения.

Изучение процессов трения показало, что очень часто при трении несмазанных поверхностей роль смазки выполняют образующиеся окислы. Они разделяют контактирующие поверхности, а иногда и уменьшают сопротивление сдвигу при скольжении.

УСТРАНЕНИЕ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ВИДОВ ИЗНОСА

Устранение износа схватыванием 1-го рода

В борьбе со схватыванием 1-го рода должно быть выполнено условие:

$$V_{\rm cxb} < V_{\rm ok}$$
.

Это может быть осуществлено либо уменьшением $V_{\rm CXB}$, либо увеличением $V_{\rm OK}$. Анализ сущности процесса схватывания при работе деталей машин, а также исследование механизма и закономерностей явления схватывания в лабораторных условиях показали, что схватывание в большой степени определяется свойствами пластичности трущихся металлов [30, 63]. При трении пластичных металлов создаются необходимые условия развития процессов схватывания: сближение поверхностей и выход на поверхность новых ювенильных частей металла.

Однако для развития процессов схватывания, кроме пластичности, необходимо, чтобы материал сопряженных поверхностей обладал склонностью к схватыванию, т. е. к образованию и развитию точечных дефектов кристалического строения, и возможностью развития особых диффузионных процессов [75]. Склонность металлов к схватыванию также зависит от способности их образовивать при трении пленки окислов и от свойств этих пленок, в связи с чем металлы делятся на две группы.

(1) К первой группе относятся металлы, на поверхностях которых при трении образуются прочные защитные плен-

К первой группе относятся металлы, на поверхностях которых при трении образуются прочные защитные пленки, хорошо соединенные с основным металлом и способные быстро восстанавливаться при их разрушении. Скорость образования пленок в этих металлах превышает скорость их разрушения. Таким образом, на поверхности трения этих металлов в широком диапазоне условий трения имеются защитные пленки окислов, препятствующие металлическому контакту и образованию металлических связей, т. е. схватыванию металлов.

2) Ко второй группе относятся металлы, на поверхности которых образуются хрупкие, непрочные, слабо связанные с основным металлом пленки окислов. Такие пленки легко разрушаются при трении и относительно медленно восстанавливаются, в связи с чем возникают металлические контакты, сопровождающиеся образованием металлических связей.

Существует два принципиальных направления предотвращения износа схватыванием 1-го рода при помощи главным образом технологических средств: во-первых, повышение твердости и уменьшение пластичности материала трущихся поверхностей, что достигается применением различных видов упрочняющей технологии, во-вторых, физико-химическая защита контактирующих поверхностей от развития процесса схватывания. Такого

рода защита может осуществляться в результате создания на поверхностях металлических пленок, подбором металлов сопряженных трущихся пар или созданием

Таблица 8

Метод увеличения твердости	Предельное значение твердости, кГ/м.й²
Упрочнение поверхностным наклепом	300-390*
Упрочнение термической обработкой:	
закалка с отпуском	650-700*
высокочастотная закалка	740—760*
закалка при помощи облучения	
электронами	740760*
Упрочнение химико-термической	
обработкой:	
цементация	570—780 🦛
азотирование	1100—1200
термодиффузионное хромирование	1500-1600
борирование	2200
ванадирование	1800
ниобирование	2000
Электролитические покрытия:	
хромирование	900—1200
" и карбидизация	До 1800
никелирование	600—1100
химическое никелирование	900-950
покрытие марганцем	980—1100
Фрикционно-диффузионное упроч-	
нение	1100—1300 }
Электроискровое упрочнение	650

слоев на поверхностях трущихся деталей из металлов и сплавов, не расположенных к взаимному схватыванию. Наименьшей склонностью к взаимному схватыванию обладают сплавы типа твердых растворов с резко выраженной гетерогенной структурой.

В табл. 8 приведены значения твердости поверхностных слоев, которую можно достичь, применяя различные

технологические методы упрочнения стали.

Для случаев очень высоких нагрузок устране-В соких пагруссия 1-го рода может быть достигнуто применением методов упрочнения, дающих максимально высокую твердость. При этом необходимо добиваться, за счет чистоты обработки поверхностей, чтобы удельные давления, возникающие на участках фактического контакта, не превышали предела текучести материала поверхностных слоев.

Создание на трущихся поверхностях металлических пленок для предотвращения схватывания 1-го рода осуществляется

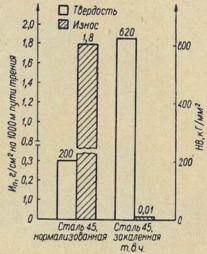


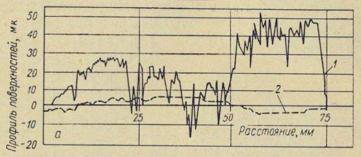
Рис. 75. Интенсивность износа нормализованной и закаленной т. в. ч. стали 45 при сухом трении скольжения (скорость скольжения 0,02 м/сек; удельная нагрузка 25 кГ/см²; твердость поверхности соответственно 240 и 720 кГ/мм²).

при помощи сульфидирования, фосфатирования, силицирования, фрикционно-диффузионного упрочнения или графитизации поверхностных слоев.

Слои из металлов и сплавов, не расположенных к схватыванию со сталью, на контактирующих поверхностях деталей машин создаются гальваническим путем,

^{*} Данные для среднеуглеродистых конструкционных сталей.

а именно: меднением, латунированием, висмутированием, сурьмированием, кобальтированием.



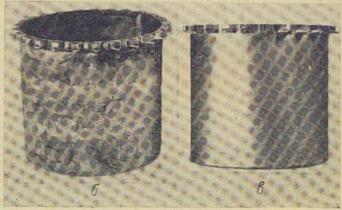


Рис. 76. Профиль поверхностей контакта (a) и внешний вид нелатунированной (б) и латунированной (в) втулок главного шатуна двигателя (втулка из стали 15; время работы двигателя 400 4): I— схватывание 1-го рода; 2— окислительный износ.

К эксплуатационным средствам по борьбе со схватыванием 1-го рода относится применение смазочных мате-

риалов с противонагрузочными добавками поверхностно-активных веществ.

В качестве примера устранения износа схватыванием 1-го рода приведем данные об износе нормализованной

и закаленной т. в. ч. стали 45 (рис. 75). Процесс износа у нормализованной стали был с ярко выраженными признаками схватывания 1-го рода. В результате значительного повышения твердости поверхностного слоя стали после закалки т. в. ч. износ схватыванием 1-го рода устраняется и вместо него развивается окислительный износ.

