

86 коп.

СХВАТЫВАНИЕ В МАШИНАХ

В книге приведены новые данные о физической сущности, механизме и основных закономерностях развития процессов схватывания при трении и износе в деталях машин. Рассматриваются методы изучения этих процессов и пути их устранения.

Книга предназначена для инженеров-конструкторов, технологов и научных работников, занимающихся вопросами увеличения надежности и долговечности машин.

Н.А. ГОЛЕГО

И
МЕТОДЫ
ЕГО
УСТРАНЕНИЯ

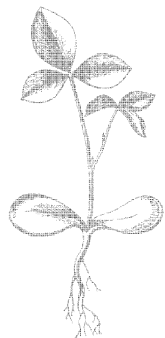
**СХВАТЫВАНИЕ
В МАШИНАХ**

И МЕТОДЫ ЕГО УСТРАНЕНИЯ

Н.А. ГОЛЕГО

Н. Л. ГОЛЕГО

СХВАТЫВАНИЕ В МАШИНАХ
И МЕТОДЫ
ЕГО УСТРАНЕНИЯ



Scan AAW



Н . Л . Голего

СХВАТЫВАНИЕ

В МАШИНАХ

И МЕТОДЫ ЕГО УСТРАНЕНИЯ

6П5.1
Г60

621.891

3—13—3

30—65М

Рецензент

*Г. А. Прейс, докт. техн.
наук*

Редакция литературы по
вопросам машинострое-
ния и транспорта

Заведующий редакцией
инж. М. А. Василенко

**КНИЖНАЯ ФАБРИКА
„О К Т Я Б Р Ъ“**

ВВЕДЕНИЕ СХВАТЫВАНИЕ — ОДИН ИЗ САМЫХ ОПАСНЫХ И РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ВИДОВ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН. ДАЖЕ В ТАКИХ СОВРЕМЕННЫХ МЕХАНИЗМАХ, КАК АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ, СХВАТЫВАНИЮ ПОДВЕРГАЮТСЯ ОКОЛО 30% ДЕТАЛЕЙ.

ПРОЦЕССЫ СХВАТЫВАНИЯ ВОЗНИКАЮТ ПРИ РАБОТЕ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ — ПРИ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ, БОЛЬШИХ НАГРУЗКАХ, В ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ, В ИНЕРТНЫХ ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ СРЕДАХ, ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И Т. Д., А ТАКЖЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ (РЕЗАНИИ, ПРОКАТКЕ, ВОЛОЧЕНИИ, ШТАМПОВКЕ И ДР.).

ПРИ СХВАТЫВАНИИ ПРОИСХОДИТ ИНТЕНСИВНЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, РЕЗКО УМЕНЬШАЕТСЯ ИХ ОБЪЕМНАЯ УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ, А В ОТДЕЛЬНЫХ СЛУЧАЯХ ПРОИСХОДИТ ЗАЕДАНИЕ И ДАЖЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН. В ТО ЖЕ ВРЕМЯ ЯВЛЕНИЯ СХВАТЫВАНИЯ УСПЕШНО ИСПОЛЬЗУЮТСЯ В ТЕХНИКЕ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ. ПОЭТОМУ ИЗУЧЕНИЕ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИМЕЕТ БОЛЬШОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ. ЗНАНИЕ ПРИРОДЫ, МЕХАНИЗМА И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ ПОЗВОЛЯЕТ РАЗРАБОТАТЬ ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭТИМИ ПРОЦЕССАМИ.

ЗА ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ В НАШЕЙ СТРАНЕ И ЗА РУБЕЖОМ ОПУБЛИКОВАН РЯД РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ ИЗУЧЕНИЮ ПРИРОДЫ ПЛАСТИЧНОСТИ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКРУЖАЮЩИХ СРЕД С ПОВЕРХНОСТЯМИ МЕТАЛЛОВ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ, СМАЗКИ И ИЗНОСА, В ЧАСТНОСТИ, ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, ПРОВЕДЕНЫ П. А. РЕБИНДЕРОМ, Г. В. КУРДЮМОВЫМ, В. Д. КУЗНЕЦОВЫМ, К. К. ХРЕНОВЫМ, Б. И. КОСТЕЦКИМ, И. В. КРАГЕЛЬСКИМ, М. М. ХРУЩОВЫМ, С. В. ПИНЕГИНЫМ, В. А. КИСЛИКОМ, Б. В. ДЕРЯГИНЫМ, П. Е. ДЬЯЧЕНКО, А. И. ПЕТРУСЕВИЧЕМ, А. С. АХМАТОВЫМ, Г. В. ВИНОГРАДОВЫМ, К. В. САВИЦКИМ, А. П. СЕМЕНОВЫМ, С. Б. АЙНБИНДЕРОМ, Г. Д. ПОЛОСАТКИНЫМ И ДРУГИМИ, А ТАКЖЕ ЗАРУБЕЖНЫМИ УЧЕНЫМИ Ф. БОУДЕНОМ, Г. ТОМЛИНСОНОМ, Г. ФИНЧЕМ И ДР. ОДНАКО ЯВЛЕНИЯ СХВАТЫВАНИЯ РАССМАТРИВАЛИСЬ В ОСНОВНОМ В СВЯЗИ С ПРОЦЕССОМ ХОЛОДНОЙ СВАРКИ И ЛИШЬ НЕБОЛЬШАЯ ЧАСТЬ РАБОТ ПОСВЯЩЕНА ИССЛЕДОВАНИЮ ЭТИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ. МАЛО ИЗУЧЕНЫ КАЧЕСТВЕН-

НЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ, ОСОБЕННО В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.

В КНИГЕ РАССМАТРИВАЕТСЯ ОБЩИЙ, ПРАКТИЧЕСКИ ВАЖНЫЙ И НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЙ СЛУЧАЙ ПРОЯВЛЕНИЯ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ — СХВАТЫВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ. ОБОБЩЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМА И ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ И ПРЕДЛОЖЕНЫ ОБОСНОВАННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭТИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ МАШИН.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ АВТОРОМ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ В ДЕТАЛЯХ МАШИН И В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ ПОКАЗАЛИ, ЧТО СХВАТЫВАНИЕ МОЖНО РАССМАТРИВАТЬ КАК ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ. СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ХАРАКТЕРИСТИКИ СХВАТЫВАНИЯ ЗАВИСЯТ ОТ СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И, В ПЕРВУЮ ОЧЕРЕДЬ, ОТ СТРОЕНИЯ ИХ АТОМОВ, ОТ СКЛОННОСТИ МЕТАЛЛОВ К СХВАТЫВАНИЮ. ВО МНОГОМ СХВАТЫВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ЗАВИСИТ И ОТ ПРОЧНОСТИ, ОТ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК.

ЗНАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК ОКИСЛОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СОПРЯЖЕННЫМИ МЕТАЛЛАМИ, ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СКЛОННОСТИ МЕТАЛЛОВ К ОБРАЗОВАНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ДАЕТ ВОЗМОЖНОСТЬ УПРАВЛЯТЬ ПРОЦЕССАМИ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭТИХ ДВУХ ГРУПП ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ И НАШЛИ СВОЕ ОТРАЖЕНИЕ В КНИГЕ.

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

МЕТОДИКА, МАШИНЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

§ 1. ВЫБОР МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение механизма и основных закономерностей развития процессов схватывания металлов при трении необходимо для разработки обоснованных методов борьбы с этими процессами в деталях машин. Методика исследования процессов схватывания металлов при трении [59] включает три этапа:

1) исследование процессов схватывания с анализом причин их возникновения и закономерностей развития на деталях машин в условиях эксплуатации с помощью разработанной системы паспортизации (см. стр. 16);

2) воспроизведение процессов в лабораторных условиях с целью изучения механизма и закономерностей их развития в зависимости от изменения условий трения (в более широком диапазоне по сравнению с условиями трения при эксплуатации машин), внешних механических воздействий (скорости относительного перемещения, удельного давления, вибраций), среды, в которой происходит трение сопряженных поверхностей (жидкой, газовой, твердой, в вакууме), свойств металлов трущихся пар, методов их обработки, температуры, масштабного фактора и др. На основании полученных результатов разработаны мероприятия по управлению процессами схватывания;

3) проверка и внедрение в практику методов борьбы со схватыванием металлов деталей машин.

Как известно, в процессе трения и износа на поверхности и в поверхностных слоях металлов в зависимости от условий трения возникают и с различ-

ной интенсивностью развиваются физико-химические и механические процессы, обуславливающие изменение качественного состояния и свойств поверхностных слоев металлов (структуры, химического состава, микротвердости и т. д.) и количественных характеристик процессов трения и износа (величины износа, коэффициента трения, температуры и др.).

В основу принятой методики положено комплексное исследование качественных и количественных характеристик процессов трения и износа в условиях схватывания металлов. Это дает возможность определить характер и закономерности развития основных процессов, возникающих в поверхностных слоях металлов при данных условиях трения.

Качественные и количественные характеристики поверхностей трения образцов, прошедших лабораторные испытания, сопоставлялись с аналогичными данными состояния поверхностей деталей машин. При этом рассматривалось также состояние исходных, не подвергавшихся трению поверхностей.

Важное значение имеет исследование изменений состояния и свойств поверхностей и поверхностных слоев металла в процессе трения и износа в условиях схватывания в макро-, микро- и субмикроскопических слоях металлов с учетом конечных внешних изменений поверхностных слоев и кинетики происходящих изменений на протяжении всего периода их развития. Применение современных методов исследования (макро-, микро- и электронномикроскопического, эмиссионно-спектрального метода анализа химического состава поверхностных слоев металла) и новейших приборов дает возможность изучить макро-, микро- и субмикроструктуру, микрогеометрию и микротвердость поверхностей и поверхностных слоев металла, изменения параметров износа, коэффициента трения, температуры и др.

При разработке методики и установлении граничных условий испытаний нужно учитывать не только явления, происходящие при работе деталей конкретных машин, но и основные тенденции в развитии современных машин — увеличение скоростей и нагрузок, работа в условиях вибрационных нагрузок, низких и высоких температур, в различных газовых и жидких средах, в вакууме и т. п.

Большинство испытательных машин и установок, использованных при исследованиях, сконструировано автором, в частности машины для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях малых, высоких и сверхвысоких скоростей скольжения, в условиях вибраций, а также установки для

исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях низких и повышенных температур, в условиях высоко-го вакуума, для исследования кинетики процессов схватывания металлов при трении.

Применение указанных машин и установок, оснащенных современными приборами и приспособлениями, позволило исследовать процессы схватывания металлов при трении в широком диапазоне изменения скоростей относительного перемещения испытуемых образцов (0,001—300 м/сек), удельных давлений (0—1200 кг/см²)*, вибраций с частотой колебаний 30—250 гц и величиной амплитуды 0—2 мм, в условиях активных и инактивных газовых и жидких сред, в высоком вакууме (до 10⁻¹⁰ мм рт. ст.), в условиях нагрева и охлаждения испытуемых образцов (от —180 до +600° С) в течение всего периода испытаний.

В процессе исследования испытывались (с учетом масштабно-го фактора) образцы различных размеров и форм, изготовленные из различных металлов и сплавов, с металлическими и неметаллическими покрытиями поверхностей трения.

§ 2. ОСНОВНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

Анализ количественных изменений процессов трения и износа и изменений структуры металлов в условиях схватывания дает возможность раскрыть механизм и закономерности физических, химических и механических процессов, возникающих и развивающихся в поверхностных слоях металлов.

В процессе микроскопического исследования выявляются по внешнему виду характерные изменения, которые происходят на поверхности трения в процессе эксплуатации деталей машин и при лабораторных испытаниях образцов: следы пластического течения металлов, вырывы и налипание частиц металла, следы оплавления и размазывания, надрывы металла, цвета побежалости, следы полирования, окисления и хрупкого разрушения поверхностей, следы воздействия абразивных частиц в виде рисок, царапин, борозд и др. В результате такого исследования по характеру наблюдаемых изменений поверхностей трения можно

* По ГОСТ 9867—61 единица давления 1 н/м² · 1 кг/см² = 9,80665 · 10⁴ н/м².

с достаточной точностью определить ведущие процессы, виды износа.

Микроструктура металлов исследовалась с помощью оптического микроскопа МИМ-8, позволяющего проводить визуальное наблюдение микроповерхностей при увеличении в 100—1350 раз и фотографирование при увеличении в 45—2000 раз. Получение четких и контрастных изображений микроструктуры в значительной мере обуславливается качеством подготовки исследуемой поверхности [20, 59, 96, 107].

Для исследования поверхностей вырезались образцы из определенных участков деталей; их размеры и форма определялись характером разрушения поверхностей трения, размерами детали и задачей исследования. Большинство исследуемых образцов имело в сечении прямоугольник или квадрат с размерами сторон от 8 до 15 мм. Из вырезанных образцов изготавливались микрошлифы. Для предотвращения заваливания краев образцы при полировании зажимались в специальную струбцину. Между образцом и струбциной прокладывалась полоска меди толщиной 0,1—0,2 мм или на исследуемую поверхность электролитическим способом осаждался слой меди. Образцы подвергались последовательно шлифованию, полированию и травлению по соответствующим режимам.

В процессе шлифования и механического полирования деформируется поверхностный слой, в результате чего искажается структура металла, полученная при трении и износе. С целью выявления подлинной микроструктуры металла процессы полирования и травления микрошлифа многократно чередовались. В тех случаях, когда механическое полирование не давало удовлетворительных результатов, применялось электролитическое полирование. При такой тщательной подготовке исследуемых поверхностей образцов выявлялся микрорельеф, характер которого зависел от физико-химической природы этих участков, наличия отдельных элементов структуры металла, их количества и качества.

С помощью металломикроскопов исследовалась микроструктура поверхностей трения металла в плане и в сечении поверхностных слоев.

Применение микроскопического метода дает возможность изучить основные изменения структуры, происходящие в микрообъемах металла в результате пластической деформации, диффузионных и тепловых явлений, схватывания металла и разрушения узлов схватывания, изменения величины и формы зерен;

выявить степень их деформации, наличие текстурирования металла, характер и глубину его деформированных слоев, наличие трещин, налипаний и вырывов, изменения прочности (твердости) металлов, окисление поверхностей и т. п.

Структуры очень малых объемов металла, неуловимых для оптических металломикроскопов, исследовались с помощью электронномикроскопического метода, позволяющего изучать особенности субмикроструктуры, субзерен и наиболее мелких субмикроскопических составляющих блоков металлов.

Электронномикроскопическое исследование структуры металлов проводилось на электронном микроскопе УЭМВ-100 с разрешающей способностью 10—25 Å и увеличенной глубиной резкости, что позволяет четче представить форму и размеры отдельных составляющих структуры. Как известно, на электронном микроскопе исследуются различные объекты в проходящих электронных лучах, поэтому предметы исследования должны быть прозрачными и очень тонкими (металлические — не больше 1000 Å). Но так как получение таких тонких металлических пластинок представляет значительные трудности, исследования, в основном, проводились на обычных непрозрачных металлических образцах — микрошлифах.

Электронномикроскопический метод исследования субмикроструктуры толстых непрозрачных металлических образцов основан на косвенном изучении рельефа поверхности микрошлифа. Для этого с поверхности микрошлифа снимают специальный прозрачный слепок — реплику, которая полностью воспроизводит рельеф поверхности микрошлифа, полученный в результате травления. Исследование реплик на электронном микроскопе в проходящих электронных лучах позволяет составить правильное представление о структуре поверхностных слоев металла.

Качество выявления составляющих элементов субмикроструктуры металлов во многом зависит от качества приготовления микрошлифа. В отличие от обычной технологии приготовления микрошлифа после механического полирования производилось электролитическое полирование и травление. Этим полностью устранялся деформированный слой металла, получаемый в результате механической обработки микрошлифа. Состав электролитов и режим электрополирования и электротравления изменялся в зависимости от исследуемого металла.

Электронномикроскопические исследования субмикроструктуры проводились в основном на образцах, изготовленных из

малоуглеродистой стали и технически чистого железа, по методике, разработанной Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР [86]. Электрополирование поверхностей таких образцов проводилось в электролите, состоящем из 75 мл хлорной и 1000 мл ледяной уксусной кислоты, при температуре электролита 30° С, в течение 30—40 сек, при напряжении тока 100—120 в и плотности 0,25—0,3 а/см². Материал катода — нержавеющая сталь. Электротравление производилось в электролите, состоящем из 0,5 г хлорного железа, 1 мл соляной кислоты (плотность 1,19), 98,5 мл метилового спирта, при напряжении тока 15—20 в и плотности 0,15—0,25 а/см²; продолжительность травления — от 5 до 45 сек. Материал катода — нержавеющая сталь.

Для электронноструктурного исследования очень важное значение имеет также качество изготовления реплик. Автором использован метод получения коллодиевых и, главным образом, угольных реплик.

В связи с тем, что исследуемые поверхностные слои металлов подвергались в процессе трения и износа в условиях схватывания большим пластическим деформациям, поверхность микрошлифа после травления имела глубокий рельеф. Для получения качественных реплик с поверхности такого микрошлифа применялся двухступенчатый способ изготовления угольных реплик, заключающийся в получении первичного, негативного, отпечатка напылением в вакууме на исследуемую поверхность микрошлифа слоя серебра толщиной 1,5—2 мк и последующем получении вторичного, позитивного, отпечатка напылением угля в вакууме на контактную сторону серебряного отпечатка.

Для предотвращения искажений исследуемой субмикроструктуры собственной структурой серебряной пленки последняя удаляется с угольных пленок растворением ее в 40%-ной азотной кислоте.

Угольные реплики имеют большую разрешающую способность и позволяют передавать четкое, контрастное изображение элементов субмикроструктуры металлов без дополнительного оттенения. Коллодиевые реплики использовались мало, так как в отличие от угольных они обладают относительно низкой разрешающей способностью и для повышения контрастности и прочности изображения нуждаются в специальном оттенении электролитическим хромом в вакууме.

Визуальное наблюдение и фотографирование исследуемых поверхностей на электронном микроскопе производились при увеличении от 3000 до 30 000 раз.

С помощью рентгеноструктурного метода исследуются структурные изменения, происходящие в очень малых объемах металла, изучаются искажения кристаллической решетки, вызванные пластической деформацией, состояние тонкой кристаллической структуры (блочности, напряжений), фазовые превращения и другие субмикроскопические явления, происходящие в поверхностных слоях металлов в процессе трения и износа.

Для определения величины блоков автором использовалась методика расчета характеристик тонкой кристаллической структуры [39, 81]. Однако расчеты, проводимые на основании расшифровки рентгенограмм, дают возможность получить лишь усредненные данные параметров структуры металлов. Поэтому в проводимых исследованиях рентгеноструктурный метод был вспомогательным и применялся в сочетании с другими методами. Рентгеноструктурные исследования проводились с помощью ионизационного рентгеновского аппарата типа УРС-50И с автоматической регистрацией рентгеновских лучей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА ЭМИССИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

В определенных условиях трения и износа повышается химическая активность поверхностных слоев металлов. Основными факторами, обуславливающими это повышение химической активности металлов при трении, являются изменение температуры и наличие пластического деформирования поверхностных слоев металлов. В результате этого интенсифицируются диффузионные процессы и поверхностные слои насыщаются различными химическими элементами из окружающей среды. При значительном повышении температуры поверхностей трения часто происходит удаление отдельных компонентов из поверхностных слоев металла, вследствие чего изменяется его химический состав.

Исследование изменения химического состава трущихся слоев металла эмиссионно-спектральным методом в комплексе с другими методами исследования значительно расширяет возможности изучения механизма процессов, возникающих при трении и износе.

Эмиссионно-спектральный метод основан на изучении спектра газового облака, образующегося при электрическом разряде между электродом и исследуемой поверхностью металла. Как известно, раскаленные пары каждого металла имеют свой строго определенный спектр. По наличию и интенсивности

определенных линий спектра можно судить о количественном и качественном составе металла.

С помощью эмиссионно-спектрального метода определялись количественные изменения содержания углерода, хрома, никеля и марганца в металле исследуемых деталей машин и лабораторных образцов. Исследования проводились на кварцевом спектрографе ИСП-28. При определении содержания углерода применялся генератор конденсированной искры ИГ-3. Содержание хрома, никеля, марганца и кремния определялось с помощью генератора высокочастотной искры [61]. Электродом служил магниевый цилиндр диаметром 1,5 мм. Это дало возможность фиксировать на фотопластинке достаточно интенсивную и стабильную во времени линию углерода, а также проводить анализ содержания хрома, никеля, марганца и кремния без предварительного обескисливания [76].

При спектральном анализе поверхностей трения металлов необходимо учитывать глубину проникновения разряда в поверхность. Этот параметр определялся при помощи профилографа-профилометра типа «Калибр-ВЭИ».

Послойный анализ производили фотографированием спектров каждой обнажаемой поверхности, которая подготавливалась шлифованием тонких слоев металла. Исследуемые поверхности тщательно промывались эфиром. Фотометрирование спектров проводилось на микрофотометре МФ-2.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА

При определении микротвердости выясняется связь механических свойств поверхностных слоев металла со структурными и фазовыми изменениями в этих слоях, устанавливается качественное различие между отдельными структурными составляющими металла, что способствует более глубокому изучению процессов схватывания. Исследование микротвердости производилось с помощью наиболее распространенного прибора ПМТ-3 конструкции М. М. Хрущева и Е. С. Берковича [114]. Микротвердость поверхностных слоев металлов в сечении определялась на микрошлифах, изготовленных в специальных струбцинах [59], предохраняющих края микрошлифов от завалов при полировании и позволяющих производить измерение микротвердости в тончайших поверхностных слоях металлов у самого края от поверхности трения.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Одним из факторов, определяющих качество сопряженных поверхностей деталей, является микрогеометрия поверхности. В процессе трения и износа микрогеометрия исходной поверхности значительно изменяется, образуя так называемый оптимальный микрорельеф для данных условий трения, находящийся в прямой связи со структурным состоянием поверхностных слоев металлов.

Характер микрогеометрии обусловлен особенностями разрушения поверхностей трения, что, в свою очередь, зависит от ведущих физико-химических и механических процессов, возникающих и развивающихся при трении и износе. В отдельных случаях исходная микрогеометрия поверхностей трения оказывает заметное влияние на возникновение и развитие процессов трения и износа, особенно в период приработки. Поэтому метод исследования микрогеометрии поверхностей трения служит важным дополнением к основному — металлоструктурному методу.

Исследование микрогеометрии поверхностей трения проводилось с помощью оптических приборов: микроинтерференционного микроскопа МИИ-4 и двойного микроскопа МИС-11 (системы Линника), а также щупового прибора — профилографа типа «Калибр-ВЭИ».

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МЕТАЛЛА ПРИ ТРЕНИИ

Развитие процессов схватывания металлов при трении в большой степени зависит от физического состояния поверхностных слоев металла (хрупкости, пластичности, предела прочности и др.) и защитных пленок на поверхности металла (их прочности, условий возникновения, разрушения и т. д.). Физическое состояние поверхностных слоев металла и защитных пленок во многом зависит от температуры нагрева, возникающей при трении и износе сопряженных металлов. Поэтому измерение температур нагрева металла сопряженных деталей имеет большое значение для понимания природы и закономерностей развития процессов схватывания.

Так как теплообразование при трении сопряженных металлов происходит в их тончайших поверхностных слоях, то измерение истинных температур в этих слоях представляет значительную трудность.

В нашей работе применялся наиболее надежный и проверенный комплексный метод измерения температур нагрева в поверхностных слоях металлов при трении, разработанный Б. И. Костецким [59] и А. И. Куюном [82]. Этим методом предусматривается непосредственное измерение температуры нагрева металла поверхностных слоев при трении с помощью искусственных термопар и косвенное определение температуры путем анализа характера изменений фазового и структурного состояний и микротвердости поверхностных слоев металлов. Применение указанного метода позволяет точнее определить градиент температур нагрева поверхностных слоев металла при трении и износе, установить зависимость между ведущими процессами, происходящими в поверхностных слоях при трении, температурой нагрева, структурными и фазовыми превращениями и изменением микротвердости металлов.

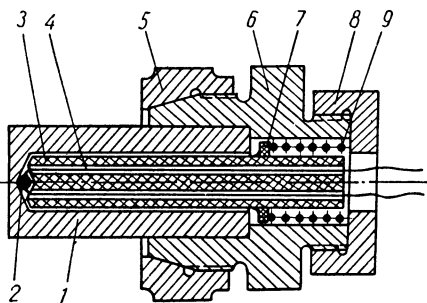


Рис. 1. Схема микротермопары для измерения температуры в поверхностных слоях металлов:

1 — испытуемый образец; 2 — спай; 3 — фарфоровая трубка (изолятор); 4 — электрод; 5 и 8 — гайки; 6 — цапга; 7 — шайба; 9 — пружина.

Температура нагрева образцов измерялась с помощью искусственных микротермопар (хромель-алюмелевых и платино-платинородиевых) с диаметром электродов 0,1 мм. Величина спаев микротермопар составляла 0,28—0,32 мм. При испытаниях в условиях низких (отрицательных) температур применялись медь-константановые микротермопары. Все микротермопары предварительно тарировались в Палате мер и весов.

Для установки микротермопар в исследуемых образцах просверливались на заданную глубину отверстия диаметром 1—1,5 мм (в зависимости от диаметра изолятора). В отверстие устанавливалась микротермопара (рис. 1) и закреплялась с помощью специального устройства.

Нагрев (в основном под действием сил внешнего трения) поверхностей трения и тончайших поверхностных слоев металла передается спаю 2 термопары, в цепи которой возникает электродвижущая сила, регистрируемая милливольтметром или осциллографом. Для измерения истинной температуры нагрева поверх-

ности трения образец испытывался до начала износа сая микротермопары. Специальное закрепление микротермопары в образце позволяло исключить отеснение сая микротермопары от поверхности трения, могущее происходить под действием пластических деформаций поверхностных слоев металла.

ИЗМЕРЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИЙ ПРИ ТРЕНИИ

Возникновение и развитие процессов схватывания металлов главным образом обуславливаются наличием и соответствующим сочетанием величин нормальных и тангенциальных усилий в местах контакта сопряженных металлов. Поэтому точное определение этих усилий имеет большое значение для изучения процессов схватывания металлов. По изменению соотношения величин нормальных и тангенциальных усилий при испытании образцов в различных условиях трения в сочетании с качественным металлографическим анализом поверхностей трения можно с большой точностью определить начало возникновения и характер развития процессов схватывания металлов.

Точное измерение указанных усилий в процессе испытаний представляет значительные трудности, так как они изменяются от нуля до величин, равных разрушающим нагрузкам, в момент полного схватывания контактирующих поверхностей. Поэтому устройства для измерения нормальных и тангенциальных усилий должны удовлетворять одновременно двум требованиям: обладать высокой чувствительностью и воспринимать большие усилия.

Этим требованиям отвечает разработанная конструкция специального динамометра с набором стальных пластинчатых пружин, по величине упругой деформации которых определяются величини-

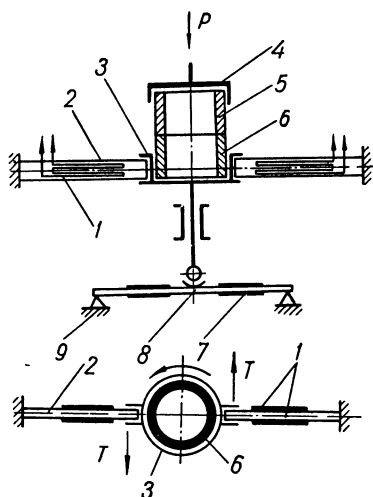


Рис. 2. Схема динамометра для измерения нормальных и тангенциальных усилий:

1 и 7 — датчики сопротивления; 2 и 8 — пластинчатые пружины; 3 — цанга для зажима неподвижного образца; 4 — цанга для зажима подвижного образца; 5 — подвижный образец; 6 — неподвижный образец; 9 — опоры; P — нормальное усилие; T — тангенциальное усилие.

ны усилий (рис. 2). Тангенциальные усилия воспринимаются свободным концом пластинчатой пружины 2, второй конец которой жестко закреплен в оправке. Нормальные усилия измеряются с помощью свободно лежащей на двух опорах пластинчатой пружины 8, на которую эти усилия передаются через стальной шарик.

Величина деформации пластинчатых пружин измеряется с помощью тензометрических датчиков сопротивления 1 и 7, наклеенных на пружину с двух сторон в местах наибольшей их деформации, тензометрического усилителя 8АНЧ и двенадцатишлейфного стационарного осциллографа К-105. Набор шлейфов различной чувствительности дает возможность фиксировать с большой точностью электрический сигнал, получаемый при любой деформации пластинчатых пружин динамометра.

Запись величин нормальных и тангенциальных усилий в регистрирующем устройстве (осциллографе) производится на одной ленте. Это повышает точность подсчета коэффициентов трения.

ПАСПОРТИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Конечной целью исследования процессов трения и износа, в том числе и процессов схватывания металлов при трении, является предотвращение износа деталей машин в широком диапазоне условий эксплуатации. В решении этой сложной проблемы одно из важных мест принадлежит определению ведущих процессов, обуславливающих характер и интенсивность износа деталей машин,— определению ведущих видов износа.

Как известно, при трении в результате взаимодействия сопряженных поверхностей в поверхностных слоях металлов возникают и развиваются различные физические, химические и механические процессы: упругие и пластические деформации, процессы упрочнения и разупрочнения металлов, тепловые процессы, вызывающие структурные и фазовые изменения в металле, процессы образования металлических связей, адсорбционные и диффузионные процессы, механическое разрушение металла, усталостные и другие процессы.

В определенных условиях трения один из процессов развивается с большей скоростью и интенсивностью и обуславливает определенный вид износа. Изменяя условия трения, можно развивать или тормозить тот или иной процесс и тем самым расширять или сужать границы существования видов износа, вызывать

переходы одних видов износа в другие и устранять износ в деталях машин.

Правильно определив ведущий процесс, ведущий вид износа, обуславливающий характер и интенсивность износа деталей машин в каждом конкретном случае, можно вполне обоснованно и рационально использовать существующие и разработать новые эффективные методы борьбы с износом.

Эффективным для определения ведущего вида износа в исследуемых деталях машин оказался метод паспортизации деталей машин [18].

Так как процессы, возникающие при трении и износе, зависят от трех основных групп факторов — внешних механических воздействий, среды, в которой работают сопряженные детали, и материала, из которого изготовлены детали, то и в основу составления паспорта легло детальное изучение этих трех групп факторов.

Паспорт состоит из трех разделов. В первом разделе содержатся основные характеристики металла и поверхностей трения исследуемых деталей после их изготовления или ремонта, в том числе: краткая характеристика физико-механических свойств металла, краткая технология изготовления деталей, геометрические характеристики деталей, данные о качестве поверхности трения, остаточных напряжениях в поверхностных слоях и др. К разделу прилагаются фотоснимки чертежа детали, микроструктуры поверхностного слоя в плане и в сечении, профилограммы микро рельефа поверхности, графики микротвердости поверхностного слоя.

Во второй раздел паспорта заносятся данные об условиях работы исследуемых деталей — скорость относительного перемещения сопряженных деталей, удельное давление на поверхности контакта, температура на поверхности трения, условия смазки и др.

В третьем разделе паспорта содержатся основные характеристики поверхностей трения деталей после их эксплуатации: микро рельеф поверхности трения, микроструктура и микротвердость поверхностных слоев, остаточные напряжения в поверхностных слоях, интенсивность износа, время работы детали и установленный вид износа. К этому разделу прилагаются фотоснимки исследуемой детали и отдельных характерных изношенных участков — микро рельефа и микроструктуры поверхности, микроструктуры поверхностного слоя, графики износа поверхностей трения и микротвердости поверхностного слоя.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕДУЩИХ ВИДОВ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПО ВНЕШНИМ ПРИЗНАКАМ

Метод определения видов износа с помощью паспортизации исследуемых деталей несколько трудоемкий, поэтому в отдельных случаях можно применять более простой метод определения видов износа по внешним признакам рабочих поверхностей трения деталей машин.

Каждому ведущему виду износа присущи характерные изменения поверхностей трения. Даже при небольшом увеличении (до 20 раз) по этим изменениям можно с достаточной точностью определять ведущий вид износа. Так, например, поверхности трения деталей машин в результате износа в условиях схватывания 1-го рода представляют собой беспорядочное скопление впадин, выступов и продольных борозд разной величины и формы с резкими границами перехода от впадин к выступам, заметными следами пластического течения металла по направлению перемещения трущихся деталей, а также налипшими на поверхности трения частицами металла или следами вырыва частиц. У деталей из мягких металлов разрушения наблюдаются по всей поверхности трения, а у деталей из твердых металлов разрушаются отдельные участки поверхности трения.

В условиях схватывания 1-го рода, вызванного микроперемещениями поверхностей сопряженных деталей, изготовленных как из мягких, так и из твердых металлов, разрушаются отдельные участки поверхностей трения. Причем характер разрушения зависит от вида нагрузки. При статической нагрузке разрушается поверхность трения детали из менее прочного материала, и частицы металла налипают на сопряженную поверхность более прочного материала. При динамической нагрузке разрушается поверхность трения более прочного металла, но имеющего меньшую ударную вязкость, и частицы металла налипают на сопряженную поверхность менее прочного металла, но с большей ударной вязкостью.

У деталей машин, подвергшихся изнашиванию в условиях схватывания 2-го рода, поверхность трения шероховатая, с относительно плавными переходами от выступов к впадинам, с заметными следами оплавления и размазывания металла по направлению перемещения пар трения, а также цветами побежалости.

Характерными особенностями поверхностей трения деталей машин, работавших в условиях начальной стадии развития схватывания 2-го рода, являются чередующиеся надрывы металла,

расположенные перпендикулярно к направлению движения сопряженных пар, вырывы и налипание частиц металла с заметными границами перехода по краям, следы пластического течения металла и цвета побежалости.

На основании исследования 124 деталей машин, работавших в различных условиях эксплуатации, составлен альбом «Внешние признаки видов изнашивания деталей машин» [19].

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА В УСЛОВИЯХ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

При анализе количественных и качественных характеристик процессов трения и износа в условиях схватывания металлов необходимо учитывать два последовательно протекающих во времени периода: период приработки и установившийся период. Период приработки характеризуется непостоянством скорости износа и процессов, обуславливающих износ.

С течением времени процессы трения и износа стабилизируются и характеризуются относительным постоянством скорости износа, температуры в зоне трения, коэффициента трения, состояния поверхности трения и поверхностных слоев, ведущих процессов, возникающих при трении и износе, и др.

Одной из основных количественных характеристик развития процессов схватывания металлов при трении является величина износа поверхностей трения. Знание характера протекания износа сопряженных поверхностей при схватывании металлов в различных условиях трения в сочетании с качественными характеристиками процессов схватывания дает возможность определить степень влияния различных факторов на интенсивность развития процессов схватывания.

При изучении закономерностей развития ведущих процессов, обуславливающих износ, необходимо знать величину износа в установившийся период. Для этого нужно определить оптимальную продолжительность опытов, с тем чтобы соотношение величин износа образцов в период приработки и в установившийся период было минимальным и постоянным для каждого режима испытаний.

С целью сокращения периода приработки поверхности трения предварительно доводились обработкой по профилю к виду приработанной поверхности, а также применялись самоцентрирующие устройства для крепления образцов, предупреждающие возможные перекосы.

Для определения величины износа образцов в данных условиях трения проводилось по три контрольных опыта. При значительном рассеивании опытных данных количество контрольных опытов увеличивалось до пяти и более; это исключало влияние случайных значений некоторых опытов на окончательный результат.

Наиболее эффективными методами оценки величины износа поверхностей трения деталей машин являются микрометраж деталей, профилографирование изношенных поверхностей, микрометрическое измерение линейного износа и определение взвешиванием потерь веса испытываемых образцов.

Микрометраж линейного износа деталей машин производится с помощью измерительных приборов (микрометров, миниметров, индикаторов). Этот метод прост, но величину износа нельзя измерить с большой точностью.

Метод профилографирования основан на определении величины износа с помощью профилограмм, снятых с поверхностей трения. В качестве контрольной базы используются нерабочие поверхности, прилегающие к изношенным участкам. Значительный масштаб увеличения профилографа («Калибр-ВЭИ») позволяет с большой степенью точности измерять величину линейного износа.

Метод определения линейного износа с помощью рычажно-чувствительных приборов применяется, главным образом, для измерения величины износа во времени, т. е. в процессе проведения опыта. Этот метод основан на измерении меняющегося расстояния от постоянной базы до испытываемого образца.

В условиях схватывания металлов происходит неравномерный износ поверхностей трения, сопровождающийся интенсивным деформированием поверхностных слоев металлов на значительную глубину, поэтому микрометрический метод не дает возможности измерить величину износа с необходимой точностью. Учитывая эти особенности износа в условиях схватывания металлов, в основном применялся метод определения износа испытываемых образцов установлением потери их веса. Взвешивание производилось на аналитических весах с точностью до 0,0001 г.

Для построения кривых износа, удобства их сопоставления и анализа в качестве единиц измерения можно принять приведенный удельный износ, отнесенный к 1000 м пройденного пути и к 1 см² поверхности трения.

Для определения приведенного удельного износа необходимо установить величину пройденного пути трения. Так как исследо-

вания проводятся в широком диапазоне изменения скоростей относительного перемещения испытуемых образцов (0,001—300 м/сек), определение величины пройденного пути представляет значительные трудности. Использовать обычные методы измерения пройденного пути трения или числа оборотов испытуемых эталонных валов или дисков с помощью обычных счетчиков в ряде случаев не представляется возможным. Число оборотов испытуемых образцов можно определять с помощью специального индукционного датчика, осциллографа и звукового генератора (рис. 3) с последующим подсчетом величины пройденного пути трения.

Наряду с определением величины приведенного износа следует также измерять величину коэффициента трения и температуру на поверхности трения в зависимости от изменения условий трения. На основании полученных данных строятся графики зависимостей изменения приведенного износа и коэффициента трения от скорости скольжения, удельного давления, температуры на поверхности трения и других факторов.

Изучение количественных характеристик процессов трения и износа должно сопровождаться всесторонним анализом изменений, происходящих на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов. Это позволит выявить ведущие виды износа, определить критические точки перехода одного вида износа в другой, границы существования ведущих процессов.

Основные качественные характеристики износа испытуемых образцов определяются с помощью металловедческого анализа. При возникновении сомнений в точности определения ведущих процессов, возникающих при трении и износе, в отдельных случаях, наряду с обычным металловедческим анализом, применялись рентгеноструктурный, спектральный, электроннографический и другие методы.

Основные качественные характеристики износа испытуемых образцов определяются с помощью металловедческого анализа.

При возникновении сомнений в точности определения ведущих процессов, возникающих при трении и износе, в отдельных случаях, наряду с обычным металловедческим анализом, применялись рентгеноструктурный, спектральный, электроннографический и другие методы.

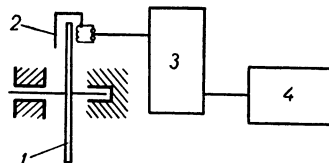


Рис. 3. Схема установки для измерения числа оборотов испытуемых образцов:

1 — магнитный ротор индукционного датчика; 2 — индукционная катушка; 3 — электронный осциллограф; 4 — звуковой генератор.

§ 3. МАШИНЫ И УСТАНОВКИ

Испытательные машины и установки для исследования процессов схватывания металлов при трении должны воспроизводить эти процессы в широком диапазоне изменения условий трения

(скорости относительного перемещения испытуемых образцов, удельного давления, жидкой и газовой сред, степени вакуума, температуры и т. д.). Причем диапазон изменения условий трения в испытательных машинах должен значительно превышать диапазон условий трения эксплуатируемых машин с учетом тенденций развития современной техники. Только тогда процессы схватывания металлов можно изучать от начальных до конечных стадий их образования и развития, находить граничные условия существования процессов в различных условиях трения, изучать механизм и закономерности его образования и развития, обеспечивать проверку эффективности методов борьбы со схватыванием в машинах, работающих в различных условиях, решать практические вопросы, связанные с конструированием новых машин.

Для изучения процессов схватывания 1-го рода при трении частично были использованы испытательные машины КЕ-2 и КЕ-4, разработанные Б. И. Костецким и В. Д. Елисеевым [63]. В основном же применялись машины, разработанные автором.

МАШИНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Машина для исследования процессов схватывания металлов, возникающих при трении скольжения, должна воспроизводить процессы упруго-пластических деформаций, упрочнения металла, возникновения и разрушения металлических связей (узлов схватывания). Один из вариантов машины такого типа описан в работе [60].

Процессы, возникающие в зоне контакта, зависят от величины и характера приложения нормальных усилий, а также тангенциальных усилий, возникающих при перемещении сопряженных тел. Поэтому неперменным принципом конструирования машины должна быть возможность проведения исследований в широком диапазоне постепенных изменений удельного давления в пределах одного опыта с учетом изменений тангенциальных усилий. В связи с этим необходимо предусмотреть точную фиксацию задаваемых изменений нормальных и тангенциальных усилий. Контактующие поверхности пары трения должны иметь постоянную площадь контакта и замкнутую площадь скольжения. Этим устраняются явления врезания одного тела в другое, волочения и протягивания.

Кинематическая схема машины, отвечающей указанным выше требованиям, представлена на рис. 4.

Расположение и форма образцов при испытаниях на этой машине показаны на рис. 5 и 6. Образцы имеют форму втулок. Контакт происходит по их торцовым поверхностям.

Площадь контакта образцов можно изменять в пределах $0,5—5 \text{ см}^2$. Нижний образец 2 (рис. 5) неподвижен. Относительное перемещение сопряженных поверхностей трения осуществляется вращением образца 1 по замкнутой поверхности скольжения.

В отдельных сериях опытов на поверхности трения неподвижного образца наносилась при помощи оптической делительной головки сетка со стороной ячейки $0,2 \text{ мм}$ (рис. 7) для определения характера разрушения поверхностей трения и степени их пластической деформации.

Нагружающее устройство рычажного типа, передающее усилие от свободно подвешенного груза, позволяет создавать нагрузку от нуля до величины, вызывающей текучесть поверхностных слоев испытуемых металлов (до $10\,000 \text{ кг/см}^2$). Величина удельного давления в пределах одного опыта может быть, в зависимости от условий испытаний, постоянной или переменной.

Изменение удельного давления в зависимости от линейного перемещения вращающегося образца может происходить в широком диапазоне величин. Изменение нормальных усилий фиксируется осциллографом с помощью датчиков, установленных на динамометре.

Движение образцу и грузу сообщается синхронно от электродвигателя постоянного тока мощностью 3 кВт через систему редукторов. Применение электродвигателя постоянного тока позво-

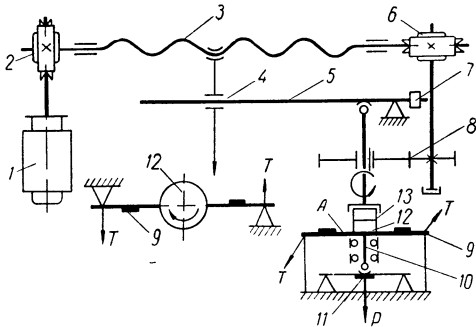


Рис. 4. Кинематическая схема машины для исследования процессов схватывания металлов в условиях малых скоростей скольжения:

1 — электродвигатель; 2 и 6 — червячные редукторы; 3 — ходовой винт с гайкой; 4 — передвижной груз; 5 — рычаг нормальной нагрузки; 7 — уравновешивающий груз; 8 — шестеренчатый редуктор; 9 — динамометр для измерения тангенциальных усилий; 10 — шарикоподшипниковые опоры; 11 — динамометр для измерения нормальных усилий; 12 — нижний неподвижный образец; 13 — верхний подвижный образец.

ляет изменять скорость вращения образца в диапазоне 0,0735—0,735 мм/сек и пропорционально — скорость перемещения груза.

На машине предусмотрено устройство для точного измерения деформации образца по его высоте, а также ряд дополнительных устройств, позволяющих проводить испытания в различных газовых и жидких средах и при различных температурах (от -100 до $+600^{\circ}\text{C}$). Предусмотрено устройство для механической обра-

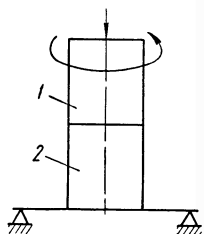


Рис. 5. Схема расположения испытываемых образцов.

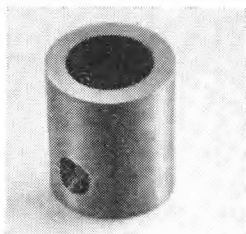


Рис. 6. Форма образца ($\times 1,8$).

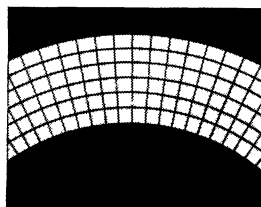


Рис. 7. Образец с нанесенной на поверхность трения сеткой.

ботки поверхностей трения при испытании в инертных газовых средах с целью удаления защитных пленок и получения чистых металлургических поверхностей образцов.

На этой машине можно исследовать влияние физических, химических и механических характеристик металлов на образование и развитие процессов схватывания, влияние различных защитных пленок (как естественных, так и искусственных, нанесенных на поверхность трения электролитическим способом, методом травления и т. п.) на процесс схватывания металлов. Предусмотрена возможность изучения свойств этих пленок и установления, при каких нормальных и тангенциальных усилиях и какой степени деформации происходит разрушение тех или иных пленок и возникает схватывание металлов.

Машина дает возможность определять силы сцепления различных металлов при схватывании, площадь разрушенных пленок и площадь выхода ювенильных поверхностей в зависимости от величины удельного давления и пути относительного перемещения образцов.

МАШИНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Большое влияние на развитие процессов схватывания оказывает скорость скольжения. Поэтому исследование закономерностей этих процессов в зависимости от изменения скорости скольжения сопряженных поверхностей имеет большое значение для теории и практики машиностроения.

Существующие испытательные машины [68] дают возможность проводить исследования при малых и средних скоростях скольжения (от 0 до 25—30 *м/сек*). Известны машины, скорость скольжения отдельных сопряженных деталей которых достигает 200—300 *м/сек*, но и эти скорости не являются предельными. Поэтому одной из наиболее актуальных задач является исследование процессов трения и износа в диапазоне высоких и сверхвысоких скоростей скольжения, изыскание путей эффективной борьбы со схватыванием металлов в этих условиях, разработка новых износостойких и антифрикционных материалов, смазок и т. д.