Вторым примером борьбы со схватыванием 1-го рода является латунирование стальных сопряженных трущихся поверхностей деталей машин, работающих при больших контактных давлениях и чрезвычайно малых

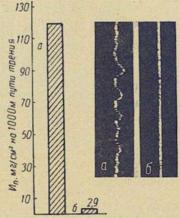


Рис. 77. Профиль поверхностей и интенсивность износа стали 40Х до (а) и после (б) сульфидирования (сухое трение; скорость скольжения 0,26 м/сек; удельная нагрузка 15 кГ/см²).

относительных перемещениях (различного типа посадки). Глубина и характер повреждения сопряженных трущихся поверхностей, работающих в этих условиях без латунирования и после латунирования, показаны на рис. 76.

Латунированию подвергаются многие сопряженные

пары двигателей и самолетов.

На рис. 77 приведены сравнительные данные интенсивности износа стали 40X до и после сульфидирования. Как видно из приведенных данных, сульфидирование полностью устраняет схватывание 1-го рода при трении в определенных условиях нагрузки.

Устранение теплового износа

Для устранения теплового износа (схватывания 2-го рода) должно быть выполнено условие:

$$V_{\text{тепл}} < V_{\text{ок}}$$
.

Особенности теплового износа металлов, связанные с высоким нагревом поверхностных слоев и резким изменением свойств металла и смазки, вызывают в первую очередь необходимость уменьшить скорость развития тепловых процессов на поверхностях трения $V_{\text{тепл}}$. Температура, развивающаяся в зоне трения $(t_{\text{тр}})$, не должна превышать критические температуры теплоустойчивости трущихся металлов и смазки $(t_{\text{кр. м}}; t_{\text{кр. см}})$, т. е. $t_{\text{тр}} < t_{\text{кр. м}}$;

 $t_{\rm TP} < t_{\rm KP.~CM}$. Выполнение неравенства $V_{\rm Tenn} < V_{\rm OK}$ может осуществляться двумя путями: увеличением теплоустойчивости трущихся металлов и смазочной среды и уменьшением возможностей теплообразования в зоне трения. Достигается это рациональным использованием конструктивных технологических и эксплуатационных средств. \times К конструктивным средствам борьбы с тепловым износом следует отнести мероприятия по охлаждению зоны

трения при помощи специальных систем воздушного или жидкостного охлаждения. Существенное уменьшение температуры в зоне трения может быть достигнуто также за счет мероприятий, связанных с выбором формы и размеров узлов трения, обеспечивающих при данных условиях теплообразования достаточный теплоотвод в окружающую среду.

При помощи технологических средств увеличивают теплоустойчивость трущихся металлов, что является очень важной первичной предпосылкой высокой износостойкости в условиях теплового износа.

Увеличение теплоустойчивости сталей достигается легированием их вольфрамом, ванадием, титаном наряду со специальной термической обработкой этих сталей. С этой же целью используются твердые металлокерамические сплавы карбидов хрома, вольфрама, ванадия, титана в сочетании с кобальтовой или другой связкой.

Устранение нежелательного теплового износа достигается также при определенной обработке поверхностей трения, в результате которой создаются неметаллические пленки (сульфидные, фосфидные, оксидные и др.). Значительный эффект достигается при сочетании указанной технологической обработки с применением для трущихся деталей материала, обладающего высокой теплоустойчивостью.

Хорошие результаты по устранению теплового износа должны дать различные методы фрикционно-диффузион-

ного упрочнения поверхностных слоев.

К эксплуатационным средствам устранения теплового износа относятся мероприятия по уменьшению удельной работы трения, а следовательно, и теплоты, выделяющейся в результате трения. Это достигается, во-первых, работой машин на режимах, исключающих возможность перегрузок, и, во-вторых, применением средств, уменьшающих коэффициент трения, нормализацией режимов смазки и введением в смазки добавок, усиливающих интенсивность протекания химических процессов на поверхностях трения металлов и способствующих образованию вторичных структур, не склонных к развитию процессов термического схватывания.

Большие возможности устранения теплового износа деталей машин открываются в связи с разработкой и применением противозадирных смазок (табл. 7). Добавление к смазкам силицида молибдена, нитрида бора, орга-

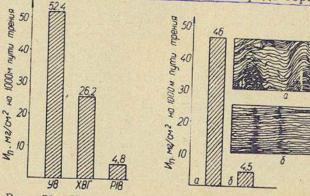


Рис. 78. Интенсивность износа сталей У8, ХВГ и Р18 в условиях теплового износа (сухое трение; скорость скольжения 6 м/сек; удельная па-грузка 20 кГ/см²).

Рис. 79. Интенсивность износа и интерферрограммы поверх-ностей трения стали 40X (a) и стали 40Х с наплавкой на тру щиеся поверхности сплава ВЗК (б) в условиях теплового износа (сухое трение; скорость скольжения 5,6 м/сек; удельная нагрузка 20 к Γ /см 2).

нозолей железа эффективно уменьшает развитие процессов термического схватывания.

В качестве примера, иллюстрирующего устранение теплового износа увеличением теплоустойчивости материалов узлов трения, могут быть приведены данные об интенсивности износа сталей У8, ХВГ и Р18 в условиях работы при недостаточной смазке (рис. 78).

Применение более теплоустойчивой стали полностью

устраняет процесс теплового износа и способствует развитию окислительного износа.

Примером борьбы с тепловым износом может служить также применение наплавок специальных теплоустойчивых твердых сплавов на трущиеся поверхности

Применение наплавки теплоустойчивого сплава ВЗК привело к устранению нежелательного теплового износа

и замене его окислительным износом.

Устранение абразивного износа

При борьбе с абразивным износом должно быть выполнено условие:

 $V_{\rm a6p} < V_{\rm ok}$.

Соблюдение этого неравенства вследствие особенностей абразивного износа, вызываемого наличием абразивной среды в зоне трения, может быть осуществлено уменьшением скорости абразивных процессов на поверхностях трения.

Устранение абразивных процессов связано главным образом с очисткой среды в зоне трения от абразивных частиц, а сопротивление материалов абразивному износу зависит в основном от их твердости, предела прочности и вязкости. В соответствии с этим борьба с абразивным изпосом ведется конструктивными, технологическими и эксплуатационными средствами.

Конструктивными средствами являются различные системы масляных и воздушных фильтров, которые обеспечивают очистку воздуха и масла от абразивных частиц, и различные приспособления, защищающие узлы трения от попадания абразивных частиц.

технологическими средствами обеспечивается придание поверхностям трения наибольшей сопротивляемости

12 50

действию абразивных частиц. К этим средствам относится применение специальных сталей и сплавов, а также методов термической, химико-термической и других видов упрочняющей обработки поверхностей трения.

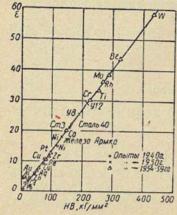


Рис. 80. Зависимость относительной износостойкости технически чистых металлов при абразивном износе от твердости (М. М. Хрущов и М. А. Бабичев).

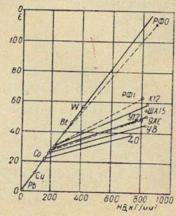


Рис. 81. Зависимость относительной износостойкости сталей разнего состава после нормальной закалки и отпуска при абразивном износе от твердости (М. М. Хрущов и М. А. Бабичев).

Значительно повышается сопротивляемость абразивному износу в результате применения наплавок специальных твердых сплавов, придающих высокую твердость, прочность и вязкость поверхностям трения.

Большая работа по изучению износостойкости металлов и сплавов при абразивном износе была проведена М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым [140].

Для оценки износостойкости металлов было введено

как частное от деления величины линейного износа эталона на величину линейного износа испытуемого металла при одинаковом пути трения.

На основании исследований была создана теория

понятие относительной износостойкости в, определяемой

На основании исследований была создана теория абразивного износа, построены графики зависимости относительной износостойкости технически чистых металлов (рис. 80) и некоторых конструкционных и инструментальных сталей, термически обработанных и необработанных (рис. 81), от твердости.

Как видно из графиков, для технически чистых металлов, находящихся в неупрочненном состоянии, имеется прямо пропорциональная зависимость между сопротивлением абразивному износу (выражаемым относительной износостойкостью) и твердостью:

$$\varepsilon = bH$$
.

Зависимость относительной износостойкости термически обработанной стали от твердости имеет линейный характер и может быть выражена уравнением

$$\varepsilon = \varepsilon_0 b' (H - H_0),$$

где ϵ_0 — относительная износостойкость стали в отожженном состоянии;

b' — коэффициент пропорциональности, имеющий разное значение для сталей различного химического состава;

 H_0 — твердость стали в отожженном состоянии.

Этими же авторами [140] было исследовано влияние наклепа на абразивный износ металлов и сплавов (рис. 82). В результате исследования был сделан общий вывод о том, что механический наклеп не повышает сопротивления металлов абразивному износу, несмотря на

то, что твердость их в ряде случаев значительно повышается.

Относительная износостойкость многих конструкционных и инструментальных сталей была определена в ра-

боте Г. А. Прейса [109]. Данные, полученные Г. А. Прейсом, приведены в табл. 9. В качестве примера ус-

В качестве примера успешной борьбы с абразивным износом можно привести данные о повышении износостойкости некоторых деталей, работающих в условиях абразивного износа, после наплавки их износостойкими сплавами [106].

Так, наплавка катков гусениц тракторов сварочной проволокой с обмазкой, в состав которой входило 20% графита, 50% ферромарганца,

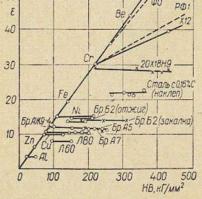


Рис. 82. График зависимости относительной износостойкости наклепанных металлов и сплавов от твердости (М. М. Хрущов и М. А. Бабичев).

5% ферросилиция, 25% мела, уменьшила их износ в 3—4 раза (толщина наплавки — 6 мм на сторону). Наплавка лемехов электродами Т-590 и Т-620 повысила срок их службы по сравнению с новыми (без наплавки) в 8,3 раза, а по сравнению с лемехами, оттянутыми кузнечным способом, в 15 раз.

При наплавке зубьев ковшей экскаваторов сплавом, состоящим из 1,5% С; 5% V; 4% Сг; 7% W и остальное Fe, их износостойкость повысилась в 4—6 раз.

Марка	Темпе	ратура нагрева	при	Твердость	Относит	
стали	цемен-	закалке	от- пуске	HV, KF MM2	при нагрузке 1,5 кГ	при нагрузке 2 кГ
P18	_	1280 м	550	835	9,0	8,95
ХВГ	-	800 м	200	905	8,85	8,90
X12M	-	1080 м	400	835	7,85	8,12
ШХ15	-	850 в	160	835	6,53	6,45
У12А	-	780 в	160	835	6,32	6,12
У10А	-	780 в	160	803	5,72	5,62
48A	_	800 в	160	775	5,20	5,20
9XC	-	850 м	180	649	4,50	4,56
5XHM		840 м	500	502	3,58	3,46
18ΧΓT	920	840 м	200	905	8,90	8,85
12XH3A	920	800 м	180	746	6,52	6,75
18XHBA	920	840 м	200	694	6,25	6,30
20X	920	800 м	180	694	5,60	5,5
45	-	Закалка	-	651	5,20	5,26
		В. Т. Ч.	#35			
CX8		1100 м	550	649	4,69	4,82
40X	-	830 м	180	628	3,91	3,97
45	-	820 в	100	606	3,68	3,68
18XHBA		840 м	180	469	3,46	3,47
45	-	820 м	300	460	3,14	3,05
45	_	820 B	500	298	1,92	1,94
30ΧΓCA	_	870 м	240	435	2,92	2,96
45	-	820 в	400	361	2,36	2,35
40X	-	850 м	600	320	2,0	2,06
45		820 в	600	261	1,70	1,69
45	1000	820 в	500	298	1,92	1,94
30ΧΓCA . ·	-	870 м	540	255	1,66	1,64
(45)	-	840	-	217	1,44	1,46
(25)		860	-	_	1,33	1,36
(10)		880	-	_	1,27	1,25
Железо		The state of				
Армко	-	-	-	-	1,00	1,0

Марка	Температура нагрева при			Твердость	Относительная износостойкость	
стали	цемен-	закалке	от- пуске	11V, KI /M M2		при нагрузко 2 <i>кГ</i>
Хром электролитический 38ХМОА	Азо- тиро- ва- ние		=	$H_{\mu_{50}}$ 1015 $H_{\mu_{50}}$ 1145	10,60 14,30	10,85 14,5

Примечания: 1. Буква «м» обозначает закалку в масле, «в» — в воде. 2. Стали марок, заключенных в скобки, подвергались нормализации.

Устранение усталостного (осповидного) износа

При борьбе с осповидным износом необходимо выполнить условие:

$$V_{\rm ocn} < V_{\rm ok}$$
.