Для проведения таких исследований разработаны конструкции двух машин. Первая машина предназначена для исследования процессов схватывания в условиях высоких, а вторая — в условиях сверхвысоких скоростей скольжения. Испытания на этих машинах осуществляются с помощью эталонных дисков, вращающихся с заданной скоростью, и неподвижных цилиндрических образцов, прижимаемых к эталонным дискам с заданным усилием.

В процессе трения скольжения испытуемых сопряженных тел с большой точностью измеряются интенсивность их износа, силы трения и температура, возникающая в условиях схватывания в поверхностных слоях металлов. Процессы схватывания в условиях высоких скоростей скольжения исследуются при помощи машины (рис. 8). Эталонный диск 4 приводится во вращение от электродвигателя мощностью 16 *квт* через систему шестеренчатых I, II, III и планетарного IV редукторов со скоростью 25—20 000 *об/мин*. На машине можно проводить испытания на эталонных дисках диаметром 100—240 *мм*. Изменяя число оборотов эталонного диска с помощью шестеренчатых и планетарного редукторов, а также диаметр эталонного диска, можно получить линейную скорость на окружности диска от 0,7 до 250 *м/сек*.

С помощью нагружающего устройства к эталонному диску прижимается испытуемый образец 2. Нагружающее устройство

рычажного типа передает усилие $0-100 \text{ кг/см}^2$ от свободно подвешенного груза на испытуемый образец. Форма и размеры ис-

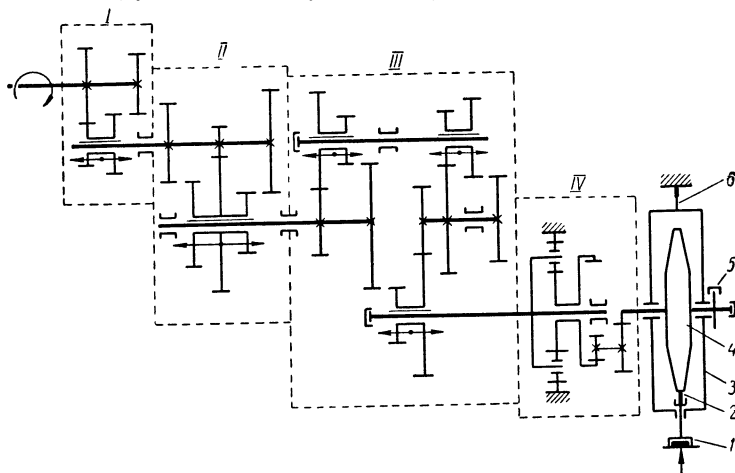


Рис. 8. Кинематическая схема машины для исследования процессов схватывания металлов в условиях высоких скоростей скольжения: 1 — пластинчатый динамометр для измерения нормальных усилий; 2 — испытуемый образец; 3 — механизм передачи тангенциальных усилий; 4 — эталонный диск; 5 — индукционный датчик для измерения числа оборотов; 6 — пластинчатый динамометр для измерения тангенциальных усилий.

пытуемого образца могут быть различными. В наших испытаниях применялся цилиндрический образец диаметром $11,3 \text{ мм}$ (площадь контакта 1 см^2) и длиной 26 мм .

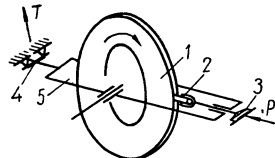


Рис. 9. Схема расположения эталонного диска, испытуемого образца и устройства для измерения нормальных и тангенциальных усилий.

На рис. 9 дана принципиальная схема расположения эталонного диска 1, испытуемого образца 2 и устройства для измерения нормальных и тангенциальных усилий. Нормальные усилия P передаются на испытуемый образец 2 через пластинчатый динамометр 3. Тангенциальные усилия T , возникающие при трении испытуемого образца по эталонному диску, передаются через образец на специальную раму 5. Под действием тангенциальных

усилий рама перемещается вокруг оси вращения эталонного диска и передает усилие на пластинчатый динамометр 4.

Машина имеет ряд дополнительных устройств для измерения интенсивности износа образцов, температуры сопряженных по-

верхностных слоев металлов, скорости относительного скольжения эталонного диска, а также для проведения испытаний в различных жидких и газовых средах. При испытаниях можно использовать диски и образцы, изготовленные из различных металлов и сплавов, поверхности трения которых могут быть обработаны различными способами.

МАШИНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ СВЕРХВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Процессы схватывания в условиях сверхвысоких скоростей скольжения исследуются с помощью специальной машины (рис. 10).

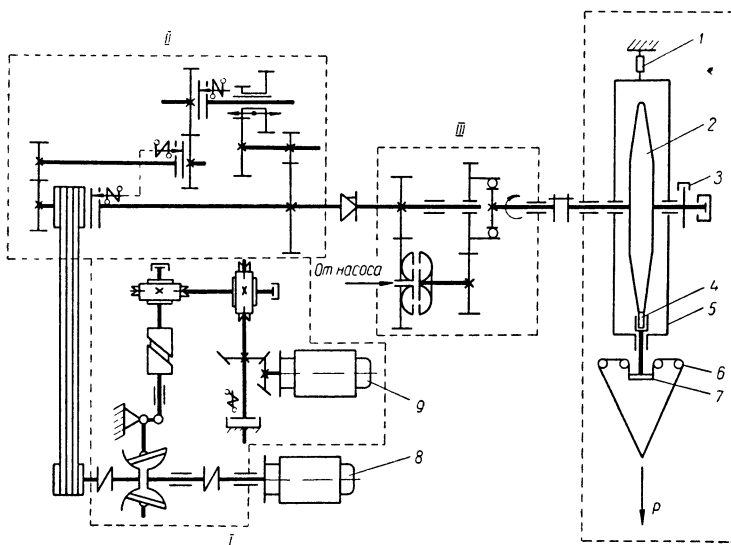


Рис. 10. Кинематическая схема машины для исследования процессов схватывания металлов в условиях сверхвысоких скоростей скольжения:

1 — пластинчатый динамометр для измерения тангенциальных усилий; 2 — эталонный диск; 3 — индукционный датчик для измерения числа оборотов; 4 — испытуемый образец; 5 — механизм передачи тангенциальных усилий; 6 — нагружающее устройство; 7 — пластинчатый динамометр для измерения нормальных усилий; 8, 9 — электродвигатели.

Эталонный диск 2 приводится во вращение со скоростью 332—55 000 об/мин от электродвигателя 8 мощностью 100 кВт через

бесступенчатый механический вариатор *I*, шестеренчатый редуктор *II* и шестеренчатый редуктор с гидромuftой *III*. Машина позволяет производить испытания на эталонных дисках с различными диаметрами (100—350 мм). Изменяя число оборотов эталонного диска с помощью бесступенчатого механического вариатора и шестеренчатых редукторов и диаметр эталонного диска, можно получить линейную скорость на его окружности от 1,8 до 900 м/сек.

Форма и размеры образцов, система их нагружения, методика измерений нормальных и тангенциальных усилий, температуры сопряженных поверхностных слоев металлов, скорости скольжения — те же, что и при исследовании процессов схватывания в условиях высоких скоростей скольжения.

На машине предусмотрен стальной защитный кожух, в котором вращается эталонный диск и который одновременно служит камерой для проведения опытов в различных газовых и жидких средах.

МАШИНА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИЙ

В процессе эксплуатации большинства машин их детали испытывают вибрационные нагрузки, значительно влияющие на развитие процессов трения и износа, и в особенности процессов схватывания металлов при трении. С целью изучения закономерностей развития процессов схватывания металлов при трении в условиях принудительной вибрации автором разработана методика исследования и сконструированы специальные машины.

Так как в процессе работы механизмов колебания деталей происходят в различных направлениях, то и в испытательных машинах с помощью вибраторов (механических и электромагнитных) возвратно-поступательное движение образцов осуществляется в двух направлениях: в плоскости, перпендикулярной к оси образца, в направлении движения вала и перпендикулярно к движению вала — с заданными частотой и амплитудой. При механическом вибраторе частота колебаний может изменяться от 30 до 250 гц, а при электромагнитном вибраторе — от 50 до 10 000 гц.

На рис. 11 показана принципиальная схема механического вибратора, посредством которого осуществляется возвратно-поступательное перемещение испытуемого образца в плоскости, параллельной оси вращения вала. Эталонный вал *1* диаметром

100 и длиной 300 мм приводится во вращение от электродвигателя мощностью 16 кВт через шестеренчатые редукторы I, II, III, при этом валу сообщается переменная окружная скорость 0,0025—12 м/сек.

К эталонному валу I с помощью нагружающего устройства 3 прижимается испытуемый цилиндрический образец 2 диаметром 11,3 и длиной 26 мм. Нагружающее устройство рычажного типа

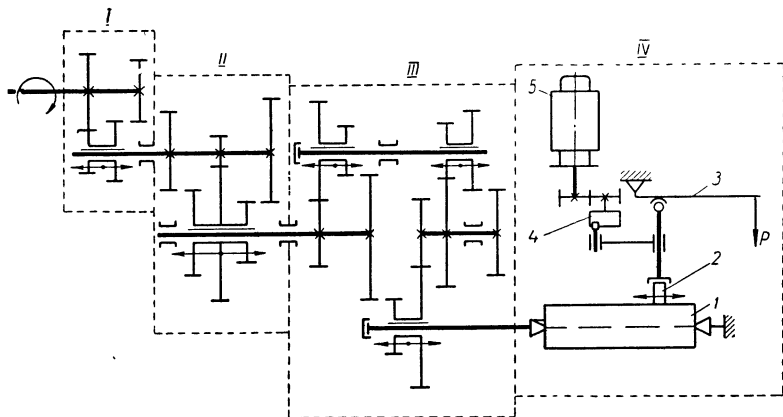


Рис. 11. Кинематическая схема машины для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях вибраций.

передает на испытуемый образец от свободноповешенного груза нормальные усилия в пределах 0—100 кг/см². В процессе испытания образцу сообщается возвратно-поступательное движение с амплитудой колебаний 0—2 мм.

При механическом вибраторе возвратно-поступательное перемещение испытуемого образца осуществляется с помощью электродвигателя 5 и кривошипного механизма 4. Электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 6 кВт приводит во вращение эксцентриковый вал кривошипного механизма, на который насажена эксцентриковая втулка, воздействующая через шатун на испытуемый образец. Заданная величина амплитуды колебаний образца устанавливается путем изменения эксцентриситета втулки поворотом ее в гнезде шатуна. Изменяя напряжение тока, питающего электродвигатель 5, от 20 до 150 в, а также напряжение возбуждения от 12 до 60 в, можно изменять число оборотов двигателя в пределах 1800—

15 000 об/мин и, следовательно, частоту колебаний испытуемого образца от 30 до 250 гц.

Частота колебаний механического вибратора контролируется с помощью индукционного датчика, связанного с валом электродвигателя, осциллографа ЭО-7 и звукового генератора ЗГ-12.

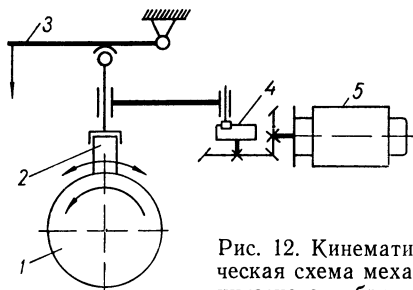


Рис. 12. Кинематическая схема механического вибратора для возвратно-поступательного перемещения образца:
1 — эталонный вал; 2 — испытуемый образец; 3 — нагружающее рычажное устройство; 4 — кривошипно-шатунный механизм; 5 — электродвигатель.

Возвратно-поступательное перемещение испытуемого образца в плоскости, перпендикулярной к его оси, вокруг оси вращения эталонного вала осуществляется при помощи вибратора (рис. 12).

Возвратно-поступательное перемещение испытуемых образцов в двух указанных выше направлениях можно осуществлять также с помощью электромагнитного вибратора (рис. 13).

ра для возвратно-поступательного перемещения образца:

1 — эталонный вал; 2 — испытуемый образец; 3 — нагружающее рычажное устройство; 4 — кривошипно-шатунный механизм; 5 — электродвигатель.

Посредством звукового генератора 1 типа ЗГ-12 устанавливается заданная частота колебаний в диапазоне 50—10 000 гц.

Сигнал звукового генератора подается на трансляционный уси-

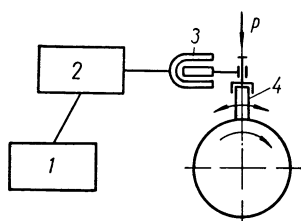


Рис. 13. Кинематическая схема электромагнитного вибратора.

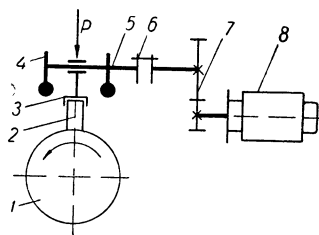


Рис. 14. Кинематическая схема механического вибратора изменением нагрузки.

литель 2 типа ТУ-5-ЗГ с номинальной мощностью на выходе 5 квт, который в диапазоне частот 50—10 000 гц имеет прямолинейную характеристику, что обуславливает стабильность колебаний.

Сигнал звукового генератора, усиленный трансляционным усилителем, подается на электромагнитный преобразователь 3 (динамик). Сердечник электромагнитного преобразователя пере-

дает движение с заданной частотой и амплитудой испытываемому образцу 4.

Для исследования влияния переменных (вибрационных) нагрузок на процессы трения и износа с заданной частотой сконструирован специальный механический вибратор (рис. 14).

Испытуемый образец 2 с помощью рычажного нагружающего устройства прижимается с заданным постоянным усилием P к эталонному валу 1. От электродвигателя 8 через редуктор 7 и эластичную муфту 6 вращение передается валу 5 с неуравновешенными массами 4. Возникающие знакопеременные инерционные силы передаются через цангу 3 на испытуемый образец. В результате совместного действия постоянной нагрузки P и знакопеременных инерционных сил образец испытывает переменную нагрузку. Изменяя величину неуравновешенных масс, усилие P и число оборотов вала, можно по заданной программе изменить величину суммарной переменной нагрузки на образец и ее частоту.

Для предотвращения отрыва образца в процессе испытания от эталонного вала усилие P должно всегда превышать инерционные силы.

На разработанных машинах с механическим или электромагнитным вибратором с помощью тензометрических датчиков, установленных на пластинчатых динамометрах, фиксируется величина воздействующих на образец нормальных и тангенциальных усилий. Предусмотрены дополнительные устройства для измерения с большой точностью величины износа вала и образца, температуры поверхностных слоев металлов пар трения, а также для проведения испытаний в различных газовых и жидких средах.

Эталонные валы и образцы могут быть изготовлены из различных металлов при различной обработке их поверхностей трения.

С помощью описанных машин и установок можно исследовать влияние частоты и амплитуды колебаний не только на развитие процессов схватывания металлов, но и на развитие других процессов, возникающих при трении и износе.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Изменения температуры поверхностных слоев металлов при трении и износе в значительной мере влияют на их физико-химические и механические свойства, приводят к изменению прочности

металлов (упрочнению или разупрочнению), скорости диффузионных или адсорбционных процессов, остаточных напряжений, т. е. влияют положительно или отрицательно на качественные и количественные характеристики трения и износа.

Однако этот важный вопрос еще недостаточно изучен. С целью восполнения в некоторой степени имеющихся пробелов в изучении данного вопроса были проведены специальные исследования.

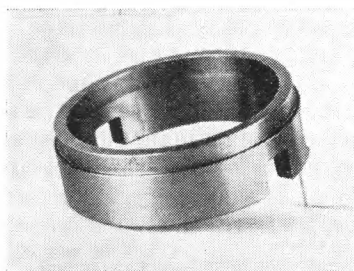


Рис. 15. Образец кольцевого типа.

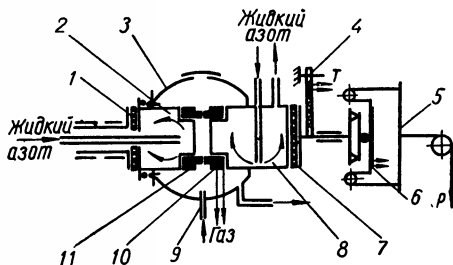


Рис. 16. Кинематическая схема установки для исследования процессов схватывания металлов в условиях низких температур.

Для этого разработаны две установки, позволяющие исследовать влияние повышенных и низких (отрицательных) температур на процессы схватывания металлов при трении.

Изучалось влияние на процессы схватывания металлов температур, возникающих в результате трения и износа испытуемых образцов и в результате специального нагрева или охлаждения образцов. Испытания проводились на образцах кольцевого типа с наружным диаметром 48 мм и внутренним диаметром 42,3 мм (рис. 15). Взаимное трение колец осуществлялось по торцовым поверхностям (площадь контакта 4 см²). Применение образцов кольцевого типа позволило исключить нежелательные явления врезания и волочения на поверхности трения и создать одинаковый температурный режим на обоих образцах пары трения.

Процессы схватывания металлов в условиях низких температур исследовались на специально разработанной установке (рис. 16). Подвижное кольцо-образец 11 приводится во вращение от электродвигателя мощностью 16 кВт через систему шестерчатых редукторов машины (рис. 8). При этом кольцу сообщается переменная окружная скорость 0,025—12 м/сек. К его торцу с помощью нагружающего устройства 5 прижимается не-

подвижный испытуемый образец 10. Нормальная нагрузка на образцы передается через систему блоков от свободно подвешенного на тросах груза в пределах от нуля до усилий, вызывающих текучесть металлов испытуемых образцов.

Нормальные и тангенциальные усилия в процессе испытаний измеряются осциллографом с помощью тензометрических датчиков, установленных на пластинчатых динамометрах 4 и 6.

Образцы охлаждаются до температуры от 0 до -180°C с помощью жидкого азота, поступающего под избыточным давлением в полости штоков 2 и 8, на которых смонтированы испытуемые образцы.

Поверхности контакта колец-образцов воспринимают температуру штоков. С целью получения замкнутого температурного контура, изолированного от металлических масс испытательной машины, наконечники штоков разделены на две части теплоизоляционными асбоцементными дисками 1 и 7. Температура охлаждения регулируется изменением количества подаваемого жидкого азота.

В условиях низких температур на поверхностях образцов оседают кристаллы влаги и углекислоты из воздуха. Поэтому исследования проводились в специально сконструированной камере 3, куда подается через отверстие 9 предварительно очищенный от влаги и углекислоты воздух. В качестве очистителя воздуха применяются: 50%-ный раствор едкого натрия и гранулированный едкий калий (от углекислоты) и концентрированная серная кислота, хлористый кальций, фосфорный ангидрид и силикагель (от влаги). Очищенный воздух попадает в так называемую азотную ловушку, где при температуре -196°C подвергается вымораживанию.

Температура образцов и в камере контролируется медь-константановыми и хромель-алюмелевыми микротермопарами. Исследования можно проводить в различных газовых и жидких средах.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Для исследования влияния повышенных температур на образование и закономерности развития процессов схватывания металлов применяется специальная установка (рис. 17) к испытательной машине (рис. 8).

Подвижной образец 5 (рис. 17) приводится во вращение вместе с валом 1 от электродвигателя через систему шестеренчатых редукторов машины (заданная скорость 0,025—12 м/сек). Нормальные усилия передаются на сопряженные поверхности трения образцов через нагружающее устройство 10, динамометр 11 и вал 9.

Нормальные усилия измеряются с помощью пластинчатого динамометра 11, а тангенциальные усилия — динамометра 12.

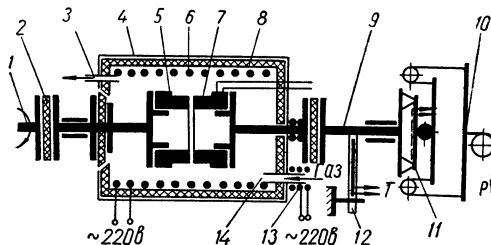


Рис. 17. Кинематическая схема установки для исследования процессов схватывания металлов в условиях повышенных температур.

Для измерения температуры на поверхности трения и определения градиента температур в поверхностных слоях металлов в каждый неподвижный образец 7 вмонтировано на разных расстояниях от поверхности трения 3—6 микротермопар.

На установке можно исследовать влияние температуры, возникающей в поверхностных слоях металлов при трении, и температуры окружающей среды на процесс схватывания. Подогрев образцов осуществляется электрической печью, состоящей из нихромовой спирали 6, защитного кожуха 4 и теплоизоляционного керамического цилиндра 8. В камере печи с помощью терморегулятора поддерживается в течение всего периода проведения опыта температура от 100 до 800° С. Кожух электрической печи одновременно служит камерой для испытаний в различных газовых средах.

При испытании образцов в газовых средах в камеру через отверстие 14 подается под избыточным давлением газ. Продувка камеры осуществляется через отверстие 3. Во избежание охлаждения образцов газ, подаваемый в камеру, предварительно подогревается до нужной температуры с помощью электропечи 13. В установке предусмотрены два теплоизоляционных асбоцементных диска 2, изолирующих нагретые образцы от металлических масс испытательной машины.

Металлические массы деталей, связанные с подвижным и неподвижным образцами, подобраны с таким расчетом, чтобы их теплоемкость и интенсивность теплоотдачи во время испытаний

были равны. Этим создается равный тепловой режим испытуемых сопряженных образцов.

В процессе испытаний измеряются температура среды и поверхностей трения, нормальные и тангенциальные усилия, скорость скольжения и величина износа образцов.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

Исследования остаточных явлений на поверхностях трения и анализ поврежденных участков на них еще не дают возможности установить истинную картину развития процессов схватывания металлов.

С помощью специальной установки (рис. 18) удалось исследовать взаимодействие контактирующих поверхностей в процессе трения, изучить механизм развития процессов схватывания от начальных стадий образования узлов схватывания до их разрушения. На установке можно исследовать образцы из различных металлов и сплавов с поверхностями трения, упрочненными различными методами, с чистыми поверхностями трения или покрытыми неметаллическими и металлическими пленками, в различных газовых средах, в условиях низких и высоких температур.

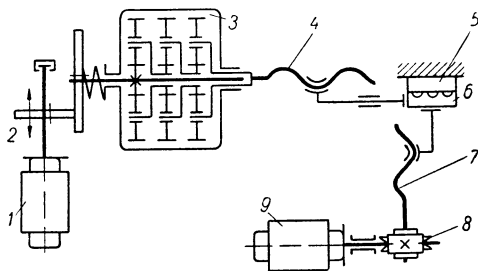


Рис. 18. Кинематическая схема установки для исследования механизма схватывания металлов.

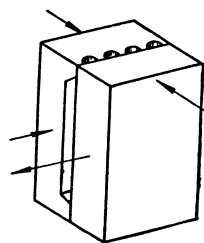


Рис. 19. Схема расположения образцов при испытании.

Расположение испытуемых образцов показано на рис. 19. неподвижный образец имеет прямоугольную форму, подвижный — П-образную. Высота образцов — 18 мм, ширина — 10 мм и площадь контакта — 10—12 мм².

Для воспроизведения процессов схватывания испытуемые образцы с помощью электродвигателя 9 (рис. 18) мощностью 400 вт через червячный редуктор 8 и микрометрический винт с

гайкой 7 прижимаются с заданным усилием и перемещаются относительно друг друга с заданной скоростью. В результате при определенных условиях трения в поверхностных слоях металлов возникают и развиваются процессы схватывания. Сжимающие удельные нагрузки могут изменяться по заданной программе от 0,25 до 200 кГ/см^2 .

Подвижный образец 6 перемещается относительно неподвижного образца 5 от электродвигателя 1 через фрикционную муфту 2, многоступенчатый шестеренчатый редуктор 3 и микрометрический винт с гайкой 4. Заданная скорость перемещения составляет 0,0001—0,25 м/сек .

В результате действия нормальных и тангенциальных усилий при определенных условиях трения в местах контакта образцов происходит пластическое деформирование поверхностных слоев металлов, разрушение защитных пленок, образование и развитие узлов схватывания.

Визуальное наблюдение, фотографирование и киносъемка изменений, происходящих на скользящем контакте и в поверхностных слоях металлов в плоскости, перпендикулярной перемещению образцов, осуществляется с помощью металлографического микроскопа МИМ-8 и микрокиноустановки МКУ-1.

Поверхности испытуемых образцов предварительно полируются и протравливаются щелочными или кислотными растворами в зависимости от материала; в результате шлифы имеют четко выраженную микроструктуру металла.

При сжатии образцов в условиях испытаний максимальные давления, а следовательно, и процессы схватывания возникают в средней части сопряженных поверхностей, периферийные участки поверхности в результате деформации вспучиваются и процессы схватывания здесь визуально не наблюдаются. Для устранения вспучивания периферийных участков поверхностей трения и создания условий возникновения процессов схватывания в плоскости шлифа образцы прижимаются поверхностями шлифов к высокопрочной стеклянной пластине, и наблюдение за развитием процессов схватывания осуществляется через эту пластину.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

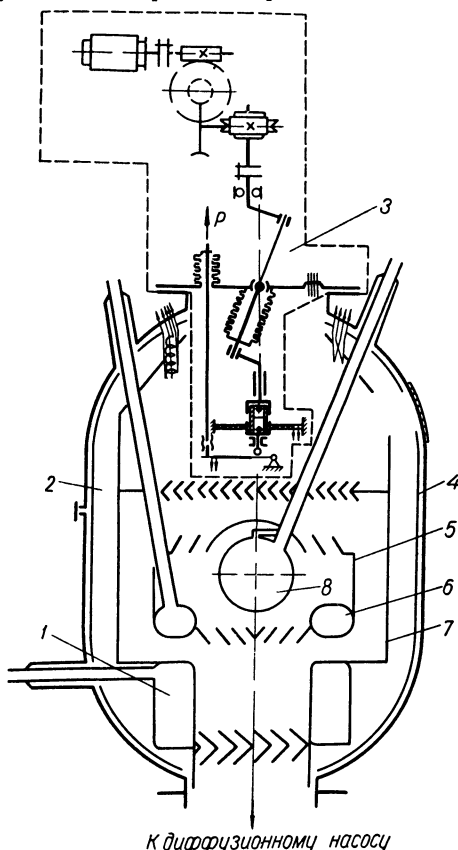
Для изучения природы процессов схватывания металлов с ювенильными поверхностями и влияния поверхностных пленок на образование и развитие процессов схватывания исследования

проводились в высоком вакууме на специальной установке (рис. 20), состоящей из вакуумной камеры 2 с присоединенным диффузионным насосом типа Н-5 и малогабаритной испытательной машины 3.

В нижней части камеры расположен азотный конденсационный насос 1 с расположенными внутри жалюзи-ловушками и холодным экраном 7. Между стенками камеры и холодным экраном азотного насоса расположен теплый экран 4, предназначенный для снижения теплообмена между наружными стенками камеры и холодным экраном. Над азотным насосом в полости, окруженной холодным экраном, расположен водородный конденсационный насос 6 с внутренними жалюзи и экраном 5, а еще выше — гелиевый насос 8. Последовательное включение насосов и минимальное количество разъёмных соединений обеспечивают получение в камере вакуума порядка 10^{-10} мм рт. ст.

Давление внутри вакуумной камеры измеряется с помощью вакуумметров типа ВИТ-1А и ВИ-12.

Применение малогабаритной испытательной машины (рис. 21) дает возможность проводить исследования при трении первого и второго рода в диапазоне скоростей скольжения 0,005—1 м/сек и удельных давлений от нуля до величины, вызывающей текучесть поверхностных слоев испытуемых металлов.



К диффузионному насосу

Рис. 20. Кинематическая схема установки для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях высокого вакуума.

В условиях трения скольжения используются образцы в форме втулок диаметром от 1 до 15—20 мм. Контакт образцов происходит по их торцам. Относительное перемещение сопряженных поверхностей трения осуществляется вращением подвижного образца 1 вокруг своей оси. Движение от электродвигателя 12 передается через сменный редуктор 11 и вал 7, закрепленный в сферическом подшипнике 8. Неподвижный образец 2 в виде втулки находится в оправке, на которую с помощью нагружающего устройства рычажного типа передаются нормальные усилия от свободноповешенного груза P через рычаг 9, тягу 6, муфту 5 и динамометр 4.

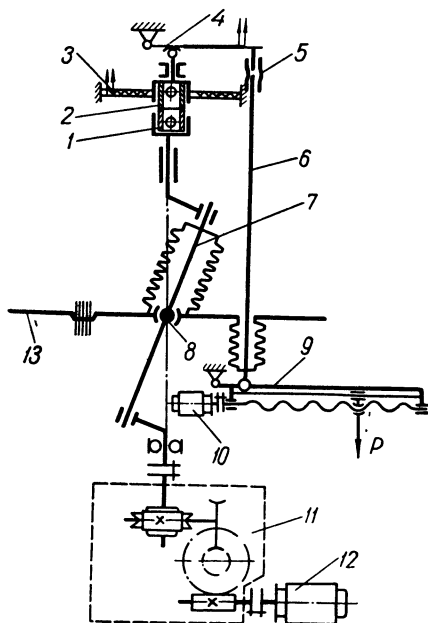


Рис. 21. Кинематическая схема малогабаритной машины МИМ.

Величина удельного давления в зависимости от условий опыта может быть постоянной или переменной. Изменение ее происходит в результате линейного перемещения груза P с помощью электродвигателя 10 и изменения величины самого груза.

Нормальные и тангенциальные усилия измеряются пластинчатыми динамометрами 3 и 4, самопишущим потенциометром или осциллографом.

Передача вращения и нагружение образцов осуществляется посредством уплотнений сифонного типа.

Для исследования процессов схватывания при трении качения необходимо в машине заменить узел крепления образцов и испытываемые образцы.

К вакуумной камере малогабаритная испытательная машина крепится с помощью фланца 13.

Вакуумная установка имеет ряд дополнительных устройств для очистки поверхностей трения испытываемых образцов от пленок и загрязнений механическим путем и нагревом образцов.

Механическая очистка поверхности производится с помощью специального приспособления, позволяющего срезать тонкий слой металла в условиях высокого вакуума с последующим нагревом до температуры рекристаллизации и охлаждением с заданной скоростью до комнатной температуры. Подобные методы очистки дают возможность в условиях высокого вакуума получить ювенильные поверхности контакта испытуемых образцов, благодаря чему создаются условия для исследования природы схватывания различных металлов при отсутствии пленок на поверхностях трения.

На указанной установке можно также исследовать влияние пленок на развитие процессов схватывания металлов изменением степени вакуума.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

§ 1. СХВАТЫВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

В большинстве опубликованных работ, посвященных изучению процессов схватывания металлов, явления схватывания рассматриваются в основном в связи с процессом холодной сварки. Поэтому до сих пор нет четкого представления о механизме и закономерностях процесса схватывания при трении.

Существуют различные точки зрения на природу, механизм и условия возникновения и развития процессов схватывания.

По мнению Д. Томлинсона [147], при сухом трении в зависимости от расстояния между молекулами металлов сопряженных поверхностей обнаруживаются два элементарных явления — возникновение и разрушение межмолекулярных связей, которые и обуславливают процесс трения.

Д. В. Конвисаров [50] считает, что для возникновения межмолекулярных связей достаточно только соприкосновения чистых металлов.

В. С. Щедров [123] условие молекулярного схватывания видит в соблюдении на фактической площади контакта определенного неравенства, в которое входят параметры, характеризующие шероховатость поверхности, молекулярную структуру поверхностного слоя и упругие свойства материалов.

Эрнст и Мерчент [67] вывели уравнение, по которому молекулярное взаимодействие сводится к эффекту прилипания поверхностей.

По мнению Б. И. Костецкого [54, 56, 58], для развития процессов схватывания металлов нужна микропластическая деформация поверхностных

слоев, в результате которой создаются свободные от окислов и загрязнений ювенильные поверхности трения и осуществляется плотный контакт металлов. При низких скоростях скольжения возможно контактное схватывание металлов, обладающих достаточной атермической пластичностью, при больших скоростях скольжения процессы схватывания развиваются во всех металлах и сплавах вследствие возникновения высоких температур в поверхностных слоях металлов и явления термической пластичности. Явления схватывания разных металлов [56] в значительной мере обуславливаются строением их электронных уровней, т. е. расположением в периодической системе Менделеева.

Ф. Боуден и Л. Лебен [128] считают, что кинетическое трение объясняется местной адгезией и сваркой в местах контакта в результате воздействия давления и высоких температур, при котором происходит размягчение и оплавление контактируемых поверхностей. Затвердевшие участки разрушаются в результате дальнейшего движения поверхностей трения, причем прочность соединения обуславливается определенным соотношением твердостей тел трения и температурой их плавления. Ф. Боуден, Д. Тейбор, А. Моор и др. [129, 131] указывают, что сваривание поверхностей возможно при низкой температуре вследствие наличия в точках контакта высокого давления и пластического течения металла. Роль пластического течения сводится к удалению пленок, препятствующих свариванию.

И. В. Крагельский выдвинул молекулярно-механическую теорию трения [16, 65, 66, 69, 71, 72, 73]. Молекулярное схватывание, по его мнению, заключается в том, что в результате деформации поврежденная кристаллическая решетка легко вступает во взаимодействие с находящейся с ней в контакте решеткой другого тела и при трении схватывание проявляется в виде глубинного разрушения, т. е. вырывания частиц с поверхности менее прочного материала.

В. Д. Кузнецов [79] считает, что молекулярное взаимодействие или прилипание трущихся поверхностей возможно при сухом трении. По его мнению, явление контактного схватывания при трении зависит от чистоты поверхности, от скорости взаимного движения, от температуры и других условий. При больших скоростях трения схватывание возможно для всех металлов и сплавов вследствие развития высоких температур и облегчения пластической деформации.

По мнению С. Б. Айнбиндера и Э. Ф. Клоковой [3], различная способность металлов к сцеплению объясняется неодинаковыми

соотношениями механических свойств поверхностных пленок и основного металла. При увеличении нагрузки пленки передают действующие силы на нижележащие слои металла, которые растекаются и выдавливаются в зазоры между частицами пленки, где и вступают в соединение друг с другом.

Г. Д. Полосаткин [92] рассматривает образование наростов при резании как результат процесса схватывания, возникающего при плавлении металла в момент отсутствия смазки. Такие же высказывания встречаются у В. Н. Кашеева [43] и В. Д. Кузнецова [79].

По В. А. Кислику [47], процесс схватывания возникает при контакте несмазанных или недостаточно смазанных поверхностей и значительных давлениях, а иногда и при высоких скоростях скольжения, вызывающих повышение температуры поверхностей. Согласно В. А. Кислику, первичным процессом при схватывании является взаимодействие молекулярных сил без интенсивного нагрева. Вторичным процессом является нагрев, возникающий при деформации схватившихся объемов металла.

А. П. Семеновым [105] предложена энергетическая гипотеза схватывания металлов, в соответствии с которой схватывание возможно в тех случаях, когда энергия атомов (ионов) кристаллической решетки становится выше определенного для данного металла уровня — энергетического порога схватывания. Способность металлов к схватыванию соответствует определенному состоянию поликристаллического металла. Возрастание энергии происходит в результате упругой или пластической деформации, возникающей при трении, или вследствие повышения температуры. При достижении энергетического порога схватывания металл делается как бы аморфным, между поверхностями образуются металлические связи и физическая поверхность раздела соприкасающихся объемов металла исчезает.

Некоторые исследователи [134] являются сторонниками гипотезы рекристаллизационного схватывания, согласно которой вследствие пластической деформации при трении металл в точках контакта переходит в такое состояние, когда рекристаллизация возникает при комнатной температуре. В процессе рекристаллизации происходит рост общих кристаллов и соединение двух контактирующих поверхностей. Свое окончательное оформление гипотеза получила в работе Д. М. Паркса [143].

Н. Ф. Лашко и С. В. Лашко-Авакян [83], Ф. Эрдман-Еснитцер и В. Вихман [135] предложили диффузионную гипотезу схватывания. По их мнению, при совместной пластической деформации

металлов возникают диффузионные процессы, обуславливающие их схватывание.

При исследовании деталей машин установлено, что процесс схватывания металлов проявляется в самых разнообразных видах в зависимости от конкретных условий эксплуатации машин. Так, Б. И. Костецкий [52, 59] с помощью металлоструктурного анализа поверхностей трения установил, что схватывание возникает при больших нагрузках и плохой смазке деталей, изготовленных из пластичных металлов.

Е. М. Швецова и И. В. Крагельский [120] наблюдали явления схватывания в виде глубинных вырывов на поверхностях фрикционных аппаратов железнодорожной автосцепки, на поршнях гидрорегуляторов, на фрикционных муфтах и др. Очаг повреждения характеризовался вихреобразной текстурой на значительной глубине. Они отмечали также повышение твердости поверхности вследствие наклепа. Продукты износа представляли собой крупные металлические частицы.

Шарнирно-болтовые соединения самолета, по мнению Д. Н. Гаркунова [17], изнашиваются в основном в результате молекулярного схватывания.

Н. В. Запольский [36], исследуя характер износа на многих деталях судовых двигателей внутреннего сгорания, обнаружил последствия схватывания в виде задиров на поверхностях поршней и других деталей.

В. А. Кислик [47] отмечает, что схватывание является наиболее распространенным видом износа для узлов тяжело нагруженных механизмов. Он наблюдал повреждения от схватывания на чугунных буксовых клиньях и накладках паровозов, работающих при несовершенной смазке в паре с деталями, изготовленными из неупрочненной термической обработкой углеродистой стали. Эти повреждения имели вид глубоких вырывов, ориентированных в направлении относительного перемещения поверхностей. Глубина повреждений достигала 1,5—2,0 мм, размер площади — 5,0—7,5 мм по ширине и 15—20 мм по длине.

Очаги схватывания В. А. Кислик [46] наблюдал также на подшипниках дышел паровозов, на шатунных и коренных вкладышах подшипников тепловозов и др. Он установил, что схватывание металлов вкладыша и вала этих тепловозов происходило в момент так называемого масляного голодания, когда свойства смазки резко менялись ввиду ее нагрева.

М. М. Хрущов [112] неоднократно отмечал наличие схватывания в подшипниках скольжения. Одно из основных требований

к антифрикционным сплавам, по мнению М. М. Хрущова, состоит в том, чтобы в процессе трения не возникали налипание, наволакивание и заедание подшипниковых материалов.

В. Д. Кузнецов [79] и другие ученые [33, 74, 101] изучали причины возникновения нароста на резце при точении и пришли к заключению, что образование такого нароста является результатом процесса схватывания.

В большинстве работ в основном приводятся количественные характеристики износа деталей машин, а также некоторые данные о внешнем виде поверхностей трения деталей, работавших в условиях схватывания, и отсутствуют качественные характеристики процесса схватывания — изменения состояния и свойств поверхностных слоев металлов.

Такое некомплексное исследование затрудняло изучение закономерностей возникновения и развития процесса схватывания металлов деталей машин, эксплуатируемых в различных условиях.

Результаты комплексных исследований являются основой для разработки теории схватывания металлов и позволяют обосновать новую методику и рациональные испытательные машины и установки для более глубокого изучения процессов схватывания металлов в лабораторных условиях.

Автором проведено комплексное исследование большого количества различных деталей из разнообразных металлов и сплавов, обработанных механическими, термохимическими и другими методами, деталей, работавших в различных условиях эксплуатации, при неодинаковых удельных давлениях, скоростях относительного перемещения, вибрациях, температурах, в твердых, жидких и газовых средах, в вакууме и т. п.

Исследование деталей машин показало, что процессы схватывания металлов возникают на поверхностях трения сопряженных деталей при сухом трении первого рода (скольжении) и в условиях высокого вакуума при трении как первого, так и второго рода (качении). При этом в деталях машин возникают и развиваются в зависимости от условий работы два различных процесса схватывания металлов, которые вызывают два четко выраженных вида разрушения (износа) поверхностей трения.

В одном случае процесс схватывания возникает и развивается при малых скоростях скольжения поверхностей трения и больших удельных давлениях, превышающих предел текучести металла, на участках фактического контакта, в условиях незначительно повышенных температур и приводит к интенсивному пла-

стическому деформированию, разрушению и уносу частиц металла с поверхностей трения. Такой процесс принято называть процессом схватывания 1-го рода.

В другом случае процесс схватывания возникает и развивается при больших скоростях скольжения поверхностей трения и повышенных удельных давлениях, что обуславливает интенсивный рост температуры в поверхностных слоях металлов, вызывая их разупрочнение и разрушение, а также размазывание и унос частиц металла с поверхностей трения. Такой процесс принято называть процессом схватывания 2-го рода.

В обычных условиях сближение атомов двух металлических тел на такое расстояние, при котором возникают металлические связи и происходит прочное их сцепление, представляет значительные трудности, так как на поверхности большинства металлов образуются прочные адсорбированные пленки различных газов, окислов и загрязнений, толщина которых достигает десятков и сотен ангстремов. Адсорбированные пленки газов прочно соединяются с металлами, поэтому удаление их очень сложно. Кроме того, при удалении такой пленки мгновенно образуется новая. Прочные и относительно толстые неметаллические пленки на поверхности металлов препятствуют в обычных условиях сближению атомов поверхностных слоев на расстояние, необходимое для образования металлических связей. После любой обработки поверхность металла обычно имеет значительную шероховатость, в связи с чем фактическая площадь контакта сопряженных поверхностей настолько мала, что если в местах контакта и были бы созданы условия для образования металлических связей, то эти связи практически были бы не ощутимы.

Условия возникновения схватывания металлов создаются естественным путем в процессе трения и износа сопряженных поверхностей. Это происходит в том случае, когда усилия, действующие в местах фактического контакта, вызывают напряжения, превышающие предел текучести металла, в связи с чем в тонких поверхностных слоях происходят пластические деформации металла, при этом поверхностные адсорбированные газовые пленки и загрязнения разрушаются, обнажая отдельные ювенильные участки металлов. Одновременно происходит сглаживание неровностей на поверхностях трения, благодаря чему значительно увеличивается площадь их фактического контакта. При тесном сближении ювенильных поверхностей возникает междуатомное притяжение металлов, на значительной площади фактического контакта образуются металлические связи, аналогичные между-

атомным связям в сплошном металле,— происходит схватывание металлов.

Образовавшиеся узлы схватывания разрушаются, так как сопряженные поверхности перемещаются относительно друг друга. В результате пластической деформации в узлах схватывания металл упрочняется. Поэтому разрушение узлов схватывания происходит обычно по основному, менее прочному, металлу. Таким образом, на поверхности одной детали происходит вырывание частиц металла, часть которых налипает на сопряженную поверхность, а остальные представляют собой продукты износа. В местах вырыва происходит концентрация напряжений, образуются трещины, снижается усталостная прочность деталей.

Налипшие частицы металла под действием нормальных и тангенциальных усилий также разрушаются. Однако при определенных условиях трения они, воспринимая большие удельные давления, деформируются и упрочняются. Упрочненные налипшие частицы металла при относительном перемещении деталей либо подобно резцам снимают своими выступами с сопряженной поверхности металлическую стружку, либо, передавая повышенные удельные давления на сопряженную поверхность в местах контакта, деформируют ее. Одновременно с этим на новых участках происходит образование узлов схватывания и их разрушение. Этот процесс в определенных условиях трения может быть непрерывным. Таким образом, происходит интенсивное деформирование, разрушение и унос металла с поверхностей трения.

СХВАТЫВАНИЕ 1-го РОДА

Характер и интенсивность изнашивания поверхностей трения деталей машин, работающих в условиях схватывания 1-го рода при различных условиях трения, зависят в основном от физических, химических и механических свойств поверхностных слоев металла (вязкости, пластичности, прочности, хрупкости, окисляемости), скорости и характера относительного перемещения поверхностей трения (равномерно-вращательного, возвратно-поступательного, микроперемещения), величины нагрузки и характера ее приложения (статической, динамической, вибрационной), окружающей среды и т. п.

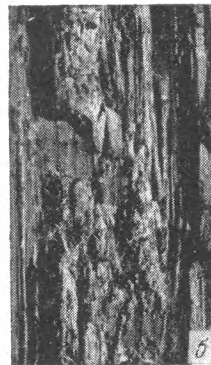
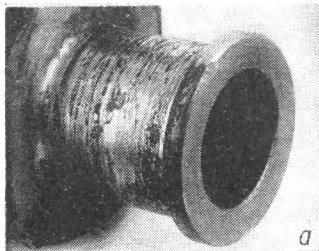
Рассмотрим некоторые особенности развития процессов схватывания металлов деталей машин, работающих в различных условиях эксплуатации.

Сопряженные детали самолета — подшипник и цапфа траверсы основной ноги шасси — работают в условиях схватывания 1-го рода. Обе детали изготовлены из стали 30ХГСА и термически обработаны, их поверхности трения имеют твердость $HRC\ 34-39$.

Цапфа траверсы вращается в подшипнике со скоростью $0,04-0,08\ м/сек$. Максимальное удельное давление равно

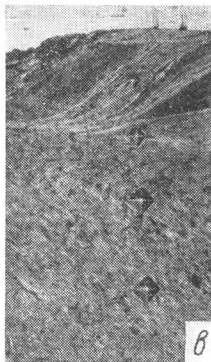
Рис. 22. Цапфа траверсы основной ноги шасси самолета после 600 посадок:

а — внешний вид поверхности трения; *б* — разрушенный участок поверхности трения ($\times 18$); *в* — микроструктура поверхности трения в сечении ($\times 480$).



$120\ кг/см^2$. При отсутствии динамической нагрузки и равномерном вращении цапфы траверсы и на ее поверхности и на поверхности подшипника происходит интенсивное схватывание металла и разрушение узлов схватывания. Одновременно, вследствие пластической деформации, упрочняются на значительную глубину поверхностные слои металла (рис. 22).

Узлы схватывания разрушаются по основному, менее прочному, недеформированному или незначительно деформированному металлу; на обеих поверхностях трения образуются вырывы и происходит налипание частиц металла. При дальнейшем движении поверхностей трения налипшие частицы металла разрушаются, образуются новые узлы схватывания, и процесс повторяется. Происходит интенсивное удаление металла с обеих поверхностей



трения, они становятся шероховатыми, с заметным течением металла по направлению движения вращающейся детали (рис. 23).

Рентгеноструктурный анализ поверхностей трения цапфы траверсы и подшипника показал, что в результате износа в условиях схватывания 1-го рода в поверхностных слоях металла пар трения значительно увеличилось напряжение и не произошло

никаких фазовых превращений. Ферритная структура с α -решеткой обнаружена как на деталях, не подвергающихся износу, так и на изношенных (рис. 24).

В результате спектрального анализа поверхности цапфы траверсы, работавшей в условиях схватывания 1-го рода, не обнаружено значительных изменений химического состава (рис. 25).