Так как интенсификация окисления при трении не может остановить процесса усталостного разрушения, являющегося основой основилного износа, то соблюдение неравенства $V_{\rm осп} < V_{\rm ок}$ должно осуществляться только путем уменьшения скорости процессов, обусловливающих осповидный износ.

Исследования показали, что причиной возникновения осповидного износа является пластическая деформация поверхностных слоев и особые явления усталости метал-

ла. Поэтому для устранения осповидного износа необходимо, чтобы нагрузки при трении качения не превышали предела текучести поверхностных слоев металла, находящихся в особо напряженном состоянии.

Высокий предел текучести металлов обеспечивается в результате применения для деталей машин, работающих в условиях осповидного износа, легированных сталей с упрочняющей их термической обработкой. При этом необходимо соблюдать неравенство

 $\sigma_s > \sigma_{\kappa p}$

где σ_s — предел текучести поверхностных слоев металла, находящихся в особых условиях напряженного состояния;

 скр — критическое напряжение, возникающее при работе трущегося сопротивления, включающее возможные остаточные напряжения первого рода.

При помощи комплекса конструктивных и эксплуатационных средств устанавливается температурный режим трущихся сопряжений, в результате сохраняется стабильность прочностных характеристик поверхностных слоев.

Основной причиной [78] возникновения недопустимого при трении качения осповидного износа являются повышенные контактные напряжения; случаи осповидного износа наблюдаются при некачественном монтаже, перекосах, неправильных зазорах, вызывающих увеличение удельного давления.

На рис. 83 представлен график зависимости основных видов износа от контактных напряжений. Из этого графика видно, что в условиях небольших контактных напряжений, не превышающих 150—200 кГ/мм², подшипники качения работают длительное время (до 26 млн. циклов) при протекании только окислительного изно-

са. При увеличении контактных напряжений до $200-450~\kappa\Gamma/{\rm Mm^2}$ длительная работа подшипников приводит

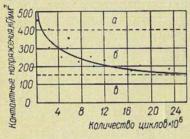


Рис. 83. График зависимости основных видов износа от контактных напряжений и количества циклов:

a — область смятия; δ — усталостного износа; δ — окислительного износа.

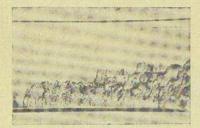


Рис. 85. Внешний вид дорожки качения внутреннего кольца шарикового подшипника, работавшего в условиях осповидного износа.



Рис. 84. Внешний вид внутреннего кольца роликового подшипника, работавшего в условиях окислительного износа.



Рис. 86. Внешний вид дорожки качения кольца шарикового опорного подшипника, на которой произошло смятие металла.

к развитию недопустимого осповидного (усталостного) износа. Если напряжения превышают предел упругости

(для стали IIIX15 в случае точечного контакта — порядка 450—500 кГ/мм²), на дорожках качения возникает остаточная деформация поверхностного слоя металла (смятие). Таким образом, полученные данные являются основой для разработки метода расчета подшипников качения, обеспечивающего условия для протекания пормального окислительного износа и устранения недопустимого осповидного износа.

В качестве примеров, иллюстрирующих износ подшипников качения при различных рабочих нагрузках, приведены рис. 84—86.

УМЕНЬШЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ИЗНОСА

Исходя из второго положения теории износа, главной задачей при окислительном износе является определение условий максимальной износостойкости и расширения границ существования этого вида износа. При этом все средства воздействия на скорость окислительного процесса должны быть направлены к тому, чтобы приблизить его к минимальному значению.

Из анализа сущности окислительного износа, заключающегося в одновременном протекании пластической деформации и диффузионных процессов, становится очевидным, что повышение износостойкости за счет локализации окислительного износа может осуществиться двумя путямия Во-первых, при помощи изменения свойств пластичности трущихся металлов в нужном направлении, так как пластичность главным образом влияет на интенсивность образования вторичных структур во-вторых, при помощи изменения химической природы вторичных структур, возникающих в результате адсорбции и диффузии на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся металлов.

Основным фактором, влияющим на износостойкость при окислительном износе, являются исходные свойства пластичности трущихся металлов, характеризующиеся σ_s , δ и ψ , так как от этих свойств зависит степень активизации поверхностных слоев металлов, склоиность их к адсорбционным, диффузионным процессам и химическим реакциям. В конечном итоге от этих свойств зависит формирование новых вторичных структур при физико-химическом взаимодействии поверхностей со средой в процессе трения.

Первичные предпосылки износостойкости трущихся поверхностей обеспечиваются при помощи технологических средств. Как известно, первичные предпосылки износостойкости обусловливаются такими свойствами и состоянием поверхностных слоев, которые в процессе трения, под воздействием эксплуатационных факторов, способствуют образованию вторичных структур, представляющих собой продукты взаимодействия металла со смазкой и кислородом воздуха, т. е. с жидкой и газовой

средами зоны трения.

Интенсивность окислительного износа зависит от скорости образования и разрушения вторичных структур. Практика эксплуатации деталей машин и лабораторные исследования показали, что чем пластичнее трущиеся металлы, тем при прочих равных условиях интенсивнее

протекает процесс окислительного износа.

Большое влияние на интенсивность протекания окислительного износа оказывает химическая активность трущихся металлов и в связи с этим состав износостойких, антифрикционных и фрикционных сплавов. Большинство технологических мероприятий, направленных на ограничение пластичности и повышение противоизносных характеристик вторичных структур, приводят к уменьшению интенсивности окислительного износа. Таким об-

разом, локализация процесса окислительного износа заключается в увеличении предела текучести и твердости

трущихся поверхностей.

Управление химическими процессами окислительного износа намного сложнее. В зависимости от условий нагружения и температуры в зоне трения количество кислорода воздуха может быть избыточным, оптимальным или недостаточным. При этом процесс износа может протекать с заметно увеличенной скоростью, при минимальных значениях величины скорости и, в случае недостатка кислорода, он может вытесняться процессом схватывания.

В связи с химической природой окислительного износа интенсивность изнашивания трущихся поверхностей металлов определяется не только количеством кислорода как химического агента, но и свойствами химически активных веществ в случае замены кислорода этими веществами. Известны вещества, усиливающие химические эффекты и ослабляющие их. Это видно из результатов исследования [76] влияния на процессы трения и износа легирования жидких смазок различными химическими присадками (табл. 7). Все это свидетельствует о том, что при локализации окислительного износа химическими средствами необходимо проявлять некоторую осторожность. В качестве примера неудачного применения химических средств для уменьшения износа при трении можно назвать применение сульфидирования.