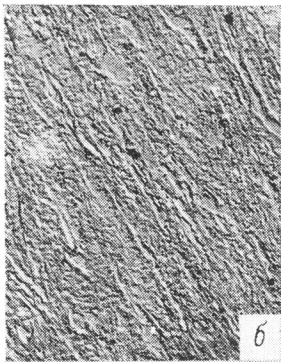
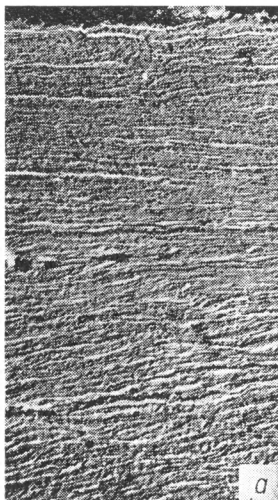


Рис. 23. Микроструктура поверхности трения цапфы в сечении ($\times 3000$):
а — деформированный слой;
б — исходная структура.

Влияние характера приложения усилий на развитие процессов схватывания 1-го рода иллюстрируется таким примером.

Сопряженные детали авиационного двигателя — главный шатун и втулка главного шатуна — работают в условиях схватывания 1-го рода. Втулка главного шатуна изготовлена из стали 15, исходная твердость поверхности трения $HB\ 160$. Главный шатун изготовлен из стали 40ХНМА, термически обработанной, поверхность трения покрыта электролитическим хромом твердостью $HRC\ 60$. Втулка посажена в главный шатун с натягом $0,05\ мм$.

В процессе эксплуатации под действием динамических нагрузок, достигающих на микроучастках поверхности контакта $50\ кг/мм^2$, при отсутствии смазки происходит микроперемещение втулки по твердому хромовому покрытию шатуна. Между поверхностями трения возникает схватывание 1-го рода. На хромированной поверхности главного шатуна образуются вырывы металла с резко выраженными границами, частицы которого налипают на мягкую поверхность втулки. Разрушение узлов схватывания при динамических нагрузках происходит не по стали марки 45, а по значительно более прочному материалу — хрому, обладающему меньшей ударной вязкостью. Разрушение хромовой поверхности главного шатуна имеет локальный характер.

В сопряженной паре (корпус и валик регулятора числа оборотов авиационного двигателя) возникают процессы схватывания 1-го рода при отсутствии динамической нагрузки. Валик изготовлен из стали 12ХНЗА, цементирован, исходная твердость поверхности трения $HRC\ 55$. Корпус регулятора изготовлен из алюминиевого сплава АЛ5, исходная твердость поверхности трения $HB\ 76$.

При равномерном вращении валика в корпусе регулятора разрушается поверхностный слой менее прочного металла корпуса регулятора и частицы его налипают на более прочный металл валика (рис. 26). Вследствие этого происходит интенсивное удаление металла с поверхности трения корпуса регулятора. Частицы металла, налипшие на валик, пластически деформированы и значительно упрочнены относительно исходного металла.

Комплексное исследование большого числа деталей машин, работавших в условиях схватывания 1-го рода, позволило определить диапазоны скоростей, давлений и температур, в которых возникает и развивается процесс схватывания 1-го рода, установить влияние твердости материалов на интенсивность и характер развития этого процесса.

Процесс схватывания 1-го рода возникает и развивается на поверхности трения в диапазоне малых скоростей относительного перемещения сопряженных поверхностей (до $0,5\text{--}0,6\text{ м/сек}$), больших удельных давлений и при незначительно повышенных температурах на поверхностях трения (до $100\text{--}150^\circ\text{С}$). Он является причиной преждевременного износа $10\text{--}40\%$ деталей современных машин и механизмов.

Схватывание 1-го рода приводит к наиболее интенсивному разрушению поверхностей трения, к образованию шероховатостей с глубокими вырывами и налипшими частицами металла,

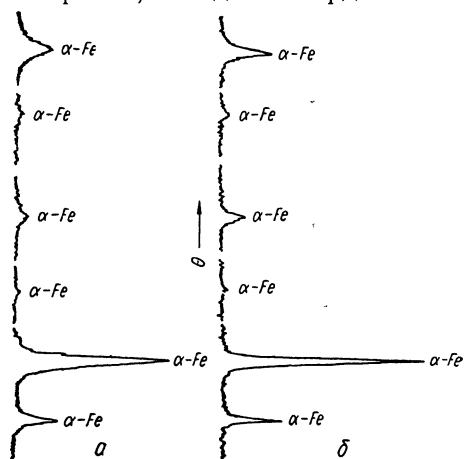


Рис. 24. Рентгенограммы поверхностных слоев цапфы траверсы: а — деформированный слой; б — исходная структура.

упрочнению поверхностных слоев металлов пар трения вследствие значительных пластических деформаций и снижению объемной усталостной прочности деталей. Поверхности трения деталей машин в результате износа в условиях схватывания 1-го рода представляют собой беспорядочное скопление впадин, выступов и продольных борозд разной величины и формы; на них есть следы пластического течения металла по направлению перемещения пар трения. На твердых поверхностях наблюдаются следы хрупкого разрушения металла.

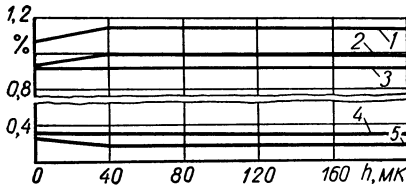


Рис. 25. График изменения процентного содержания химических компонентов в поверхностном слое цапфы траверсы:
1 — кремний; 2 — марганец; 3 — хром; 4 — никель; 5 — углерод.

более прочную. При динамической нагрузке разрушается более прочная поверхность трения с вязкостью, и частицы металла налипают на менее прочную поверхность с относительно большей ударной вязкостью.

При равнозначных механических характеристиках двух сопряженных поверхностей деталей машин и при равных условиях упрочняемости металлов при трении как при динамической, так и при статической нагрузках разрушение и налипание частиц металла происходит в равной мере на обеих сопряженных поверхностях.

Поверхностные слои сопряженных поверхностей деталей, изготовленных из твердых металлов, разрушаются не на всей поверхности трения, а только на отдельных ее участках. Аналогичное разрушение происходит при микроперемещениях поверхностей трения деталей, изготовленных из твердых и мягких металлов.

В зависимости от характера нагружения деталей машин, работающих в условиях схватывания 1-го рода, изменяется характер разрушения поверхности трения. При статической нагрузке разрушается менее прочная поверхность трения, и частицы металла налипают на относительно меньшей ударной

более прочную. При динамической нагрузке разрушается более прочная поверхность трения с вязкостью, и частицы металла налипают на менее прочную поверхность с относительно большей ударной вязкостью.

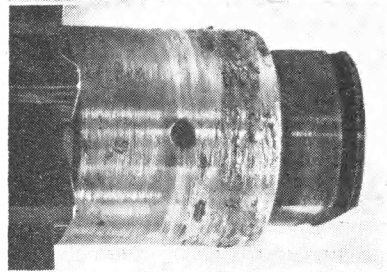


Рис. 26. Поверхность трения валика регулятора оборотов авиадвигателя, подвергшаяся износу в условиях схватывания 1-го рода.

На поверхности трения при определенных условиях (упрочнении поверхностных слоев металла в результате пластической деформации) возникают сопутствующие процессам схватывания 1-го рода окислительные процессы. Тогда в поверхностных слоях сопряженных деталей образуются высокопрочные защитные пленки окислов, препятствующие дальнейшему возникновению узлов схватывания.

Если поверхностные слои металла поверхностей трения имеют высокую механическую прочность (порядка $HRC\ 50 \div 60$), то образование и развитие процессов схватывания 1-го рода затруднено и происходит только при больших удельных давлениях ($1200—1300\ кГ/см^2$) и имеет локальный характер.

С увеличением нагрузки интенсивность износа поверхностей трения в условиях схватывания 1-го рода увеличивается.

При износе поверхностей трения в условиях схватывания 1-го рода в поверхностных слоях металла не происходит никаких фазовых превращений и изменений химического состава. В большинстве случаев увеличивается напряжение в поверхностных слоях металлов пар трения относительно исходных поверхностей.

На процесс образования и развития схватывания 1-го рода эффективное влияние оказывает смазка в машинах. С помощью обычной жидкостной смазки в большинстве случаев можно предупредить возникновение и развитие этого процесса.

СХВАТЫВАНИЕ 2-го РОДА

Схватывание 2-го рода возникает при больших скоростях относительного перемещения поверхностей трения и высоких удельных давлениях, в результате чего происходит мгновенный нагрев и разупрочнение тончайших поверхностных слоев металлов, их пластическая деформация под действием механических сил, разрушение адсорбированных пленок, сближение ювенильных поверхностей и образование металлических связей. Образование и последующее разрушение узлов схватывания приводит к разрушениям поверхностей трения в виде чередующихся надрывов, вырывов, налипания, смятия и размазывания металла по направлению движения при трении, а также к интенсивному износу поверхностей трения.

Схватывание 2-го рода возникает при критических температурах разупрочнения поверхностных слоев металла. Температу-

ра поверхностей трения зависит от скорости их относительного перемещения, нагрузки, теплопроводности металла, теплоемкости, теплоотдачи сопряженных пар и т. д.

В условиях схватывания 2-го рода с повышением температуры прочность металла понижается. При разных других условиях прочность поверхностей трения одной сопряженной детали будет выше прочности другой. Разрушается менее прочная поверхность трения, и металл налипает на более прочную сопряженную поверхность. При этом пластические деформации и разрушение поверхностей трения происходят в тончайших поверхностных слоях металлов в отличие от схватывания 1-го рода, при котором разрушаются более толстые поверхностные слои металлов пар трения.

Износ деталей машин в условиях схватывания 2-го рода является одним из наиболее интенсивных. Наличие граничной смазки на поверхностях трения не оказывает эффективного сопротивления развитию этого вида износа. В результате трения в условиях высоких температур происходит нарушение смазочных свойств, разложение и испарение смазочных материалов и разрыв масляных пленок. При наличии граничной смазки процессы схватывания 2-го рода возникают и развиваются при более высоких скоростях скольжения и удельных давлениях.

Характер внешнего проявления процесса схватывания 2-го рода в начальный период его образования и развития отчетливо можно наблюдать на примере сопряженных деталей заднего моста автомобиля ГАЗ-51 — конической шестерни полуоси и корпуса. Шестерня (рис. 27) изготовлена из стали 20ХНМ и цементирована до твердости поверхности *HRC* 58, корпус — из чугуна с твердостью поверхности трения *HB* 130. Смазка — барботажная.

Процесс схватывания 2-го рода возникает в условиях эксплуатации под действием нормальных тангенциальных усилий. На поверхности трения корпуса происходит вырыв частиц металла, которые оседают на поверхности трения шестерни. Наросты имеют вид островков высотой 0,5—2 мм, переходы в местах вырывов и в наростах нерезкие, имеются цвета побежалости, а в отдельных местах — следы оплавления и размазывания металла.

В деталях машин, работающих с большими скоростями скольжения, в условиях схватывания 2-го рода вследствие высоких температур оплавляется металл в тончайших поверхностных слоях. Разупрочненные, подвижные поверхностные слои металла увлекаются поверхностями трения и размазываются. Интенсив-

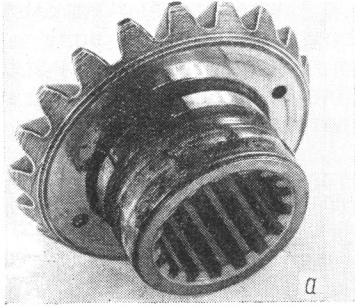
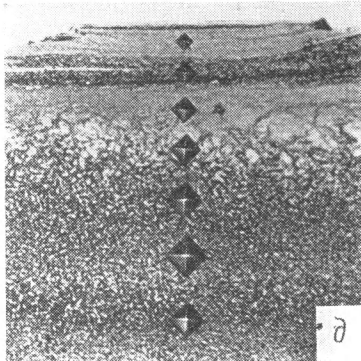
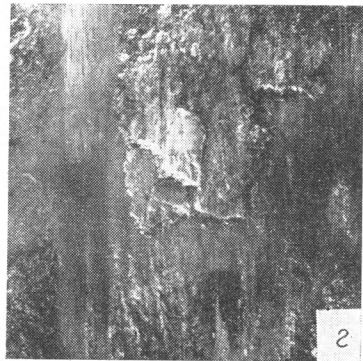
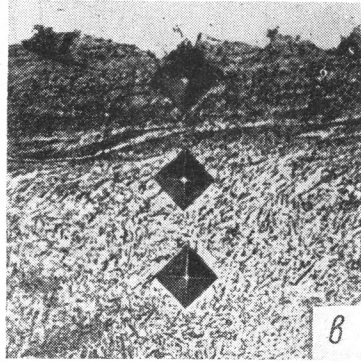
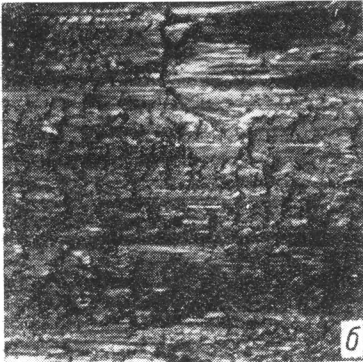


Рис. 27. Шестерня полуоси заднего моста автомобиля ГАЗ-51 после 100 тыс. км пробега:

a — внешний вид поверхности трения; *б* и *г* — участки поверхностей трения ($\times 20$); *в* — микроструктура поверхности трения в сечении ($\times 600$); *д* — микроструктура поверхности трения в сечении ($\times 300$).



ность износа в этом случае резко уменьшается. Наросты на поверхности трения размазываются и остаются только их следы.

Примером развития процесса схватывания 2-го рода при больших скоростях скольжения могут служить сопряженные детали авиационного двигателя — двойная шестерня привода нагнетателя и втулка. Шестерня изготовлена из стали марки 12Х2Н4А и цементирова-

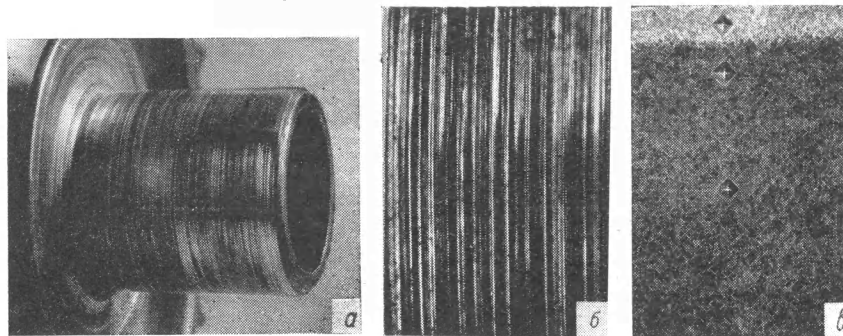


Рис. 28. Шейка двойной шестерни привода нагнетателя авиационного двигателя после 600 ч работы:

а — внешний вид поверхности трения; *б* — участок поверхности трения ($\times 18$); *в* — микроструктура поверхности трения в сечении ($\times 400$).

на до твердости *HRC* 60, втулка из бронзы Бр. ОС5-25. Смазка осуществляется под давлением. Скорость относительного перемещения цапфы двойной шестерни во втулке достигает $4,6$ м/сек. Удельное давление на поверхность трения составляет 50 кг/см².

В определенных неблагоприятных условиях трения поверхностные слои металла нагреваются и возникает процесс схватывания 2-го рода, в результате которого тонкие поверхностные слои металла шестерни оплавляются, размазываются и налипают на сопряженную поверхность. Высокий нагрев поверхностных слоев металла приводит к их отпуску, вторичной закалке и резкому изменению механических свойств, микротвердость поверхностных слоев металла увеличивается на 250 кг/мм² (рис. 28 и 29).

В определенных неблагоприятных условиях трения поверхности двойной шестерни установлено, что при схватывании 2-го рода в поверхностных слоях металла происходит изменение напряжений и фазовые превращения. Упрочненный поверхност-

ный слой имеет аустенитную структуру в отличие от исходной — ферритной (рис. 30).

В условиях схватывания 2-го рода происходит интенсивный процесс науглероживания (цементации) поверхностей с одновременным уменьшением концентрации легирующих элементов, уходящих в процессе трения с продуктами износа в виде окислов (рис. 31).

Комплексный (металлоструктурный, рентгеновский, спектральный и др.) анализ деталей различных машин после их эксплуатации в условиях схватывания 2-го рода свидетельствует о том, что износ в условиях схватывания 2-го рода, вызванный нарушением нормальной работы машины или несовершенством конструкции, является аварийным.

Процесс схватывания 2-го рода, возникающий и развивающийся в поверхностных слоях металла сопряженных деталей машин при больших скоростях относительного перемещения, высоких удельных давлениях и температурах, зачастую приводит к заеданию поверхностей сопряженных деталей.

Главным фактором, обуславливающим образование и развитие процессов схватывания 2-го рода, является теплота, возникающая при трении скольжения сопряженных поверхностей. При достижении определенной критической температуры на поверхностях трения наступают разупрочнение и фазовые превращения в поверхностных слоях металла. Начало разупрочнения металлов является началом образования и развития процесса схватывания 2-го рода.

С увеличением температуры в поверхностных слоях сопряженных металлов до начала оплавления происходит увеличение интенсивности изнашивания поверхности трения и развития процесса схва-

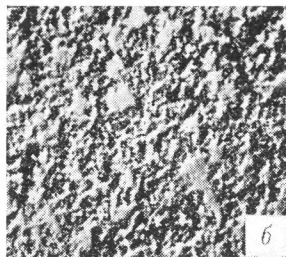
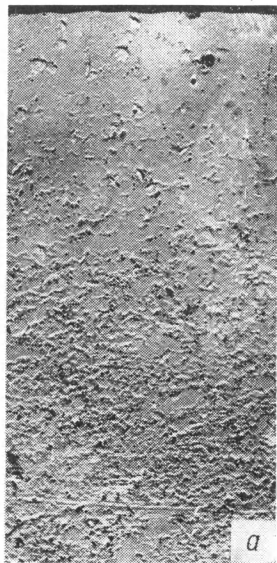


Рис. 29. Микроструктура поверхности трения в сечении шейки шестерни привода нагнетателя авиационного двигателя ($\times 3000$):

а — закаленный слой;
б — исходная структура.

тывания 2-го рода. При температуре плавления поверхностных слоев интенсивность износа поверхностей трения относительно уменьшается. Таким образом, возникновение и развитие износа в условиях схватывания 2-го рода происходит в определенном интервале температур. Так как температура поверхности трения в основном зависит от скорости и нагрузки, то образование и развитие процессов схватывания 2-го рода также зависит и от этих факторов.

Характерными особенностями состояния поверхностей трения деталей машин, работающих в условиях на-

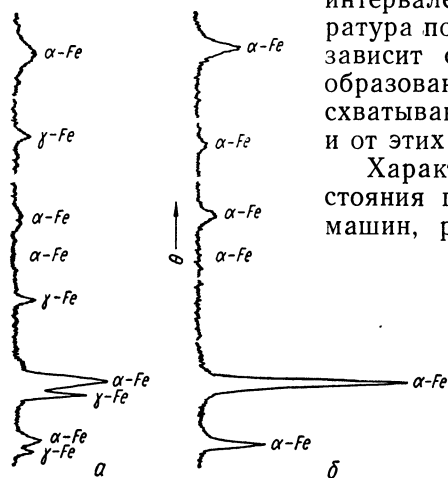


Рис. 30. Рентгенограммы поверхностных слоев металла шейки двойной шестерни привода нагнетателя авиационного двигателя:

а — деформированный слой в условиях схватывания 2-го рода после 600 ч работы; *б* — исходная структура.

чальной стадии развития схватывания 2-го рода, является чередующиеся надрывы металла, расположенные перпендикулярно к направлению движения пар трения, вырывы и налипшие частицы металла с резкими границами перехода по краям, следы пластического течения металла и цвета побежалости. Характерными особенностями поверхностей трения деталей, работающих при более высоких скоростях скольжения в условиях схватывания 2-го рода, являются следы оплавления и размазывания металла. Переходы в местах вырывов и наростов металлов, имевшие место в начальной стадии развития процессов схватывания 2-го рода, исчезают.

В условиях схватывания 2-го рода в поверхностных слоях металлов происходят структурные изменения, фазовые превра-

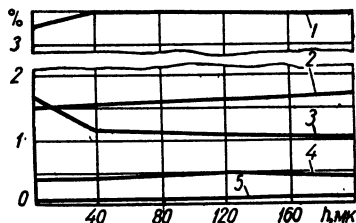


Рис. 31. График изменения процентного содержания химических компонентов в поверхностном слое шейки двойной шестерни нагнетателя авиационного двигателя после 600 ч работы:

1 — никель; 2 — хром; 3 — углерод (в условных единицах); 4 — марганец; 5 — кремний.

щения и изменение напряжения. В закаленных поверхностных слоях металлов образуется аустенитная фаза. Изменяется и химический состав поверхностных слоев металлов деталей машин. Уменьшается содержание легирующих элементов в результате их диффузии из близлежащих слоев к поверхности трения.

Эффективное сопротивление износу поверхностей трения в условиях высоких температур оказывают теплоустойчивые металлы, которые способны сохранять свою исходную структуру и твердость при высоком нагреве, а также интенсивно отводить тепло в тончайших поверхностных слоях металлов от зоны максимальных температур в глубь металла или в окружающую среду. Повышение механической прочности, твердости поверхностных слоев металлов не оказывает действенного сопротивления износу в условиях схватывания 2-го рода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

Количественные и качественные закономерности развития процессов трения и износа зависят от основных групп факторов: внешних механических воздействий на поверхности трения, окружающей среды, свойств металлов, методов их обработки, размера сопряженных тел, продолжительности работы, температуры и др.

Влияние этих групп факторов в широком диапазоне их изменений на процессы, возникающие при трении в сопряженных поверхностях, не всегда можно изучить на деталях машин.

Значительно эффективнее воспроизвести их на специальных испытательных машинах и изучить причины возникновения и механизм этих процессов на всех стадиях их развития, найти границы их существования в зависимости от изменений в широком диапазоне взаимодействия отдельных факторов или групп факторов. С этой целью и был проведен комплекс лабораторных исследований.

Испытания проводились по двум направлениям: изучались количественные характеристики процессов (интенсивность износа, коэффициент трения, температура поверхностных слоев, измерялись микротвердость, макро- и микрорельеф поверхностей трения и т. п.), а также изучались качественные изменения, происходящие на поверхности и в поверхностных слоях металлов.

Испытания проводились по разработанной методике на испытательных машинах, установках и приборах, описанных в гл. 1.

§ 1. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ, УДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВИБРАЦИЙ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ

Изменение скоростей скольжения влияет, главным образом, на качественные характеристики процессов схватывания. Поэтому величина износа в зависимости от скорости скольжения носит экстремальный характер. Однако из опубликованных работ видно, что изучение влияния скоростей скольжения на износ проводилось в узком диапазоне скоростей и недостаточное внимание уделялось качественным характеристикам. Так, например, В. Эйлендер, В. Эртель и Г. Шмальц, проводившие испытания термически обработанной углеродистой стали при скоростях скольжения 0,1—0,25 м/сек, наблюдали характерные максимумы величины износа. При дальнейшем увеличении скорости скольжения до 0,5 м/сек величина износа резко снижалась. Таким образом, зависимость величины износа от скорости скольжения была выявлена только для узкого диапазона скоростей (0,1—0,5 м/сек).

Б. Кель и Е. Зибель [144] проводили опыты при сухом трении в более широком диапазоне скоростей скольжения — от 0,06 до 5 м/сек. Испытание проходило при торцовом трении двух полых цилиндрических образцов, изготовленных из нормализованной углеродистой стали. Авторы установили, что при некоторых величинах скоростей скольжения интенсивность износа снижается в 500—600 раз, достигая минимума при скорости 0,9 м/сек, а затем начинает возрастать. Причина этого явления не выяснена. Испытания на износ образцов из нормализованной стали У8 в условиях сухого трения, выполненные И. В. Крагельским и Е. М. Швецовым [64, 72] на машине, изготовленной по схеме Б. Келя и Е. Зибеля, дали аналогичные результаты.

Понижение интенсивности износа при определенном значении скоростей скольжения отмечалось в опытах В. В. Чернышева [119] для различных марок стали, которые испытывались при удельном давлении 10 кг/см^2 и в пределах скоростей скольжения 0,07—0,7 м/сек. Недостатком этой работы было то, что испытание проводилось при малых скоростях скольжения.

Н. С. Позолотина [78] при испытаниях на износ в более широком диапазоне скоростей (0—37 км/ч) определила закономерность интенсивности изнашивания чугуна при трении по осевой стали. При скоростях скольжения чугуна 4—5 км/ч наблюдался характерный максимум величины износа, затем с увеличением скорости скольжения интенсивность износа быстро снижалась. В диапазоне скоростей 17—29 км/ч величина износа стабилизировалась, и при дальнейшем увеличении скорости скольжения интенсивность износа возрастала. Причину наблюдаемого изменения интенсивности износа Н. С. Позолотина объясняет образование наростов и наплывов на поверхностях трения, которые образуются в результате молекулярного взаимодействия поверхностей.

В. Н. Кашеев и Н. Я. Ткаченко [44] в результате испытания на износ образцов из бронзы ОВС-6-6-3 при трении о бронзовый диск в диапазоне скоростей скольжения 1—16 м/сек получили кривые с экстремальным значением износа.

Б. И. Костецкий [59] при исследовании влияния скорости скольжения на износ установил, что изменение скорости скольжения сопровождается изменением структурного и фазового состояния металла поверхностных слоев.

Существенное влияние на развитие процессов схватывания при трении оказывают удельные давления [13, 85]. При трении металлов вследствие значительной микрошероховатости поверхностей и возникновения местных высоких напряжений появляются островки схватывания, приводящие к увеличению износа.

Установлено, что во всех случаях увеличение удельного давления повышает интенсивность износа. Эта зависимость получена Н. Н. Иншаковым [37] при испытании литой стали; П. К. Топехой [108] — при испытании закаленной стали; Е. А. Суходольской [106], Г. А. Прейсом и И. В. Лавруком [94] — при испытании чугунов; Р. Л. Джонсоном, М. А. Свикертом и Е. Е. Биссоном [29] — при испытании сталей; В. Н. Кашеевым и Н. Я. Ткаченко [44] — при испытании бронзы по бронзе.

Б. И. Костецкий [59], исследуя влияние удельного давления на интенсивность износа, пришел к выводу, что для каждой пары трения существует критическое удельное давление, при котором износ резко возрастает. При этом происходят не только количественные, но и качественные изменения процессов трения и износа, т. е. переход от одного вида износа к другому.

На закономерности развития процессов схватывания метал-

лов при трении большое влияние оказывают вибрации, возникающие при работе машин.

Вибрации при трении могут возникать по двум причинам: либо в результате автоколебаний, либо под воздействием внешних возмущающих сил.

Большинство ученых, изучающих автоколебания [38, 40, 41, 51, 110, 126, 128, 142], рассматривало не результат воздействия колебаний на исследуемое тело, а механизм возбуждения колебаний, и изыскивало пути их устранения.

Советские ученые Н. Ф. Кунин и Г. Д. Ломакин [80] впервые попытались изучить влияние колебаний на износ. Однако они изучали только внешние изменения, которые возникают на поверхностях трения при износе образцов, без привлечения металлографического и рентгеновского анализов.

Износостойкость резцов на специально сконструированных токарных станках, создающих искусственные вибрации, исследовали А. И. Каширин [42], В. А. Кривоухов и А. Л. Воронов [75]. Они отмечали повышение интенсивности износа при уменьшении частоты и увеличении амплитуды вибрации и показали, что процесс изнашивания инструмента во многом зависит от характера вибрации резца.

Ф. Боуден и его последователи [11, 128] высказали предположение о том, что скачкообразный характер перемещения металлических поверхностей трения является результатом разрушения перешейков сварки в зонах контакта, т. е. схватывание — причина возникновения колебаний.

Отмечая большую практическую и научную ценность проведенных работ по изучению влияния внешних механических воздействий на развитие процессов схватывания при трении, следует назвать их существенные недостатки.

Большинство исследователей изучало процессы трения и износа при низких значениях и в очень узких диапазонах скоростей скольжения и давлений. Количественные характеристики износа не всегда увязывались с качественными изменениями в поверхностных слоях сопряженных деталей. Во многих работах не вскрыты основные закономерности, происходящие при трении и износе, и не даны объяснения кривых износа. Многие авторы ограничивались описанием внешней стороны процесса и общими соображениями о зависимости изнашивания от физических, химических, механических и других факторов.

Попытки некоторых авторов изучить одновременно влияния скоростей скольжения и удельного давления на износ сво-

дились к тому, что результаты исследований зависимости износа от скорости скольжения и от удельного давления строились в виде совмещенных кривых в двух координатах. Такие графики не дают представления о процессах, протекающих на поверхностях трения при изменении скоростей скольжения и удельного давления.

Одной из основных тенденций современного машиностроения является постоянное увеличение скоростей (производительности) и нагрузки (мощности) проектируемых и изготовляемых машин. Для этого машиностроители должны располагать достаточными сведениями о процессах трения и изнашивания при больших скоростях относительного перемещения поверхностей трения и высоких удельных давлениях.

Многие исследователи изучали процессы трения и износа в лабораторных условиях в узком диапазоне либо удельных давлений, либо скоростей скольжения, поэтому до сих пор полностью не раскрыта взаимосвязь процессов, которые возникают и развиваются в машинах.

Для восполнения в некоторой степени имеющегося пробела автором проведены комплексные лабораторные исследования влияния внешних механических воздействий на процессы трения и износа и, в первую очередь, образования и развития процессов схватывания металлов при трении.

На первом этапе исследований изучалось отдельно влияние скоростей скольжения и удельного давления на закономерности развития процессов схватывания металлов при трении. Влияние скоростей скольжения изучалось на образцах из нормализованной стали 45, работавших в паре с нормализованными валами из стали 10, на испытательной машине (рис. 8). Испытания проводились при удельном давлении 50 кг/см^2 при трении без смазки в диапазоне скоростей скольжения $0,0025\text{—}8 \text{ м/сек}$.

В результате проведенных исследований получены количественные закономерности развития процессов трения и износа, подтвержденные с помощью качественного металловедческого, рентгеноструктурного, спектрального и других анализов изменений структуры, химического состава и свойств поверхностных слоев металла. На этом основании были построены графики зависимости износа образцов и валов, температуры на поверхности трения, коэффициента трения от скорости скольжения и графики изменения микротвердости поверхностей трения образцов, испытанных при различных скоростях скольжения.

Анализ полученных количественных и качественных законо-

мерностей развития процессов трения и износа позволил выявить основные ведущие процессы, возникающие во всем диапазоне изменения скоростей скольжения и обуславливающие характер и интенсивность износа поверхностей трения, установить грани-

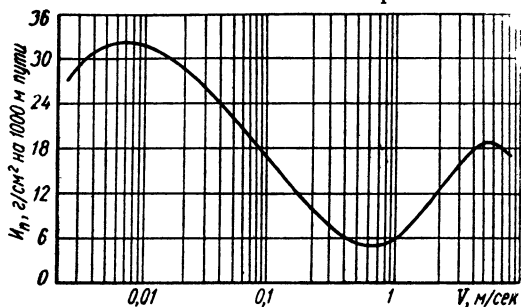


Рис. 32. График зависимости приведенного износа нормализованных образцов (сталь 45) при трении без смазки по нормализованному валу (сталь 10) от скорости скольжения при постоянном удельном давлении 50 кг/см^2 .

цы существования этих процессов, критические скорости перехода одного ведущего процесса в другой, интенсивность износа поверхностей трения.

Установлено, что во всем диапазоне скоростей скольжения ($0,0025—8 \text{ м/сек}$) на сопряженных поверхностях возникают и развиваются три ярко выраженных ведущих процесса: схватывание 1-го рода, окислительный и схватывание 2-го рода. Эти процессы чередуются, возникая и развиваясь в определенной закономерности, в строгих границах скорости, они имеют ярко выраженную, отличную друг от друга количественную и качественную характеристики развития.

Кривые зависимости величины износа от скорости скольжения при трении без смазки имеют два характерных максимума износа в диапазоне малых и больших скоростей скольжения (рис. 32, 33).

В диапазоне скоростей скольжения ($0,0025—0,5 \text{ м/сек}$) возникает и развивается процесс схватывания 1-го рода, при котором

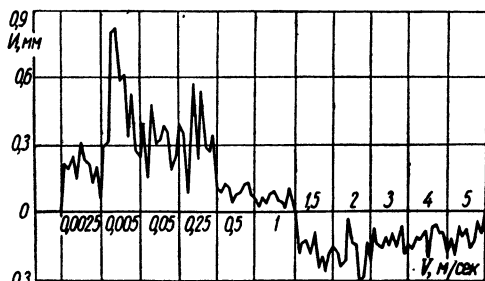


Рис. 33. Профилограмма поверхности трения эталонного вала (сталь 10) после испытания на износ при трении без смазки в паре с образцами (сталь 45), постоянном удельном давлении 50 кг/см^2 и различных скоростях скольжения.

происходит интенсивное разрушение (износ) поверхностей трения образцов (рис. 34, 1—4) и вала (рис. 35, 1). Поверхности трения образцов и вала, испытанных в этом диапазоне скоростей, представляют собой беспорядочное скопление впадин и выступов, продольных борозд разной величины и формы, с резкими границами перехода от впадин к выступам, с заметными следами вы-

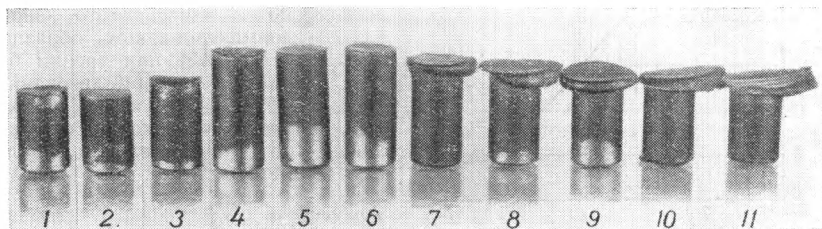


Рис. 34. Нормализованные образцы (сталь 45) после испытания при постоянном удельном давлении 50 кг/см^2 со скоростью скольжения: 1 — 0,0025 м/сек; 2 — 0,005 м/сек; 3 — 0,05 м/сек; 4 — 0,25 м/сек; 5 — 0,5 м/сек; 6 — 1 м/сек; 7 — 1,5 м/сек; 8 — 2 м/сек; 9 — 3 м/сек; 10 — 4 м/сек и 11 — 5 м/сек.

рывов и налипания частиц металла, пластического течения металла по направлению перемещения пар трения (рис. 36, а, $V = 0,005 \text{ м/сек}$). Класс чистоты поверхностей снизился с 7-го до 3—4-го (рис. 36, б). В поверхностных слоях видны следы пластического деформирования металлов на глубину 100—150 мк (рис. 36, в; 37). Микротвердость деформированного слоя достигает 450 кг/мм^2 (рис. 36, г).

В процессе испытания на поверхности трения повышается температура до $60\text{—}180^\circ \text{C}$ (рис. 38), коэффициент трения находится в пределах 0,6—1,1. Фазовых превращений в поверхностных слоях металлов в указанных условиях трения не происходит. Поверхностные слои металлов после испытания имеют исходную ферритную структуру с α -решеткой (рис. 39).

Послойный спектральный анализ образцов, испытанных в условиях схватывания 1-го рода, показал, что заметного изменения химического состава в поверхностных слоях металлов не происходит (рис. 40).

С увеличением скорости скольжения в диапазоне средних скоростей (0,5—1 м/сек) возникают и развиваются окислительные процессы. В этих условиях происходит относительно малый износ поверхностей трения (рис. 32 и 33). На поверхностях трения появляются блестящие белые, коричневые и серые пятна

окислов (рис. 35, II и рис. 36, а, $V = 0,5$ м/сек). Поверхности трения заглаживаются и класс чистоты их повышается с 7-го (исходного) до 8-го (рис. 36, б). Происходит пластическая деформация металла в очень тонких поверхностных слоях (рис. 36, в), твердость которых достигает 400 кг/мм² (рис. 36, г).

Температура на поверхности трения при испытании в указанном диапазоне скоростей скольжения повышается от 180 до 500°C (рис. 38). Коэффициент трения при этом несколько снижается и находится в пределах $0,5$ — $0,6$ (рис. 41). Такой характер качественных и количественных изменений, происходящих на поверхности трения, как показал Б. И. Костецкий [59], свидетельствует о развитии окислительных процессов.

С увеличением скорости скольжения в диапазоне 1 — 5 м/сек на поверхностях трения возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода; при этом происходит интенсивный износ образцов (рис. 32). Поверхность трения в результате износа в этих условиях становится шероховатой, с относительно плавными переходами от выступов к впадинам, имеются следы оплавления и размазывания металла по направлению перемещения пар трения (рис. 36, а, $V = 5$ м/сек).

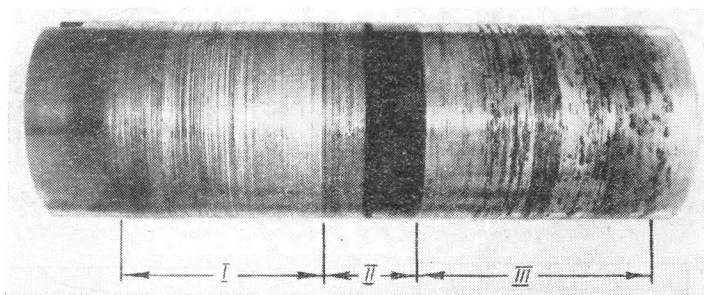


Рис. 35. Эталонный вал после испытания:

I — зона схватывания 1-го рода; *II* — зона окислительных процессов; *III* — зона схватывания 2-го рода.

В начальной стадии развития процесса схватывания 2-го рода ($1,5$ — 2 м/сек) поверхности трения характеризуются чередующимися надрывами металла, расположенными перпендикулярно к направлению движения пар трения, следами вырывов и налипания частиц металла с заметными границами перехода по краям, следами пластического течения металла (рис. 36, а, $V = 1,5$ м/сек).

$V = 0,005 \text{ м/сек}$

$V = 0,5 \text{ м/сек}$

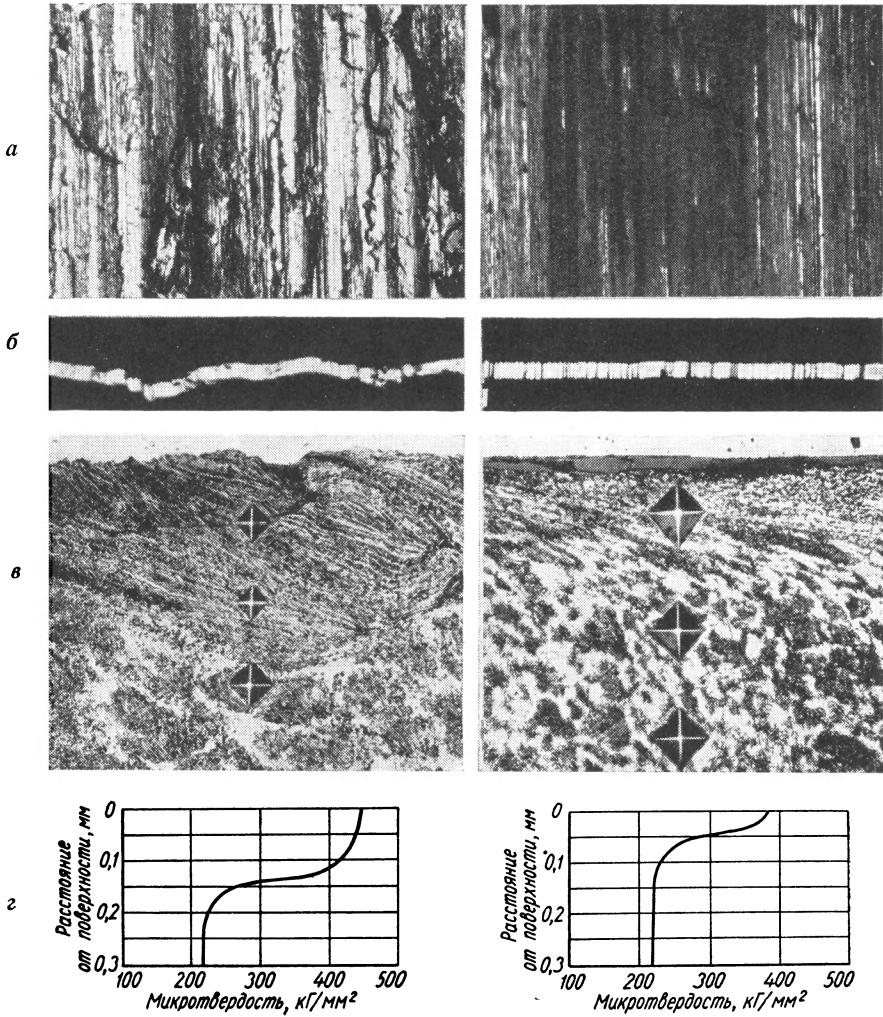
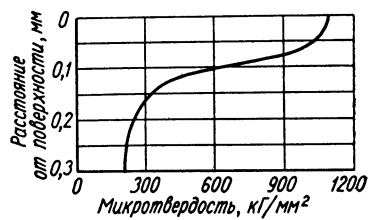
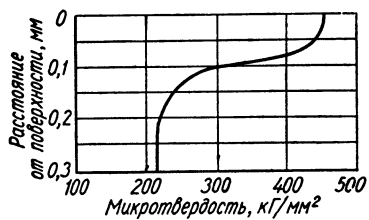
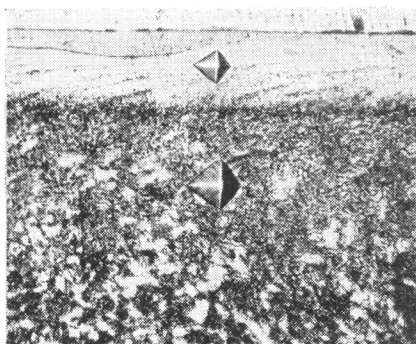
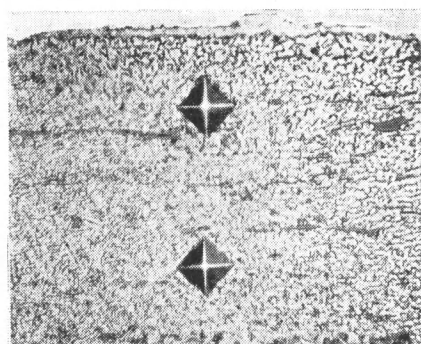
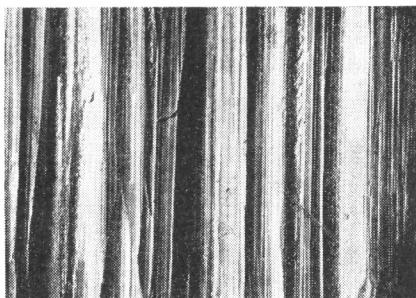
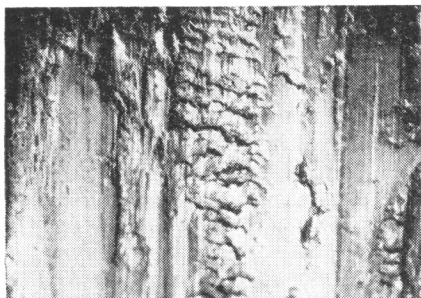


Рис. 36. Результаты испытаний при трении без смазки нормализованных образцами скоростями скольжения: *a* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *б* — профилограммы поверхностей трения микротвердости поверхностные слоев.

$V = 1,5 \text{ м/сек}$

$V = 5 \text{ м/сек}$



цов (сталь 45) по валу (сталь 10) с удельным давлением 50 кг/см^2 и различных ($\times 80$); в — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); г — графики изменения

Вал практически не изнашивается, на его поверхности происходит налипание частиц металла, оторвавшихся с поверхности образцов (рис. 33, 35, III и рис. 42). Микрорельеф поверхности образцов становится более грубым и соответствует 3—4-му классу (рис. 36, б). Начало образования процесса схватывания связано с критической температурой нагрева поверхностей в результате трения, при которой начинается разупрочнение металла. Для стали 45, из которой изготовлены испытываемые образцы, критическая температура начала разупрочнения находится в пределах 400—450° С.

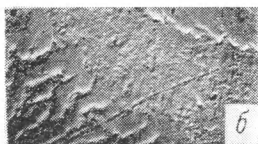
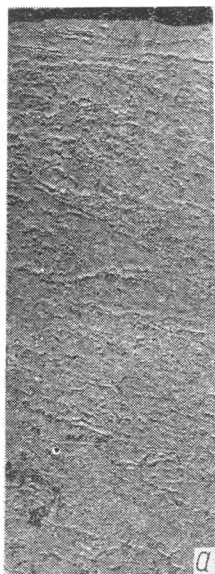


Рис. 37. Микроструктура поверхности трения в сечении образца (сталь 45) после испытания в условиях схватывания 1-го рода ($\times 3000$):
а — деформированный слой; б — исходная структура.

Развитие процесса схватывания 2-го рода с увеличением скорости скольжения связано с дальнейшим нагревом поверхностей трения. При скорости 5 м/сек температура поверхности трения достигает 1000—1100° С (рис. 38). Интенсивный нагрев вызывает разупрочнение металлов, уменьшение механической прочности, увеличение пластичности металлов, что способствует образованию металлического контакта в сопряженных парах, образованию процесса схватывания. При этом в поверхностных слоях металлов в зависимости от степени нагрева (скорости скольжения) образуются структуры рекристаллизации, отпуска и закалки (рис. 36, в, $V = 1,5$ и 5 м/сек и рис. 43). Микротвердость достигает 450 и 1050 кг/мм² (рис. 36, г).

В поверхностных слоях металла происходят фазовые превращения. На рентгенограмме (рис. 44) наряду с линиями феррита (α —Fe) видны линии остаточного аустенита (γ —Fe). Это дает основание утверждать, что образовавшиеся белые, нетравящиеся слои (рис. 36, в, $V = 5$ м/сек) являются результатом закалки вследствие нагрева при трении и последующем охлаждении образцов.

В поверхностных слоях образцов, испытанных в условиях

схватывания 2-го рода, наблюдается некоторое уменьшение концентрации углерода и легирующих элементов (рис. 45).

Коэффициент трения в начальный период схватывания находится в пределах от 0,5 до 0,58 и с увеличением скорости постепенно уменьшается до 0,3 (рис. 41).

Таким образом, изменение скорости скольжения оказывает огромное влияние на возникновение и развитие ведущих процессов, обуславливающих интенсивность и характер разрушения поверхностей трения.