В условиях окислительного трения при надежной граничной смазке и отсутствии явлений схватывания 1-го и 2-го рода износ сульфидированных поверхностей был

значительно больше, чем несульфидированных.

Результаты эксплуатационных исследований деталей двигателя автомобиля ГАЗ-51, работавших при окислительном износе, также подтвердили увеличение в 2,3—

3,5 раза износа сульфидированных цилиндров и коленчатых валов по сравнению с несульфидированными.

Надо полагать, что в условиях эксплуатации, при которых ограничивается интенсивность окислительных процессов, будет наблюдаться значительное уменьшение интенсивности окислительного износа. Такие условия можно создать введением в смазочное масло добавок, тормозящих окислительные процессы.

Хорошие результаты по локализации окислительного износа при трении качения получены в исследова-

ниях [81].

Для локализации окислительного износа были приме-

нены две группы технологических мероприятий.

 Мероприятия по уменьшению величины пластической деформации и неравномерности распределения нагрузки по площади контакта:

а) увеличением твердости поверхностей трения до

максимально возможных значений (RC 62-64);

б) обеспечением обработки поверхности по высокому классу чистоты (11—12);

в) покрытием поверхности качения тонким слоем

пластичного металла (олова).

Исследования показали, что увеличение класса чистоты и покрытие поверхности тонким слоем пластичного металла обеспечивают увеличение площади фактического контакта и более равномерное распределение напряжений по поверхности трения; увеличение твердости поверхностей трения уменьшает глубину и интенсивность пластических деформаций. Все это резко сокращает процесс приработки поверхностей качения, продолжительность периода нормального износа при этом заметно увеличивается.

 Мероприятия по борьбе с окислительным износом при трении второго рода предполагают защиту поверхностей металла и поверхностных слоев от действия кислорода окружающей среды. К мероприятиям этой групны относятся покрытие поверхностей качения тонким изолирующим слоем олова, экранирование рабочей поверхности хорошо адсорбирующимися поверхностно-активными веществами (олеиновая кислота), введение антиокислителей в смазку, применение металлических протекторов окисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адам Н. К., Физика и химия поверхностей, Киев, Гостех-издат УССР, 1947.

2. Архаров В. И., Окисление металлов, М., Металлургиздат,

1944.

194

→ 3. Аксенов А. Ф., Лабораторные исследования износостойкости подшипниковых материалов и смазочных масел при граничном трении скольжения, Сб. «Труды КИ ГВФ», 1959. 4. Аллап А. Дж., Применение пластиков в качестве твердых

смазок и материалов подшипников, «Машиностроение за рубежом»,

1958, № 12.

5. Альшиц И. Я., Вержбицкий Н. Ф., Зоммер Э. Ф., Опоры скольжения, Киев, Машгиз, 1958. 6. Ахматов А. С., Молекулярная физика граничного трения,

М., Госиздат физико-математической литературы, 1963.

7. Ахматов А. С., Проблема граничного трения, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.

8. Асафьев С. С., Электроискровое упрочнение деталей машин, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Изд-во АН УССР, 1960, стр. 28—39.

9. Бегиджанова А. П., Баранов В. Н., Применение но-

вых видов пластмасс в узлах трения, Сб. «Труды НАТИ», вып. 10, 1960.

10. Беляев П. П., Зальбельрфарб М. И., Никелирование без наложения тока, М., Госхимиздат, 1961.
11. Блантер М. Е., Беседин Н. П., Сб. «Металловедение

и термообработка металлов», 1955, № 6.

Богачев И. Н., Мсталлография чугуна, М., Машгиз, 1952.
 Бочвар А. А., Металловедение, М., Металлургиздат, 1956.
 Бочвар А. М., Белые антифрикционные сплавы, М., 1918.

🗢 15. Ван Бюрен, Дефекты в кристаллах, М., Изд-во иностр.

лит., 1962. 16. Виноградов Г. В., Сб. «Новые пути исследования сма-

зок», Изд-во АН СССР, 1961, № 1. 17. Виноградов Г. В., Применение и механизм действия

войск, 1957.

19. Виноградов С. В., Калинин К. П., Цинковые под-шипниковые сплавы, М., Металлургиздат, 1941.

20. Виноградов Ю. М., Сульфидирование металлов, М.,

Машгиз, 1958.

🗕 21. Виноградов Ю. М., Киреева З. П., Повышение износостойкости поверхностных слоев подшипников методами химикотермической обработки, «Качество поверхности деталей машин», Изд-во АН СССР, 1961, № 5, стр. 138—145.

— 22. В и н о г р а д о в Г. В., Присадки к маслам и топливам, Сб. «Труди даминателического солочности машин», 1061 стр. 107

Сб. «Труды научно-текнического совещания», М., 1961, стр. 197. 23. Витенков С. А., Белемицина В. И., Упрочиение поверхности деталей машин методом химического никелирования, «Качество поверхности деталей машин», Изд-во АН СССР, 1961, № 5, стр. 146-155.

24. Вологдин В. П., Поверхностная инфракционная закалка,

М., Оборонгиз, 1947.

25. Вольперт Г. Д., Наплавки износоустойчивыми сплавами,

25. Вольперт 1. Д., Наплавки износоустоичивыми сплавами, М., Промстройиздат, 1953.

1 26. Сб. «Вакансии и другие точечные дефекты в металлах и сплавах», М., Металлургиздат, 1961.

27. Герцрикен С. Д., Дехтяр И. Я., «Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе», Физматгиз, 1960, № 1.

28. Герцрикен С. Д., Голубенко З. П., «Известия СФХА», вып. 16, Изд-во АН СССР, 1946, стр. 167.

29. Геллер Ю. А., Инструментальные стали, М., Металлургиздат, 1955.

30. Голего Н. Л., Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах, Киев, Машгиз, 1961.

31. Голего Н. Л., Методики исследозания явлений изнашивания в деталях машин, Сб. «Труды КИ ГВФ», М., Редиздат Аэро-

32. Гольдштейн М. Е., Электролитическое осаждение спла-

ва никель-фосфор, «Заводская лаборатория», 1961, № 6.

УЗЗ. Гребенщиков И. В., Роль химии в процессе полировки,

«Сорена», вып. 2, 1935. 34. Груздов П. Я., Графитизированная сталь, М., Стандарт-

гиз, 1950.