В зависимости от величины скорости скольжения в поверхностных слоях металлов возникают и развиваются с различной интенсивностью упругие и пластические деформации, упрочнение и разупрочнение металлов, тепловые процессы, вызывающие структурные и фазовые изменения в металле, адсорбционные и диффузионные процессы, процессы образования металлических связей и механические разрушения металлов.

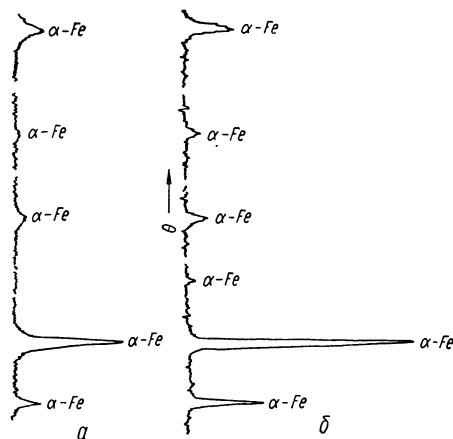


Рис. 39. Рентгенограммы поверхностных слоев металла образцов (сталь 45): а — испытанных в условиях схватывания 1-го рода; б — исходная структура.

интенсивностью износа поверхностей трения.

В условиях средних скоростей скольжения (0,5—1 м/сек) при несколько большем нагреве поверхностей трения интенсифици-

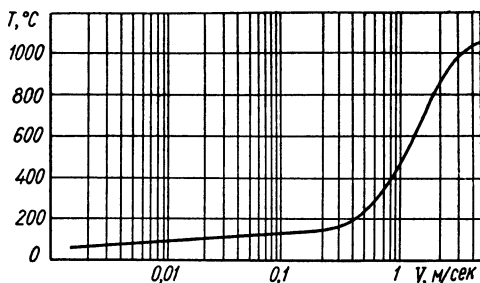


Рис. 38. График зависимости температуры нагрева поверхностей образцов (сталь 45) при трении по валу (сталь 10) от скорости скольжения при удельном давлении 50 кг/см².

При малых скоростях скольжения развивается процесс схватывания 1-го рода (в результате интенсивного деформирования металлов и разрушения адсорбированных поверхностных пленок). Он сопровождается большой

интенсивностью износа поверхностей трения.

руются окислительные процессы, образуются прочные защитные пленки на поверхности трения, причем скорость образования таких пленок превышает скорость их разрушения. В результате окислительные процессы преобладают и обуславливают малую интенсивность износа поверхностей трения.

При повышенных скоростях скольжения (1—5 м/сек) происходит интенсивный нагрев поверхностей трения, разупрочнение, интенсификация пластических деформаций металла, разрушение

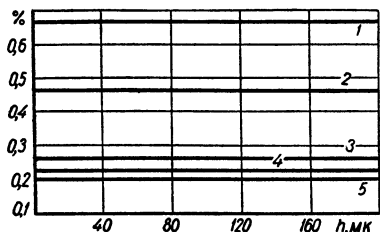


Рис. 40. График изменения процентного содержания химических компонентов в поверхностном слое нормализованного образца (сталь 45) после испытания без смазки при удельном давлении 50 кг/см² и скорости скольжения 0,025 м/сек:

1 — марганец; 2 — углерод; 3 — хром; 4 — никель; 5 — кремний.

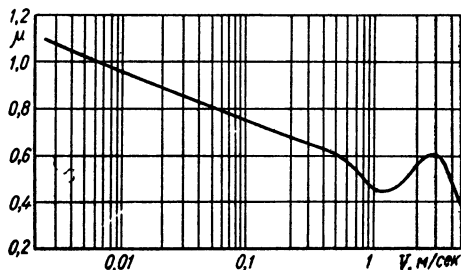


Рис. 41. График зависимости коэффициента трения от скорости скольжения нормализованных образцов (сталь 45) по нормализованному валу (сталь 10) с удельным давлением 50 кг/см².

защитных поверхностных пленок, образование металлического контакта и схватывание сопряженных металлов. В этих условиях трения преобладающим процессом является схватывание 2-го рода, обуславливающее большую интенсивность износа поверхностей трения.

Таким образом, в зависимости от изменения скорости скольжения в диапазоне от 0,0025 до 5 м/сек возникают и развиваются три ярко выраженных процесса — схватывание 1-го рода, окислительный и схватывание 2-го рода. Эти процессы возникают и развиваются в определенных границах скоростей скольжения, чередуются между собой и обуславливают качественную и количественную характеристики износа поверхностей трения.

Наряду с основными процессами при трении протекают и сопутствующие им процессы, которые в меньшей степени влияют на износ деталей. В условиях схватывания 1-го и 2-го рода сопутствующим процессом в первую очередь является окислитель-

ный, который оказывает заметное сопротивление развитию процессов схватывания и в условиях средних скоростей скольжения полностью их вытесняет и сам становится ведущим.

Исследования влияния величины удельных давлений (в диапазоне 5—1300 кГ/см^2) на закономерности развития процессов схватывания металлов при трении проводились по принятой методике (см. стр. 7) при постоянных скоростях скольжения на образцах из конструкционных сталей.

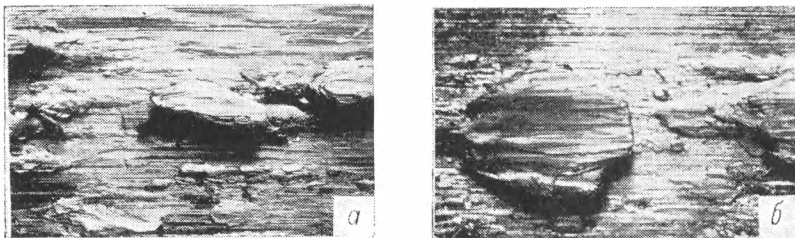


Рис. 42. Поверхности трения вала (сталь 10) после испытания с удельным давлением 50 кГ/см^2 в условиях схватывания 2-го рода:
а — при скорости скольжения 2 м/сек ; б — при 5 м/сек ($\times 18$).

В результате исследований установлено, что изменение в широком диапазоне удельного давления в основном приводит к изменению интенсивности развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода и количественному изменению величины износа. В отдельных случаях в условиях трения, близких к критическим условиям перехода одного ведущего процесса в другой, изменение величины удельного давления при прочих равных условиях может вызвать переход одного процесса в другой и качественные изменения износа поверхностей трения.

В качестве примера могут быть приведены результаты опытов на нормализованных образцах (сталь 45) при трении без смазки в паре с нормализованными валами (сталь 10) со скоростью скольжения 0,025 и 5 м/сек при переменном удельном давлении в интервале 5—125 кГ/см^2 . Во всем интервале изменения удельных давлений при скорости скольжения 0,025 м/сек возникает и развивается один ведущий процесс — схватывание 1-го рода, при этом с увеличением удельного давления увеличивается интенсивность развития процесса схватывания и износ поверхностей трения (рис. 46, кривая 2).

При скорости скольжения 5 м/сек во всем диапазоне изменения удельного давления возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода. С увеличением удельного давления увеличи-

вается интенсивность развития процесса схватывания и износ поверхностей трения.

Воспроизведенные в лабораторных условиях на образцах процессы схватывания 1-го и 2-го рода по характеру развития и внешним проявлениям соответствуют процессам, выявленным в деталях машин.

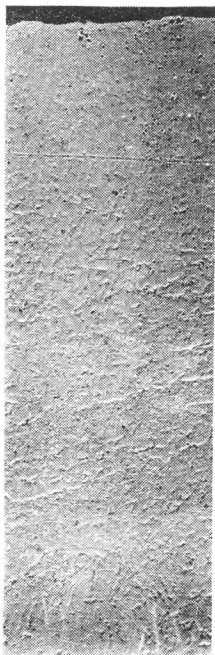


Рис. 43. Микроструктура поверхности трения в сечении образца (сталь 45) после испытания в условиях схватывания 2-го рода ($\times 3000$).

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод, что изменение величины скорости скольжения и удельного давления различно влияет на развитие процессов схватывания металлов.

Для выяснения причин возникновения и закономерностей развития ведущих процессов при трении в зависимости от величины удельных давлений и скорости скольжения были проведены четыре серии лабораторных испытаний. Опыты проводились на образцах в паре с валами из типовых конструкционных сталей при трении без смазки в диапазоне изменений скоростей скольжения 0,005—5 м/сек и удельном давлении 1; 5; 25; 50; 75 и 100 кг/см².

В первой серии опытов испытывались нормализованные образцы из стали 45, работавшие по нормализованному валу из стали 10. Основные количественные зависимости приведенного износа образцов от скорости скольжения и удельного давления даны на рис. 47.

Величины износа и скорости скольжения отложены на пространственной диаграмме в двух масштабах. Масштаб величины износа в диапазоне 0—0,1 г/см² по сравнению с масштабом величины износа от 0,1 г/см² и выше увеличен в 70 раз, а масштаб величины скорости скольжения в диапазоне 0—0,25 м/сек увеличен в 14 раз по сравнению с масштабом скорости скольжения в диапазоне 0,25—5,0 м/сек.

Характерной особенностью пространственной диаграммы является наличие двух максимумов износа в условиях малых и больших скоростей скольжения. В диапазоне средних скоростей скольжения наблюдаются области относительно малого износа.

В исследуемом диапазоне изменения скоростей и удельного давления существуют три ведущих процесса: схватывание 1-го рода, окислительный и схватывание 2-го рода, обуславливающие интенсивность износа. Эти процессы чередуются между собой, возникают и развиваются каждый по определенному закону в строго определенных границах скоростей скольжения и давлений и имеют ярко выраженную, отличную друг от друга, количественную и качественную характеристики развития.

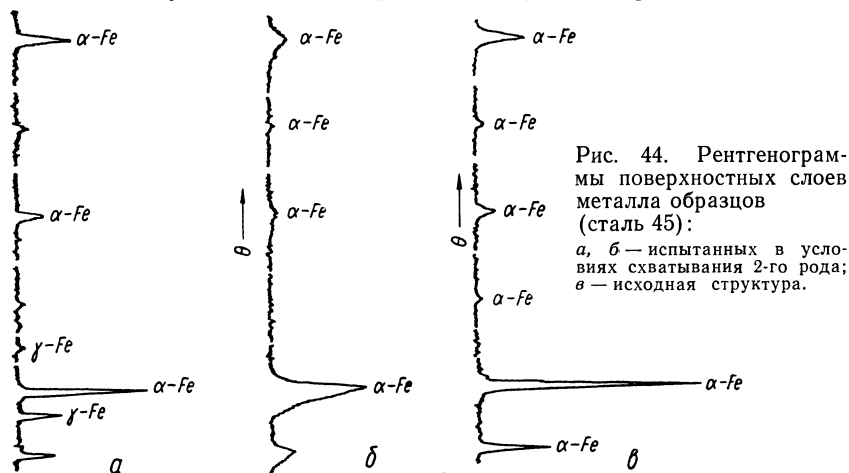


Рис. 44. Рентгенограммы поверхностных слоев металла образцов (сталь 45):
а, б — испытанных в условиях схватывания 2-го рода; в — исходная структура.

В диапазоне малых скоростей скольжения ($0,005—0,2$ м/сек) и при удельных давлениях $5—100$ кг/см² возникает и развивается процесс схватывания 1-го рода, приводящий к интенсивному износу поверхности трения. При этом с увеличением удельного давления резко возрастает износ. На диаграмме зона развития процесса схватывания 1-го рода обозначена цифрой 1.

В диапазоне средних скоростей скольжения ($0,2—2$ м/сек) в интервале изменения удельных давлений $5—100$ кг/см² и в диапазоне скоростей от $0,005$ до $3,3$ м/сек при удельном давлении 1 кг/см² возникает и развивается окислительный процесс с относительно малой интенсивностью износа поверхностей трения. С увеличением удельного давления величина износа заметно уменьшается. На диаграмме зона развития окислительного процесса обозначена цифрой 2.

В диапазоне скоростей скольжения от $1—3$ до 5 м/сек при любых удельных давлениях развивается процесс схватывания

2-го рода, приводящий к интенсивному износу поверхностей трения.

С увеличением удельного давления интенсивность износа образцов увеличивается. На диаграмме зона развития процесса схватывания 2-го рода обозначена цифрой 3.

Полученные при исследовании количественные и качествен-

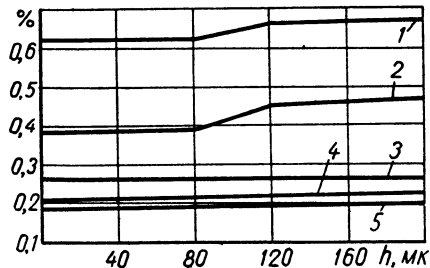


Рис. 45. График изменения процентного содержания химических компонентов в поверхностном слое нормализованного образца (сталь 45) после испытания без смазки при скорости скольжения 4 м/сек и удельном давлении 50 кг/см²:

1 — марганец; 2 — углерод; 3 — хром; 4 — никель; 5 — кремний.

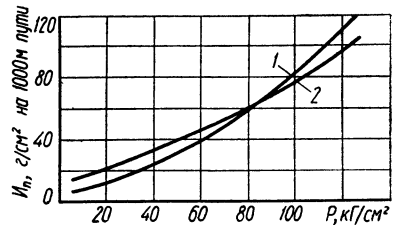


Рис. 46. График зависимости приведенного износа образцов (сталь 45) при трении без смазки по валу (сталь 10) от удельных давлений при скорости скольжения:

1 — 5 м/сек; 2 — 0,025 м/сек.

ные закономерности развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода и окислительного процесса, границы их существования и характерные особенности внешнего проявления, интенсивность износа в условиях развития этих процессов в зависимости от изменения величины скоростей скольжения и удельного давления согласуются с результатами ранее проведенных исследований.

Во второй серии опытов испытывались закаленные образцы при трении по закаленным валам из стали У8. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа образцов от скорости скольжения и удельного давления (рис. 48) значительно отличается от предыдущей. В диапазоне скоростей скольжения от 0,005 до 1—3 м/сек и во всем интервале изменения величины удельного давления развивается окислительный процесс (зона 1), обуславливающий относительно малый износ поверхностей трения.

При скорости скольжения от 1—3 м/сек и выше возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода (зона 2), вызывающий интенсивный износ поверхностей трения.

Таким образом, при испытании закаленных образцов по закаленным валам во всем диапазоне изменений скорости скольжения и удельного давления развиваются только два ведущих процесса — окислительный и схватывание 2-го рода. Окислительный процесс развивается в широком диапазоне изменений скоростей скольжения и удельных давлений. Границы его существования значительно расширены в сторону малых скоростей скольжения.

Схватывание 1-го рода как ведущий процесс отсутствует. Его отсутствие и расширение границ существования окислительного процесса связано с повышенной твердостью и малой пластичностью закаленной стали У8. Об этом свидетельствуют фотоснимки изменений макро- и микроструктуры, профилограммы поверхностей трения и графики изменения микротвердости закаленных образцов после испытания при удельном давлении 100 кг/см^2 .

В третьей серии опытов испытывались закаленные образцы из стали У8 при трении по нормализованным валам из стали 10. На основании результатов испытаний построена пространственная диаграмма зависимости износа образцов от скорости скольжения и удельного давления (рис. 49).

При скорости скольжения от $0,005$ до $1\text{--}2 \text{ м/сек}$ во всем интервале удельных давлений возникает и развивается окислительный процесс (зона 1). Износ происходит с малой интенсивностью и повышается с увеличением удельного давления. Уменьшение износа образцов в диапазоне малых скоростей скольжения по сравнению с результатами второй серии опытов объясняется тем, что трение твердого стального образца происходит по мягкому стальному валу, который сильнее изнашивается.

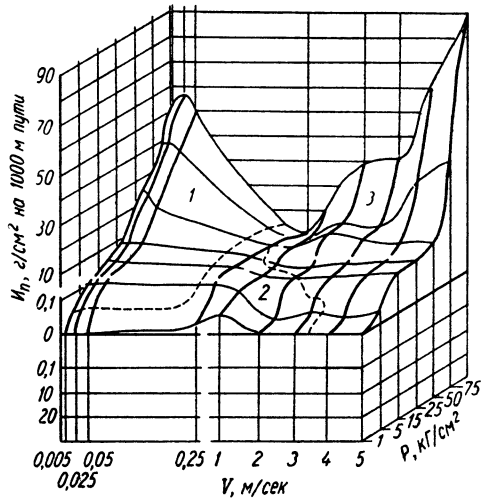


Рис. 47. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа нормализованных образцов (сталь 45) при трении без смазки по нормализованным валам (сталь 10) от скорости скольжения и удельного давления.

С увеличением скорости скольжения выше 1—2 м/сек возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода (зона 2), скорости скольжения и удельного давления (рис. 48) значительно зывающий интенсивный износ поверхностей трения. При увеличении удельного давления износ в этой зоне резко возрастает.

В четвертой серии опытов испытывались нормализованные образцы из стали 45 при трении по закаленным валам из стали У8.

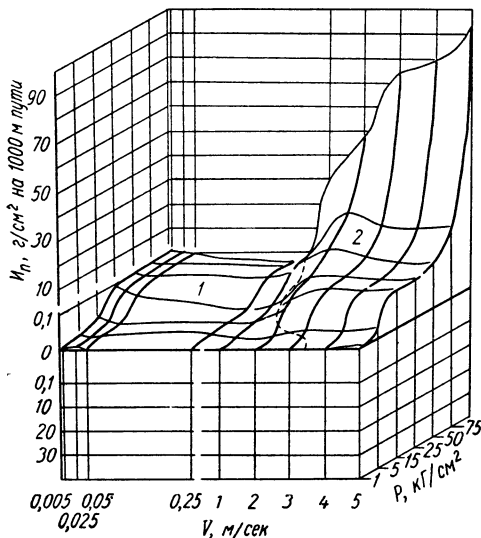


Рис. 48. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа закаленных образцов (сталь У8) при трении без смазки по закаленным валам (сталь У8) от скорости скольжения и удельного давления.

Наличие характерных максимумов и минимумов износа на построенной по результатам испытаний пространственной диаграмме (рис. 50) и анализ качественных изменений структуры, микрорельефа и микротвердости поверхностей трения образцов подтверждают возникновение и развитие в этих условиях трех ведущих процессов: схватывания 1-го рода (зона 1), окислительного (зона 2) и схватывания 2-го рода (зона 3). Характер расположения зон подобен характеру расположения их на пространственной диаграмме, приведенной

на рис. 47. Разница между этими диаграммами заключается в том, что зона окислительного процесса (рис. 50) несколько сдвинута в сторону увеличения скорости скольжения и сужена в сторону меньших удельных давлений, а также в изменении количественных характеристик износа. В зоне схватывания 1-го рода величины износа значительно меньше по сравнению с износом в той же зоне на рис. 47. Кроме того, при скоростях скольжения 0,005—0,05 м/сек с увеличением удельного давления износ увеличивается со значительно меньшей интенсивностью. Максимум износа зоны схватывания 1-го рода смещен в сторону повышенных скоростей скольжения.

В зонах окислительного процесса и схватывания 2-го рода интенсивность износа практически мало отличается от интенсивности износа в аналогичных зонах при первой серии опытов.

Анализ результатов испытаний подтверждает особо важное влияние факторов внешних механических воздействий на закономерности развития процессов трения и износа и ведущую роль в этом скоростей скольжения, изменение которых оказывает решающее влияние на качественные характеристики трения и износа.

Изменение давлений вызывает в основном изменение интенсивности развития ведущих процессов и износа поверхностей трения, за исключением некоторых условий испытаний, когда увеличение давления приводит к уменьшению величины износа или вызывает переход одного ведущего процесса в другой.

Полученные результаты позволили выявить общие закономерности развития процессов схватывания при трении без смазки стальных образцов по стальным валам с различной твердостью, а также определить границы существования ведущих процессов и интенсивность износа поверхностей трения в зависимости от изменения скорости скольжения и удельного давления.

Установлено, что при трении нормализованных стальных образцов по нормализованным стальным валам интенсивно развиваются процессы схватывания 1-го и 2-го рода. Окислительные процессы возникают в узких границах изменений скоростей скольжения. Такой характер развития связан с большой пластичностью металлов, обуславливающей разрушение поверхностных защитных пленок при пластической деформации поверхностных

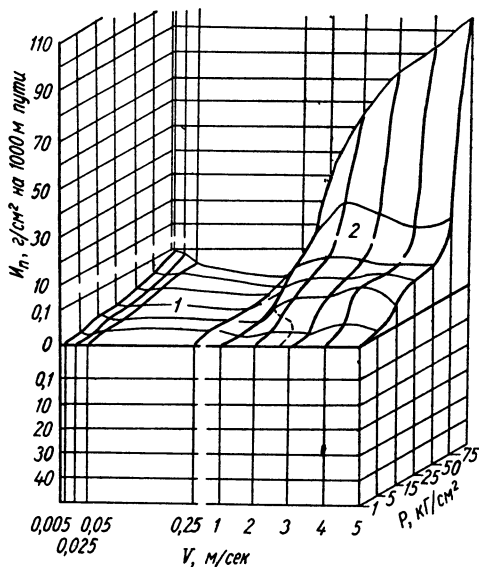


Рис. 49. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа закаленных образцов (сталь У8) при трении без смазки по нормализованным валам (сталь 10) от скорости скольжения и удельного давления.

слоев металлов при трении, образование металлического контакта, возникновение и развитие процессов схватывания, особенно 1-го рода.

При трении закаленных стальных образцов по закаленным стальным валам процесс схватывания 1-го рода не возникает. Зона окислительного износа значительно расширена в сторону малых скоростей скольжения. Это объясняется повышенной твердостью и малой пластичностью поверхностных слоев металлов.

В указанных условиях трения прочные малоподвижные поверхностные слои металлов благоприятно влияют на образование и сохранение защитных пленок на поверхности трения, препятствующих

металлическому контакту и возникновению схватывания металлов. В результате разупрочнения

металла под влиянием нагрева при трении процесс схватывания 2-го рода интенсивно развивается в прежних границах.

С целью изучения закономерностей развития процессов схватывания металлов при больших скоростях скольжения автором проведены лабораторные исследования на установке (рис. 8). Испытания проводились на эталонных дисках диаметром 220—230 мм и образцах диаметром 11,3 и длиной 26 мм в диапазоне скоростей скольжения 0,025—

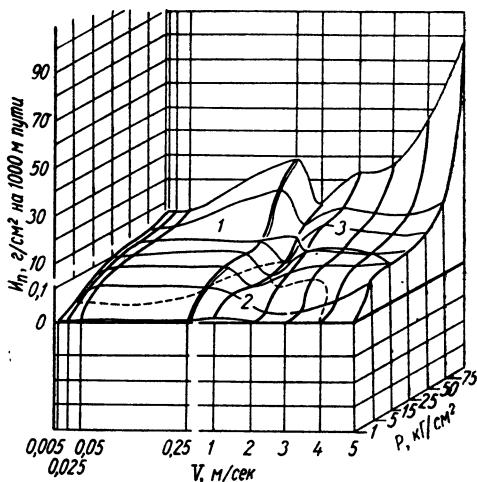


Рис. 50. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа нормализованных образцов (сталь 45) при трении без смазки по закаленным валам (сталь У8) от скорости скольжения и удельного давления.

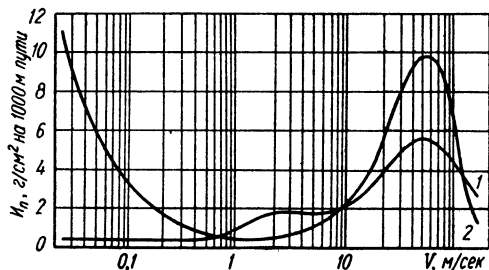


Рис. 51. График зависимости приведенного износа стальных образцов при трении без смазки и удельном давлении 25 кг/см² от скорости скольжения.

лонных дисках диаметром 220—230 мм и образцах диаметром 11,3 и длиной 26 мм в диапазоне скоростей скольжения 0,025—

150 м/сек при постоянном удельном давлении 25 кг/см^2 в условиях трения без смазки. Диски изготовлялись из нормализованной стали 45 и закаленной стали У8, образцы — из нормализованной стали 45, закаленной стали У8, чугуна ХМ и бронзы Бр. АЖМц.

На рис. 51 представлен график зависимости приведенного износа от изменения скорости скольжения при трении без смазки стальных образцов по стальному диску при постоянном удельном давлении 25 кг/см^2 . Кривой 2 характеризуется изменение интенсивности износа при трении нормализованных образцов по нормализованному диску из стали 45, а кривой 1 — при трении закаленных образцов по закаленному диску из стали У8.

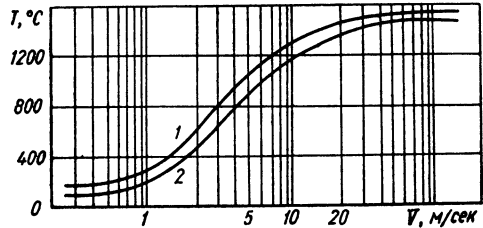


Рис. 52. График зависимости температуры на поверхности трения при испытании без смазки образцов из стали 45 (кривая 1) по дискам (сталь 45) и образцов из стали У8 (кривая 2) по дискам (сталь У8) при удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения.

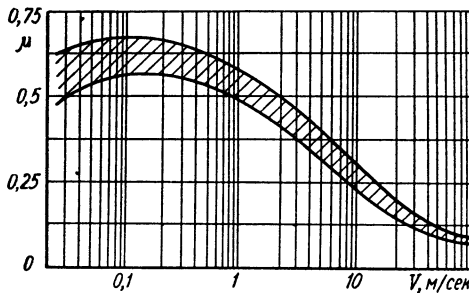
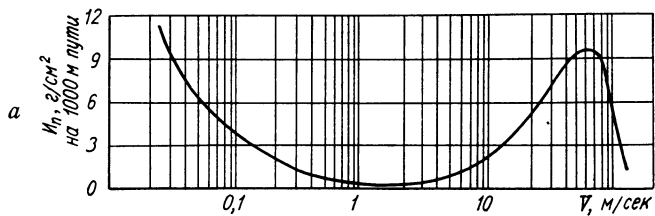


Рис. 53. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки нормализованных образцов по нормализованному диску при удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения.

0,025 м/сек. С повышением скорости скольжения интенсивность износа снижается. Это объясняется тем, что значительно повышается температура поверхностей трения (рис. 52) и интенсивность сопутствующих окислительных процессов.

Комплексный анализ количественных и качественных изменений на поверхности трения образцов в результате испытаний позволило установить, что в диапазоне скоростей скольжения 0,025—1 м/сек на поверхности трения образцов (сталь 45) развивается процесс схватывания 1-го рода, в результате которого происходит их интенсивный износ. Максимальная интенсивность износа в условиях схватывания 1-го рода отмечена при скорости скольжения



$V = 0,05 \text{ м/сек}$

$V = 2 \text{ м/сек}$

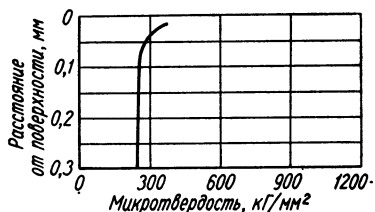
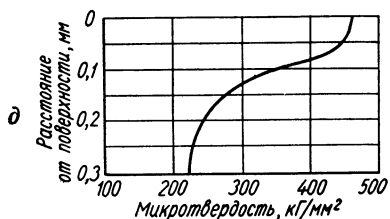
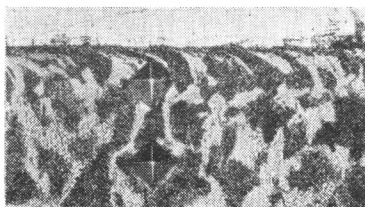
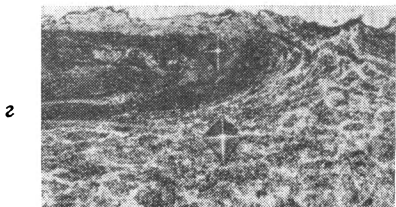
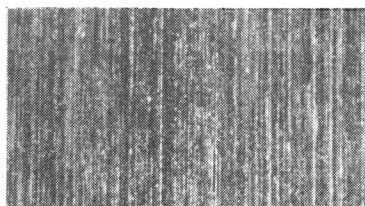
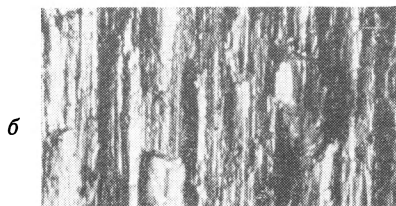


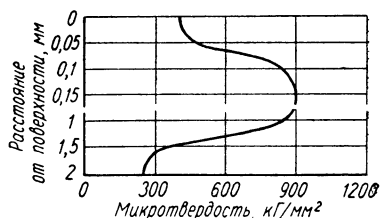
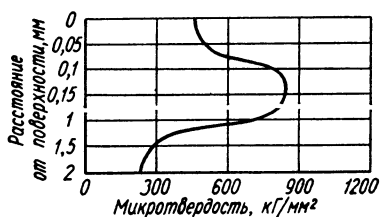
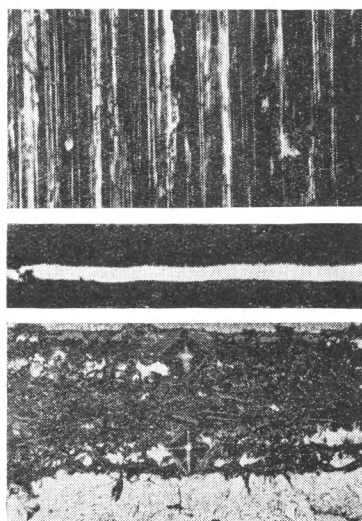
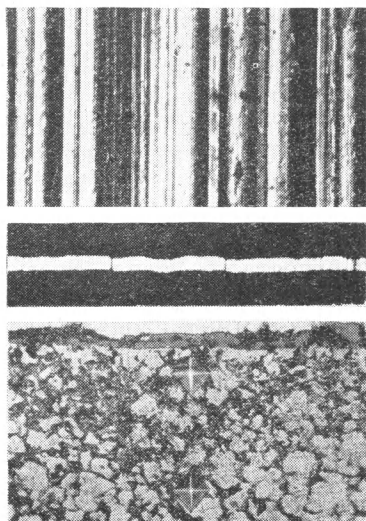
Рис. 54. Результаты испытания нормализованных образцов (сталь 45) при *a* — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *в* — про в сечении ($\times 300$); *д* — графики изменения микротвердости поверхностных слоев

В диапазоне скоростей скольжения 1—2 м/сек развиваются ведущие окислительные процессы, обуславливающие износ образцов с малой интенсивностью.

При скоростях скольжения выше 2 м/сек на поверхности трения нормализованных образцов развивается с различной интенсивностью процесс схватывания 2-го рода. В диапазоне скоростей скольжения 2—4 м/сек интенсивность износа с увеличением скорости скольжения возрастает, а затем происходит спад интенсивности износа при скорости 5 м/сек, что, вероятно, связано

$V = 75 \text{ м/сек}$

$V = 125 \text{ м/сек}$



различных скоростях скольжения:
 филогаммы поверхностей трения ($\times 80$); z — микроструктуры поверхностных слоев в сечении.

с особыми условиями трения в результате совместного действия температуры и скорости деформирования разупрочненного металла.

С увеличением скорости скольжения интенсивно повышается температура поверхностного слоя металла (рис. 52) и степень разупрочнения его. Интенсивность износа достигает максимума при скорости 50—75 м/сек. С дальнейшим повышением скорости в результате действия высоких температур происходит оплавление отдельных участков поверхностных слоев металла. Расплавленный металл выполняет роль жидкой смазки, и интенсивность износа образцов снижается.

При трении нормализованных образцов в паре с нормализованными дисками из стали 45 с увеличением скорости скольжения коэффициент трения уменьшается от 0,65 до 0,05 (рис. 53).

На поверхностях трения образцов, испытанных в условиях схватывания 1-го рода, имеются следы глубоких вырывов и налипаний частиц металла (рис. 54,б, $V = 0,05$ м/сек). Микрорельеф поверхности соответствует 3-му классу чистоты (рис. 54,в). В поверхностных слоях происходят пластические деформации на глубину 170—180 мк (рис. 54,г). Микротвердость пластически деформированных участков поверхностного слоя достигает 450 кг/мм² (рис. 54,д).

На поверхностях трения и в поверхностных слоях образцов, испытанных при скорости скольжения 2 м/сек, происходят изменения, характерные для окислительного износа. На поверхности трения видны следы окислов (рис. 54,б). Микрорельеф поверхности соответствует 6-му классу чистоты (рис. 54,в). В сечении поверхностных слоев видны окислы; глубина пластического деформирования значительно меньше, чем у образцов, испытанных в условиях схватывания 1-го рода (рис. 54,г). Микротвердость поверхностных слоев повышается по сравнению с микротвердостью исходной структуры (рис. 54,д).

При скорости скольжения 5 м/сек на поверхности трения появляются вырывы и размазывание металла по направлению вращения. Микрорельеф поверхности соответствует 4-му классу чистоты. Слой пластически деформированного металла меньше, чем в условиях схватывания 1-го рода, но больше, чем в условиях окислительного износа. О развитии высоких температур на поверхности трения свидетельствует образование тонкого слоя закаленного металла, микротвердость которого достигает 700 кг/мм².

При испытании образцов со скоростью скольжения 10 м/сек

происходит более интенсивное размягчение поверхностных объемов металла и размазывание его по поверхности трения. Чистота поверхности повышается, микрорельеф соответствует 5-му классу чистоты. В сечении поверхностных слоев металла видны окислы, микротвердость которых составляет 880 кг/мм^2 . Микротвердость нижележащих слоев за счет измельчения структуры достигает 350 кг/мм^2 .

Макроструктура и микрорельеф поверхности трения образцов, испытанных со скоростью 20 м/сек , такие же, как и при скорости 10 м/сек . Макроструктура поверхностных слоев характерна тем, что у поверхности трения находится слой отпущенного металла, микротвердость которого составляет $280\text{—}300 \text{ кг/мм}^2$. Микротвердость на глубине от 50 до 150 мк повышается до 580 кг/мм^2 вследствие закалки металла и образования на этой глубине твердых слоев окислов.

Поверхность трения образцов, испытанных со скоростью скольжения 75 м/сек , отличается более гладким рельефом, соответствующим 6-му классу чистоты (рис. 54, в). При трении образцов с этой скоростью выделяется большое количество тепла, достаточное для того, чтобы нагреть поверхностные слои металла до температуры, выше критической. В результате такого нагрева происходят структурные изменения на значительную глубину. В сечении поверхностных слоев (рис. 54, з) образуется структура троосто-мартенсита, микротвердость которой достигает 800 кг/мм^2 .

При испытании со скоростью скольжения 125 м/сек поверхность трения образцов покрывается сплошным слоем расплавленного металла, чистота поверхности соответствует 7-му классу (рис. 54, в). Макроструктура поверхностных слоев характеризуется наличием у поверхности слоя окисленного металла, ниже которого располагается слой металла со структурой троостита, еще ниже — со структурой мартенсита (рис. 54, з). В связи с образованием новых закалочных структур микротвердость поверхностных слоев значительно увеличивается, достигая 900 кг/мм^2 (рис. 54, д).

На поверхности трения закаленных образцов в диапазоне скоростей скольжения $0,025\text{—}1 \text{ м/сек}$ возникают окислительные процессы, интенсивность износа в условиях которых мала. В этом же диапазоне скоростей скольжения при испытании нормализованных образцов (сталь 45) возникает процесс схватывания 1-го рода. Это обуславливается тем, что закаленные образцы имеют значительно более высокую твердость и меньшую пластичность

по сравнению с нормализованными образцами и на их поверхностях трения сохраняются устойчивые, прочные пленки окислов, препятствующие развитию схватывания.

При скоростях скольжения выше 1 м/сек на поверхностях трения закаленных образцов (сталь У8) развивается с различной интенсивностью процесс схватывания 2-го рода. Интенсивность износа закаленных образцов в диапазоне скоростей от 10 до 100 м/сек меньше, чем у нормализованных образцов, а характер кривой интенсивности износа в зависимости от скорости скольжения остается прежним.

На рис. 55 представлен график зависимости интенсивности износа образцов из чугуна ХМ при испытании в паре с нормализованными дисками из стали 45 (кривая 1) и закаленными дисками из стали У8 (кривая 2) от скорости скольжения.

Анализ результатов испытаний показал, что в диапазоне скоростей скольжения 0,025—0,5 м/сек на поверхности трения развиваются окислительные процессы для случаев обеих пар. Интенсивность износа в этом диапазоне скоростей скольжения относительно небольшая.

В диапазоне скоростей скольжения 0,5—100 м/сек на поверхности трения чугуновых образцов развиваются с различной интенсивностью процессы схватывания 2-го рода. Обе кривые в этом диапазоне скоростей расположены близко одна к другой.

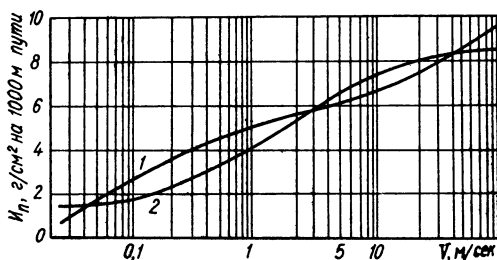


Рис. 55. График зависимости износа при трении без смазки чугуновых образцов по стальным дискам и удельного давления 25 кг/см² от скорости скольжения.

При трении чугуновых образцов в диапазоне скоростей скольжения 5—125 м/сек (рис. 56) по закаленному диску (сталь У8) коэффициент трения изменяется от 0,75 до 0,12 (кривая 1), а при трении по нормализованному диску (сталь 45) — от 0,5 до 0,2 (кривая 2). На рис. 57 показан график зависимости интенсивности износа образцов из бронзы Бр. АЖМц при испытании в паре с нормализованными дисками из стали 45 (кривая 2) и закаленными дисками из стали У8 (кривая 1) от скорости скольжения. В диапазоне скоростей скольжения от 0,025 до 2—3 м/сек на поверхности трения развиваются окислительные про-

цессы. Интенсивность износа в этом диапазоне скоростей скольжения небольшая, причем при трении бронзовых образцов по нормализованным стальным дискам она несколько больше, чем при трении по закаленным дискам.

В диапазоне скоростей скольжения выше 2—3 м/сек возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода, в этих условиях интенсивность износа резко возрастает, но до определенного значения скорости скольжения (порядка 20 м/сек). При более высоких скоростях скольжения интенсивность износа несколько уменьшается. Коэффициент трения во всем диапазоне скоростей находится в пределах от 0,54 до 0,03 (рис. 58).

Таким образом, исследование воспроизведенных в лабораторных условиях процессов схватывания металлов 1-го и 2-го рода, выявленных в деталях машин, показали, что изменение скорости скольжения и удельного давления при трении сопряженных тел в основном влияет на

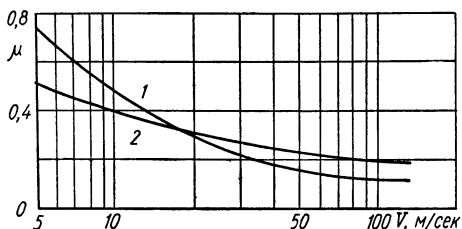


Рис. 56. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки чугуновых образцов по стальным дискам и удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения.

изменение температуры поверхностей трения, на характер и скорость деформации поверхностных слоев металла, а это приводит к коренным изменениям качественных характеристик металлов и поверхностных пленок, обуславливающих возникновение и развитие процессов схватывания.

Рис. 57. График зависимости приведенного износа при трении без смазки бронзовых образцов по стальным дискам и удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения.

Исследование влияния внешних механических воздействий на поверхность трения было бы неполным без рассмотрения влияния вибраций на возникновение и развитие процессов схватывания металлов при трении скольжения.

Вибрации способствуют интенсивному разрушению поверх-

ностей трения. Естественно, что изучение закономерностей развития процессов, происходящих на поверхностях сопряженных вибрирующих деталей при трении и износе, имеет большое научное и практическое значение.

В большинстве опубликованных работ, посвященных влиянию вибраций на различные процессы, лишь выясняются причины возникновения вибраций и рассматриваются мероприятия по их

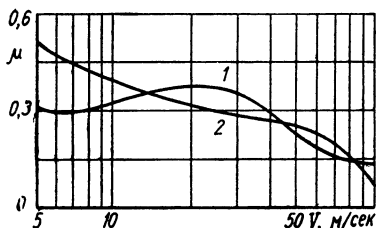


Рис. 58. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки бронзовых образцов (Бр. АЖМц) по стальным дискам и удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения:

1 — диски из стали У8; 2 — из стали 45.

устранению. Поэтому возникла необходимость исследовать, как влияют вибрации на развитие и разрушение защитных пленок, препятствующих образованию схватывания, а также как они влияют на процесс самого возникновения схватывания металлов с ювенильными поверхностями, полученными в результате разрушения пленок при трении.

Для изучения влияния вибраций на развитие процессов схватывания металлов были изготовлены установки, позволяющие создавать принудительную вибрацию

испытуемых образцов с частотой $20\text{—}200 \text{ гц}$ и амплитудой $0,05\text{—}1,0 \text{ мм}$ в трех направлениях: перпендикулярно к поверхности трения, параллельно поверхности трения вдоль образующей эталонного вала и по ходу его вращения.

Опыты проводились по описанной ранее методике (см. стр. 28) в различных условиях трения.

Первая серия опытов выполнена при трении без смазки цилиндрических нормализованных образцов (сталь 45) по эталонным нормализованным валам из той же стали и закаленным образцов по закаленным валам (сталь У8) в диапазоне изменения скоростей скольжения $0\text{—}10 \text{ м/сек}$ и при удельном давлении 25 кг/см^2 . Вибрация образцов осуществлялась вдоль образующей вала с амплитудой колебаний $0,2$ и $1,0 \text{ мм}$ и частотой 50 и 200 гц . На основании результатов испытаний построены графики зависимости приведенного износа образцов и коэффициента трения от скорости скольжения. Для сравнения на этих же графиках приведены кривые изменения износа и коэффициента трения от скорости скольжения для образцов, испытанных в аналогичных условиях трения, но без вибраций.

Графики зависимости приведенного износа и коэффициента трения образцов, испытанных при вибрациях с амплитудой ко-

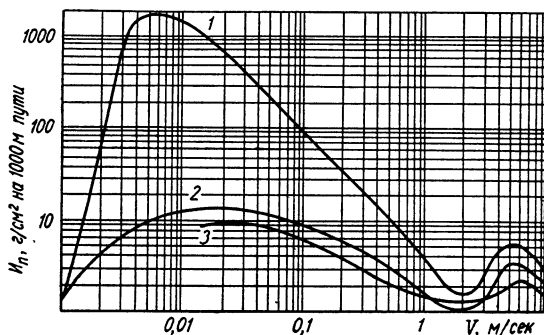


Рис. 59. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из нормализованной стали 45, удельном давлении 25 кг/см^2 и амплитуде колебаний $1,0 \text{ мм}$ от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 200 гц; 2 — 50 гц; 3 — без вибрации.

лебаний $1,0 \text{ мм}$ и частотой 50 и 200 гц, представлены на рис. 59 и 60, а результаты их качественного анализа — на рис. 61.

Анализ количественных и качественных характеристик процессов трения и износа при соответствующих скоростях скольжения и различных частотах колебаний образцов позволил установить, что вибрация не приводит к возникновению новых видов износа. Как и без нее, при вибрации возникают и развиваются три основных процесса: схватывание 1-го и 2-го рода и окислительный.

Однако вибрация образцов (особенно при больших ее значениях) вызывает значительную интенсификацию процессов в поверхностных слоях, особенно процессов схватывания 1-го рода и окислительного, а также

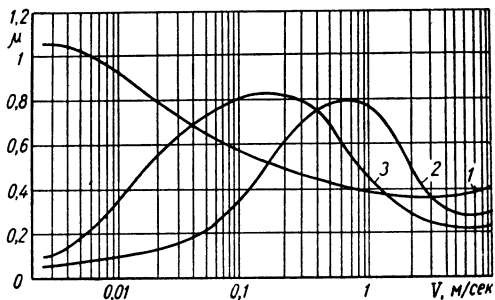
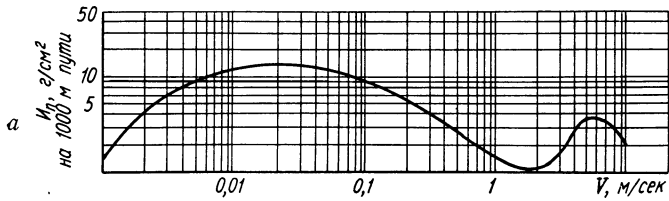


Рис. 60. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки образцов из нормализованной стали 45, удельном давлении 25 кг/см^2 и амплитуде колебаний $1,0 \text{ мм}$ от скорости скольжения:

1 — без вибрации; 2 — частота колебаний 50 гц; 3 — 200 гц.

изменение границ существования основных процессов и абсолютных значений износа и коэффициента трения. В диапазоне скоростей скольжения $0-0,0025 \text{ м/сек}$ при частоте колебаний 50 и 200 гц развиваются ярко выраженные окислительные процессы, которые приводят к относительно интенсивному износу образцов.