35. Гудцов Н. Т., Баранов Ф. Д., Кузьмина Н. В., «Металлург», 1936, № 5, 6. V36. Гуляев А. П., Миттельберг Р. Н., Проблемы проч-

ности при высоких температурах, М., Машгиз, 1950.

37. Гуляев А. П., Термическая обработка стали, М., Машгиз, 1953.

 Гуляев А. П., Металловедение, М., Оборонгиз, 1963.
 Гуляев А. П., Энциклопедический справочник, Машиностроение, т. 3, М., Машгиз, 1948. — V40. Данков П. Д., Игнатов Д. В., Шишаков Н. А.,

Электронографические исследования окисных и гидроокисных пленок на металлах, Изд-во АН СССР, 1953.

— (41. Дерягин Б. В., Обухов Е. В., Анормальные свойства тонких слоев жидкости, «Коллоидный журнал», т. 1, 1935, стр. 385.

— (42. Дерягин Б. В., Кусаков М. М., Сб. «Известия АН СССР», Свойства тонких жидкостей и их влияние на взаимодействие твердых поверхностей, Изд-во АН СССР, 1936, № 5, стр. 141.

43. Дерягин Б. В., Кусаков М. М., Экспериментальное исследование сольвации поверхностей в применении к построению математической теории устойчивости меофильных коллоидов, Изд-во AH CCCP, 1937, № 5.

44. Дерягин Б. В., Татиевская А. С., Расклинивающее действие свободных жидких пленок и его роль в устойчивости пен,

союзного химобщества им. Д. И. Менделееза, 1938.

47. Сб. «Детали машин», кн. 2, М., Машгиз, 1958. 48. Дубинин Г. Н., Хромирование стали, М., Металлургиздат, 1950.

49. Дубинин Г. Н., Сб. «ДАН СССР», новая серия, 1952, № 2, 4. 5 и 6.

50. Дьяченко П. Е., Применение метода микротвердости для определения глубины наклепанного слоя, Сб. «Труды совещания по

микротвердости», Изд-во АН СССР, 1951.
— 51. Дья ченко П. Е., Повышение износостойкости и срока службы машин, Сб. «Первая Киевская конференция», Киев, Маш-

гиз, 1953.

52. Дьяченко П. Е., Влияние технологических факторов на износ металлов, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы деталей машин», М., Машгиз, 1958.

53. Дьяченко П. Е., Ванштейн В. Ф., Волнистость стальной поверхности и ее влияние на износ подшинниковых материалов, Сб. «Качество поверхности деталей машин». Изд-во АН СССР,

- 54. Дьяченко П. Е., Влияние направления следов механической обработки на силу трения, Сб. II «Трение и износ», Изд-во АН CCCP, 1956.

 55. Дьяченко П. Е. и др., Некоторые возможности использования облучения для поверхностного упрочнения металлов, «Качество поверхности деталей машин», Изд-во АН СССР, 1961, № 5.

56. Елин П. В., Износ металлов в машинах при неполной смазке, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Изд-во АН СССР, 1960.

→ 57. Елин П. В., Прочность смазочной пленки и износ металлов при несовершенной смазке, Сб. V, «Трение и износ в машинах», Изд-во АН СССР, 1960.

 58. Залецкий Г. И., Влияние масштабного фактора на величину износа металлов при трении скольжения, Сб. «Труды КИ ГВФ», М., Редиздат Аэрофлота, 1956.

59. Каданер Л. И., Новейшие достижения гальванопластики, Изд-во Харьковского Госуниверситета, 1951. 60. Котрелл А. Х., Дислокации и пластическое течение в кри-

сталлах, М., Изд-во иностр. лит., 1958.
61. Костецкий Б. И., Назаренко П. В., Применение теории дислокаций при исследованиях внешнего трения кристаллических тел, Сб. «Тезисы докладов III межвузовской конференции», Петрозаводск, 1963.

←62. Костецкий Б. И., Колесниченко Л. Ф., Изучение пластических деформаций при трении первого и второго родов и по-строение дислокационных моделей, Сб. «Тезисы докладов III межву-

зовской конференции», Петрозаводск, 1963.

63. Костецкий Б. И., Сопротивление изнашиванию деталей

машин, Киев, Машгиз, 1959.

64. Костецкий Б. И., Голего Н. П., Топеха П. К., Химический анализ поверхностных слоев при разных видах износа, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИ ГВФ», М., Редиздат Аэрофлота, 1956.

65. Костецкий Б. И., Троцик О. И., Исследование структуры железа и стали при высокотемпературном окислении в атмо-

туры железа и стали при высокотемпературном окисления в атмосфере воздуха, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киез, 1959.

— 66. Костецкий Б. И., Троцик О. И., Термический анализ новых структур, возникающих на поверхностях трения деталей машин, «Физика металлов и металловедение», т. 5, вып. 3, 1958.

67. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Топеха П.К., Троцик О. И., Карета Н. Л., Рентгеновское исследование структуры поверхности трения, «Физика металлов и металловедение», т. 7, вып. 1, 1957.

68. Костецкий Б. И., Аксенов А. Ф., Влияние адсорбции 68. Костецкий Б. И., Аксенов А. Ф., Влияние адсороции кислорода на процессы трения и изнашивания металлических поверхностей, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киев, 1959.

69. Костецкий Б. И., Мамин Г. Н., О роли кислорода при трении качения, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киев, 1964. № 5.

70. Костецкий Б. И., Центральная лаборатория Уралмашзавода, «Инструментальное дело», М., Машгиз, 1947.

71. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Голего Н. Л., Топеха П. К., Классификация металлов и сплавов по их износостойкости, Сб. «Труды третьей Всесоюзной конференции по трению

и износу в машинах», т. 1, Изд-во АН СССР, 1960.
72. Костецкий Б. И., Топеха П. К., Носовский И. Г., Вторичные структуры на поверхностях трения и износ металлов, C6. «Труды третьей Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. 1, Изд-во АН СССР, 1960.

73. Костецкий Б. И., Износ металлов и масштабный эффект, Сб. «ДАН УССР», 1951, № 2.

74. Костецкий Б. И., Пустоварова Н. П., Сухое трение, Изд-во Латв. АН, 1960.

— 75. Костецкий Б. И., Ивженко И. П., Дислокационная холодной сварки металлов, «Автоматическая сварка», 1964, № 5.

76. Костецкий Б. И., Натансон М. Э., Скарченков К. З., Топеха П. К., Основные вопросы увеличения эффективности смазочных масел, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киев, 1964.
77. Костецкий Б. И., Барбалат Б. М., Запоро-

жец В. В., Сб. «Материалы к конференции по повышению надежности и долговечности машин, оборудования и приборов», М., Изд-во ЦИНТНАМ, т. IV

78. Костецкий Б. И., Едигарян Ф. С., Классификация основных видов износа и элементы теории износа при трении качения, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киев, 1964.