$V = 0,0025 \text{ м/сек}$

$V = 0,05 \text{ м/сек}$

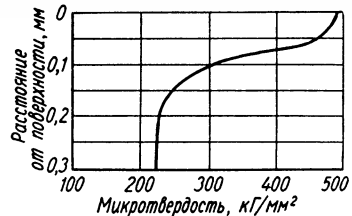
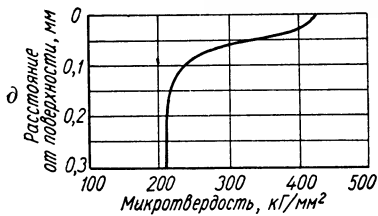
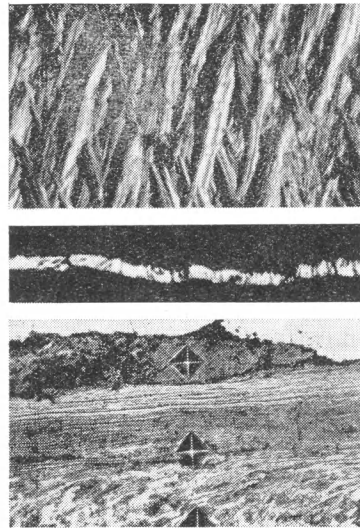
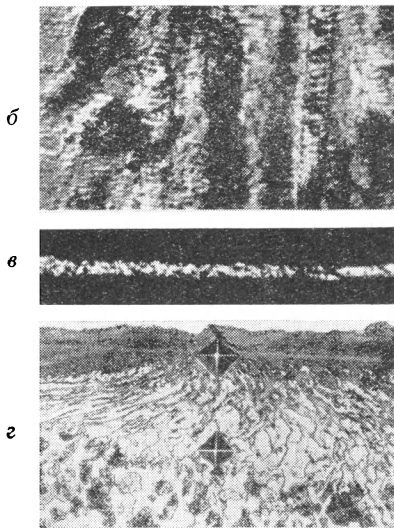


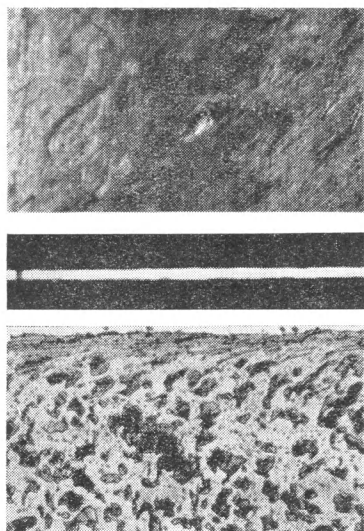
Рис. 61. Результаты испытаний при трении без смазки нормализованных образцов колебаний 200 гц:

а — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *в* — профи в сечении ($\times 300$); *д* — графики изменения микротвердости поверхностных слоев в сечении.

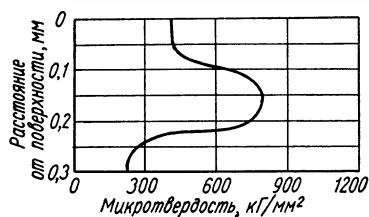
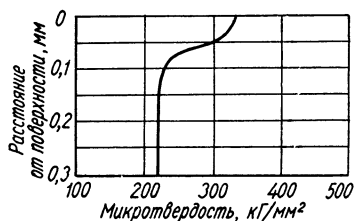
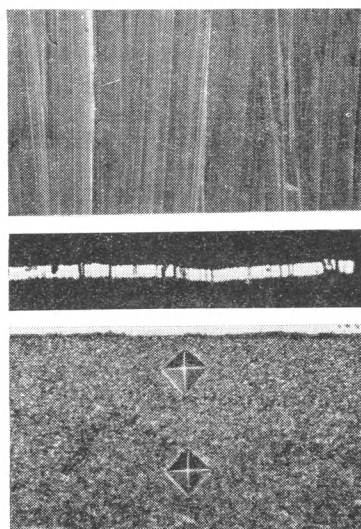
С увеличением скорости скольжения до 1 м/сек развивается процесс схватывания 1-го рода. В диапазоне скоростей 1—2 м/сек снова развиваются окислительные процессы и с дальнейшим увеличением скорости — процессы схватывания 2-го рода.

Отличительной особенностью результатов испытаний образцов в условиях вибраций является наличие двух зон развития арко выраженных окислительных процессов — в диапазоне очень

$V = 2$ м/сек



$V = 8$ м/сек



пов (сталь 45), удельном давлении 25 кг/см², амплитуде колебаний 1 мм и частоте 100 Гц. а — микрофотографии микрорельефа поверхностей (× 80); б — микрофотографии микроструктур поверхностных слоев

малых и средних скоростей скольжения. При отсутствии вибраций окислительные процессы развиваются обычно только в зоне средних скоростей скольжения.

Процесс схватывания 1-го рода в условиях вибраций развивается в более узком диапазоне скоростей скольжения, но со значительно большей интенсивностью, чем при отсутствии вибраций, и приводит к быстрому износу образцов, превышающему в 20—200 раз износ образцов, испытываемых без вибраций.

В условиях схватывания 2-го рода при вибрациях интенсивность износа образцов в 1,5—2,5 раза превышает интенсивность износа без вибраций.

Вибрация образцов оказывает существенное влияние на коэффициент трения (рис. 60). В условиях вибрации в зависимости от частоты колебаний изменяется как абсолютное значение коэффициента трения, так и характер изменения его от скорости скольжения.

Влияние вибраций особенно сказывается при малых скоростях скольжения. Так, в диапазоне скоростей 0—0,25 м/сек коэффициент трения в условиях вибрации увеличивается от 0,09 до 0,6 при частоте колебаний 50 гц и от 0,13 до 0,8 при частоте 200 гц. С увеличением скорости скольжения влияние вибраций на коэффициент трения снижается.

Примером характерных качественных изменений поверхностей трения образцов, испытанных в первой зоне (при малых скоростях) развития окислительных процессов, могут служить фотоснимки внешнего вида поверхностей трения и микроструктуры поверхностных слоев металлов в сечении, профилограммы поверхности трения и графики микротвердости поверхностных слоев в сечении (рис. 61).

На поверхности трения видны пленки окислов, следы продуктов износа в виде коричневого и черного порошков (рис. 61,б, $V = 0,0025$ м/сек). Микрорельеф поверхности трения соответствует 6-му классу чистоты (рис. 61,в). В поверхностном слое металла видны следы характерного пластического деформирования металла на глубину 175—180 мк и над деформированным металлом — пленка окислов (рис. 61,г). Твердость деформированного слоя увеличилась по сравнению с твердостью основной исходной структуры в два раза (рис. 61,д).

На поверхности трения образцов, испытанных в условиях схватывания 1-го рода, имеются характерные изменения в виде вырывов и налипания частиц металла и борозд по направлению движения образца (рис. 61,б, $V = 0,05$ м/сек). Микрорельеф по-

верхности в этих условиях испытаний соответствует 3—4-му классам чистоты (рис. 61,в). В поверхностных слоях металлов видны следы пластического деформирования металла на глубину 180 мк; на поверхности видны вырывы и налипание частиц металла (рис. 61,з). Микротвердость деформированного слоя достигает 500 кг/мм².

Образцы, испытанные во второй зоне (при средних скоростях скольжения) развития окислительного процесса, имеют изменения на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов, несколько отличающиеся от происходящих на поверхности трения образцов, испытанных в первой зоне развития окислительных процессов. Они гладкие, блестящие, местами серого и темно-коричневого цвета (рис. 61,б, $V = 2$ м/сек). Микрорельеф поверхности соответствует 6—7-му классам чистоты (рис. 61,в). В тонких поверхностных слоях сечения наблюдается пластическая деформация металла по направлению относительного перемещения образцов (рис. 61,з). Микротвердость деформированного слоя несколько увеличивается по сравнению с исходной структурой (рис. 61,д).

На поверхности трения образцов, испытанных в условиях схватывания 2-го рода при скорости 8 м/сек, видны следы размазанного, размягченного металла, ориентированные в направлении движения образца (рис. 61,б). Чистота поверхности соответствует 5-му классу (рис. 61,в). В результате воздействия высоких температур при трении структура поверхностных слоев представляет собой троостит (рис. 61,з). Микротвердость поверхностного слоя достигает 450—820 кг/мм².

Следующие опыты были проведены на образцах, подвергнутых вибрации с амплитудой колебаний 0,2 мм, при всех прочих одинаковых условиях. Результаты количественных зависимостей приведенного износа и коэффициента трения от скорости скольжения и частоты колебаний представлены на рис. 62 и 63.

Качественный анализ позволил установить ведущие процессы, развивающиеся на поверхности трения, и границы их существования во всем диапазоне изменения скоростей скольжения и частот колебаний образцов. Установлено, что вибрация с амплитудой колебания 0,2 мм не вызывает возникновения новых видов износа и существенно не влияет на интенсивность протекания ведущих процессов в поверхностных слоях образцов. Так же, как и в предыдущих опытах, возникает окислительный износ в диапазоне скоростей 0—0,0025 м/сек и процесс схватывания 1-го рода — при скоростях скольжения 0,0025 м/сек и выше — до

1 м/сек. Дальнейшее чередование видов износа происходит в тех же границах по скорости скольжения, что и при вибрации образцов с амплитудой 1 мм (рис. 59). При изменении амплитуды

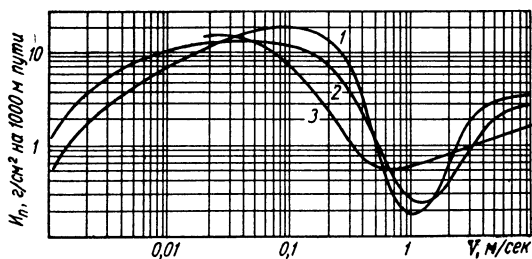
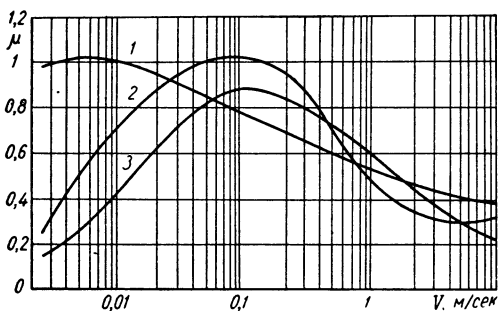


Рис. 62. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из нормализованной стали 45, удельном давлении 25 кг/см² и амплитуде колебаний 0,2 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 200 гц; 2 — 50 гц; 3 — без вибрации.

колебаний с 1,0 на 0,2 мм значительно уменьшается износ образцов, который при вибрации 0,2 мм приближается к износу образцов, испытанных без вибрации.

Последующие опыты были проведены для выяснения влияния материала пары трения на развитие процессов схватывания при трении без смазки в условиях вибрации образца с частотой колебаний 50 и 200 гц и амплитудой 0,2 и 1 мм в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—10 м/сек.



Испытуемые образцы и эталонный вал были изготовлены из закаленной стали У8.

Рис. 63. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки образцов из нормализованной стали 45, удельном давлении 25 кг/см² и амплитуде колебаний 0,2 мм от скорости скольжения:

1 — без вибрации; 2 — частота колебаний 50 гц; 3 — 200 гц.

Результаты исследования изменений в поверхностных слоях образцов показали, что вибрация существенно влияет на характеристики процессов трения и износа закаленных образцов. Так, в диапазоне скоростей 0,0025—0,5 м/сек при трении без

вибраций развивается окислительный процесс с очень малой интенсивностью износа образцов (рис. 64, кривая 3). В тех же условиях трения, но при вибрации образцов с амплитудой коле-

баний 1,0 мм в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,25 м/сек развивается процесс схватывания 1-го рода, который приводит к интенсивному износу поверхностей трения. В диапазоне скоростей скольжения 0,25—0,5 м/сек развивается окислительный процесс, вызывающий интенсивный износ образцов, значительно превышающий износ при трении без вибраций. При скорости скольжения выше 0,5 м/сек развивается процесс схватывания 2-го рода в таких же границах скоростей скольжения, как при трении без вибраций. Интенсивность износа образцов при этом в 2—4 раза превышает интенсивность износа образцов при трении в этих же условиях, но без вибраций.

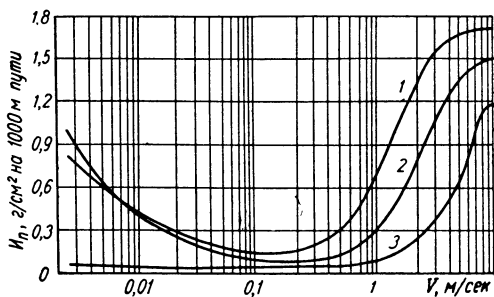


Рис. 64. График зависимости приведенного износа образцов из закаленной стали У8 при трении без смазки, удельном давлении 25 кг/см² и амплитуде колебаний 1,0 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 50 гц; 2 — 200 гц; 3 — без вибрации.

Вибрации оказывают существенное влияние на коэффициент трения, особенно при малых скоростях скольжения. Так, при скоростях скольжения, близких к 0,005 м/сек, без вибраций коэффициент трения находится в пределах 0,9—1,0 (рис. 65), и на поверхностях трения протекает окислительный процесс. Вибрации образца приводят к значительному снижению коэффициента трения — до 0,09—0,12, т. е. в 10 раз, при одновременном резком увеличении износа в условиях интенсивного развития процесса схватывания 1-го рода. С увеличением скорости скольжения

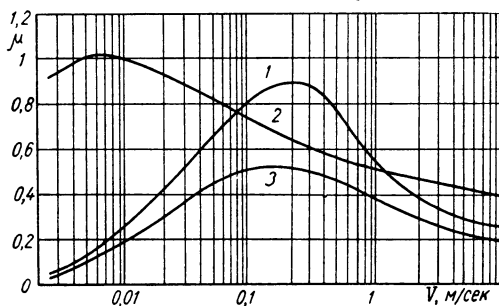


Рис. 65. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки образцов из закаленной стали У8, удельном давлении 25 кг/см² и амплитуде колебаний 1,0 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 50 гц; 2 — без вибрации; 3 — 200 гц.

трения, особенно при малых скоростях скольжения. Так, при скоростях скольжения, близких к 0,005 м/сек, без вибраций коэффициент трения находится в пределах 0,9—1,0 (рис. 65), и на поверхностях трения протекает окислительный процесс. Вибрации образца приводят к значительному снижению коэффициента трения — до 0,09—0,12, т. е. в 10 раз, при одновременном резком увеличении износа в условиях интенсивного развития процесса схватывания 1-го рода. С увеличением скорости скольжения

са схватывания 1-го рода. С увеличением скорости скольжения

коэффициент трения при вибрациях образцов увеличивается, а при трении без вибраций — несколько снижается.

При вибрации образцов с амплитудой колебаний 0,2 мм

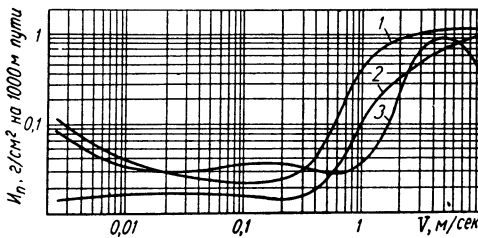


Рис. 66. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из закаленной стали У8, удельном давлении 25 кг/см^2 и амплитуде колебаний 0,2 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 50 гц; 2 — без вибрации; 3 — 200 гц.

колебаний 0,2 мм не вносит существенных изменений в развитие процесса схватывания 2-го рода и не оказывает большого влияния на изменение коэффициента трения во всем диапазоне изменений скоростей скольжения (рис. 67).

Во второй серии опытов изучалось влияние вибраций с различной частотой и амплитудой колебаний на закономерности развития процесса трения и износа в условиях граничной смазки. Испытания проводились в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—10 м/сек при удельном давлении 100 кг/см^2 .

Испытывались нормализованные образцы из стали 45 при трении в условиях граничной смазки (масло МС-20) и вибрации с амплитудой колебаний 0,2 и 1,0 мм и частотой колебаний 50 и 200 гц вдоль образующей вала.

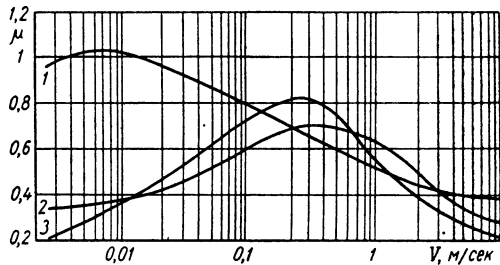


Рис. 67. График зависимости коэффициента трения при испытании без смазки образцов из закаленной стали У8, удельном давлении 25 кг/см^2 и амплитуде колебаний 0,2 мм от скорости скольжения:

1 — без вибрации; 2 — частота колебаний 50 гц; 3 — 200 гц.

На основании данных, полученных при испытаниях, были построены кривые зависимостей приведенного износа образцов (рис. 68 и 69), и коэффициента трения (рис. 70 и 71) от изменения скорости скольжения, частоты и амплитуды колебаний.

Изучение качественных изменений поверхностных слоев образцов, испытанных при соответствующих скоростях скольжения и различных частотах колебаний образца, позволило определить ведущие процессы, развивающиеся в условиях опыта, и закономерности их развития.

Установлено, что в диапазоне малых скоростей скольжения (0,0025—0,25 м/сек) происходит взаимодействие масел и кислорода воздуха с металлом поверхностей трения, возникают физико-химические процессы, способствующие образованию защитных пленок, которые препятствуют схватыванию сопряженных поверхностей. Ведущим в этих условиях является окислительный процесс с относительно небольшой интенсивностью износа

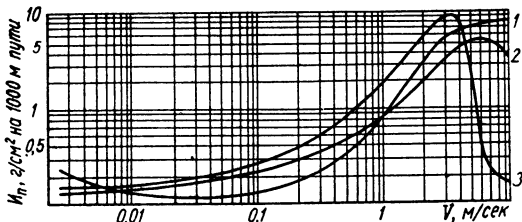


Рис. 68. График зависимости приведенного износа образцов из нормализованной стали 45 при трении в условиях граничной смазки (МС-20), удельном давлении 100 кг/см² и амплитуде колебаний 1,0 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 50 гц; 2 — без вибрации; 3 — 200 гц.

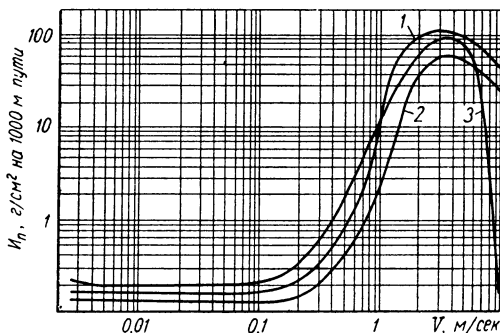


Рис. 69. График зависимости приведенного износа образцов из нормализованной стали 45 при трении в условиях граничной смазки (МС-20), удельном давлении 100 кг/см² и амплитуде колебаний 0,2 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 200 гц; 2 — без вибрации; 3 — 50 гц.

процессов трения и износа по сравнению с испытаниями без вибраций. Коэффициент трения на всех режимах вибраций в этом диапазоне скоростей имеет малую величину.

При скорости 0,25—0,5 м/сек окислительный процесс переходит в схватывание 2-го рода, а коэффициент трения значительно увеличивается (рис. 70 и 71). С дальнейшим повышением скорости до 3—5 м/сек на поверхности трения интенсивно развивается процесс схватывания 2-го рода, и под действием высоких температур масло теряет свои смазочные защитные свойства. Образуются металлические контакты поверхностей пар трения; Коэффициент трения достигает своего максимального значения,

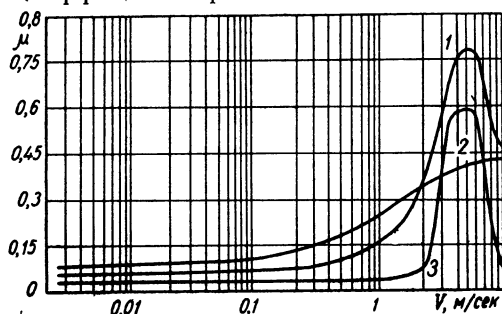


Рис. 70. График зависимости коэффициента трения при испытании в условиях граничной смазки (МС-20) образцов из нормализованной стали 45, удельном давлении 100 кг/см² и амплитуде колебаний 1,0 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 50 гц; 2 — без вибрации; 3 — 200 гц

причем на его абсолютную величину вибрации оказывают существенное влияние, особенно при большой амплитуде колебаний (1,0 мм). Так, если коэффициент трения образца при испытании без вибраций со скоростью скольжения 5 м/сек достигает в абсолютном значении 0,4, то при колебании с частотой 50 гц и амплитудой 1,0 мм коэффициент трения возрастает до 0,78.

В диапазоне скоростей скольжения от 5 м/сек и выше интенсивность износа пар трения несколько падает, процесс схватывания 2-го рода тормозится и переходит в более сложные физико-химические процессы. При вибрации с частотой 200 гц и амплитудой 1,0 мм, начиная со скорости 4 м/сек, износ резко уменьшается (рис. 68, кривая 3). В этих же условиях значительно уменьшается коэффициент трения (рис. 70, кривая 3).

При вибрации с амплитудой колебания 0,2 мм износ снижается при скоростях 5—6 м/сек и его минимальная величина наблюдается при скорости 10 м/сек (рис. 69). Однако интенсивность снижения износа в этом случае значительно меньше, чем при вибрации с амплитудой 1,0 мм.

Таким образом, результаты лабораторных исследований показывают, что основными факторами, обуславливающими возникновение и развитие процессов схватывания металлов, являются наличие или отсутствие на поверхности трения прочных

защитных пленок, а также склонность сопряженных тел к взаимному образованию металлических связей. Существенное влияние на эти факторы оказывают вибрации.

Роль вибраций в образовании и развитии защитных пленок двоякая. С одной стороны, вибрации в определенных условиях трения вызывают повышение температуры на сопряженных поверхностях и этим способствуют интенсивному развитию защитных пленок, а значит препятствуют образованию схватывания.

С другой стороны, знакопеременные воздействия вибраций на поверхности трения приводят к интенсивному разрушению защитных пленок и образованию металлических контактов между сопряженными поверхностями, что способствует схватыванию металлов.

Вибрации оказывают существенное влияние на количественные и качественные характеристики процессов трения и износа, особенно на закономерности развития ведущих процессов схватывания металлов. В определенных условиях трения они приводят к интенсификации развития процессов схватывания металлов, изменению границ их существования и критических точек перехода одних ведущих процессов в другие, вызывают повышенный износ поверхностей трения и существенно изменяют характер и абсолютные значения коэффициента трения.

В диапазоне частоты колебаний 50—200 гц, амплитуды 0,2—1 мм и скорости скольжения 0—10 м/сек при испытании без смазки вибрации сопряженных тел приводят к интенсивному развитию процессов схватывания 1-го рода, при этом износ поверхностей трения образцов иногда в сотни раз превышает износ образцов, испытанных без вибраций.

Вибрации повышают также интенсивность развития процессов схватывания 2-го рода, при этом интенсивность износа поверхностей трения образцов в несколько раз превышает интенсивность износа образцов, испытанных без вибраций.

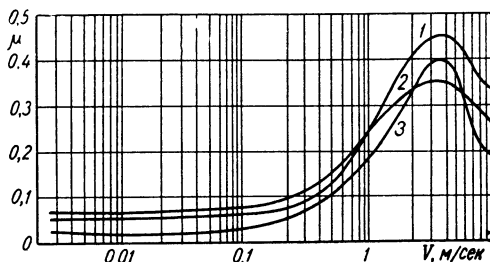


Рис. 71. График зависимости коэффициента трения при испытании в условиях граничной смазки (МС-20) образцов из нормализованной стали 45, удельном давлении 100 кг/см² и амплитуде колебаний 0,2 мм от скорости скольжения:

1 — частота колебаний 200 гц; 2 — без вибрации; 3 — 50 гц.

При работе закаленных образцов с высокой твердостью поверхностей трения в условиях вибраций в диапазоне малых скоростей скольжения возникает и интенсивно развивается процесс схватывания 1-го рода. В этих же условиях трения, но без вибраций, развиваются только окислительные процессы.

В условиях граничной смазки вибрации образцов не оказывают существенного влияния на изменение закономерностей развития ведущих процессов, возникающих при трении. Как при вибрации образцов, так и без нее в диапазоне малых и средних скоростей скольжения развиваются окислительные процессы с малой интенсивностью износа. Это объясняется тем, что вибрации с выбранной частотой и амплитудой не разрушают жидкой смазочной пленки, которая препятствует металлическому контакту, образованию схватывания. С увеличением скорости скольжения окислительные процессы переходят в процесс схватывания 2-го рода. Границы существования и интенсивность развития процессов окисления и схватывания 2-го рода в условиях граничной смазки при вибрации образцов и без нее имеют примерно равные значения.

Вибрация способствует снижению коэффициента трения, особенно в условиях малых скоростей скольжения.

Изменение частоты и амплитуды колебания образцов своеобразно влияет на закономерности развития процессов трения и износа. Чем больше частота и амплитуда колебаний, тем большее влияние оказывает вибрация на изменение закономерностей развития процессов трения и износа.

Изменение количественных и качественных закономерностей развития процессов трения и износа, в том числе и процессов схватывания металлов, в условиях вибраций связано с видоизменением характера приложения нормальных и тангенциальных усилий. Вибрации вызывают динамический и знакопеременный характер приложения этих сил, а это приводит к изменению величины удельных давлений на поверхности контакта, скорости и характера деформации поверхностных слоев металла, увеличение скорости разрушения адсорбированных защитных пленок на поверхности металлов, изменениям характера разрушения узлов схватывания металлов, фактического пути относительного перемещения поверхностей двух сопряженных тел и скорости относительного скольжения. Все это, естественно, оказывает влияние на физические, химические и механические процессы, возникающие на поверхностях трения и в поверхностных слоях металлов.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ

Как известно из работ П. А. Ребиндера [98], В. Д. Кузнецова [78], В. С. Щедрова [124], А. М. Даниеляна [24], значительная часть работы трения превращается в теплоту и только незначительная ее часть расходуется на внешнее диспергирование и другие виды остаточных явлений. В. Д. Кузнецов [79] установил, что если деформирование при трении происходит при температуре, превышающей температуру рекристаллизации, то металл не наклепывается, и вся энергия пластического деформирования превращается в тепловую, сосредоточивающуюся в тонких слоях, вблизи поверхностей трения. Поэтому температура в местах контакта может достигать высоких значений даже при небольших нагрузках и скоростях. С повышением скорости деформирования и нагрузки тепловой эффект проявляется более ярко, так как выделяемое тепло не успевает отводиться и рассеиваться в окружающую среду. Повышение температуры способствует, по мнению многих исследователей, возникновению процессов схватывания.

В том случае, если наблюдаются кратковременные температурные вспышки, способность металлов к схватыванию может уменьшаться. При этом происходит выглаживание [120], а затем закалка поверхностей. Вследствие увеличения наклепа уменьшается пластичность и степень внедрения одного металла в другой.

Ф. Боуден и Д. Тейбор [130], исследуя влияние тепловых явлений на протекание процессов при трении, пришли к выводу, что на сопряженных поверхностях трения могут возникать очень высокие температуры даже при умеренных нагрузках и скоростях. Эти температуры локализуются в точках фактического контакта, положение которых с течением времени изменяется вследствие изнашивания выступов и замены их новыми.

Большое влияние на градиент температуры в точках контакта оказывает теплопроводность металла: с повышением ее — температура в точках контакта понижается.

У многих металлов при повышении температуры поверхности создаются условия для соответствующего изменения градиента механических свойств: понижается прочность и повышается пластичность.

Б. И. Костецкий [52] считает, что тепловой износ вызывается нагревом поверхностных слоев трущихся металлов. Разрушение

при тепловом износе происходит вследствие размягчения поверхностных слоев контактного схватывания, смятия и налипания металла. Тепловые явления в дальнейшем становятся причиной увеличения температуры на поверхности трения. Абсолютные значения температуры определяются скоростью скольжения, а глубина поверхностных слоев, охваченных действием высокой температуры, — величиной удельного давления при трении. При достижении определенной температуры процессы схватывания могут прекратиться ввиду образования тонкой пленки расплавленного металла и его окисления. Тогда износ, несмотря на дальнейшее увеличение скорости скольжения и температуры, становится постоянным.

По наблюдениям Л. А. Чатыняна [116], испытывавшего образцы из различных материалов в диапазоне температур от 20 до 700° С, при высоких температурах возникают пленки, которые способствуют уменьшению величины износа и коэффициента трения. Испытания в вакууме и в нейтральных средах подтвердили положительную роль пленок при трении.

Г. Финч [136, 138] высказал мнение о том, что с повышением температуры плавления металлов склонность их к схватыванию уменьшается. Однако А. П. Семенов [103] установил, что температура плавления исследуемого тела не определяет его противозадирных свойств.

Таким образом, авторы перечисленных работ приходят к единому выводу, что температура поверхности трения оказывает существенное влияние на развитие процессов схватывания, хотя результаты многих работ не отражают существа явлений, происходящих при трении и износе металлов в различных температурных условиях [91]. Недостаточно освещается роль отрицательных температур в развитии процессов схватывания металлов при трении, отсутствует анализ качественных закономерностей этих процессов.

Как уже отмечалось, основными качественными характеристиками, обуславливающими возникновение и развитие процессов схватывания, является наличие или отсутствие на поверхности трения защитных пленок и склонность сопряженных тел к взаимному образованию металлических связей — к схватыванию. Тепловые явления в зоне трения весьма своеобразно влияют как на первый, так и на второй фактор.

Для изучения влияния температуры на закономерности развития процессов схватывания металлов автором были проведены лабораторные испытания в широком диапазоне ее изменений

при трении без смазки в интервале скоростей скольжения 0,0025—5 м/сек.

Перед началом опытов проводился принудительный нагрев или охлаждение испытуемых образцов до заданной температуры, которая поддерживалась в течение всего времени опыта.

При изменении скоростей скольжения и удельных давлений в результате работы трения поверхности нагреваются с различной интенсивностью. Поэтому принудительный нагрев или охлаждение сопряженных поверхностей в различных условиях трения позволили выяснить роль температуры в возникновении и развитии процессов схватывания.

С помощью специальных установок (рис. 16 и 17) испытывались образцы, предварительно нагретые или охлажденные до заданной температуры.

Исследованию подвергались образцы кольцевого типа с наружным диаметром 48 и внутренним 42,3 мм. Взаимное трение колец осуществлялось по торцовым поверхностям. Применение образцов кольцевого типа дало возможность исключить нежелательные явления врезания и волочения на поверхности трения и создать одинаковый температурный режим на обоих образцах пары трения. Наконечники штоков, на которых монтировались образцы, состояли из двух частей, разделенных теплоизоляционными асбоцементными дисками, для получения замкнутого температурного контура, изолированного от металлических масс испытательной машины. Металлические массы подбирались также с таким расчетом, чтобы их теплоемкость и интенсивность теплоотдачи во время испытания были одинаковыми, ибо в процессе опытов температура поверхностей при трении значительно изменяется, так как истинная температура поверхностей трения состоит из температуры, полученной образцами принудительно от внешнего источника тепла, и температуры, аккумулируемой на поверхности трения в результате работы трения. Температура образцов контролировалась с помощью искусственных микропар.

В первой серии опытов изучались количественные и качественные закономерности развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода в среде воздуха, при трении без смазки, на нормализованных образцах из стали 45, при удельном давлении 15 кг/см², в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—5 м/сек, при принудительном охлаждении образцов до —100° С, при комнатной температуре 20° С и при принудительном нагреве до 200, 400 и 600° С.

Анализ количественных и качественных изменений позволил определить границы возникновения и интенсивность развития ведущих процессов, критические точки перехода одних процессов в другие.

График изменения суммарного приведенного износа двух сопряженных образцов с различной степенью предварительного нагрева или охлаждения от скорости скольжения представлен на рис. 72.

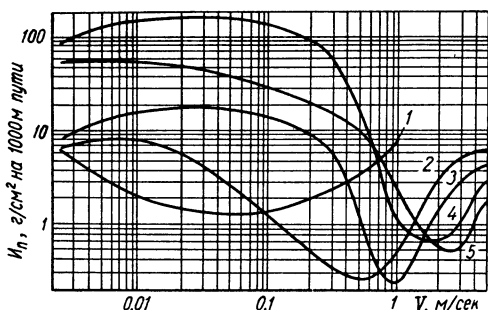


Рис. 72. График зависимости приведенного суммарного износа нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде воздуха, удельном давлении 15 кг/см^2 от скорости скольжения и температуры предварительного нагрева или охлаждения образцов:

1 — при 600°C ; 2 — 400°C ; 3 — 200°C ; 4 — 20°C ; 5 — -100°C .

Кривой 1 характеризуется изменение интенсивности износа образцов, предварительно нагретых до температуры 600°C . Установлено, что в диапазоне скоростей скольжения $0,0025-1 \text{ м/сек}$ на поверхностях трения интенсивно развивается процесс схватывания 2-го рода. В интервале скоростей $0,0025-0,05 \text{ м/сек}$ интенсивность износа несколько уменьшается, достигая минимума при скорости $0,05 \text{ м/сек}$. При скоростях

скольжения сверх $0,05 \text{ м/сек}$ интенсивность износа увеличивается. Такой характер изменения интенсивности износа, вероятно, связан со скоростью пластического деформирования в различной степени разупрочненного металла. При скоростях выше 1 м/сек зачетные опыты не проводились, так как происходит интенсивное разупрочнение металла под действием высоких температур и объемного разрушения образцов.

В диапазоне скоростей скольжения до $0,25 \text{ м/сек}$ температура поверхностей трения увеличивается в результате работы трения на $30-100^\circ \text{C}$ и составляет $630-750^\circ \text{C}$. С дальнейшим увеличением скоростей скольжения температура на поверхностях трения достигает $980-1000^\circ \text{C}$ (рис. 73, кривая 1), а коэффициент трения при этом повышается с $0,62$ до $0,89$ (рис. 74, кривая 1).

Кривой 2 (рис. 72) характеризуется интенсивность износа образцов, предварительно нагретых до температуры 400°C .

В диапазоне скоростей скольжения $0,0025-0,5 \text{ м/сек}$ на по-

верхностях трения развиваются окислительные процессы, при этом температура их находится в пределах 420—560° С (рис. 73, кривая 2).

По мере увеличения скоростей от 0,0025 до 0,5 м/сек интенсивность износа значительно снижается, что объясняется увеличением интенсивности окислительных процессов с повышением температуры. Значения коэффициента трения в этом диапазоне скоростей находятся в пределах 0,42—0,55 (рис. 74, кривая 2).

В диапазоне скоростей 0,5—5 м/сек происходит интенсивное повышение температуры на поверхностях трения (рис. 73, кривая 2). В связи с этим очень разупрочняется металл поверхностных слоев образца и резко увеличивается интенсивность износа (рис. 72, кривая 2). Ведущим процессом в этом диапазоне скоростей является процесс схватывания 2-го рода. Коэффициент трения возрастает до 0,65.

Кривой 3 (рис. 72) характеризуется интенсивность износа поверхностей трения образцов, предварительно нагретых до 200° С. Начиная с наименьших скоростей скольжения до скорости 1 м/сек развиваются с разной интенсивностью окислительные процессы. В этом диапазоне скоростей температура поверхностей трения соответствует 250—540° С (рис. 73, кривая 3). При изменении скорости скольжения от 0,0025 до 0,25 м/сек интенсивность износа относительно мало изменяется, затем до скорости 1 м/сек происходит более интенсивное повышение температуры поверхностей трения, в связи с чем значительно увеличивается интенсивность процессов окисления; износ образцов резко уменьшается. Коэффициент трения в этом диапазоне скоростей скольжения находится в пределах 0,72—0,6 (рис. 74, кривая 3).

В диапазоне скоростей скольжения 1—5 м/сек на поверхностях трения сопряженных образцов развивается процесс схваты-

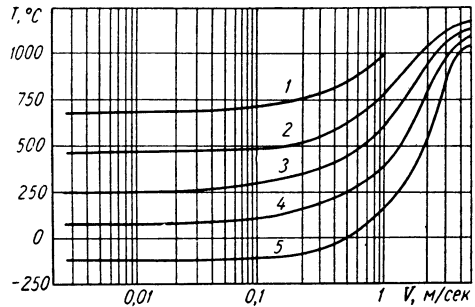


Рис. 73. График зависимости температуры на поверхности трения нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде воздуха, удельном давлении 15 кг/см² от скорости скольжения и температуры предварительного нагрева или охлаждения образцов:

1 — при 600° С; 2 — 400° С; 3 — 200° С; 4 — 20° С; 5 — -100° С.

вания 2-го рода, интенсивность которого возрастает с увеличением скорости и температуры (рис. 73, кривая 3). Коэффициент трения в этом диапазоне скоростей скольжения колеблется от 0,6 до 0,43 (рис. 74, кривая 3).

Интенсивность износа образцов, имеющих в начале опыта комнатную температуру (20° С), характеризуется кривой 4 (рис. 72). В этих опытах наблюдались все три ведущих процесса, возникающие при трении скольжения: схватывание 1-го рода,

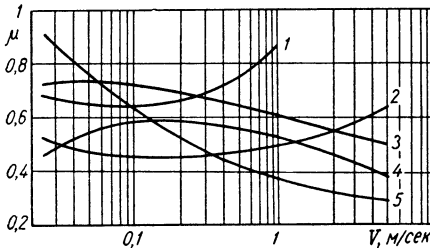


Рис. 74. График зависимости коэффициента трения при испытании нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде воздуха, удельном давлении 15 кг/см² от скорости скольжения и температуры предварительно нагрева или охлаждения образцов:

1 — при 600° С; 2 — 400° С; 3 — 200° С; 4 — 100° С; 5 — 20° С.

коэффициента трения в этом диапазоне скоростей изменяется от 0,9 до 0,4 (рис. 74, кривая 5).

При скоростях скольжения выше 0,5 м/сек возрастает температура на поверхностях трения, в диапазоне скоростей 0,5—2 м/сек ведущими становятся окислительные процессы, интенсивность износа снижается. Коэффициент трения в этом диапазоне скоростей колеблется от 0,4 до 0,35 (рис. 74, кривая 5).

В диапазоне скоростей скольжения 2—5 м/сек интенсивно развивается процесс схватывания 2-го рода. Температура поверхностей трения в этом диапазоне скоростей увеличивается от 760 до 1140° С (рис. 73, кривая 4), а величина коэффициента трения уменьшается от 0,35 до 0,30 (рис. 74, кривая 5).

Кривой 5 (рис. 72) характеризуется интенсивность износа поверхностей трения образцов, предварительно охлажденных до

окислительный и схватывание 2-го рода.

Процесс схватывания 1-го рода развивается в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,5 м/сек. Интенсивность износа до скорости скольжения 0,25 м/сек изменяется незначительно, при этом температура поверхностей трения достигает 40—180° С (рис. 73, кривая 4). Затем интенсивность износа резко снижается, так как усиливается роль окислительных процессов с повышением температуры до 250° С при скорости скольжения 0,5 м/сек. Величина

—100° С. Необходимо отметить, что отрицательная температура удерживалась только до скорости 0,5 *м/сек*, несмотря на то, что в течение всего опыта производилось принудительное охлаждение образцов с прежней интенсивностью. С увеличением скорости скольжения температура на поверхностях трения постепенно повышается и при скорости 5 *м/сек* достигает 1020° С. Процесс схватывания 1-го рода возникает и развивается в диапазоне скоростей 0,0025—1 *м/сек*. Температура поверхностей трения при этом изменяется от —100 до 180° С (рис. 73, кривая 5), а значения коэффициентов трения находятся в пределах от 0,45 до 0,58 (рис. 74, кривая 4).

В диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,25 *м/сек* в условиях отрицательных температур (от —100 до —40° С) наряду с развитием ведущего процесса схватывания 1-го рода развиваются с небольшой интенсивностью сопутствующие окислительные процессы.

Интенсивность износа в условиях схватывания 1-го рода с увеличением отрицательных температур повышается несмотря на увеличение прочности металла, это объясняется в основном хладноломкостью металла. Низкая удельная вязкость и высокая степень хрупкости при таких температурах благоприятствуют интенсивному механическому диспергированию поверхностей трения. С этой точки зрения становится понятным вид части кривой, соответствующей скоростям скольжения 0,0025—0,5 *м/сек* и, следовательно, температурному интервалу от —100 до 0° С, где наблюдается уменьшение интенсивности износа с увеличением температуры, т. е. по мере уменьшения степени хладноломкости металла. При скорости выше 1 *м/сек* в связи с развитием окислительных процессов интенсивность процессов схватывания и износ резко уменьшаются. Коэффициент трения понижается от 0,5 при скорости скольжения 1,0 *м/сек* до 0,4 при скорости скольжения 5 *м/сек* (рис. 74, кривая 4).

В диапазоне скоростей 1—5 *м/сек* интенсивно повышается температура поверхностей трения. В связи с этим на поверхностях трения преобладают окислительные процессы, которые при скоростях выше 2 *м/сек* переходят в процессы схватывания 2-го рода.

Результаты испытаний подтверждают, что температура является основным фактором, обуславливающим границы возникновения и интенсивность развития ведущих процессов, возникающих при трении скольжения. Нагрев или охлаждение поверхностей трения с различной интенсивностью приводят к рез-

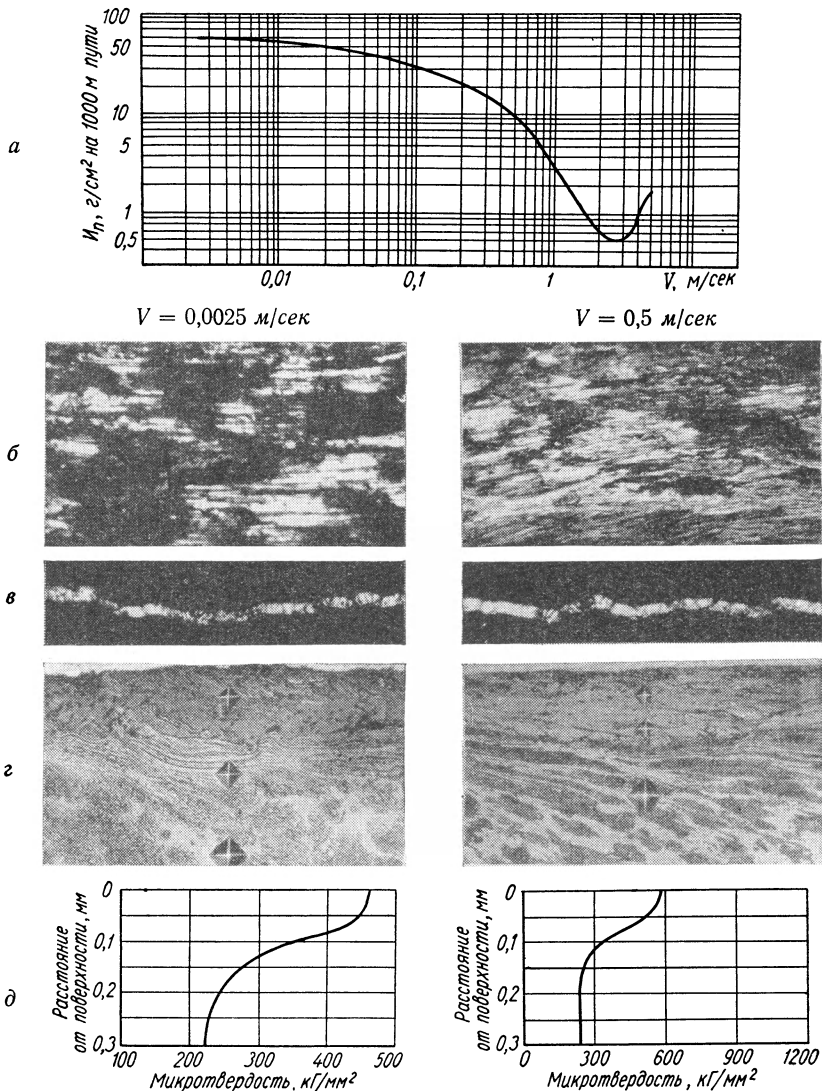


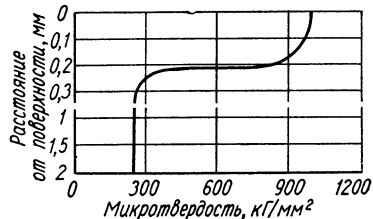
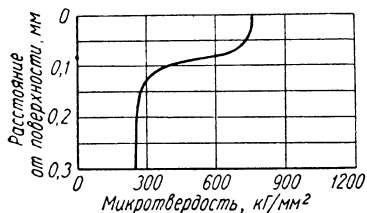
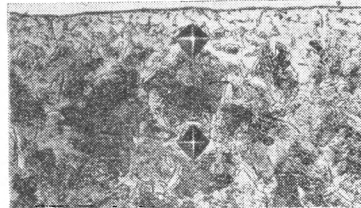
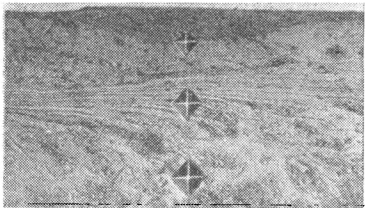
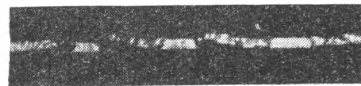
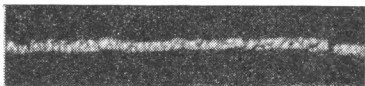
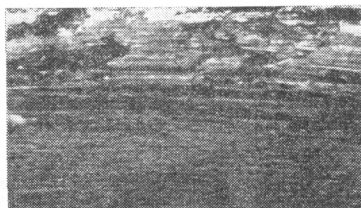
Рис. 75. Результаты испытаний нормализованных образцов из стали 45 при предварительном охлаждении — 100°C и при различных скоростях скольже
a — график приведенного суммарного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$);
 слоев в сечении ($\times 300$); *г* — графики изменения микротвердости поверхностных слоев

кому изменению физико-химических и механических свойств металлов.

Таким образом, изменяя температуру при прочих равных условиях, можно вызывать или изменять ведущие процессы на поверхностях трения, изменять критические точки перехода одних процессов в другие. Так, например, процесс схватывания 1-го рода при охлаждении образцов до -100°C развивается в диапазоне скоростей скольжения $0,0025-1 \text{ м/сек}$; при нагреве образцов до комнатной температуры — в интервале $0,0025-0,5 \text{ м/сек}$; при

$V = 1 \text{ м/сек}$

$V = 5 \text{ м/сек}$



трении без смазки в среде воздуха, удельном давлении 15 кг/см^2 , температуре ния:

v — профилограммы поверхностей трения ($\times 80$); z — микроструктуры поверхностных в сечении.

нагреве образцов до 200 и 400° С процесс схватывания 1-го рода не возникает, он вытесняется окислительным процессом.

Процесс схватывания 2-го рода в зависимости от степени предварительного нагрева или охлаждения образцов развивается в таких диапазонах скоростей скольжения: при охлаждении образцов до —100° С и при комнатной температуре — от 2 до 5 *м/сек*; при нагреве образцов до 200° С — от 1 до 5 *м/сек*; при нагреве образцов до 400° С — от 0,5 до 5 *м/сек*; при нагреве образцов до 600° С — от 0,0025 *м/сек* и выше. То есть с ростом температуры границы возникновения и развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода резко сдвигаются в сторону меньших скоростей скольжения.

Ведущие процессы, их границы и критические точки перехода удобно определять с помощью металлоструктурного анализа. При испытании образцов, предварительно охлажденных до температуры —100° С, установлено, что в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—1 *м/сек* развивается с различной интенсивностью ведущий процесс схватывания 1-го рода и, кроме того, при скорости 0,0025 *м/сек* — сопутствующий окислительный процесс. На поверхностях трения наряду с характерными признаками схватывания — следами вырывов и налипания металла, видны следы черного порошка окислов (рис. 75,б). Микрорельеф поверхности соответствует 4-му классу чистоты (рис. 75,в), в сечении видны следы пластической деформации поверхностного слоя металла на глубину 180—200 *мк* (рис. 75,д). Микротвердость деформированного поверхностного слоя повышается до 480 *кГ/мм²*.

Образцы, исследованные при скорости скольжения 0,5 *м/сек*, характеризуются изменением поверхностей трения и поверхностных слоев металла, соответствующим схватыванию 1-го рода. На поверхностях трения имеются шероховатые неровности, следы вырывов и налипания частиц металла (рис. 75,б). Микрорельеф поверхности соответствует 3-му классу чистоты (рис. 75,в), в сечении видны следы пластической деформации на глубину 100—150 *мк* (рис. 75,г). Микротвердость поверхностного слоя увеличивается в 2—2,5 раза относительно микротвердости исходной структуры (рис. 75,д).

В интервале скоростей 1—2 *м/сек* на поверхностях трения развиваются окислительные процессы. На более гладкой поверхности видны окислы (рис. 75,б). Микрорельеф поверхности соответствует 6-му классу чистоты (рис. 75,в). В поверхностных слоях металла видны слой окислов и следы пластической деформации (рис. 75,г). Микротвердость достигает 700 *кГ/мм²*.

Изменения, происшедшие на поверхности трения образцов, испытанных при скорости скольжения 5 м/сек, характерны для схватывания 2-го рода. На поверхности образцов видны следы размазывания разупрочненного металла по направлению движения (рис. 75,б). Микрорельеф поверхности соответствует 5-му классу чистоты (рис. 75,в). В поверхностном слое металла под действием высоких температур произошло структурное изменение. Структура представляет собой сорбит закалки (рис. 75,г). Микротвердость поверхностного слоя достигает 1100 кг/мм².

Испытания образцов, имеющих комнатную температуру и предварительно нагретых до 200, 400 и 600° С, подтверждают, что ведущими являются окислительный процесс и схватывание 2-го рода.

Определенный интерес представляет выяснение влияния температуры сопряженных поверхностей на изменение в процессе трения химического состава металла (рис. 76). Спектральный анализ поверхностей трения образцов из нормализованной стали 45, работавших в различных температурных режимах, указанных выше, проведен в среде воздуха по принятой методике (см. стр. 11).

Изменение химического состава поверхностей трения наблюдается лишь при температурах, превышающих 500° С: содержание углерода уменьшается на 25—33%, хрома — на 37—45%, никеля — на 26—35%, марганца — на 48—54%, кремния — на 20—25% по сравнению с содержанием этих элементов в исходной поверхности. По-видимому, уменьшение концентрации указанных элементов объясняется усилением их диффузии из близлежащих слоев к поверхностям трения, где происходит их окисление и удаление в виде соответствующих окислов.

Следует отметить, что уменьшение углерода и легирующих примесей наблюдается лишь в поверхностном слое толщиной до 40—60 мк. В более глубоких слоях концентрация этих элементов резко возрастает, приближаясь к их содержанию в исходной поверхности.

При более низких температурах, и особенно отрицательных, содержание углерода и легирующих примесей мало изменяется по сравнению с содержанием этих элементов в исходной поверхности.

Уменьшение углерода, хрома, никеля, марганца и кремния при повышенных температурах является стабильным в широком интервале температур (500—1150° С), т. е. градиент концентрации этих элементов при их диффузии из близлежащих слоев

к поверхностям трения довольно устойчив и мало зависит от температуры.

Таким образом, качественный и количественный анализы результатов первой серии опытов показывают, что процесс схва-

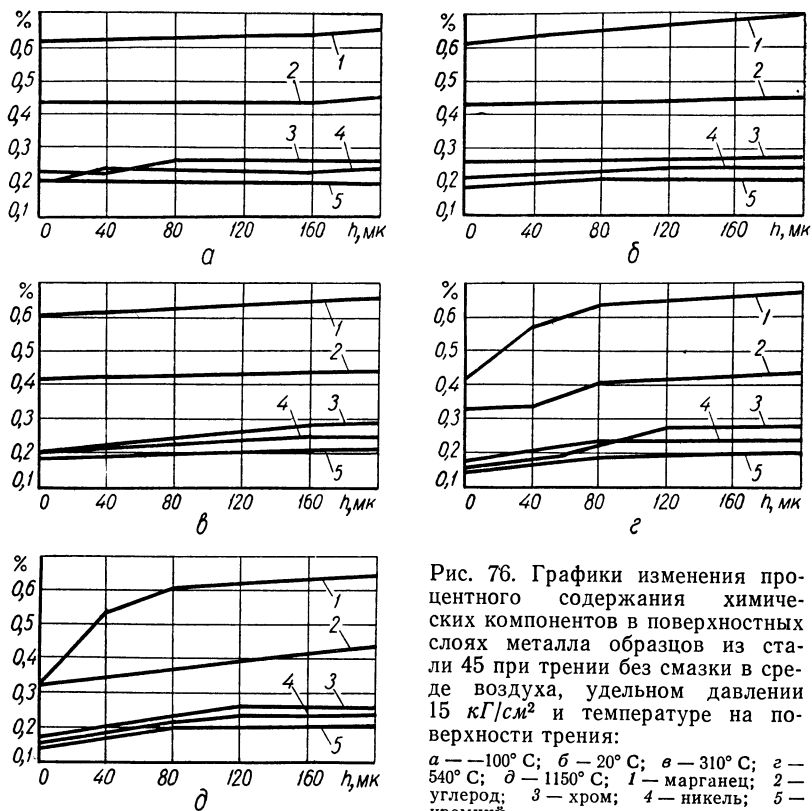


Рис. 76. Графики изменения процентного содержания химических компонентов в поверхностных слоях металла образцов из стали 45 при трении без смазки в среде воздуха, удельном давлении 15 кг/см^2 и температуре на поверхности трения:

a — -100°C ; *б* — 20°C ; *в* — 310°C ; *г* — 540°C ; *д* — 1150°C ; 1 — марганец; 2 — углерод; 3 — хром; 4 — никель; 5 — кремний.

тывания 1-го рода возникает и развивается в среде воздуха для стали 45 в диапазоне температур на поверхности трения от -100 до 180°C . С дальнейшим повышением температуры (180 — 560°C) процесс схватывания 1-го рода переходит в окислительный. В диапазоне температур 560 — 1200°C развивается процесс схватывания 2-го рода.

Различная интенсивность одного и того же процесса в определенном интервале температур поверхности трения объясняется

различной скоростью деформирования поверхностных слоев и различной величиной слоя одинаково разупрочненного металла.

Кислород воздуха оказывает значительное влияние на интенсивность и границы развития процессов схватывания, так как на поверхностях образуются пленки окислов, которые препятствуют и в отдельных случаях предотвращают схватывание металлов.

Вторая серия опытов посвящена исследованию влияния температуры на развитие процессов схватывания металлов при трении в среде химически чистого аргона. Испытания проводились на нормализованных образцах из стали 45 при трении без смазки, удельном давлении 15 кг/см^2 , в интервале скоростей скольжения $0,0025$ — 10 м/сек , при принудительном охлаждении образцов до -100°С , комнатной температуре 20°С и принудительном нагреве до 200 , 400 и 600°С .

Опыты показали, что нейтральная среда аргона исключает развитие окислительных процессов на поверхностях трения.

На рис. 77 представлен график зависимости суммарного приведенного износа двух сопряженных образцов с различной степенью предварительного принудительного нагрева или охлаждения от скорости скольжения.

Кривой 1 характеризуется изменение интенсивности износа образцов, предварительно нагретых до 600°С . В диапазоне скоростей $0,0025$ — $1,0 \text{ м/сек}$ на сопряженных поверхностях интенсивно развивается процесс схватывания 2-го рода. Температура поверхностей трения в этом диапазоне скоростей изменяется от 660 до 860°С (рис. 78, кривая 1), с увеличением скорости значения коэффициента трения возрастают от 1 до 5,7 (рис. 79, кривая 1). При скоростях выше $1,0 \text{ м/сек}$ зачетные опыты не проводились, так как испытуемые образцы сильно деформировались и разрушались.

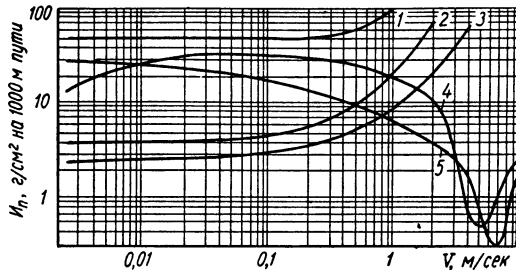


Рис. 77. График зависимости приведенного суммарного износа нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде аргона, удельном давлении 15 кг/см^2 от скорости скольжения и температуры предварительного нагрева или охлаждения образцов:

1 — при 600°С ; 2 — 400°С ; 3 — 200°С ; 4 — 20°С ; 5 — -100°С .

Интенсивность износа в среде аргона по сравнению с интенсивностью износа в среде воздуха возросла в десятки раз. Это объясняется тем, что на поверхностях трения разупрочненных образцов полностью отсутствуют пленки окислов. Величина коэффициента трения в среде аргона в 1,4—7 раз и температура поверхности сопряженных образцов в несколько раз выше, чем при трении в среде воздуха.

Кривой 2 (рис. 77) характеризуется изменение интенсивности

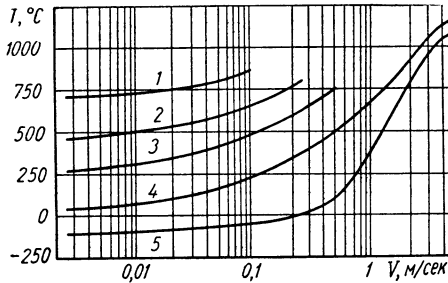


Рис. 78. График зависимости температур на поверхности трения нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде аргона, удельном давлении 15 кг/см^2 от скорости скольжения и температуры предварительного нагрева или охлаждения образцов:

1 — при 600°C ; 2 — 400°C ; 3 — 200°C ; 4 — 20°C ; 5 — -100°C .

износа образцов, предварительно нагретых до 400°C . Установлено, что в диапазоне скоростей $0,0025\text{—}2 \text{ м/сек}$ (выше 2 м/сек зачетные опыты не проводились) на поверхностях трения развивается процесс схватывания 2-го рода, интенсивность которого с ростом скорости скольжения увеличивается (в этих же условиях в среде воздуха развивается окислительный процесс и интенсивность износа поверхностей трения значительно ниже).

Температура сопряженных поверхностей в этом диапазоне скоростей изме-

няется от 450 до 770°C (рис. 78, кривая 2), а коэффициент трения имеет значения $0,76\text{—}4,8$ (рис. 79, кривая 2).

Изменение интенсивности износа образцов, предварительно нагретых до 200°C , от скорости скольжения характеризуется кривой 3 (рис. 77). В диапазоне скоростей скольжения $0,0025\text{—}0,10 \text{ м/сек}$ развивается процесс схватывания 1-го рода, интенсивность которого постепенно возрастает по мере увеличения скорости скольжения (в среде воздуха возникает окислительный процесс). Интенсивность износа образцов в условиях схватывания 1-го рода в 1,5—4 раза больше, чем в среде воздуха. Температура сопряженных поверхностей повышается от 250 до 460°C (рис. 78, кривая 3), а значения коэффициента трения находятся в пределах $0,46\text{—}1,0$ (рис. 79, кривая 3).

В диапазоне скоростей скольжения $0,10\text{—}4,0 \text{ м/сек}$ температура сопряженных поверхностей повышается до 750°C , и интен-

сивно развивается процесс схватывания 2-го рода. Интенсивность износа в этих условиях в десятки раз выше интенсивности износа в среде воздуха. Коэффициент трения увеличивается и становится равным 4,5 при скорости скольжения 0,7 м/сек. Выше скорости 4,0 м/сек зачетные опыты не проводились.

Кривой 4 (рис. 77) характеризуется изменение интенсивности износа образцов, имеющих в начале опыта комнатную температуру 20° С. В диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,4 м/сек развивается с различной интенсивностью процесс схватывания 1-го рода. Интенсивность износа образцов до скорости 0,25 м/сек несколько выше по сравнению с интенсивностью износа в среде воздуха. В диапазоне скоростей от 0,4 м/сек и выше развивается процесс схватывания 2-го рода.

В ранее проведенных исследованиях при трении пальчикового образца по валу износ поверхностей в среде аргона в десятки раз превышал износ в воздухе. Это кажущееся противоречие объясняется следующим образом. При трении пальчикового образца по валу продукты износа легко удаляются с поверхности вала самим образцом. При трении же образцов кольцевого типа продукты износа значительное время находятся между сопряженными поверхностями. В среде аргона продукты износа представляют собой ювенильные металлические частицы, которые под влиянием сил адгезии снова прилипают к поверхности образца и таким образом уменьшают интенсивность износа. С увеличением скорости скольжения процесс схватывания 1-го рода переходит в процесс схватывания 2-го рода, интенсивность которого возрастает с увеличением скорости и превышает в 10—15 раз износ в среде воздуха.

Кривой 5 (рис. 77) характеризуется изменение интенсивности износа образцов, имеющих в начале опыта температуру —100° С. Процесс схватывания 1-го рода развивается в диапазоне ско-

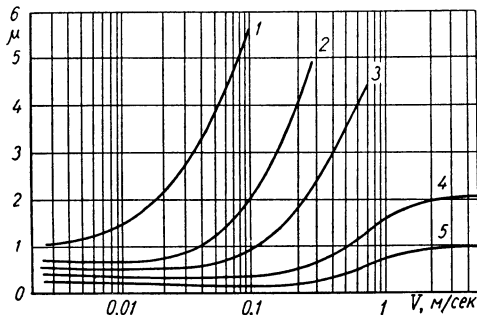


Рис. 79. График зависимости коэффициента трения при испытании нормализованных образцов из стали 45 без смазки в среде аргона, удельном давлении 15 кг/см² от скорости скольжения и температуры предварительного нагрева или охлаждения образцов: 1 — при 600° С; 2 — 400° С; 3 — 200° С; 4 — 20° С; 5 — —100° С.

ростей скольжения $0,0025—1$ м/сек. Температура сопряженных поверхностей изменяется от -100 до 450°C (рис. 78, кривая 5), а коэффициент трения — от $0,26$ до $0,69$ (рис. 79, кривая 5). Износ образцов в среде аргона в этом диапазоне несколько превышает износ в воздухе. Это объясняется тем, что вторичное схватывание частиц металла (продуктов износа) с основным металлом в среде аргона затруднено в связи с повышенной их твердостью при отрицательных температурах.

Характер изменения интенсивности износа в условиях схватывания 1-го рода при отрицательных температурах в среде аргона такой же, как и в среде воздуха. С увеличением отрицательной температуры интенсивность износа возрастает, несмотря на увеличение прочности металла, за счет повышения его хрупкости и хладноломкости.

В диапазоне скоростей скольжения $1—5$ м/сек интенсивно повышается температура сопряженных поверхностей до 1070°C при скорости 5 м/сек (рис. 78, кривая 5), коэффициент трения увеличивается до $1,0$ (рис. 79, кривая 5). В этом диапазоне скоростей развивается процесс схватывания 2-го рода, интенсивность которого повышается с увеличением скорости.

Итак, основным фактором, обуславливающим возникновение, интенсивность и границы развития ведущих процессов при трении скольжения в среде аргона, так же как и в среде воздуха, является температура. Границы и интенсивность развития процессов схватывания в среде аргона расширяются за счет отсутствия окислительных процессов. Например, при охлаждении образцов до -100°C процесс схватывания 1-го рода развивается в диапазоне скоростей $0,0025—1$ м/сек, при комнатной температуре образцов — $0,0025—0,5$ м/сек, при нагреве образцов до 200°C — $0,0025—0,25$ м/сек, а при нагреве образцов до 400 и 600°C процесс схватывания 1-го рода вытесняется процессом схватывания 2-го рода. С повышением температуры границы возникновения и развития процесса схватывания 1-го рода сдвигаются в сторону меньших скоростей.

Определение ведущих процессов, границ их развития, критических точек перехода одних процессов в другие производилось, как и в первой серии опытов, с помощью металлоструктурного анализа. Установлено, что в интервале скоростей скольжения $0,0025—1$ м/сек ведущим является процесс схватывания 1-го рода. На поверхностях трения образцов, испытанных при скорости скольжения $0,0025$ м/сек, видны характерные признаки схватывания — следы вырывов и налипания частиц металла (рис. 80, б).

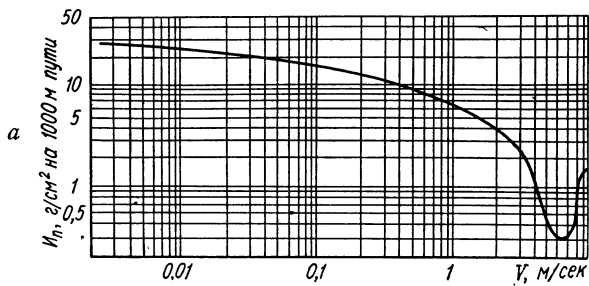
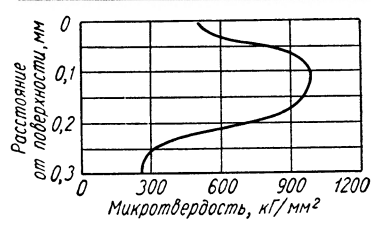
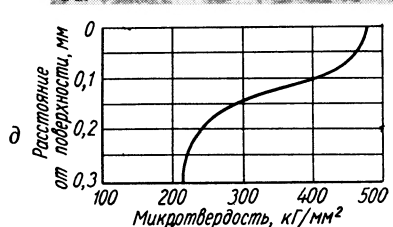
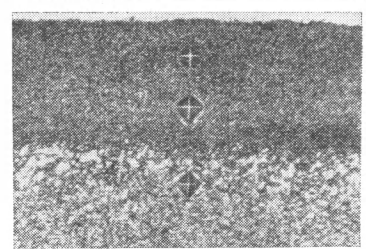
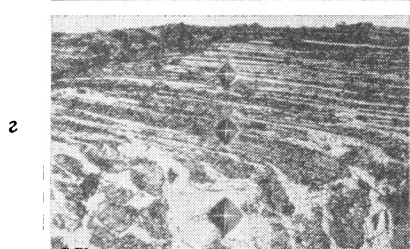
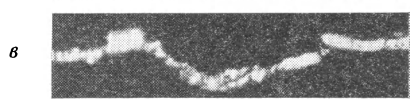
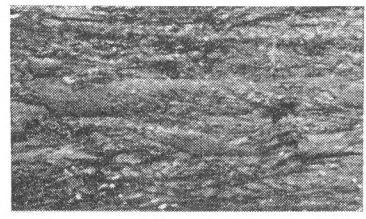
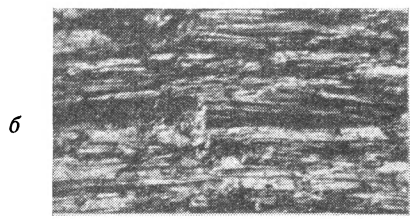


Рис. 80. Результаты испытания при трении без смазки в среде аргона нормализованных образцов из стали 45, удельном давлении 15 кг/см^2 , с предварительным охлаждением до температуры -100°C и при различных скоростях скольжения:

$V = 0,0025 \text{ м/сек}$

$V = 3 \text{ м/сек}$



а — график приведенного суммарного износа; б — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); в — профилограммы поверхностей трения ($\times 80$); г — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); д — график изменения микротвердости поверхностных слоев в сечении.

Микрорельеф соответствует 3-му классу чистоты (рис. 80,в), в сечении видны следы пластической деформации поверхностного слоя металла (рис. 80,д). Микротвердость поверхностного слоя достигает 480 кг/мм^2 .

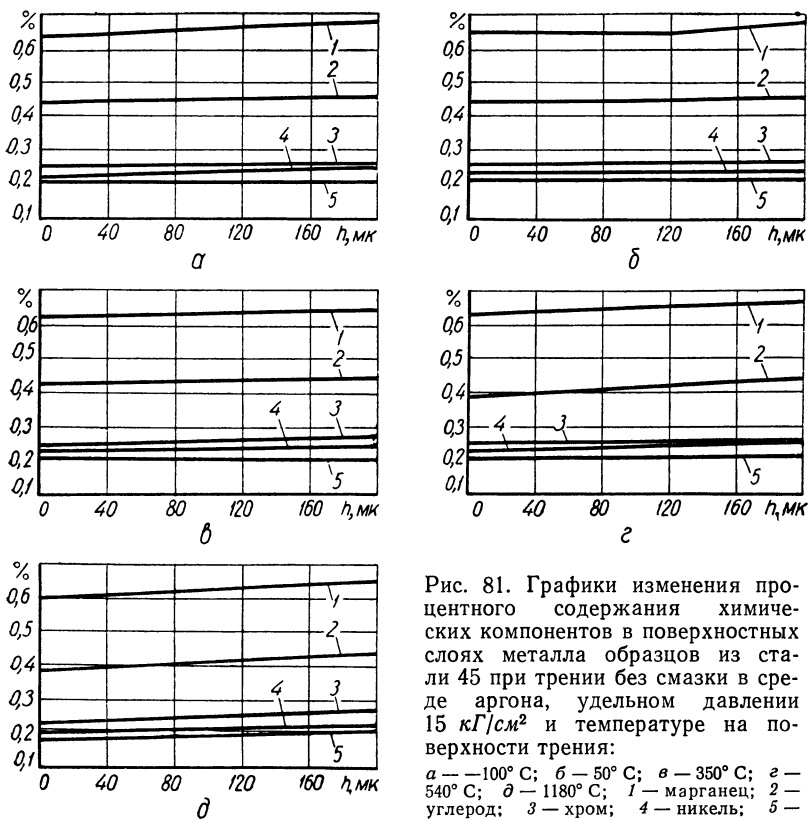
На поверхностях трения образцов, испытанных при скорости скольжения 3 м/сек , имеются изменения, характерные для процесса схватывания 2-го рода, — следы размазывания разупроченного металла по направлению движения (рис. 80,б). Микрорельеф поверхности соответствует 3—4-му классам чистоты (рис. 80,в). В результате воздействия высоких температур в поверхностном слое металла произошли структурные изменения: структура представляет собой троостит (рис. 80,з). Микротвердость поверхностных слоев достигает 950 кг/мм^2 .

Влияние температуры поверхностей трения на изменение их химического состава определялось спектральным анализом поверхностей образцов, работавших в среде аргона. Результаты анализа (рис. 81) подтверждают, что в среде аргона температура поверхностей трения не оказывает существенного влияния на изменение их химического состава. Содержание углерода и легирующих примесей у поверхности трения в близлежащих к ней слоях на глубине до 200 мк мало изменяется и почти соответствует содержанию этих элементов в исходной поверхности.

Качественный и количественные анализы результатов второй серии опытов показали, что в интервале температур поверхностей трения от -100 до 460°C возникает и развивается процесс схватывания 1-го рода. Интенсивность развития этого процесса в десятки раз выше в среде аргона, чем в среде воздуха. С дальнейшим повышением температуры ($460—1200^\circ \text{C}$) процесс схватывания 1-го рода переходит в процесс схватывания 2-го рода, минуя окислительные процессы на поверхности трения. При этом интенсивность процесса схватывания 2-го рода в среде аргона в сотни раз выше, чем в среде воздуха. Границы возникновения и развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода при трении в среде аргона значительно расширяются за счет отсутствия зоны окислительных процессов.

Как обобщение данных опытов на рис. 82 представлен график зависимости суммарного приведенного износа от температуры поверхностей при трении в среде воздуха и постоянных скоростях скольжения. На основании этих данных установлены температурные границы возникновения и развития ведущих процессов на поверхностях трения и критические температуры перехода одних процессов в другие.

Таким образом, качественный и количественный анализы результатов опытов первой серии позволяют сделать следующие выводы. Процесс схватывания 1-го рода возникает и развивается с различной интенсивностью в среде воздуха в диапазоне темпе-



ратур на поверхностях трения — 100—180° С. Дальнейшее повышение температуры приводит к переходу процесса схватывания 1-го рода в окислительные процессы, которые возникают и развиваются с различной интенсивностью в диапазоне температур 180—560° С. При повышении температуры от 560 до 1200° С возникает и развивается с различной интенсивностью процесс схватывания 2-го рода.

Различная интенсивность процесса в определенном интервале температур поверхностей трения может быть связана со скоростью деформирования поверхностных слоев и с величиной слоя одинаково разупрочненного металла. Аналогичные выводы можно сделать и по результатам второй серии опытов.

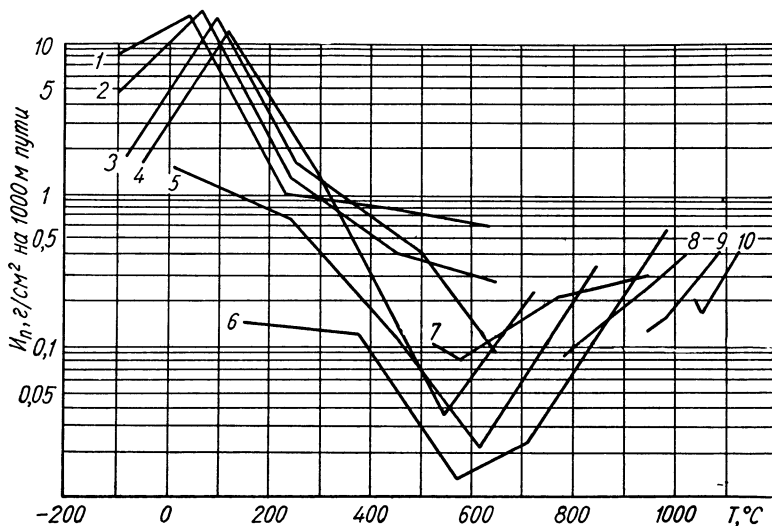


Рис. 82. График зависимости приведенного суммарного износа нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде воздуха, удельном давлении 15 кг/см^2 от температуры на поверхности трения: 1 — скорость скольжения $0,0025 \text{ м/сек}$; 2 — $0,05 \text{ м/сек}$; 3 — $0,12 \text{ м/сек}$; 4 — $0,25 \text{ м/сек}$; 5 — $0,5 \text{ м/сек}$; 6 — 1 м/сек ; 7 — 2 м/сек ; 8 — 3 м/сек ; 9 — 4 м/сек ; 10 — 5 м/сек .

На рис. 83 представлен график зависимости суммарного приведенного износа от температуры поверхностей при трении в среде аргона.

Таким образом, результаты, полученные в обеих сериях испытаний, показывают, что температура является одним из основных факторов, обуславливающих закономерности развития процессов схватывания металлов при трении. Изменение температуры, с одной стороны, вызывает повышение механической прочности и химической активности металлов, что способствует уменьшению их пластичности, образованию прочных защитных пленок окислов, а, следовательно, уменьшению интенсивности развития или предотвращению нежелательного процесса схватывания 1-го рода. С другой стороны, изменение температуры вызывает

понижение механической прочности металлов, их разупрочнение, повышение пластичности, а это приводит к разрушению защитных пленок, возникновению металлических контактов и интенсивному развитию процессов схватывания 2-го рода.

При отрицательных температурах прочность металла повышается и в условиях схватывания 1-го рода наблюдается рост

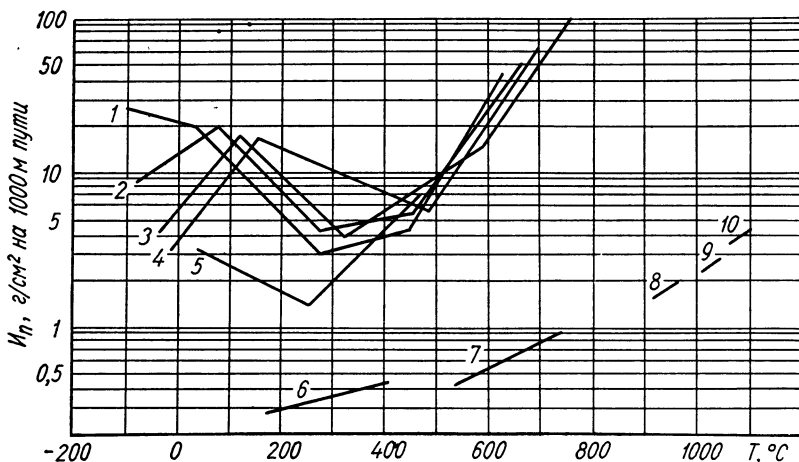


Рис. 83. График зависимости приведенного суммарного износа нормализованных образцов из стали 45 при трении без смазки в среде аргона, удельном давлении 15 кг/см^2 от температуры на поверхности трения: 1 — скорость скольжения $0,0025 \text{ м/сек}$; 2 — $0,05 \text{ м/сек}$; 3 — $0,12 \text{ м/сек}$; 4 — $0,25 \text{ м/сек}$; 5 — $0,5 \text{ м/сек}$; 6 — 1 м/сек ; 7 — 2 м/сек ; 8 — 3 м/сек ; 9 — 4 м/сек ; 10 — 5 м/сек .

интенсивности износа, что объясняется в основном хладноломкостью металла.

Изменяя температуру на поверхностях трения, независимо от изменения в определенных пределах внешних условий трения (скорости, давления и др.), можно изменять в желаемом направлении границы и интенсивность развития ведущих процессов, вызывать переходы одних процессов в другие и в отдельных случаях полностью их устранять.

Внешние воздействия — скорость относительного перемещения и удельное давление — оказывают существенное влияние на развитие ведущих процессов, поскольку от них зависит изменение температуры на поверхностях трения, скорость и интенсивность деформации поверхностных слоев металла.

Ведущие процессы при трении возникают и развиваются в строго определенных границах температур.

В среде воздуха, независимо от изменения скорости скольжения и давления, при трении образцов из стали 45 процесс схватывания 1-го рода развивается в диапазоне температур от -100 до 180°C , окислительные процессы — от 180 до 560°C и процесс схватывания 2-го рода — от 560 до 1200°C .

В среде аргона процессы схватывания развиваются в более широком диапазоне температур: процесс схватывания 1-го рода — в интервале температур от -100 до 460°C , процесс схватывания 2-го рода — от 460 до 1200°C .

Границы возникновения и развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода значительно расширяются за счет полного отсутствия окислительных процессов.

Интенсивность износа образцов (сталь 45) в условиях схватывания 2-го рода в среде аргона (при отсутствии кислорода) возрастает в сотни раз по сравнению с интенсивностью износа в среде воздуха. В то же время интенсивность износа в условиях схватывания 1-го рода изменяется незначительно при изменении окружающей газовой среды. Химический состав в поверхностных слоях металлов (сталь 45) изменяется в среде воздуха лишь при температурах, превышающих 500°C , и является стабильным во всем интервале изменения температур.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ СОПРЯЖЕННЫХ ТЕЛ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ

Одной из причин возможной противоречивости результатов исследований процессов схватывания является применение исследователями образцов, различных по форме и размерам. Поэтому для получения сопоставимых результатов необходимо учитывать влияние масштабного фактора [5, 109, 121].

Б. И. Костецкий [53] утверждает, что величина удельного износа образцов при изменении размеров пары трения в некоторых случаях увеличивается в 60 раз. Такое изменение величины износа объясняется изменением параметров теплового процесса, площади фактического контакта и частоты контакта при трении. В дальнейшем Б. И. Костецкий [59] пришел к выводу, что наиболее вероятным объяснением этого влияния является изменение температуры образцов различных размеров.

Исследования Г. И. Залецкого [34] подтвердили, что в зависимости от условий трения и размеров образцов удельный износ

увеличивается в 900 и больше раз. Размеры образцов оказывают также влияние на качественные характеристики, т. е. на виды износа и критические скорости относительного перемещения образцов при сухом трении и при трении со смазкой. При испытании образцов больших диаметров критические точки перехода одного вида износа в другой смещаются в сторону меньших скоростей. Это объясняется тем, что теплота трения в больших образцах развивается значительно интенсивнее, чем в малых.

С общей проблемой масштабного фактора при трении и износе тесно связаны работы И. В. Крагельского [68, 70] о коэффициенте взаимного перекрытия. Однако конкретных данных о влиянии масштабного фактора на развитие процессов схватывания еще очень мало.

С целью более детального изучения закономерностей развития процессов схватывания металлов при трении без смазки в среде воздуха и аргона в зависимости от масштабного фактора (изменение размеров вала и образца или образца при неизменной величине вала) автором проведена серия лабораторных испытаний. Опыты проводились на нормализованных цилиндрических образцах (сталь 45) диаметром 11,3 и длиной 26 мм при трении без смазки в среде аргона по нормализованным валам (сталь 10) диаметром 100 и длиной 300 мм при удельном давлении 50 кг/см^2 , в диапазоне скоростей скольжения 0,005—12 м/сек.

Результаты анализа качественных изменений поверхностных слоев металла образцов и валов позволили установить, что в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—12 м/сек возникают и развиваются два ведущих процесса — схватывание 1-го и 2-го рода (от 0,0025 до 0,7 м/сек — схватывание 1-го рода и от 0,7 до 12 м/сек — схватывание 2-го рода). Скорость 0,7 м/сек является критической для перехода процесса схватывания 1-го рода в процесс схватывания 2-го рода.

Величина весового износа образцов (рис. 84, кривая 1) в условиях схватывания 1-го рода во много раз меньше величины износа валов (кривая 2), в условиях же схватывания 2-го рода, наоборот, более интенсивно изнашиваются поверхности образцов, а валы практически не изнашиваются. При этом наблюдается налипание на поверхностях трения валов частиц металла, оторвавшихся с поверхностей трения образцов. Таким образом, интенсивность износа и граничные условия возникновения и развития схватывания в нейтральной среде аргона в основном зависят от прочности поверхностных слоев металлов, тесно связанной со степенью их нагрева и пластической деформацией при

трении. При повышении прочности металлов интенсивность процессов схватывания уменьшается и, наоборот, при разупрочнении (в определенных пределах) интенсивность износа повышается.

Во всем диапазоне изменений скоростей скольжения температуры поверхностных слоев металла образцов значительно выше температуры валов при одинаковых условиях трения. Так,

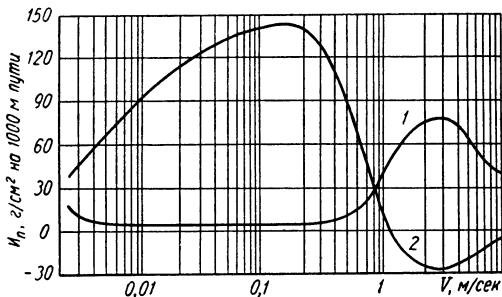


Рис. 84. График зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде аргона нормализованных образцов из стали 45 по нормализованному валу из стали 10 при удельном давлении 50 кг/см^2 от скорости скольжения:

1 — износ образца; 2 — вала.

например, в условиях схватывания 1-го рода при скорости скольжения $0,25 \text{ м/сек}$ температура

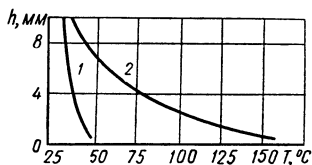


Рис. 85. График зависимости температуры поверхностных слоев металла вала (1) и образца (2) при трении без смазки в среде аргона, скорости скольжения $0,25 \text{ м/сек}$ и удельном давлении 50 кг/см^2 от расстояния от поверхности трения.

вала и образца на глубине 10 мм от поверхности трения составляла $30\text{—}35^\circ \text{C}$, а на глубине $0,5 \text{ мм}$ температура вала была $40\text{—}45^\circ \text{C}$, а образца — $150\text{—}155^\circ \text{C}$ (рис. 85). При этом прочность поверхностных слоев металла образцов превышает на $30\text{—}32\%$ прочность вала [59]. Различие температур поверхностных слоев металлов при одинаковых условиях трения объясняется тем, что массы вала и образца неодинаковы по величине и обладают в связи с этим различной теплоотдачей.

В результате пластического деформирования поверхностных слоев металла валов и образцов при трении в условиях схватывания 1-го рода происходит их упрочнение. Более интенсивно деформируются, а следовательно, и упрочняются образцы, так как поверхности их находятся под непрерывным воздействием все новых участков поверхностей валов. Поэтому износ поверхностей трения образцов как более прочных будет меньше износа валов (узлы схватывания разрушаются по менее прочному металлу).

Вывранные с менее прочной поверхности вала частицы металла налипают на сопряженную поверхность образца, а остальные частицы представляют собой продукт износа. Так как узлы схватывания образуются непрерывно на новых участках, то непрерывно происходит и интенсивное разрушение менее прочной поверхности вала (рис. 84).

В условиях схватывания 2-го рода в диапазоне скоростей скольжения 0,7—12 *м/сек* происходит более интенсивный нагрев поверхностных слоев металла валов и образцов. При скорости скольжения 3 *м/сек* температура вала на глубине 10 *мм* от поверхности трения равна 40—45° С, а образца — 400—420° С, на глубине 0,5 *мм* соответственно 80—90 и 850—900° С (рис. 86). В этих температурных условиях происходит резкое разупрочнение поверхностных слоев металла образцов. Их прочность понижается относительно валов в 6—7 раз, а это приводит к более интенсивному износу менее прочных поверхностей трения образцов (рис. 84). Вал практически не изнашивается, к его поверхности прилипают и размазываются на ней оторвавшиеся разупрочненные частицы металла образца. Были проведены испытания также на образцах кольцевого типа с наружным диаметром 48 и внутренним 42,3 *мм*, изготовленных из нормализованной стали 45.

Кольцевые образцы испытывались попарно. Один из них был неподвижным, другой подвижным. Трение осуществлялось по торцовым поверхностям. Оба образца были одинаковых размеров. Испытание проводилось на испытательной машине (рис. 8) при трении без смазки в среде аргона с постоянным удельным давлением 15 *кГ/см²* и с переменной скоростью скольжения 0,0025—10 *м/сек*.

На основании полученных при испытании данных установлено, что интенсивность износа подвижных и неподвижных образцов во всем диапазоне скоростей скольжения изменялась одинаково (рис. 87).

В диапазоне скоростей скольжения 0,0025—1 *м/сек* с большой интенсивностью развивается процесс схватывания 1-го рода, а в диапазоне 1—10 *м/сек* — процесс схватывания 2-го рода. Градиенты температур в поверхностных слоях подвижных и неподвижных образцов, испытанных при одинаковых условиях трения, идентичны.

Таким образом, при испытании двух сопряженных образцов кольцевого типа, равных по величине и форме, в поверхностных слоях в широком диапазоне изменений условий трения возникают

и развиваются с одинаковой степенью тепловые явления, пластические деформации, упрочнение и разупрочнение металлов, процессы схватывания и износа металлов.

Были проведены две серии опытов для исследования закономерностей развития процессов схватывания металлов в зависимости от изменения размеров образцов при постоянном размере вала.

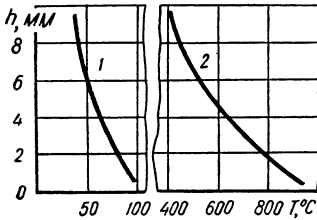


Рис. 86. График зависимости температуры поверхностных слоев металла вала (1) и образца (2) при трении без смазки в среде аргона, скорости скольжения 3 м/сек и удельного давления 50 кг/см² от расстояния от поверхности трения.

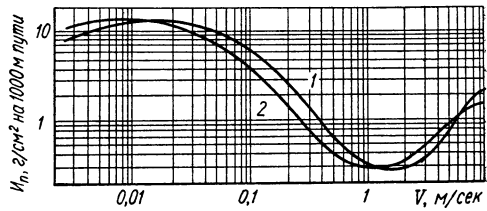


Рис. 87. График зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде аргона нормализованных кольцевых образцов из стали 45 и удельном давлении 15 кг/см² от скорости скольжения: 1 — износ неподвижного образца; 2 — подвижного образца.

В первой серии опытов изучались закономерности развития процессов схватывания металлов в зависимости от изменения размеров образцов при постоянной скорости скольжения. Испытывались цилиндрические образцы из нормализованной стали 45 диаметром 5, 10, 20, 30 и 40 мм в паре с цилиндрическими валами диаметром 100 и длиной 300 мм из той же стали. Испытания проводились при скорости скольжения 0,06 и 3,44 м/сек, трении без смазки и при удельном давлении 60 кг/см². Величина износа образцов определялась взвешиванием, качественный анализ трущихся поверхностных слоев металла — с помощью комплексного металлоструктурного исследования.

Установлено, что при малой скорости скольжения (0,06 м/сек) на поверхности трения образцов развивается процесс схватывания 1-го рода, а при скорости скольжения 3,44 м/сек — процесс схватывания 2-го рода. При этом с увеличением диаметра образцов интенсивность развития процесса схватывания 1-го рода и износ значительно уменьшаются (рис. 88, кривая 2), а процесс схватывания 2-го рода и износ — резко возрастают (кривая 1). Так, величина приведенного износа образцов диаметром 40 мм

в условиях схватывания 1-го рода в 7—8 раз меньше (при равных условиях трения) величины износа образцов диаметром 5 мм. В условиях схватывания 2-го рода приведенный износ образцов диаметром 30 мм в 7—8 раз превышает износ образцов диаметром 5 мм.

При трении поверхностные слои металла образцов различного диаметра нагреваются неодинаково. Так, например, в условиях схватывания 1-го рода температура на поверхности трения образца диаметром 5 мм равна 100—120° С, а образца диаметром 40 мм — 300—310° С (рис. 89, кривая 2). В условиях схватывания 2-го рода температура на поверхности трения образца диаметром 5 мм равна 800—810° С, а образца диаметром 40 мм — 1100° С (кривая 1). Это объясняется тем, что с увеличением диаметра образца уменьшается интенсивность его теплоотдачи и с ростом поверхности контакта увеличивается теплообразование.

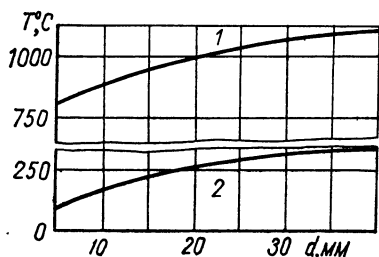


Рис. 89. График зависимости температуры поверхностных слоев металлов при трении без смазки от диаметра испытуемого образца:

1 — скорость скольжения 3,44 м/сек; 2 — 0,06 м/сек.

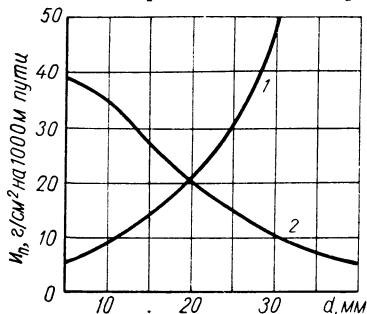


Рис. 88. График зависимости приведенного износа при трении образцов различного диаметра из стали 45 по валу из стали 45 и удельном давлении 60 кг/см² от скорости скольжения:

1 — при 3,44 м/сек; 2 — 0,06 м/сек.

В условиях схватывания 1-го рода с увеличением температуры поверхностей трения образцов от 100 до 350° С упрочняются поверхностные слои металла и повышается их химическая активность, а это приводит к уменьшению интенсивности развития процессов схватывания и износа металлов.

В условиях схватывания 2-го рода с увеличением температуры образцов от 800 до 1100° С металл резко разупрочняется и интенсивно развиваются процессы схватывания и износа.

Во второй серии опытов исследовались закономерности развития процессов схватывания металлов при трении в зависимости

от изменения размеров образцов и скорости скольжения в пределах 0,005—4 м/сек. Применялись образцы из нормализованной стали 45 диаметром 5 и 30 мм в паре с валами диаметром 100 мм из той же стали. Испытания проводились при удельном давлении 40 кг/см² в условиях сухого трения.

Максимумы износа при малых скоростях скольжения (рис. 90) соответствуют износу в условиях схватывания 1-го и 2-го рода. При минимальном значении величины износа и скорости скольжения 0,5 и 1 м/сек на поверхностях трения развиваются окислительные процессы.

У образцов диаметром 30 мм (кривая 1) в диапазоне скоростей скольжения 0,005—0,5 м/сек развивается процесс схватывания 1-го рода, причем с увеличением скорости скольжения интенсивность износа образцов уменьшается. С возрастанием скорости скольжения (больше 0,5 м/сек) процесс схватывания 1-го рода переходит в процесс схватывания 2-го рода, интенсивность которого возрастает.

У образцов диаметром 5 мм (кривая 2) процесс схватывания 1-го рода возникает в диапазоне скоростей скольжения 0,005—1 м/сек. Характерно, что в этих условиях трения интенсивность износа образцов диаметром 5 мм значительно превышает интенсивность износа образцов диаметром 30 мм.

С увеличением скорости скольжения интенсивность процесса схватывания 1-го рода при испытании образцов диаметром 5 мм уменьшается, а при скорости скольжения больше 1 м/сек процесс схватывания 1-го рода переходит в процесс схватывания 2-го рода.

В результате анализа данных испытаний установлено, что существуют три отличных друг от друга зоны образования и развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода.

В первой зоне (диапазон скоростей скольжения 0,005—0,5 м/сек) возникает и развивается процесс схватывания 1-го рода, причем с увеличением диаметра образцов (от 5 до 30 мм) интенсивность его уменьшается.

Во второй зоне (диапазон скоростей скольжения 0,5—1 м/сек) возникают и с относительно малой интенсивностью развиваются процессы схватывания 1-го и 2-го рода. Изменяя размеры образцов, можно вызывать переходы одних видов износа в другие, а также изменять критические точки этих переходов. Так, например, при скорости скольжения 0,7 м/сек на поверхностях трения образцов диаметром 30 мм развивается процесс схватывания 2-го рода, а на образцах диаметром 5 мм при этих же

условиях (рис. 90, точка *a*) — процесс схватывания 1-го рода (рис. 91).

В третьей зоне (диапазон скоростей скольжения 1—4 м/сек) возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода, причем с увеличением размеров образцов интенсивность его возрастает.

С увеличением диаметра испытываемых образцов критические точки перехода процесса схватывания 1-го рода в процесс схватывания 2-го рода смещаются влево, в сторону уменьшения скоростей скольжения; с уменьшением диаметра образцов — в сторону повышения скоростей скольжения.