79. Костецкий Б. И., Виды износа и стойкость режущих инструментов, оснащенных твердыми сплавами, Сб. «Трение и износ при резании металлов», М., Машгиз, 1955.

80. Кузнецов В. Д., Бессонов Н. А., Пиченин Н. Ф., Изнашиваемость поверхности при внешнем трении в зависимости от поверхности при внешнем трении в зависимости при внешнем трени в зависи от поверхностной энергии, «Журнал технической физики», в. 3, 1947,

🏎 81. Костецкий Б. И., Филипчук Ш. К., Контактная прочность машиностроительных материалов, М., Изд-во «Наука», 1964. 82. Кудрявцев И. В., Современное состояние и основные

направления в области упрочнения деталей машин поверхностным наклепом, Сб. «Труды ЦНИИТМАШ», 1958.

83. Куликов О. О., Браславский В. М., Технология упрочнения обкаткой роликами и шариками крупных деталей машин, Сб. «Труды ЦНИИТМАШ», 1959, № 2.

84. Куликов О. О., Браславский В. М., Упрочнение крупных деталей поверхностным наклепом, Сб. «Качество поверхности деталей машин», Изд-во АН СССР, 1961, № 5.

85. Кузьмин М. И., Метод упрочнения и отделка поверхностей деталей машин наклепыванием специальными упрочнителями, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», М., Машгиз, 1956. 86. Косенко П. А., Оптимальная шероховатость трущихся

поверхностей, Сб. «Качество обработанных поверхностей», М., Маш-гиз, 1954.

87. Кочетков А. А., Работы химинститутов АП СССР за 1940 г., Изд-во АН СССР, 1941, стр. 137. 88. Конобеевский С. Г., Сб. «Известия АН СССР», ОХН,

1937, № 5. — 89. Лазаренко В. К., Прейс Г. А., Износостойкость метал-

лов, Киев, Машгиз, 1960. 90. Левицкий Г. С., Хромирование деталей машин и инстру-

ментов, М., Машгиз, 1951.

91. Маталин А. А., Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин, М., Машгиз, 1956.

92. Металловедение и термическая обработка, М., Металлург-

издат, 1956.

93. Металлокерамические пористые подшипники скольжения, Институт металлокерамики и специальных сплавов, Изд-во АН СССР, Киев, 1963.

94. Металловедение и термическая обработка, Металлургиздат,

95. Мелков М. П., Восстановление автотранспортных деталей электролитическим осталиванием, М., 1957. 96. Моськин В. С., Основы легирования стали, Металлург-

издат, 1959.

97. Минкевич А. Н., Химико-термическая обработка стали,

М., Машгиз, 1960.

М. Машгиз, 1900.
98. Натчук А. И., Качество поверхностного слоя при ультразвуковом барировании, Сб. «Качество поверхностей деталей машин», Изд-во АН СССР, 1961, № 5, стр. 108—114.
99. Наумов С. Л., Исследование сопротивления металлов абразивному изнашиванию, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киев, 1960.
100. Носовский И. Г., Исследование изнашивания стали 45

в воздухе, аргоне и кислороде, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.

101. Носовский И. Г., Исследование процессов трения и изнашивания стали 45 в углекислоте, Сб. «Труды КВИАВУ ВВС»,

вып. 81, Киев, 1960. протекание процессов окисления и схватывания при износе металлов, Сб. «Труды КИ ГВФ», вып. II, Киев, 1961. — 103. Носовский И. Г., Некоторые вопросы теории антифрик-

ционности, Сб. «Труды КВИАВУ ВВС», Киев, 1963.

104. Платонов В. Ф., Подшипники из полиамидов, М., Маш-

гиз, 1961.

105. Повышение стойкости деталей машин, М., Машгиз, 1959. — 106. Поляк М. С., Повышение стойкости инструмента и деталей машин путем наплавки новыми износостойкими сплавами, Полтавское областное книжно-газетное издательство, 1963. 107. Перцовский М. Л., Пористое хромирование, М., Маш-

гиз, 1949.

108. Плишко Д. С., Износостойкость хромированных деталей авиационных двигателей, Сб. «Труды КИ ГВФ», Киев, 1959.

109. Прейс Г. А., Повышение износостойкости деталей оборудования предприятий пищевой промышленности, Машгиз, 1963.

110. Прессованные бронзополимерные подшипники, Сб. «Пластмассы в машиностроении за рубежом» (под ред. Д. С. Абрамсона), вып. 2, ГОСИНТИ, «Зарубежная техника», 1959.

111. Пустоварова Н. П., Влияние пластических деформаций на процессы, происходящие при трении металлов, Киев, Изд-во

ностно-активной среды на граничное трение и износ, Сб. «Развитие теории трения и изнашивание», Изд-во АН СССР, 1957.

→ 114. Ребиндер П. А., Влияние активных смазочно-охлаждающих жидкостей на качество поверхностей при обработке металлов

резанием и давлением, Изд-во АН СССР, 1946.

115. Ребиндер П. А., Венстрем Е. К., Влияние физических и адсорбционных слоев на пластическое течение металлов, Сб. «Известия АН СССР», серия физ., Изд-во АН СССР, 1937, № 4-5.

— 116. Ребиндер П. А., Физико-химическая механика, М., Изд-во

«Знание», 1958.

117. Резолюция Всесоюзного совещания по развитию теории трения и износа, Изд-во АН СССР, 1954.

→ 118. Рид В. Т., Дефекты в кристаллах, М., Изд-во иностр.

лит., 1962.

119. Саверин М. М., Дробеструйный наклеп, М., Машгиз,

120. Сатель Э. А., Елизаветина М. А., Технологические методы повышения качества поверхностного слоя деталей машин, «Качество поверхности деталей машин», Изд-во АН СССР,

121. Санжаровский А. Т., Способ покрытия марганцем из-

делий из черных металлов, «Заводская лаборатория», 1959, № 7. 122. Семенов А. П., Отчет о командировке в Англию, Изд-во AH CCCP, 1960.

123. Славинский М. П., Малооловянистые и безоловянистые баббиты, М., ОНТИ, 1937

124. Омирпин А. П., Промышленные цветные сплавы, М., Металлургиздат, 1956.

125. Справочник машиностроителя, т. 4, «Подшипники», М., Машгиз, 1956.