Интенсивность износа в условиях схватывания 1-го рода образцов меньшего диаметра значительно превышает интенсивность износа образцов большего диаметра. А в условиях схватывания 2-го рода — наоборот. Это объясняется тем, что размер испытываемых образцов обуславливает температуру поверхностных слоев металлов при трении. При схватывании 1-го рода повышение температуры в трущихся поверхностных слоях образцов вызывает увеличение прочности и химической активности металлов, возрастает интенсивность окисления и образуются защитные пленки окислов. При схватывании 2-го рода повышение температуры вызывает разупрочнение металла и интенсивное развитие процесса схватывания. Повышение при этом химической активности металлов не оказывает значительного влияния на развитие схватывания 2-го рода.

Таким образом, изменение размеров сопряженных тел, при прочих равных условиях трения, оказывает значительное влияние на интенсивность развития процессов схватывания металлов, вызывает изменение граничных условий их существования, смещение критических точек перехода одного процесса в другой, изменение интенсивности износа поверхностей трения, коэффициента трения и температуры в поверхностных слоях металлов.

Увеличение диаметра образцов (от 5 до 40 мм) при испытании во всем диапазоне изменения скоростей скольжения (0,005—

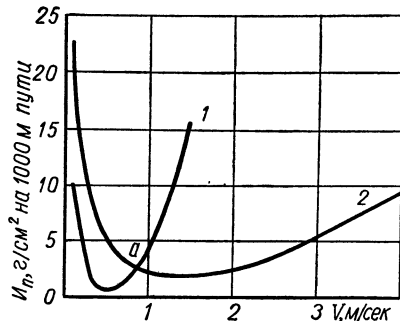


Рис. 90. График зависимости приведенного износа при трении образцов различного диаметра из стали 45 по валу из стали 45 и удельном давлении 40 кг/см^2 от скорости скольжения:

1 — диаметр 30 мм; 2 — 5 мм.

5 м/сек) приводит к увеличению температуры поверхностных слоев металлов. Изменение же температуры вызывает значительные изменения физико-химических и механических свойств металлов, их упрочнение или разупрочнение, изменение интенсивности диффузионных и адсорбционных процессов, изменение остаточных напряжений и т. п. Это, в свою очередь, приводит к изменению закономерностей образования и развития процессов схватывания металлов.

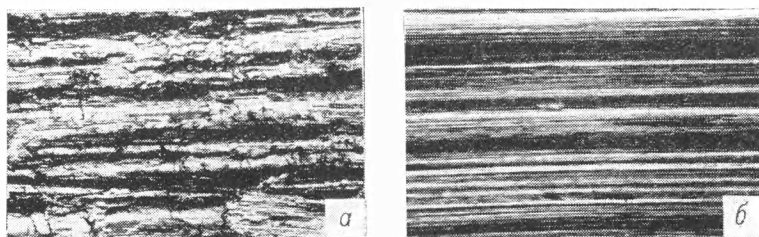


Рис. 91. Поверхность трения образцов из стали 45 после испытания при удельном давлении 40 кг/см^2 и скорости скольжения $0,7 \text{ м/сек}$: а — диаметр образца 5 мм ($\times 20$); б — 30 мм ($\times 20$).

Изменение размеров и форм сопряженных тел трения можно эффективно использовать как метод борьбы со схватыванием металлов. Можно изменить в желаемом направлении интенсивность теплообразования на поверхности трения и теплоотдачи испытуемых пар и этим регулировать температуру на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов.

Для уменьшения интенсивности развития процесса схватывания 1-го рода подбором размеров и форм сопряженных деталей создаются условия повышения температуры на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов — от комнатной до критической температуры интенсивного упрочнения металлов. В условиях схватывания 2-го рода в результате подбора размеров и форм сопряженных деталей снижается температура на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов. Таким путем можно в отдельных случаях почти полностью устранить процессы схватывания.

При конструировании и изготовлении деталей машин, имеющих отличную от испытанных образцов форму и размеры, необходимо учитывать влияние масштабного фактора на развитие процессов схватывания металлов при трении.

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДОВ РАБОТЫ МАШИНЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛА

Характер и интенсивность износа сопряженных поверхностей деталей машин зависит от продолжительности их работы. В процессе работы машин отчетливо проявляются три периода износа деталей: начальный, период установившегося износа и усиленного износа.

Период начального износа, или период приработки (рис. 92, участок *a*), — время перехода от исходного состояния поверхностей трения к установившемуся. В этот период износ происходит неравномерно и приближается к некоторой постоянной величине, характерной для периода установившегося износа.

Во время приработки постепенно изменяются условия трения сопряженных поверхностей деталей машин. По мере увеличения фактической площади контакта снижаются среднее удельное давление и средняя температура на поверхностях трения.

На протяжении этого периода происходит характерное изменение микрорельефа поверхностей трения.

Период установившегося износа (рис. 92, участок *б*) характеризуется относительным постоянством условий работы трения и скорости износа.

Период усиленного износа (рис. 92, участок *в*) характеризуется изменениями зазоров в трущихся сопряжениях, геометрической формы деталей и связанными с этим резкими изменениями условий работы поверхностей трения.

Для увеличения срока службы деталей машин необходимо стремиться сокращать период начального износа до минимума, увеличивать период установившегося износа до возможного максимума и предупреждать наступление периода усиленного износа.

Процесс приработки тесно связан с процессом установившегося износа. В зависимости от условий трения процесс приработки протекает по-разному. Кривая *1* характеризует износ

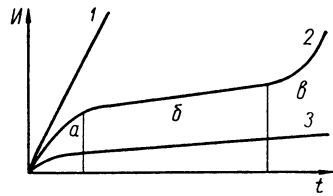


Рис. 92. Характерные кривые износа деталей машин:

1 — неблагоприятный случай работы сопряженных деталей; *2* — наиболее общий случай развития износа во времени; *3* — наиболее благоприятный случай работы сопряженных деталей.

в неблагоприятных условиях приработки. В этом случае возникают и интенсивно развиваются процессы схватывания, на поверхностях трения отсутствуют защитные пленки, при недостаточной смазке образуются задиры и повреждения.

При более благоприятных условиях приработки (кривая 3) период начального износа сокращен, интенсивность износа и силы трения небольшие, процессы схватывания не получают развития, на поверхностях трения создаются оптимальный микро-рельеф и защитные вторичные структуры.

Особенно велико значение приработки для деталей машин, работающих в условиях высоких удельных давлений, повышенных температур, в агрессивных газовых средах, при высоких скоростях скольжения и при недостаточном подводе смазки. В этих условиях детали работают обычно на пределе запасов износостойкости применяемых материалов и уже в период приработки могут возникать и развиваться процессы схватывания. При неблагоприятных условиях приработки процесс схватывания 1-го рода, интенсивно развиваясь, вызывает повреждения и быстрый износ трущихся поверхностей.

В нормальных условиях приработки, когда возникающие процессы схватывания 1-го рода не получают развития, к концу этого периода на поверхностях трения образуются устойчивые защитные пленки, препятствующие созданию металлических контактов и схватыванию металлов, поэтому в период установившегося износа на сопряженных поверхностях трения развиваются благоприятные окислительные (химические) процессы.

Период усиленного износа характеризуется переходом от благоприятного окислительного износа к износу схватыванием 2-го рода (тепловому).

С целью продления срока службы машин необходимо предупредить в первую очередь возникновение и развитие процессов схватывания металлов, особенно в период приработки.

Для качественного проведения приработки важное значение имеют: точность изготовления и качество сборки деталей машин, выбор соответствующего класса чистоты поверхностей и характера шероховатостей, а также наличие определенных физико-химических и механических свойств поверхностных слоев.

В процессе нормальной приработки независимо от исходного микро-рельефа поверхности образуется оптимальный микро-рельеф, характерный для данных условий работы.

Не менее важным в процессе приработки является переход от исходного состояния поверхностного слоя и исходной струк-

туры к состоянию структуры и свойствам, соответствующим установившимся процессам работы и износа деталей машин.

При нормальных условиях приработки на поверхности и в поверхностных слоях образуются своеобразные вторичные структуры, происхождение которых связано с особенностями процессов пластической деформации, насыщением поверхности кислородом воздуха и углеродом смазки. Эти структуры обладают высокой износостойкостью, хорошей способностью адсорбировать смазку, изолирующими свойствами, препятствующими контакту чистых металлов, и восстанавливаются в процессе трения.

Хорошо приработанная поверхность должна обладать оптимальным микрорельефом и иметь вторичную структуру, прочно и равномерно распределенную по поверхности контакта.

Качественная приработка деталей машин заключается в том, чтобы в самый короткий срок при минимальной величине износа обеспечить образование оптимального микрорельефа и оптимальной структуры, а также свойств поверхности и поверхностных слоев. Эту задачу можно решать двумя путями: при изготовлении, доводке и сборке деталей и узлов (технологическим путем) и при эксплуатации, особенно при обкатке и в начальный период работы машин.

Технологические мероприятия предполагают:

1) подбор материалов пары трения, не склонных к взаимному схватыванию, что очень важно, так как в начальный период поверхности трения не защищены прочными защитными пленками, образующимися при дальнейшей работе, а фактические удельные давления очень большие и значительно превышают величину давления при установившемся износе;

2) механическую обработку поверхностей и создание микрорельефа, наиболее близкого к оптимальному. Чрезмерная шероховатость вызывает пики удельных давлений, разрушение поверхностей, образование больших зазоров, а также обуславливает увеличение времени приработки. Излишняя чистота микрорельефа поверхности ухудшает условия смазки и экономически нецелесообразна;

3) качественный монтаж сопряженных деталей и узлов (без перекосов, вызывающих повышенные удельные давления, которые приводят к нежелательным явлениям схватывания металлов).

Эксплуатационными мероприятиями являются:

1) правильное нагружение узлов трения при обкатке, плавное повышение нагрузки на рабочие звенья во времени;

2) применение смазок, способствующих образованию оптимального микрорельефа и свойств поверхностей трения, и специальных добавок (поверхностно-активных веществ, коллоидного графита, металлозольей, сернистых соединений);

3) правильный выбор режима эксплуатации машин в установившийся период.

Первая и вторая группы мероприятий позволяют резко сократить время приработки, осуществлять приработку при малых коэффициентах трения и малой интенсивности износа, при небольших удельных давлениях и лучших условиях смазки. Все это обеспечивает более быстрое образование защитных вторичных структур и способствует переходу к установившемуся режиму с более износостойкими поверхностями.

§ 2. ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ, ЖИДКИХ СРЕД И ТВЕРДЫХ СМАЗОК НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

РОЛЬ ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ СРЕД В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

Влияние газовых и жидких сред на возникновение и развитие процессов схватывания металлов неоднократно отмечалось многими учеными [49, 127, 139 и др.].

По данным, например, Б. И. Костецкого [52], П. К. Топехи [108], Е. М. Швецово́й и И. В. Крагельского [120], на поверхностях трения при насыщении их кислородом образуются либо перенасыщенные твердые растворы, либо значительно более хрупкие химические соединения. Сама же пленка может иметь различную толщину в зависимости от того, на какой структурной составляющей материала она образовалась.

Большое влияние газовой среды при сухом трении стальных поверхностей отмечает И. Г. Носовский [90]. Проведенные в этом направлении работы показали, что газовая среда может даже служить смазочным материалом.

Многие исследователи пришли к выводу, что пленки окислов на поверхностях трения предотвращают схватывание [49, 55, 72, 90, 145, 149 и др.].

Л. Ф. Коффин [45], исследуя трение металлов в различных газовых средах, обнаружил, что если пара трения состоит из

металлов, обладающих полной или умеренной растворимостью в твердом состоянии, то в инертной среде (гелий) происходит схватывание. Поверхности не слипаются, если приложенное давление недостаточно для того, чтобы вызвать интенсивное течение и разрушение пленок окислов. По мнению Финча [136, 138], одной из причин различной способности к схватыванию одноименных и разноименных пар металлов является неодинаковая изнашиваемость пленок окислов.

По данным А. П. Семенова [104], пленки окислов защищают металл от схватывания только при малых деформациях, причем препятствует схватыванию адсорбированная пленка, легко распространяющаяся на вновь образуемые (ювенильные) поверхности металла.

Многочисленные исследования проведены для выяснения влияния жидкой среды на процессы трения и износа деталей машин и прежде всего — влияния различных смазочных жидкостей.

При гидродинамическом режиме работы подшипников сопряженные поверхности трения разделены слоем смазки. В этом случае основную роль выполняют объемные свойства смазки, в первую очередь ее вязкость. В тех случаях, когда гидродинамический режим не обеспечивается, износостойкость узлов трения зависит от свойств тонкой граничной масляной пленки и от ее взаимодействия с материалом поверхностей трущихся деталей и с окружающей газовой средой [8, 14, 15].

Основные закономерности граничного трения и состояние тонких смазочных пленок исследовались во многих работах [6, 7, 12, 25—28, 122 и др.].

Открытый и описанный П. А. Ребиндером эффект понижения поверхностной прочности материала под действием поверхностно-активных веществ (эффект Ребиндера) позволил научно обоснованно использовать ряд ценных свойств жидких сред в процессах трения и износа материалов [84, 99, 100].

В последнее время внимание ученых привлекают вопросы химического взаимодействия жидкой среды с материалом поверхностей трения [88, 115, 133 и др.]. Результаты исследований дали возможность разработать различные химические присадки к маслам, предотвращающие повышенный износ деталей машин при тяжелых режимах работы узлов трения.

Перспективны и интересны исследования по выяснению взаимодействия газовой и жидкой сред в процессе трения и износа. Установлено, что масло в процессе трения интенсивно окисляет-

ся, и продукты окисления оказывают огромное влияние на трение и износ материалов.

Возникновение и развитие процессов схватывания тесно связано с наличием или отсутствием на поверхностях трения защитных пленок и их свойствами, а также с различной склонностью металлических связей к схватыванию. Различные среды, по-разному взаимодействуя с металлами (химическая или физическая адсорбция, диффузия отдельных элементов среды в поверхностные слои металлов), образуют защитные пленки с различными свойствами, препятствующие в той или иной степени образованию металлических контактов сопряженных тел, схватыванию металлов.

Несмотря на очевидную роль сред при трении, влияние их на образование и закономерности развития процессов схватывания (особенно 1-го рода), возникающих при трении сопряженных металлов, исследовано недостаточно.

Известные в настоящее время жидкие смазочные материалы не обеспечивают требуемой износостойкости деталей современных машин, работающих в условиях высоких и сверхвысоких скоростей скольжения, больших удельных давлений и температур. В некоторых случаях применение жидкой или консистентной смазки в узлах трения вообще исключается. Для таких условий разрабатываются специальные антифрикционные материалы, в состав которых входят вещества, выполняющие при трении роль твердой смазки. Данных же об оптимальных количествах компонентов твердых смазок, о влиянии различных твердых смазок на процессы трения и износа совершенно нет.

С целью изучения влияния сред на развитие процессов схватывания металлов автором проводились исследования в газовых и жидких средах в присутствии твердых смазок на образцах из сталей 45 и У8, серого чугуна, бронзы и никеля (с добавками твердых смазок) в паре с образцами, валами и дисками из сталей 10, 45, У8 и ЭИ437 в условиях схватывания 1-го и 2-го рода при переменных скоростях скольжения в пределах 0,005—150 м/сек и удельных давлениях от 1 до 200 кг/см². Проводились также металловедческие исследования качественных изменений структуры металлов, изменений микротвердости и химического состава поверхностных слоев металлов, изменений микрорельефа поверхности трения и др.

В первых двух сериях опытов исследовалось развитие процессов схватывания металлов с относительно чистыми поверхностями трения в инертных газовых средах аргона и углекислого

газа (при отсутствии прочных защитных пленок на поверхности трения). В третьей серии опытов изучалось влияние защитных адсорбированных пленок и вторичных структур, возникающих на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов в среде кислорода, на схватывание металлов.

Первая серия опытов проводилась на испытательной машине (рис. 8) в среде химически чистого аргона, при трении без смазки нормализованных образцов из стали 45 по нормализованным

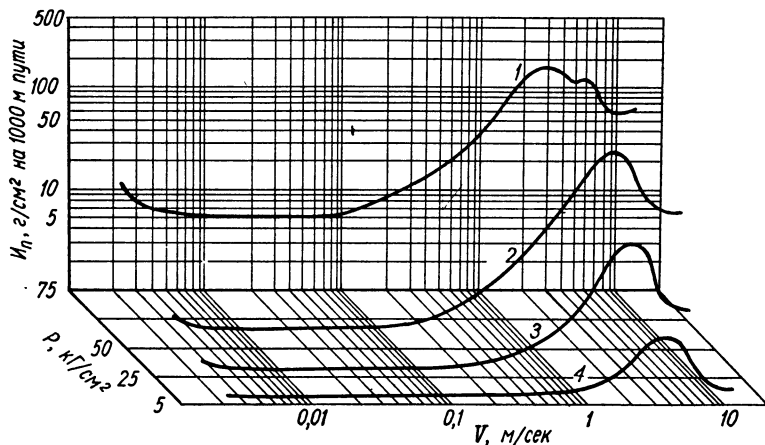


Рис. 93. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде аргона нормализованных образцов по нормализованному валу от скорости скольжения и удельного давления:

1 — 75 кг/см²; 2 — 50 кг/см²; 3 — 25 кг/см²; 4 — 5 кг/см².

валам из стали 10, а также закаленных образцов по закаленным валам из стали У8 в диапазоне изменения скоростей скольжения 0,0025—12 м/сек при удельном давлении 5, 25, 50 и 75 кг/см².

На основании полученных при испытании данных установлено, что во всем диапазоне изменений скорости трения и давлений возникают и развиваются с различной интенсивностью два ведущих процесса — схватывание 1-го и 2-го рода, которые и обуславливают интенсивность износа, изменение коэффициента трения и температуры на поверхностях трения.

На рис. 93 представлена пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде аргона нормализованных образцов (сталь 45) по нормализован-

ному валу (сталь 10) от скорости скольжения и удельного давления.

В диапазоне скоростей скольжения от 0,0025 до 0,25—3 *м/сек* развивается процесс схватывания 1-го рода. С увеличением скорости скольжения процесс схватывания 1-го рода переходит в процесс схватывания 2-го рода.

Величина приведенного износа образцов в условиях схватывания 1-го рода относительно небольшая, однако суммарный приведенный износ валов и образцов в 2 раза превышает величину износа в условиях схватывания 2-го рода. Коэффициент трения при схватывании 1-го рода находится в пределах 1,75—2,5, а в условиях схватывания 2-го рода — 0,8—1,8. Температура на поверхностях трения в условиях схватывания 1-го рода равна 80—450° С, а в условиях схватывания 2-го рода — от 450° С до температуры плавления металла.

Во всем диапазоне изменения скоростей скольжения с увеличением удельного давления соответственно увеличиваются интенсивность износа и температура трения, изменяются коэффициент трения и границы возникновения и развития процессов схватывания. С увеличением давления при развитии процесса схватывания 1-го рода эти границы сужаются и при развитии процесса схватывания 2-го рода — расширяются.

При удельном давлении 5 *кГ/см²* процесс схватывания 1-го рода возникает и развивается в диапазоне изменения скоростей скольжения 0,0025—3 *м/сек*. При скорости 3 *м/сек* он переходит в процесс схватывания 2-го рода, который развивается с увеличением скорости скольжения до 12 *м/сек*. При удельном давлении 25 *кГ/см²* процесс схватывания 1-го рода наблюдается в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—2 *м/сек*, а процесс схватывания 2-го рода в диапазоне 2—12 *м/сек*. При удельном давлении 50 *кГ/см²* процесс схватывания 1-го рода развивается в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—1 *м/сек*, схватывание 2-го рода — от 1 до 12 *м/сек*, при удельном давлении 75 *кГ/см²* — соответственно 0,0025—0,25 и 0,25—12 *м/сек*. Критические точки перехода процесса схватывания 1-го рода в схватывание 2-го рода с увеличением удельного давления смещаются на диаграмме влево, в сторону уменьшения скоростей скольжения.

Из пространственной диаграммы зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде аргона закаленных образцов (сталь У8) по закаленным валам от скорости скольжения и удельного давления (рис. 94) видно, что в диапазоне скоростей скольжения от 0,0025 до 0,3—2 *м/сек* во всем интервале удельных

давлений развивается с малой интенсивностью процесс схватывания 1-го рода. С увеличением скоростей скольжения от 0,3 до 2 м/сек процесс схватывания 1-го рода переходит в процесс схватывания 2-го рода.

Интенсивность износа закаленных образцов и валов в условиях схватывания 1-го рода относительно небольшая — при удельном давлении 75 кг/см² наибольший приведенный износ об-

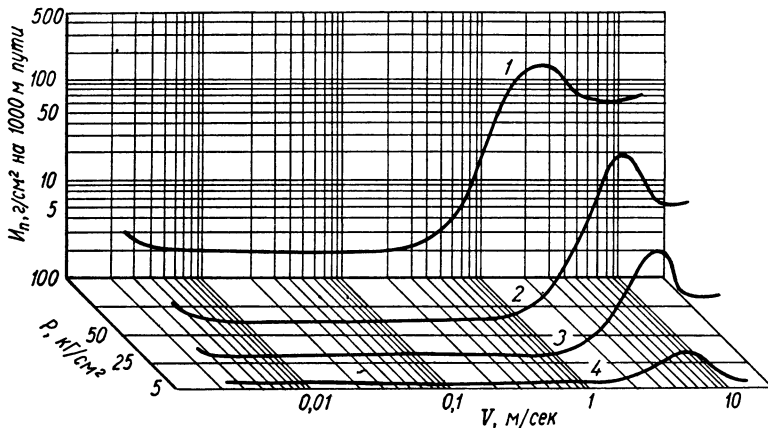


Рис. 94. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде аргона закаленных образцов по закаленным валам в зависимости от скорости скольжения и удельного давления:

1 — 75 кг/см²; 2 — 50 кг/см²; 3 — 25 кг/см²; 4 — 5 кг/см².

разцов достигает 2,0 г/см². Это объясняется малой пластичностью закаленных образцов в условиях незначительно повышенных температур, что препятствует развитию процессов схватывания.

В условиях схватывания 2-го рода интенсивность износа закаленных образцов в сотни раз превышает износ в условиях схватывания 1-го рода. Так, при удельном давлении 75 кг/см² он достигает 140 г/см². С увеличением удельного давления интенсивность износа в условиях схватывания 1-го рода увеличивается незначительно и в условиях схватывания 2-го рода — значительно, например, при скорости 4 м/сек приведенный износ при удельном давлении 25 кг/см² равен 1,8 г/см², при 50 кг/см² — 5,0 г/см² и при 75 кг/см² — 100 г/см².

Интенсивное увеличение износа объясняется тем, что с увеличением скорости скольжения и удельного давления на по-

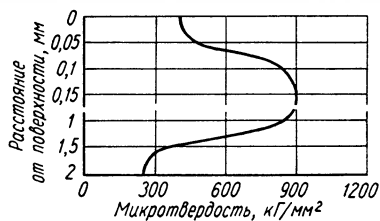
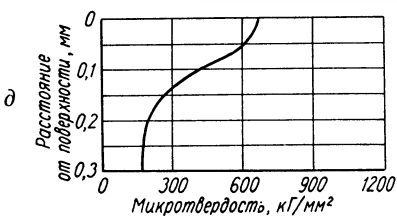
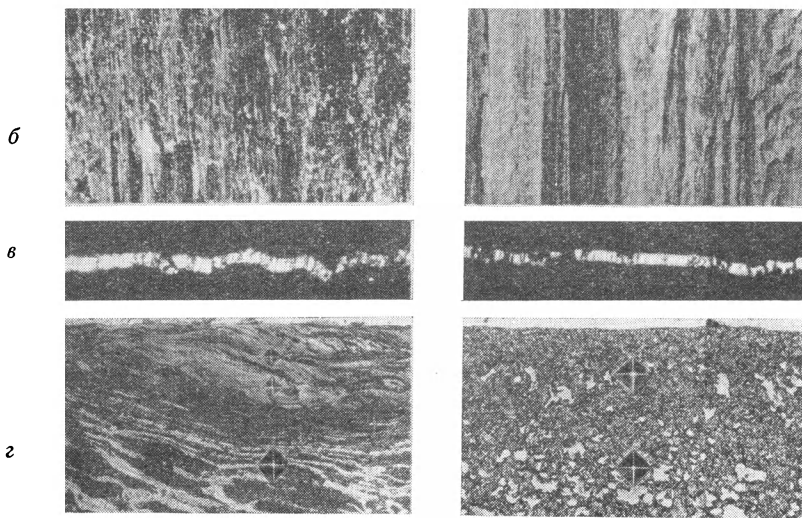
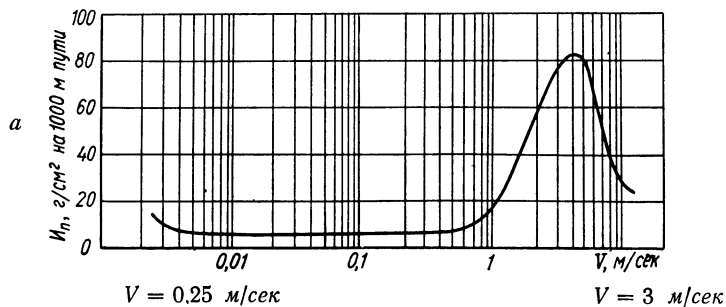


Рис. 95. Результаты испытания нормализованных образцов (сталь 45) в среде давлением 50 кг/см^2 :

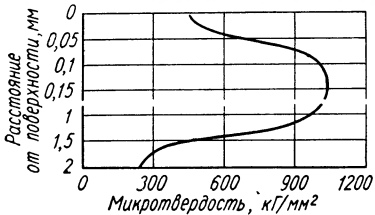
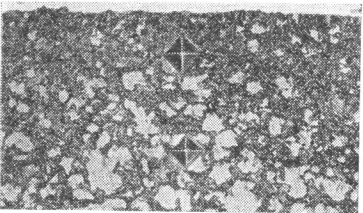
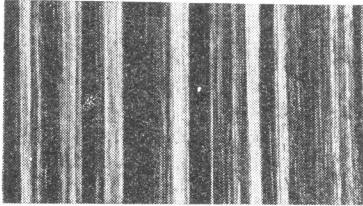
a — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *в* — про ($\times 80$); *г* — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); *д* — график изменений слоев.

верхностях трения возникают высокие температуры, происходит разупрочнение металла, повышение его пластичности, а это способствует интенсивному разрушению защитных пленок и развитию процессов схватывания металлов.

Для выявления ведущих процессов, возникающих при трении и износе, и изучения закономерностей их развития полученные качественные и количественные характеристики процессов трения и износа анализировались во всем диапазоне изменений условий трения (рис. 95).

На поверхностях трения и в поверхностных слоях металлов

$V = 10 \text{ м/сек}$



аргона без смазки, с удельным

филограммы поверхностей трения
нения микротвердости поверхность-

образцов, испытанных в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—1 м/сек, имеются изменения, характерные для условий схватывания 1-го рода. Образцы, испытанные при 0,25 м/сек, имеют шероховатую поверхность, видны вырывы и налипание частиц металлов, следы пластической деформации по направлению движения (рис. 95,б). Микрорельеф поверхности соответствует 4-му классу чистоты (рис. 95,в), в сечении видны следы интенсивного пластического деформирования металла на глубину 200 мк от поверхности трения (рис. 95,г). Значительно повышается твердость деформированного слоя, достигая 690 кг/мм² (рис. 95,д). Образцы, испытанные в диапазоне скоростей скольжения 1—12 м/сек, имеют изменения на поверхностях трения и в поверхностных слоях металлов, характерные для условий схватывания 2-го рода. Так, при скорости 3 м/сек образцы имеют шероховатую поверхность, следы вырывов и налипания частиц металла, размазанного и разупрочненного металла (рис. 95,б). Микрорельеф поверхности соот-

ветствует 5-му классу чистоты (рис. 95,в). Структура поверхностных слоев металлов представляет собой троосто-мартенсит, ближе к поверхности трения преобладает трооститная структура (рис. 95,г). Микротвердость значительно увеличивается и в зоне троостита достигает $400\text{--}600 \text{ кг/мм}^2$, а в зоне троосто-мартенсита — 900 кг/мм^2 (рис. 95,д).

При скорости скольжения 10 м/сек образцы имеют более гладкую поверхность со следами интенсивного течения и размазывания металлов (рис. 95,б). Микрорельеф поверхности соответствует 6-му классу чистоты (рис. 95,в). Поверхностные слои металла имеют троосто-мартенситную структуру, в поверхностных слоях происходит отпуск, в результате чего образуется троостит, под ним находится троосто-мартенситная структура (рис. 95,г).

Микротвердость в зоне троостита достигает $450\text{--}800 \text{ кг/см}^2$, в нижележащих слоях — 1020 кг/мм^2 и на глубине $1,55 \text{ мм}$ от поверхности трения соответствует микротвердости исходного металла. Такие изменения характерны для процессов схватывания 2-го рода.

Во второй серии опытов проводились испытания нормализованных образцов из стали 45 при трении по нормализованным валам из стали 10 в среде углекислого газа без смазки, в диапазоне скоростей скольжения $0,0025\text{--}10 \text{ м/сек}$ и при удельном давлении 50 кг/см^2 .

Установлено, что во всем диапазоне изменения скоростей скольжения, так же как и в предыдущей серии опытов в среде аргона, возникают и развиваются только два ведущих процесса — схватывание 1-го и 2-го рода.

На графике (рис. 96) видны максимумы и минимумы износа, критические точки характерных изменений величины износа, что связано с различной интенсивностью развития процессов схватывания и переходом одного процесса в другой. В диапазоне скоростей скольжения $0,0025\text{--}0,5 \text{ м/сек}$ развивается процесс схватывания 1-го рода, а с увеличением скорости выше $0,5 \text{ м/сек}$ — процесс схватывания 2-го рода.

Износ образцов (кривая 2) в условиях схватывания 1-го рода в среде углекислого газа относительно невелик, однако суммарный износ валов и образцов значительно превышает износ в условиях схватывания 2-го рода (кривая 1). Такое же явление наблюдается при испытании в среде аргона и объясняется влиянием размеров сопряженной пары.

В третьей серии опытов проводились испытания нормализо-

ванных образцов из стали 45 при трении по нормализованным валам из стали 10, а также закаленных образцов по закаленным валам из стали У8, без смазки в активной газовой среде кислорода, в интервале скоростей скольжения 0,0025—12 м/сек и при удельном давлении 5, 25, 50 и 75 кг/см².

На основании полученных результатов построены пространственные диаграммы зависимости приведенного износа нормализованных (рис. 97) и закаленных образцов (рис. 98) от скорости скольжения и удельного давления.

Во всем диапазоне изменения скоростей скольжения и удельного давления возникает и развивается с различной интенсивностью окислительный процесс.

На поверхностях трения образуются прочные защитные пленки, которые, являясь продуктом соединения кис-

лорода с металлом, препятствуют в процессе трения металлическому контакту сопряженных тел и предотвращают возникновение схватывания металлов. Износ образцов в среде кислорода происходит в результате разрушения под действием нормальных и тангенциальных усилий защитных пленок, а не поверхностных слоев чистых металлов. В условиях окислительного износа скорость образования защитных пленок всегда превышает скорость их разрушения. Процесс разрушения и образования защитных пленок приводит к износу поверхностей трения с относительно небольшой интенсивностью.

При скорости скольжения выше 2—5 м/сек скачкообразно возрастает интенсивность весового износа закаленных и нормализованных образцов, что вызывается значительным увеличением скорости окисления металла образцов в среде кислорода при его нагреве в результате трения. Происходит процесс сгорания металла при трении в среде кислорода. Повышение удельного давления приводит к увеличению интенсивности износа образцов.

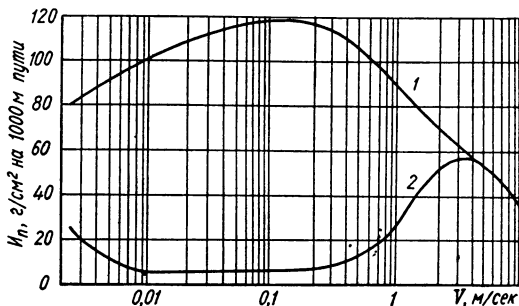


Рис. 96. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из стали 45 по валу из стали 10 в среде углекислого газа и суммарного износа образцов и валов при удельном давлении 50 кг/см² от скорости скольжения.

Коэффициент трения в условиях окислительного износа образцов находился в пределах 0,3—0,7.

Для удобства сопоставления и анализа закономерностей развития процессов схватывания металлов в различных газовых средах — аргоне, углекислом газе, кислороде и воздухе — построены графики приведенного износа нормализованных образцов из стали 45 и валов из стали 10 (рис. 99), а также закаленных об-

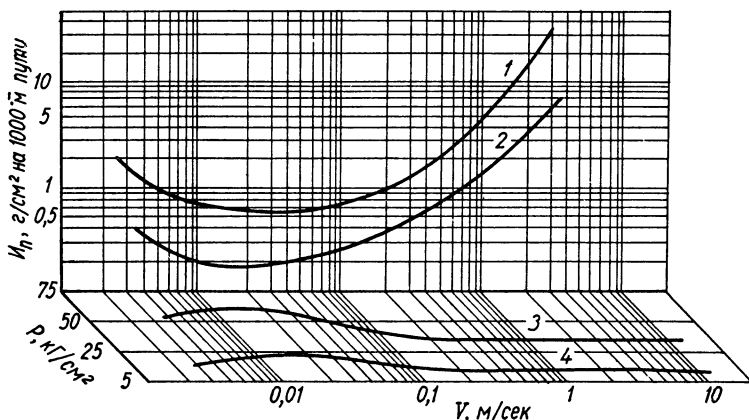


Рис. 97. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде кислорода нормализованных образцов из стали 45 по нормализованным валам из стали 10 от скорости скольжения:

1 — при удельном давлении 75 кг/см²; 2 — 50 кг/см²; 3 — 25 кг/см²; 4 — 5 кг/см².

разцов из стали У8 (рис. 100) при трении в диапазоне скоростей 0,0025—10 м/сек и удельном давлении 50 кг/см².

В нейтральных газовых средах — аргоне и углекислом газе (рис. 99, кривые 2, 3, 5 и 6) — поверхности трения нормализованных образцов изнашиваются во всем диапазоне скоростей с наибольшей интенсивностью; с меньшей интенсивностью они изнашиваются в среде воздуха (кривые 4 и 7) и с наименьшей — в среде кислорода (кривая 1).

В среде аргона и углекислого газа развиваются два ведущих процесса: схватывание 1-го рода (в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,5 м/сек) и 2-го рода (0,5—10 м/сек). В среде воздуха — три процесса: схватывание 1-го рода (0,0025—0,25 м/сек), окисление (0,25—1 м/сек) и схватывание 2-го рода (1—10 м/сек). В среде кислорода — только один окислительный

процесс (от 0,0025 до 3—4 м/сек); при испытании со скоростью скольжения выше 3—4 м/сек образцы сгорают.

Интенсивность износа в условиях схватывания 1-го рода в среде аргона несколько превышает интенсивность износа в среде углекислого газа и в 2—3 раза превышает интенсивность износа в среде воздуха. В условиях схватывания 2-го рода интенсивность износа в аргоне также несколько превышает интенсивность износа в среде углекислого газа и в 5—8 раз превышает

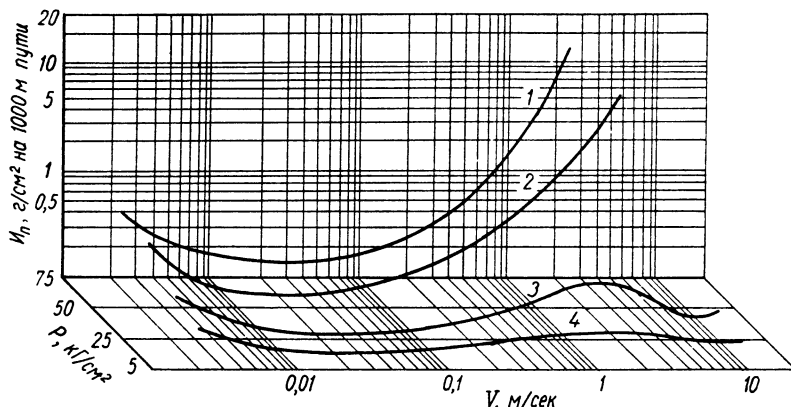


Рис. 98. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении без смазки в среде кислорода закаленных образцов по закаленным валам (сталь У8) от скорости скольжения:

1 — при удельном давлении 75 кг/см²; 2 — 50 кг/см²; 3 — 25 кг/см²; 4 — 5 кг/см².

интенсивность износа в среде воздуха. Интенсивность износа поверхностей трения в нейтральных средах при равных условиях трения превышает интенсивность износа в среде кислорода в несколько сот раз.

Износ закаленных образцов в среде аргона, воздуха и кислорода в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,5 м/сек происходит с малой интенсивностью. В среде аргона в этом интервале скоростей очень слабо развивается процесс схватывания 1-го рода, что и приводит к совсем небольшому износу (рис. 100, кривая 1). В среде воздуха (кривая 3) и кислорода (кривая 2) развиваются окислительные процессы, обуславливающие несколько большую интенсивность износа образцов. При скорости скольжения, превышающей 0,5 м/сек, в средах аргона и воздуха развиваются процессы схватывания 2-го рода и интенсивность износа

образцов скачкообразно растет. Износ в среде аргона (кривая 1) в 8—10 раз превышает износ в среде воздуха (кривая 3). В среде кислорода с увеличением скорости скольжения сверх 1—2 м/сек развиваются окислительные процессы большой интенсивности (сгорание образцов).

Таким образом, развитие процессов схватывания металлов зависит от характера взаимодействия окружающих газовых сред с поверхностью металла, от их способности образовывать защитные пленки, от проч-

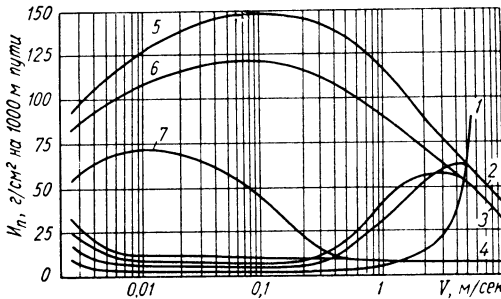


Рис. 99. График зависимости приведенного износа при трении без смазки нормализованных образцов из стали 45 по валу из стали 10 и суммарного износа валов и образцов при удельном давлении 50 кг/см² от скорости скольжения:

1 — в среде кислорода; 2 — аргона; 3 — углекислого газа; 4 — воздуха; 5 — суммарный износ в среде аргона; 6 — углекислого газа; 7 — воздуха.

В среде чистого кислорода в результате образования прочных защитных пленок процессы схватывания металлов не возникают во всем диапазоне изменения скоростей скольжения (0,0025—2÷5 м/сек) и удельных давлений (5—75 кг/см²).

В среде воздуха (при меньшем количестве кислорода) образуются защитные пленки менее интенсивно. При малых и больших скоростях скольжения скорость образования защитных пленок меньше скорости их разрушения, в результате развиваются процессы схватывания металлов 1-го и 2-го рода. При средних скоростях скольжения создаются благоприятные условия для развития окислительного износа.

В средах аргона и углекислого газа при отсутствии кислорода или незначительном количестве его во всем диапазоне изменения

ные пленки, от прочности этих пленок, их сцепляемости с основным металлом. Особая роль в развитии явлений внешнего трения и в борьбе со схватыванием металлов принадлежит кислороду и кислородсодержащим газовым средам. Изменяя количество кислорода в окружающей среде, можно изменять интенсивность образования защитных пленок, а значит — интенсивность развития и границы существования процессов схватывания металлов.

скоростей скольжения и удельных давлений интенсивно развиваются только процессы схватывания 1-го и 2-го рода, так как малоактивное взаимодействие инертных газов с металлом приводит к образованию малопрочных пленок на поверхности металла, которые в процессе трения легко разрушаются. С увеличением удельного давления в средах воздуха, аргона и углекислого газа значительно сужаются границы процесса схватывания 1-го рода и расширяются границы процесса схватывания 2-го рода.

На поверхности трения закаленных образцов (сталь У8)

в активной среде воздуха или кислорода при малой и средней скоростях скольжения в связи с пониженной пластичностью металлов (повышенной прочностью) разрушение защитных пленок происходит с меньшей скоростью, чем их образование. Поэтому развивается окислительный износ. В этих же условиях в инертных газовых средах возникает и развивается процесс схватывания 1-го рода. Причем интенсивность износа поверхностей трения в условиях схватывания 1-го рода в 2—3 раза меньше интенсивности окислительного износа.

Смазочные материалы применяются для механического разделения сопряженных поверхностей. Кроме того, отдельные компоненты жидких смазок, соединяясь с металлом, образуют на поверхностях трения защитные, пассивирующие пленки. В зависимости от свойств жидкие смазки обладают различной полярной активностью и различными характеристиками физической адсорбции.

Поверхностно-активные добавки к смазкам способствуют созданию прочных адсорбционных пленок на поверхностях трения, препятствующих металлическому контакту сопряженных тел.

С целью определения количественных и качественных закономерностей развития процессов схватывания металлов в усло-

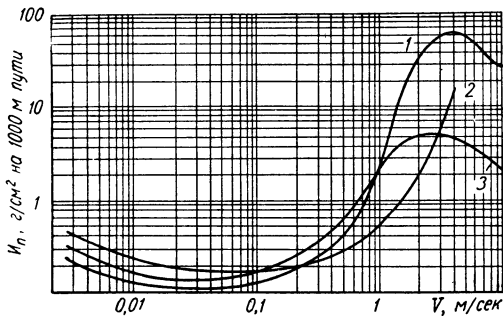


Рис. 100. График зависимости приведенного износа при трении без смазки закаленных образцов по закаленным валам (сталь У8) и удельном давлении 50 кг/см^2 от скорости скольжения.

виях граничного трения в различных жидких средах автором проведен комплекс исследований на образцах из стали, бронзы и чугуна в широком диапазоне изменения скорости скольжения и удельного давления.

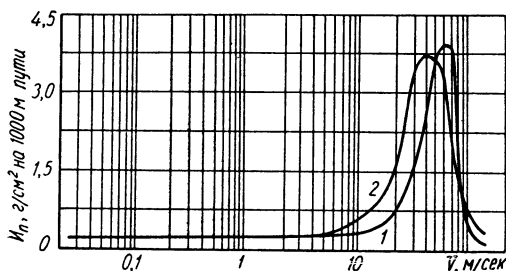


Рис. 101. График зависимости приведенного износа при трении в условиях граничной смазки (МС-20) и удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения:

1 — нормализованных образцов по нормализованному диску (сталь 45); 2 — закаленных образцов по закаленному диску (сталь У8).

машины (рис. 8). Анализ результатов испытаний показал, что в диапазоне скоростей скольжения $0,025\text{—}10 \text{ м/сек}$ происходит с малой интенсивностью окислительный износ поверхностей трения (рис. 101) при относительно малом коэффициенте трения— $0,07\text{—}0,13$ (рис. 102) и температуре, не превышающей $80\text{—}100^\circ \text{C}$ (рис. 103). Прочные масляные пленки и слои вторичных структур, образующиеся в этих условиях на поверхности трения, препятствуют образованию металлических контактов и возникновению схватывания металлов.

Поверхности трения образцов, испытанных в диапазоне $0,025\text{—}10 \text{ м/сек}$, относительно гладки (рис. 104,б). Микрорельеф поверхности соответствует 6—7-му классу (рис. 104,в). Поверхностные слои металлов пластически деформируются на небольшую глубину (рис. 104,г).

В процессе испытаний измерялись весовой износ образцов, величина сил трения и температура поверхностей трения. По окончании испытаний производился также анализ качественных изменений на поверхности трения и в поверхностных слоях металлов образцов.

Испытания проводились по принятой методике на специальной

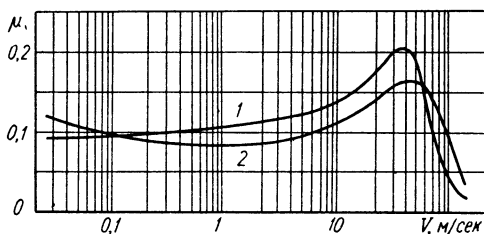


Рис. 102. График зависимости коэффициента трения в условиях граничной смазки (МС-20) при удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения:

1 — нормализованных образцов по нормализованному диску (сталь 45); 2 — закаленных образцов по закаленному диску (сталь У8).

В диапазоне скоростей скольжения 10—20 м/сек наблюдается белый слой вторичной структуры, под ним виден деформированный слой с характерным течением металла по направлению движения образцов. Микротвердость резко увеличивается и превышает твердость исходной структуры в 3,5 раза (рис. 104,д).

В диапазоне скоростей скольжения 20—100 м/сек в поверх-

ностных слоях образцов температура достигает 1000—1100° С. Под действием таких температур в связи с десорбцией и распадом молекул масло теряет свои защитные свойства, происходит разупрочнение металла, интенсивное его деформирование и разрушение защитных пленок. Образуются металлические контакты поверхностей пар трения, происходит схватывание металлов 2-го рода, резко возрастает интенсивность износа.

Коэффициент трения увеличивается, достигая 0,2. На поверхности трения наблюдается размазывание металла по направлению движения (рис. 104,б), чистота поверхности снижается до 5-го класса (рис. 104,в). В поверхностных слоях образуется троосто-мартенситная структура с прожилками окислов (рис. 104,з).

Микротвердость в зоне трооститной структуры увеличивается до 500 кг/мм², а в зоне мартенситной структуры — до 750—800 кг/мм² (рис. 104,д).

В диапазоне скоростей скольжения от 100 м/сек и выше интенсивность износа образцов резко падает, развитие процесса схватывания 2-го рода уменьшается и переходит в сложные физико-химические процессы. На поверхностях трения в результате сгорания масла образуются прочные неметаллические пленки, препятствующие их металлическому контакту. Коэффициент трения снижается до 0,03—0,04.