126. Справочник машиностроителя, т. 2, М., Машгиз, 1959.

127. Справочник машиностроителя, т. 4, Смазочные и уплотнительные устройства, М., Машгиз, 1956.

— 128. Тетельбаум М. С., Микрогеометрия и износ поверх-

ности трения, Сб. «Качество поверхности деталей машин», М., Маш-

129. Технологические процессы восстановления деталей машин электролитическим осталиванием, Сб. «Труды конференции по по-вышению работоспособности МТС и совхозов», М., Изд-во МСХ,

- 130. Топеха П. К., Основные виды износа металлов, Киев,

Пол. 10 пеха 11. К., Основные виды изпоса металлов, кнев, машгиз, 1952.

С131. Трепнел Б., Хемосорбция, М., Изд-во иностр. лит., 1958.

С132. Трусков П. Ф., Физико-химические изменения в металлах при трении, Сб. «Труды КИ ГВФ», вып. 3, Киев, 1962.

— 133. Трусков П. Ф., Физико-химические изменения металлов при трении, Сб. «Труды КИ ГВФ», вып. 3, Киев, 1962.

134. Уманский Я. С., Сб. «Известия АН СССР», СФХА, 1948.

135. Френкель Я. И., Введение в теорию металлов, М., Гостомосоромилат. 1948.

техтеоретиздат, 1948.

136. Фукс Г. И., Присадки к маслам и топливам, Сб. «Труды научно-технического совещания», М., 1931, стр. 228.

— 137. Хрущов М. М., Бабичев М. А., Сб. «Трение и износ в машинах», Изд-во АН СССР, 1941.

138. Хрущов М. М., Бабичев М. А., Сопротивление абразивному изнашиванию чугунов различного состава и структуры, Сб. Х., «Трение и износ в машинах», Изд-во АН СССР, 1955.

139. Хрущов М. М., Исследование приработки подшипнико-

вых сплавов и цапф, Изд-во АН СССР, 1946.
— 140. Хрущов М. М., Бабичев М. А., Исследование изнаши-

вания металлов, Изд-во АН СССР, 1960. 141. Чегодаев Д. Д., Наумов З. К., Дунаевская И. С.,

Фторопласты, М., Госхимиздат, 1960. 142. Черешкевич Л. В., Чегодаев Д. Д., Ядвина Н. Е., Фторопластовые подшипники, работающие без смазки, Л., Маш-

143. Шевелев А. Е., «Автомобильная промышленность»,

1947, № 1

144. Штейнберг С. С., Основы термической обработки стали,

М., Металлургиздат, 1945. ✓ 145. Beeck O., Civens I. W., a Smith A. E., On the mechanism of boundary lubrication, "Proc. Roy. Soc.", Ser. A., V. 177,

80, 1941. 146. Evans V., I., Chem., Soc. 5, 1029, 1927. 147. Freundlich H., Patschek G., Locher H., L. Phys. Chem., 128, 321, 1927; 130, 289, 1927.

148. Hardy W. B., The Theory of Lubrication, Proceedings f. Royal Society Acad., London, vol 88A, 1913, p. 303; vol N8A, 1928, p. 209; Fourth Report on Colloidal Chemistry kolloid Leitschrift, 1918, 46, 268 und 1932, 52, N 1, p. 1.

149. I i mori T., Nature, 140, 278, 1937.

150. Transtad L., Hoverstad T., Phys., Chem., 170, 172, 1034.

172, 1934.

151. Langmuir I., Metting Chemical Engineer, 15, 1916, p. 468.

152. Miley H., Evans V., I. Chem., Soc., 15, 1937.

153. Nelson H., I. Chem., Phys., 5, 252, 1937.

154. Tonn W., "Archiv für das Eisenhüttenwesen", 10, 466—

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	Стр.
Глава 1. Физические, химические и механические процессы	
в зоне трения	7
Возникновение процессов в поверхностных	
слоях металла при внешнем трении	7
Процессы в зоне трения и их скорости	15
Состояния поверхностей и поверхностных	
слоев металла в зоне трения	22
Предпосылки износостойкости и антифрик-	
ционности и основные определения	26
Глава 2. Основные положения теории износа	31
📝 Первое положение теории износа	31
Классификация видсв износа деталей машин	32
Износ схватыванием 1-го рода	34
Окислительный износ	37
Тепловой износ	42
Абразивный износ	47

Осповидный (усталостный) износ	50
Модели строения поверхностных слоев ме-	
талла узлов трения	54
Следствия первого положения теории износа	77
Влияние внешних механических воздействий	
на скорости процессов при трении и износе	78
Влияние среды (газовой, жидкой и твердой)	
на скорости процессов при трении и износе	84
Влияние материала трущихся поверхностей	
на скорости процессов при трении и износе	94
У Второе положение теории износа	101
Глава 3. Борьба с износом деталей машин	105
Общие сведения	105
Конструктивные средства борьбы с износом	
деталей машин	107
Материалы для изготовления трущихся пар машин	116
Металлические сплавы	116
Металлокерамические материалы	120
Материалы на основе высокомолекулярных соединений	122
Технологические средства борьбы с износом деталей машин. Способы упрочнения тру-	
щихся поверхностей	127
Упрочнение поверхностным наклепом	127
Упрочнение термической обработкой	128
Упрочнение химико-термической обработкой	130
Упрочнение термодиффузионной обработкой	132
	205

Упрочнение нанесением износостойких метал-	- 4 (-
лических покрытий	133
Фрикционно-диффузионное упрочнение	140
Упрочнение поверхностей наплавкой износо-	
стойкими сплавами	141
Электроискровое упрочнение	144
Шероховатость поверхности и начальный пе-	
риод износа (приработка) деталей машин	145
Эксплуатационные средства борьбы с изно-	
сом деталей машин	154
Надежность деталей машин, работающих	
в условиях трения, смазки и износа	155
Смазка деталей машин	165
Устранение нежелательных видов износа	172
Устранение износа схватыванием 1-го рода	172
Устранение теплового износа	178
Устранение абразивного износа	181
Устранение усталостного (осповидного) из-	
носа	186
Уменьшение окислительного износа	189
Литература	194
vinicpa, ypa	134

Борис Иванович Костецкий докт. техн. наук, Игорь Георгиевич Носовский канд. техн. наук

Износостойкость и антифрикционность деталей машин

Редактор издательства Е. Е. Лесовая Художник Л. Б. Сергий Художественный редактор Б. В. Валуенко Технический редактор Е. Т. Бабич Корректор Я. Я. Чигрина