Существенные изменения химического состава поверхностей трения образцов, работавших при различных скоростях скольже-

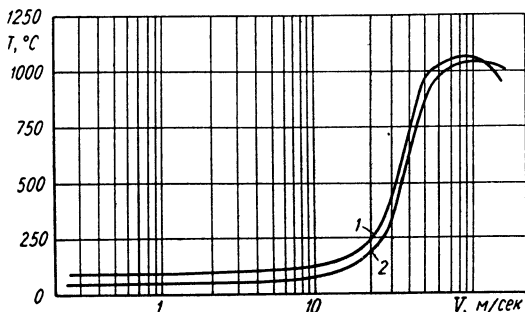
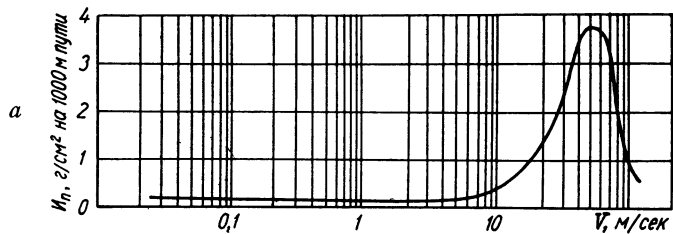


Рис. 103. График зависимости температуры нагрева поверхностей трения в условиях граничной смазки при удельном давлении 25 кг/см² от скорости скольжения:

1 — нормализованных образцов по нормализованным дискам (сталь 45); 2 — закаленных образцов по закаленным дискам (сталь У8).



$V = 10 \text{ м/сек}$

$V = 20 \text{ м/сек}$

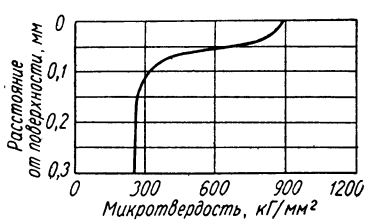
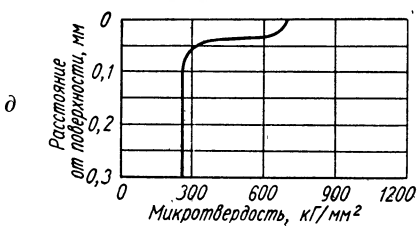
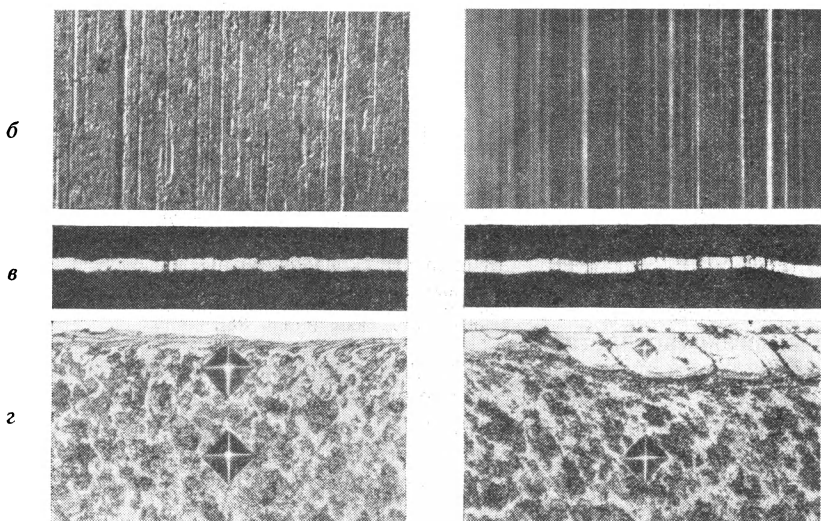


Рис. 104. Результаты испытания нормализованных образцов в паре с норма удельном давлении 25 кг/см^2 :

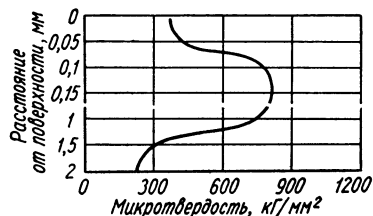
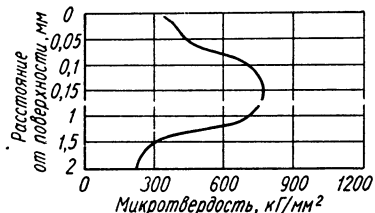
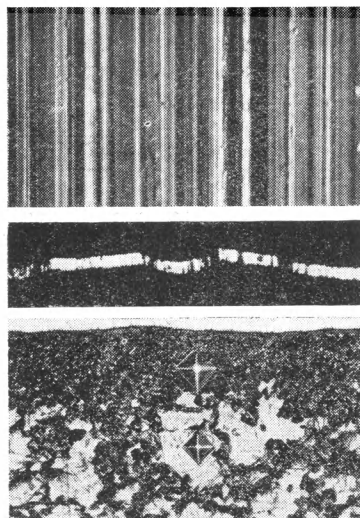
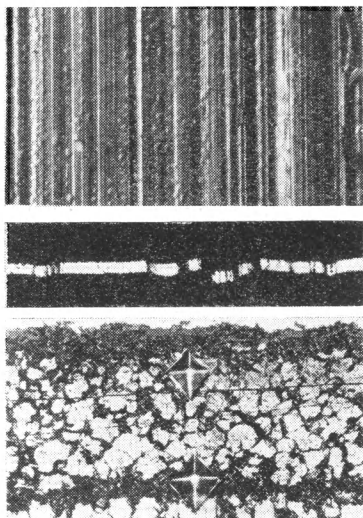
a — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *в* — про ($\times 300$); *г* — графики изменения микротвердости поверхностных слоев.

ния в условиях граничной смазки (МС-20), происходят при скорости скольжения 50 м/сек и выше (рис. 105). Наблюдающееся увеличение концентрации углерода, которое происходит одновременно с уменьшением концентрации легирующих примесей, объясняется интенсивной диффузией углерода, в основном выделяющегося из масла, и, частично, кислорода воздуха в металл благодаря протеканию пластической деформации.

Следует отметить, что при скорости 100 м/сек и выше сохраняется повышенное содержание углерода в поверхностном слое, несмотря на уменьшение величины приведенного износа.

$V = 50 \text{ м/сек}$

$V = 150 \text{ м/сек}$



лизованными дисками (сталь 45) в условиях граничной смазки (МС-20) при филограммы поверхностей трения ($\times 80$); z — микроструктуры поверхностных слоев

При испытании образцов из бронзы Бр. АЖМц в паре с нормализованными дисками из стали 45 и закаленными дисками из стали У8 установлено, что в условиях граничной смазки (МС-20) в диапазоне скоростей скольжения 0,02—20 м/сек бронзовые об-

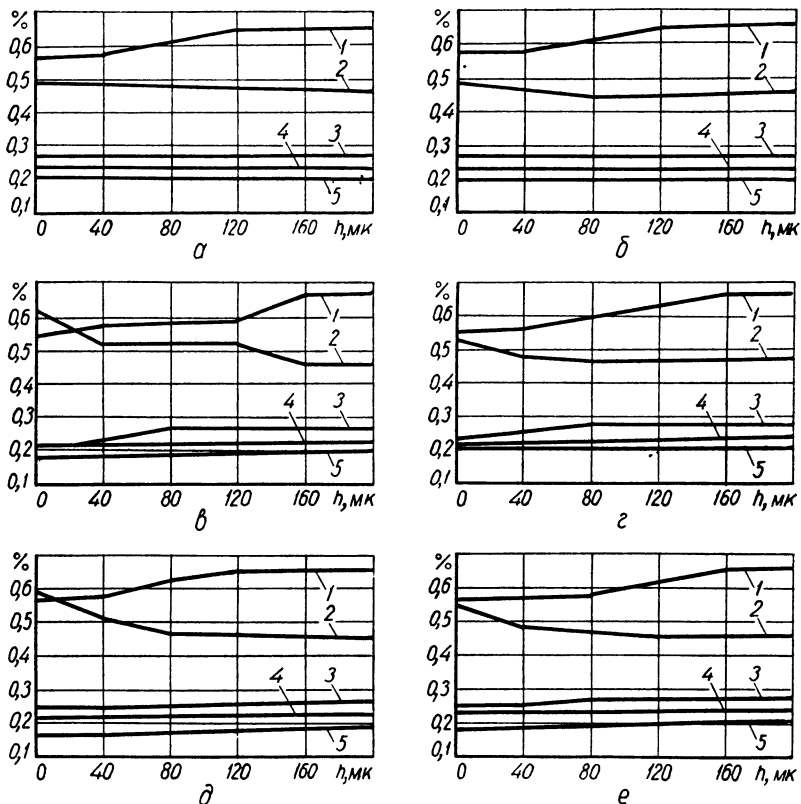


Рис. 105. Графики изменения процентного содержания химических компонентов в поверхностных слоях металла образцов (сталь 45) при трении в условиях граничной смазки (МС-20) и удельном давлении 25 кг/см^2 :

а — скорость скольжения 10 м/сек; б — 20 м/сек; в — 50 м/сек; г — 75 м/сек; д — 100 м/сек; е — 150 м/сек; 1 — марганец; 2 — углерод; 3 — хром; 4 — никель; 5 — кремний.

разцы при трении по нормализованному и закаленному дискам изнашиваются сравнительно мало (рис. 106). На поверхности

трения развиваются окислительные процессы, при этом коэффициент трения находится в пределах 0,07—0,18 (рис. 107).

В диапазоне скоростей скольжения от 20 м/сек и выше возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода, в условиях которого поверхности трения интенсивно изнашиваются. Коэффициент трения в этом случае находится в пределах от 0,07 до 0,3.

Качественные изменения макроструктуры и микро-рельефа поверхностей трения, микроструктуры и микротвердости поверхностных слоев бронзовых образцов, подвергнутых испытанию, свидетельствуют, что во всем диапазоне скоростей скольжения ведущими являются два процесса — окислительный и схватывание 2-го рода.

При испытании образцов из серого чугуна ХМ в паре с нормализованными (сталь 45) и закаленными (сталь У8) дисками окислительные процессы с малой интенсивностью износа развиваются в относительно меньшем диапазоне скоростей скольжения — от 0,025 до 5,0 м/сек (рис. 108). В этих условиях коэффициент трения находится в пределах 0,10—0,35 (рис. 109). Процесс схватывания 2-го рода возникает с увеличением скорости скольжения от 5,0 м/сек и выше.

С увеличением скорости скольжения интенсивность износа возрастает, а коэффициент трения резко уменьшается и находится в пределах 0,35—0,08. Характерные изменения, происходящие

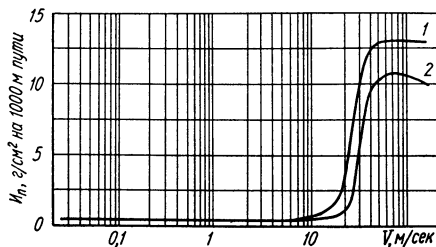


Рис. 106. График зависимости приведенного износа при трении в условиях граничной смазки (МС-20) и удельном давлении 25 кг/см² от скорости скольжения бронзовых образцов (Бр. АЖМц):

1 — по нормализованным дискам из стали 45; 2 — по закаленным дискам из стали У8.

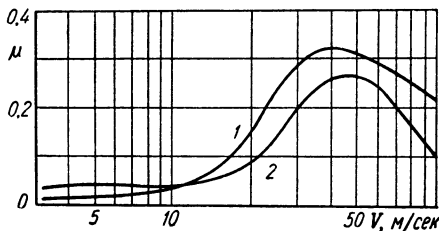


Рис. 107. График зависимости коэффициента трения в условиях граничной смазки (МС-20) и удельном давлении 20 кг/см² от скорости скольжения бронзовых образцов (Бр. АЖМц):

1 — по закаленным дискам из стали У8; 2 — по нормализованным дискам из стали 45.

в процессе испытаний на поверхности трения и в поверхностных слоях чугунных образцов, свидетельствуют, что и в этом случае ведущими являются процесс схватывания 2-го рода и окислительный.

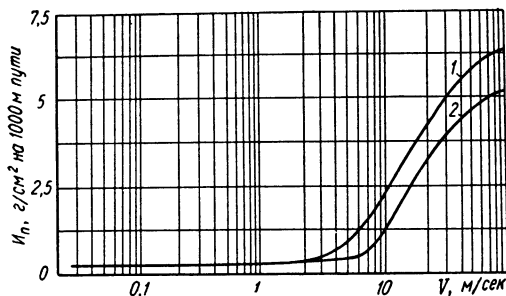


Рис. 108. График зависимости приведенного износа при трении в условиях граничной смазки (МС-20) и удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения образцов из серого чугуна:

1 — по нормализованным дискам из стали 45; 2 — по закаленным дискам из стали У8.

С целью изучения закономерностей развития процессов схватывания металлов при трении в условиях граничной смазки (МС-20) в зависимости от скорости скольжения (0,0025—12 м/сек) и удельного давления (от 100 до 300 кг/см^2) проведена серия опытов. На основании полученных данных построены пространственные диаграммы приведенного износа нормализованных образцов (сталь 45) в паре с нормализованными валами из той же стали (рис. 110), а также закаленных образцов в паре с закаленными валами из стали У8 (рис. 111).

В диапазоне скоростей скольжения от 0,0025 до 0,25—1 м/сек во всем интервале изменения удельных давлений на поверхностях трения нормализованных и закаленных образцов возникают и развиваются в основном окислительные процессы с малой интенсивностью. При этом в результате трения происходит относительно небольшой нагрев поверхности трения (до 60—90° С). Коэффициент трения находится в пределах 0,002—0,15.

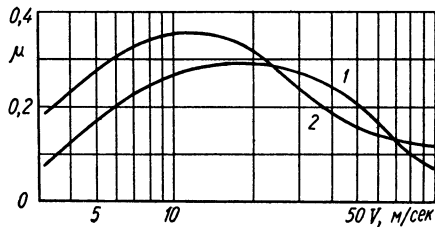


Рис. 109. График зависимости коэффициента трения в условиях граничной смазки (МС-20) при удельном давлении 25 кг/см^2 от скорости скольжения образцов из серого чугуна:

1 — по нормализованным дискам из стали 45; 2 — по закаленным дискам из стали У8.

С увеличением скорости скольжения температура на поверхностях трения скачкообразно растет, достигая 1050—1200° С. В этих условиях разрушается масляная пленка в результате де-

сорбции и распада молекул масла, происходит разупрочнение и интенсивное деформирование поверхностных слоев металла, образуется металлический контакт, возникает и развивается с большой интенсивностью процесс схватывания 2-го рода. Интенсивность износа образцов резко возрастает и при скорости 2—4 м/сек достигает максимума.

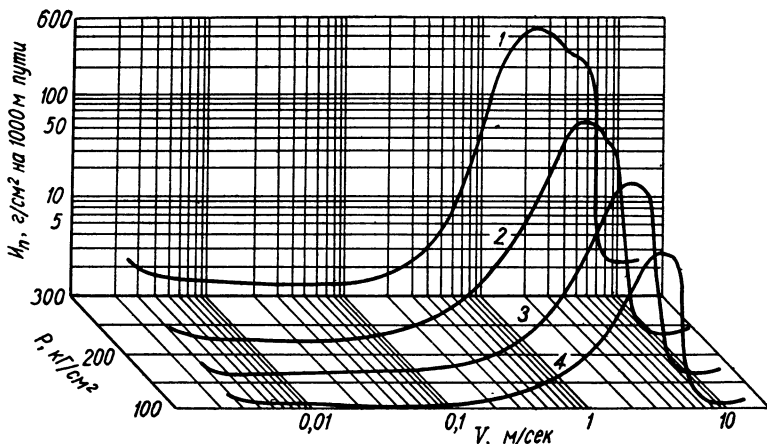


Рис. 110. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении в условиях граничной смазки (МС-20) нормализованных образцов по нормализованным валам из стали 45 от скорости скольжения:

1 — при удельном давлении 300 кг/см²; 2 — 200 кг/см²; 3 — 150 кг/см²; 4 — 100 кг/см².

При дальнейшем увеличении скорости скольжения интенсивность развития процесса схватывания 2-го рода и износа уменьшается, а при критической скорости 4—6 м/сек процесс схватывания прекращается и переходит в сложные химические процессы.

В указанных условиях трения процесс схватывания 2-го рода развивается в строго определенных границах скорости скольжения. При этом с ростом удельного давления границы этого процесса расширяются. Так, например, при удельном давлении 150 кг/см² при испытании закаленных образцов (рис. 111) процесс схватывания 2-го рода наблюдается в пределах 1—4 м/сек, при удельном давлении 200 кг/см² — 0,5—5 м/сек, при 300 кг/см² — 0,25—6 м/сек.

При испытании нормализованных образцов границы образования и развития процесса схватывания 2-го рода несколько

расширяются в сторону повышенных скоростей скольжения, и интенсивность износа поверхностей трения увеличивается по сравнению с интенсивностью износа закаленных образцов.

В условиях граничной смазки (МС-20) начало образования и развития процесса схватывания 2-го рода при испытании нормализованных и закаленных образцов происходит при одинаковых критических скоростях и удельных давлениях. Это обуславливается тем, что начало разупрочнения обоих металлов происходит при одинаковых критических температурах.

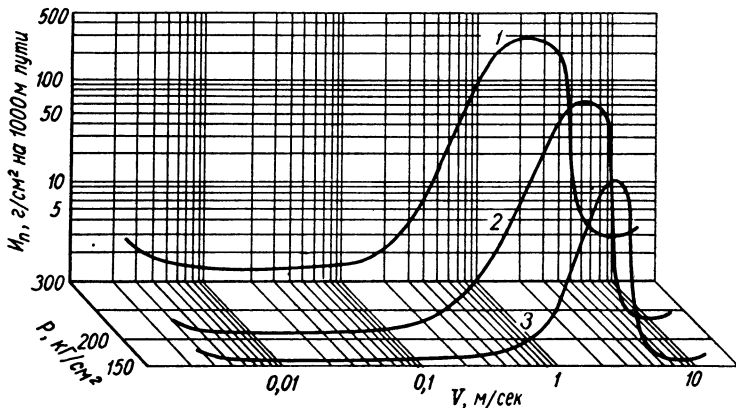


Рис. 111. Пространственная диаграмма зависимости приведенного износа при трении в условиях граничной смазки (МС-20) закаленных образцов по закаленным валам из стали У8 от скорости скольжения:

1 — при удельном давлении 300 кг/см²; 2 — 200 кг/см²; 3 — 150 кг/см².

В диапазоне скоростей скольжения от 4—6 до 12 м/сек под действием высоких температур происходит распад молекул масла и его сгорание. На поверхности трения образуются неметаллические пленки и соединения кислорода с металлом, одновременно происходит интенсивная диффузия выделившегося из масла углерода в глубь поверхностных слоев металла в процессе его пластического деформирования. Насыщение углеродом происходит на глубину до 100—170 мк (рис. 112), количество углерода в этих слоях достигает 3% (рис. 113). Поверхностные неметаллические пленки и вторичные структуры препятствуют образованию металлического контакта сопряженных поверхностей трения и возникновению схватывания металлов. Износ поверхностей трения в этом диапазоне скоростей происходит с малой интенсивностью.

В результате специальной серии опытов установлено, что окружающая инертная газовая среда даже в условиях граничной смазки оказывает огромное влияние на закономерности развития процессов схватывания металлов при трении. Жидкая смазка в условиях инертной окружающей среды (аргона), не содержащей кислорода, не оказывает эффективного сопротивления возникновению и развитию явлений схватывания металлов.

При испытании образцов в паре с валами (сталь 45) в условиях граничной смазки (МС-20) в среде воздуха (рис. 114, кривая 2) при удельном давлении 150 кг/см^2 в диапазоне скоростей скольжения $0,05—0,5 \text{ м/сек}$ образуются на поверхности трения прочные защитные пленки, препятствующие металлическому контакту сопряженных поверхностей. В этом диапазоне развиваются только окислительные процессы. В аналогичных условиях трения, но в среде аргона (кривая 1), смазка теряет свои смазочные свойства. Защитные пленки, возникающие на поверхностях трения в результате взаимодействия смазки с металлом, без кислорода не оказывают достаточного сопротивления схватыванию. В этих условиях трения возникает и интенсивно развивается процесс схватывания 1-го рода и износ образцов значительно превышает износ в среде воздуха.

С увеличением скорости скольжения сверх $0,5 \text{ м/сек}$ на поверхностях трения образцов в условиях граничной смазки как в среде воздуха, так и аргона развивается процесс схватывания 2-го рода, причем интенсивность развития этого процесса в среде аргона значительно выше, чем в среде воздуха.

Особый интерес представляет изучение влияния поверхностно-активных смазочных сред на закономерности развития процесса схватывания металлов. Как известно, поверхностно-активные среды обладают двумя свойствами: во-первых, высокой степенью адсорбции на поверхности металлов и способностью

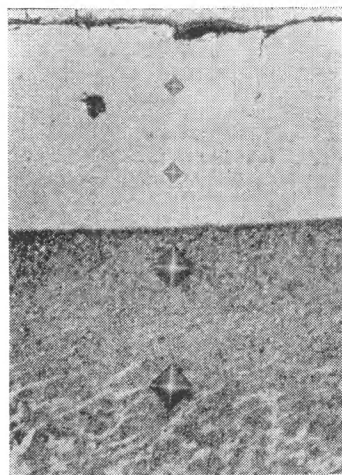


Рис. 112. Микроструктура поверхностного слоя образца (сталь 45) в сечении после испытания в условиях граничной смазки (МС-20) при скорости скольжения 9 м/сек и удельном давлении 200 кг/см^2 ($\times 480$).

образовывать прочные связи с металлом, прочные смазочные адсорбционные пленки, и, во-вторых, поверхностно-активные среды вызывают значительное понижение поверхностной прочности и облегчают пластическую деформацию в процессе трения тончайших поверхностных слоев металлов [97].

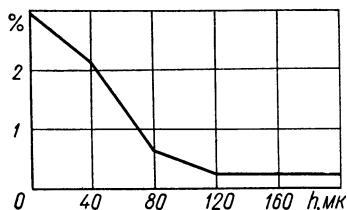


Рис. 113. График изменения количества углерода в поверхностном слое образца (сталь 45) после испытания в условиях граничной смазки (МС-20) при скорости скольжения 9 м/сек и удельном давлении 200 кг/см².

С целью изучения влияния поверхностно-активных сред на закономерности развития процессов схватывания металлов проведено две серии опытов. В первой серии опытов изучалось влияние поверхностно-активных сред на возникновение и развитие процесса схватывания 1-го рода, во второй — на процесс схватывания 2-го рода.

Опыты первой серии производились на испытательной машине по принятой методике (см. стр. 26) на образцах, имевших форму втулок, изготовлен-

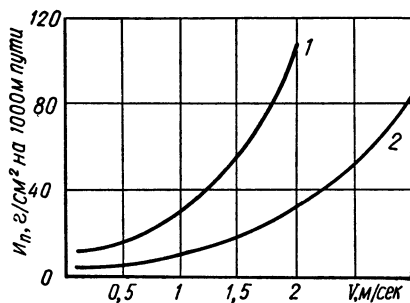


Рис. 114. График зависимости приведенного износа при трении в условиях граничной смазки (МС-20) нормализованных образцов по нормализованному валу (сталь 45) при удельном давлении 150 кг/см² от скорости скольжения.

ных из технически чистого железа, алюминия и меди, при трении со скоростью скольжения 0,0025 м/сек и переменном удельном давлении. Нужно было определить, при каких критических

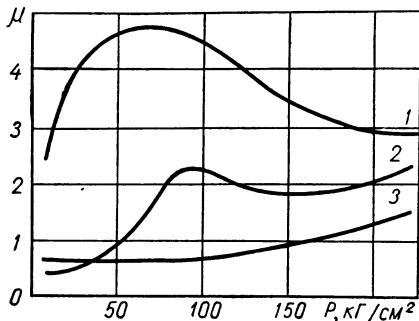


Рис. 115. График зависимости коэффициента трения при испытании на сопротивляемость схватыванию двух образцов из технически чистого железа при скорости скольжения 0,0025 м/сек от величины удельного давления:

1 — без смазки; 2 — в вазелиновом масле; 3 — в вазелиновом масле с добавкой 0,2% олеиновой кислоты.

удельных давлениях возникает процесс схватывания 1-го рода на поверхностях образцов при трении без смазки, в вазелиновом масле и в вазелиновом масле с добавкой 0,2% поверхностно-активной олеиновой кислоты. Возникновение и развитие процесса схватывания определялось по качественным изменениям, происходящим в поверхностных слоях металлов, по изменению коэффициента трения и по наличию прочного соединения (сварки) испытуемых образцов.

У образцов, изготовленных из технически чистого железа,

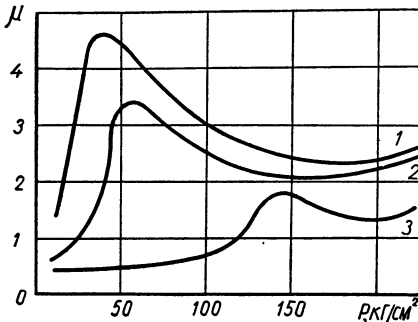


Рис. 116. График зависимости коэффициента трения при испытании на сопротивляемость схватыванию двух образцов из алюминия при скорости скольжения 0,0025 м/сек от величины удельного давления:

1 — без смазки; 2 — в вазелиновом масле; 3 — в вазелиновом масле с добавкой 0,2% олеиновой кислоты.

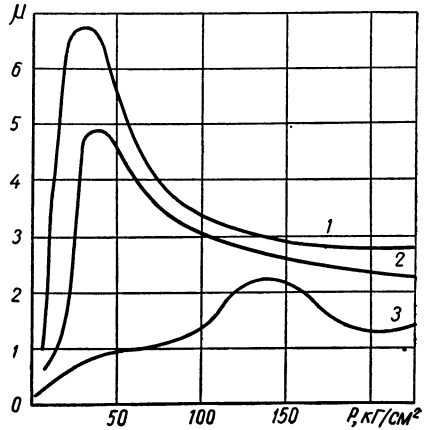


Рис. 117. График зависимости коэффициента трения при испытании на сопротивляемость схватыванию двух образцов из меди при скорости скольжения 0,0025 м/сек от величины удельного давления:

1 — без смазки; 2 — в вазелиновом масле; 3 — в вазелиновом масле с добавкой 0,2% олеиновой кислоты.

алюминия и меди, при трении без смазки процесс схватывания 1-го рода возникает при удельном давлении 8—10 кг/см² и наибольшего развития (полной сварки по всей контактирующей поверхности) достигает при удельном давлении 30—38 кг/см²; при этом коэффициент трения составляет 4,5—6,8 (рис. 115—117).

В неактивном вазелиновом масле процесс схватывания 1-го рода возникает при удельном давлении 10—30 кг/см² и достигает своего наибольшего развития при удельных давлениях 45—80 кг/см². Коэффициент трения в этих условиях несколько снижается и находится в пределах 2,1—4,9.

В среде вазелинового масла с добавкой 0,2% олеиновой кислоты процесс схватывания возникает и развивается при значительно бóльших удельных давлениях ($105\text{--}110 \text{ кг/см}^2$) и достигает своего наибольшего развития при $120\text{--}135 \text{ кг/см}^2$. Коэффициент трения резко снижается и находится в пределах $1,0\text{--}2,2$.

В процессе испытаний под действием нормальных и возникающих тангенциальных усилий в условиях схватывания 1-го рода поверхностные слои металлов интенсивно пластически деформируются на различную глубину в зависимости от окружающей среды. При трении в присутствии поверхностно-активной жидкой среды деформация металла локализуется в тончайших поверхностных слоях и распространяется на глубину $20\text{--}30 \text{ мк}$ (рис. 118). При отсутствии поверхностно-активной среды деформация металла распространяется на значительную глубину, при испытании без смазки — на глубину $200\text{--}250 \text{ мк}$, в среде вазелинового масла — $150\text{--}200 \text{ мк}$.

Уменьшение объема металла, вовлекаемого в пластическую деформацию в поверхностно-активной среде, приводит к значительному снижению тангенциальных усилий. Таким образом, поверхностно-активная среда оказывает значительное сопротивление возникновению и развитию процесса схватывания 1-го рода.

С целью определения влияния масляных сред, имеющих различную химическую и физическую активность, на возникновение процесса схватывания 2-го рода проведена вторая серия опытов. Испытания проводились на образцах в паре с валами из нормализованной стали 45 в условиях граничной смазки (МС-20), гиподной, вазелиновой и вазелиновой с добавкой 0,2% олеиновой кислоты, на испытательной машине (рис. 8) при удельном давлении $0\text{--}200 \text{ кг/см}^2$ и скорости скольжения $1,5\text{--}10,5 \text{ м/сек}$.

Наибольшее сопротивление возникновению процесса схватывания 2-го рода оказывают поверхностно-активная гиподная смазка (рис. 119, кривая 1) и вазелиновое масло с добавкой 0,2% олеиновой кислоты (кривая 2); наименьшее — неактивное вазелиновое масло (кривая 4). Так, например, процесс схватывания 2-го рода возникает при скорости скольжения $4,5 \text{ м/сек}$ в среде гиподной смазки при удельном давлении 100 кг/см^2 , в среде вазелинового масла с добавкой 0,2% олеиновой кислоты — при 80 кг/см^2 , в смазке МС-20 (кривая 3) — при 60 кг/см^2 и нейтральном вазелиновом масле — при 24 кг/см^2 .

Анализ характера изменения приведенного износа металлов позволил установить, что начало возникновения схватывания 2-го рода в среде смазки МС-20 (рис. 120, кривая 1) происходит



a

б

3

2

1

Рис. 118. Характерные изменения поверхностей и поверхностных слоев образцов из технически чистого железа после испытания на сопротивляемость схватыванию при скорости скольжения $0,0025 \text{ м/сек}$ без смазки при удельном давлении 35 кг/см^2 (1), в вазелиновом масле при 80 кг/см^2 (2), в вазелиновом масле с добавкой 0,2% олеиновой кислоты при 135 кг/см^2 (3): а — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); б — микроструктура поверхностных слоев ($\times 300$).

при скорости скольжения 2,7 м/сек. В тех же условиях трения, но в среде поверхностно-активной гиподидной смазки (кривая 2) процесс схватывания возникает при скорости скольжения 4,5 м/сек.

Таким образом, смазки по-разному взаимодействуют с металлами, но все они создают на поверхности трения защитные пленки, предотвращающие в тех или иных условиях трения схватывание металлов.

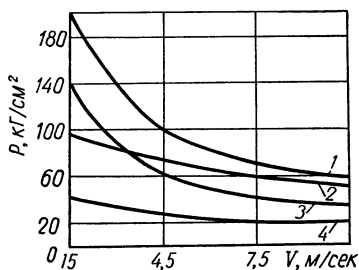


Рис. 119. График зависимости начала возникновения процесса схватывания 2-го рода в условиях граничной смазки от скорости скольжения и удельного давления.

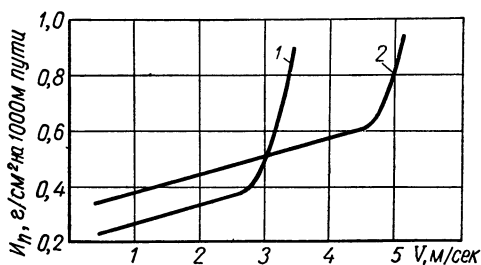


Рис. 120. График зависимости приведенного износа при трении образцов (сталь 45) по валу (сталь 10) в условиях граничной смазки, удельном давлении 100 кг/см² от скорости скольжения.

Граничная смазка в широком диапазоне изменения скоростей скольжения и удельных давлений полностью устраняет процесс схватывания 1-го рода, значительно сдвигает начало возникновения процесса схватывания 2-го рода в сторону больших скоростей скольжения и удельных давлений и сужает его границы.

Испытания образцов в условиях граничной смазки (МС-20) в среде аргона, не содержащей кислорода, показали, что на поверхности трения возникают и интенсивно развиваются процессы схватывания как 1-го, так и 2-го рода. В аналогичных условиях трения, но в среде воздуха, процесс схватывания 1-го рода вовсе не возникает. При больших скоростях скольжения, удельных давлениях и повышенных температурах, когда защитные пленки разрушаются, развивается только схватывание 2-го рода.

В поверхностно-активных средах процесс схватывания 1-го рода возникает при критических удельных давлениях, в 4—5 раз превышающих давления, при которых этот процесс возникает в неактивных жидких средах, а процесс схватывания 2-го рода сдвигается в сторону больших скоростей и давлений.

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ СМАЗОК НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ

В определенном диапазоне условий трения прочные защитные естественные пленки в жидкой смазочной или газовой среде не возникают, либо возникают со скоростью, которая ниже, чем скорость их разрушения. В связи с этим возникают металлургические контакты и схватывание металлов. Поэтому одним из главных и необходимых условий борьбы со схватыванием является создание твердых смазочных пленок, обладающих особыми антифрикционными свойствами. Твердые смазки можно вводить в зону трения различными путями, например, непосредственно в металл (методами порошковой металлургии), нанесением на поверхность трения, созданием тумана из твердых смазок и др.

Автором проведены исследования влияния твердых смазок (графита «П», окиси цинка, нитрида бора и флогопита), введенных в массу металла (никеля) методом порошковой металлургии, которые применяются в качестве составляющих антифрикционных материалов для работы при больших скоростях скольжения, больших удельных давлениях и высоких температурах. Образцы испытывались в паре с дисками из стали ЭИ437.

В ходе опытов скорость скольжения достигала 300 м/сек , что соответствует требованиям современного и перспективного машиностроения.

В результате опытов установлено, что с увеличением скорости скольжения износ образцов уменьшается, причем это уменьшение значительнее для антифрикционного материала, содержащего оптимальное количество твердой смазки. Если с увеличением скорости от 100 до 300 м/сек износ материала с содержанием $40\% \text{ ZnO}$ уменьшается в 20 раз (рис. 121, кривая 1), то износ материала с $20\% \text{ ZnO}$ практически не изменяется (рис. 121, кривая 4). По абсолютной же величине износ материала с содержанием $20\% \text{ ZnO}$ в 30 — 40 раз меньше износа материала с $40\% \text{ ZnO}$.

Коэффициент трения с увеличением скорости скольжения плавно снижается при испытании материалов с содержанием 30 , 20 и $10\% \text{ ZnO}$ (рис. 122, кривые соответственно 2, 4 и 3). При содержании $40\% \text{ ZnO}$ коэффициент трения с увеличением скорости скольжения увеличивается (рис. 122, кривая 1).

Зависимости износа и коэффициента трения от скорости скольжения для такой твердой смазки, как графит, имеют в основном такой же характер, как и при испытании материалов с окисью цинка.

Общий характер закономерностей при испытании материалов с нитридом бора такой же, как и для материалов с окисью

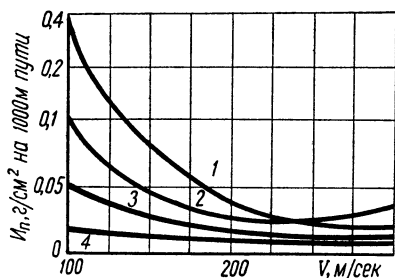


Рис. 121. График зависимости приведенного износа металллокерамических образцов на основе никеля с добавкой 40% окиси цинка (кривая 1), 30% (2), 10% (3) и 20% (4) при испытании в паре с дисками из стали ЭИ437 при удельном давлении $2,5 \text{ кг/см}^2$ от скорости скольжения.

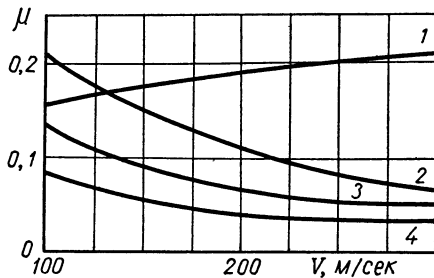


Рис. 122. График зависимости коэффициента трения при испытании металллокерамических образцов на основе никеля с добавкой окиси цинка в паре с дисками из стали ЭИ437 и удельном давлении $2,5 \text{ кг/см}^2$ от скорости скольжения.

цинка и с графитом, но по количественным показателям износа образцов нитрид бора значительно уступает окиси цинка и гра-

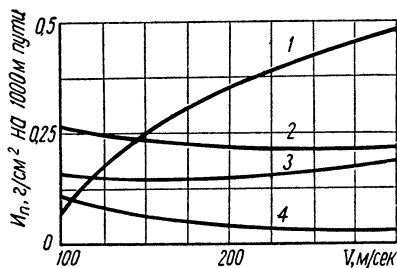


Рис. 123. График зависимости приведенного износа металллокерамических образцов на основе никеля с добавкой флогопита при испытании в паре с дисками из стали ЭИ437 и удельном давлении $2,5 \text{ кг/см}^2$ от скорости скольжения.

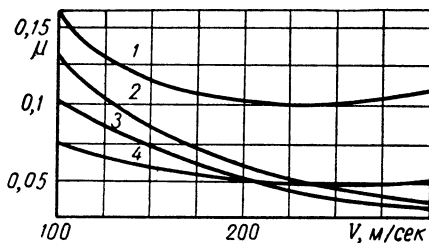


Рис. 124. График зависимости коэффициента трения при испытании металллокерамических образцов на основе никеля с добавкой 40% флогопита (кривая 1), 30% (2), 20% (3) и 10% (4) в паре с дисками из стали ЭИ437 при удельном давлении $2,5 \text{ кг/см}^2$ от скорости скольжения.

фиту. При равных условиях трения износ материала с нитридом бора в 15—20 раз больше, чем материала с окисью цинка.

При испытании материала с содержанием 40% флогопита (рис. 123, кривая 1) износ при увеличении скорости скольжения значительно возрастает. Для материалов с содержанием 30, 20 и 10% флогопита (кривые 2, 3 и 4) износ с увеличением скорости хотя и снижается, но весьма незначительно. Коэффициент трения (рис. 124) во всех случаях с увеличением скорости снижается.

В результате исследований установлены оптимальные количества каждого вида твердой смазки в антифрикционном материале, а также выявлены наиболее перспективные по износостойкости твердые смазки для данных условий трения (рис. 125).

Макро- и микроструктурный анализ поверхностей трения показал, что в процессе трения и износа антифрикционных материалов, в состав которых входят сухие смазки, на поверхностях трения и в поверхностных слоях происходят сложные физико-химические процессы. При высоких температурах, развивающихся на поверхностях трения при каталитическом действии металлов, в условиях интенсивных пластических деформаций поверхностных слоев твердая смазка активно взаимодействует как с окружающей средой, так и с металлом пар трения.

В результате такого взаимодействия образуются тонкие пленки вторичных структур, свойства которых и определяют антифрикционные характеристики данной сухой смазки, т. е. ее способность препятствовать развитию металлического контакта трущихся элементов, а следовательно, развитию процессов схватывания 1-го и 2-го рода.

Наиболее эффективными твердыми смазками в борьбе со схватыванием металлов при больших скоростях скольжения и высоких температурах являются окись цинка с оптимальным составом 20% и флогопит — 10% по объему к основному металлу.

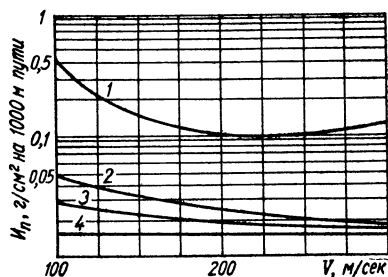


Рис. 125. График зависимости приведенного износа металлокерамических образцов на основе никеля с добавкой 10% нитрида бора (кривая 1), 10% графита (2), 10% флогопита (3) и 20% окиси цинка (4) при испытании в паре с дисками из стали ЭИ437 и удельном давлении $2,5 \text{ кг/см}^2$ от скорости скольжения.

§ 3. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

Возникновение и границы развития процессов трения и износа, как подтверждают исследования различных авторов, зависят от основных физико-химических и механических свойств металлов в исходном состоянии, свойств, полученных в результате различных методов обработки, а также вызванных процессом трения и изнашивания.

К важнейшим факторам, определяющим интенсивность износа сопряженных деталей, Б. И. Костецкий [57] относит также способность к образованию химических соединений на поверхностях трения, к схватыванию в процессе трения, тепловые свойства, взаимодействие со смазкой.

Из работ Ф. Бодена [132] и др. известно, что в обычных условиях поверхности трения покрыты пленками, которые препятствуют проявлению механических свойств в поверхностных слоях металла. Однако при интенсивном износе влияние этих пленок на износ уменьшается.

В. Д. Кузнецов [77] приводит ряд данных, из которых видно, что прямой связи между износостойкостью и исходными механическими свойствами металла нет.

В исследованиях П. К. Топехи [108] установлено, что в итоге термических процессов, происходящих на поверхности трущегося металла, а также упрочнения и разупрочнения его, диффузионных явлений и т. п. состояние поверхности трения изменяется. При указанных условиях создаются вторичные структуры, которые и определяют антифрикционность и износостойкость металла. На износостойкость металла оказывает влияние также микро- и макроструктура, размер зерна, степень чистоты поверхности и качество ее обработки.

Влияние пластической деформации поверхностных слоев, обусловливаемой напряженным состоянием и температурой активных объемов металла, изучалось многими исследователями: В. А. Кривоуховым [74], Г. М. Заморуевым [35], Б. Д. Грозиним [23], Г. Финчем [137], М. А. Большаниной [10] и др. Все они показали, что возрастание пластического течения поверхностных слоев способствует контактному схватыванию металлических поверхностей. Поэтому в практике для повышения износостойкости

применяются механические способы обработки поверхности наклепом, накаткой и другими способами, уменьшающими пластичность.

П. Е. Дьяченко [32] показал, что при любом удельном давлении отожженные образцы изнашиваются сильнее, чем образцы, предварительно наклепанные.

А. П. Семенов [103] пришел к заключению, что предварительный наклеп способствует проявлению схватывания. Однако при постоянстве давления в сопряженной паре и в случае недостаточности давления для развития пластической деформации, необходимой для схватывания, наклеп может повышать способность против схватывания.

В работах М. М. Хрущова [113] указывалось, что в некоторых условиях наклеп не оказывает благоприятного действия на износостойкость.

Существенное влияние на способность к схватыванию оказывает чистота поверхности. М. М. Хрущов [111], исследуя трение стальной цапфы (сталь 45) при несовершенной смазке, заметил, что удельное давление, при котором начинается заедание, повышается с уменьшением шероховатости поверхности цапфы. Аналогичное влияние шероховатости на износ отмечает Б. Д. Грозин [22]: при испытании баббита по шейке с различной обработкой износ баббита был прямо пропорционален чистоте обработки вала.

В. А. Кислик [47] на основании лабораторных исследований установил, что возникновение схватывания поверхностей в точках действительного контакта зависит от микропрофиля этих поверхностей. Влияние шероховатости на износ изучалось также П. Е. Дьяченко [30, 31], А. А. Маталиным [87] и др.

О влиянии твердости поверхностей трения на развитие процессов износа пока нет общего мнения. Некоторые исследователи считают, что износостойкость с увеличением твердости повышается [9, 92, 95, 117]. Другие исследователи придерживаются иного мнения [77, 93, 146, 148]. О. Нибердинг установил, что износостойкость материалов при истирании стальным и чугуном дисками не одинаковая. По этому поводу А. П. Грин [141] отмечал, что на процессы изнашивания абсолютное значение твердости не оказывает непосредственного влияния, но относительная твердость двух скользящих поверхностей такое влияние оказывает.

А. П. Семенов [103] установил, что природа, концентрация и состояние примесей в сплаве (твердый раствор, химическое

соединение, свободные включения) оказывают влияние на способность металлов к схватыванию.

В. А. Кислик [48], В. В. Чернышев [118, 119], А. Ф. Челноков [117] и др. определили, что большое влияние на схватывание стали оказывает количество содержащегося в ней углерода.

К. Гудзейт [140] провел исследование зависимости сопротивления схватыванию разноименных пар металлов от их взаимной растворимости. Установлено, что схватывание определяется возможностью трущейся пары металлов образовывать тот или другой вид «внутриметаллического соединения».

И. В. Крагельский и Е. М. Швецова [72] пришли к выводу, что способность к схватыванию определяется строением кристаллической решетки металла.

М. М. Хрущов [112] считает, что при одинаковой твердости гетерогенные материалы проявляют меньшую склонность к схватыванию, чем гомогенные, а также что при сопряжении разнородных материалов склонность к схватыванию уменьшается.

Итак, возникновение процессов схватывания в большой мере зависит от физико-химических и механических свойств металлов в исходном состоянии, а также от изменения свойств поверхностных слоев после технологической обработки и в результате трения и износа.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПО ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Отсутствие классификации металлов и сплавов по их износостойкости затрудняет правильное использование металлов и сплавов для изготовления деталей машин, приводит к ошибкам при выборе их для изготовления деталей проектируемых машин и усложняет дальнейшую разработку и изыскание износостойких металлических материалов.

Для изучения закономерностей развития процессов трения и износа различных металлов и сплавов была сделана попытка классифицировать их по износостойкости [62].

Основными видами износа деталей машин при трении скольжения являются: износ в условиях схватывания 1-го рода, окислительный износ, износ в условиях схватывания 2-го рода и абразивный износ.

Возникновение этих основных видов износа тесно связано со свойствами трущихся материалов и с взаимодействием поверхностей трения с кислородом воздуха. Эти виды износа возникают

при сухом трении и проявляются при граничной смазке. Абразивный износ зависит от наличия и свойств абразивной среды.

Практика эксплуатации машин и лабораторные исследования показали, что различные металлы и сплавы в зависимости от характера их обработки по-разному проявляют способность к схватыванию и окислению. Изменением методов обработки металлов можно устранить нежелательные виды износа — схватывание 1-го и 2-го рода и вызывать на поверхности трения более благоприятный вид износа — окислительный [59].

В зависимости от того, как проявляется в металлах способность к схватыванию и окислению при трении, а также от свойств пленок окислов, образующихся на поверхностях трения, металлы и сплавы классифицируются по износостойкости, определяющей сроки службы и качество работы машин.

Способность металлов к схватыванию наиболее целесообразно изучать в условиях, при которых схватывание проявляется в чистом виде и не сопровождается другими процессами. Такие условия создаются при трении без смазки в среде аргона. Способность металлов к окислению и свойства пленок окислов, образующихся при трении, лучше всего изучать при трении без смазки в среде кислорода.

Первая серия опытов проведена на специальной машине трения КЕ-2 с герметической камерой, которая позволяет вести испытания в различных газовых средах. Испытанию при сухом трении в воздухе, кислороде, аргоне и последующему металлографическому исследованию были подвергнуты образцы из технического чистого железа, стали 45, меди, бронзы Бр. АМц, Бр. АЖМц, Бр. О14 и Бр. С30, алюминия, олова, баббита Б83, свинца, висмута, сурьмы, кадмия, никеля, цинка, магния и кобальта. Трение образцов осуществлялось о вращающийся эталонный диск из стали 45. Скорость перемещения поверхностей трения во время испытаний составляла 6 м/сек , удельное давление — $7,5 \text{ кг/см}^2$.

При испытаниях измерялись сила трения и температура на поверхности трения и определялись приведенные весовой и объемный износы образцов. При металлографическом анализе исследовалась поверхность трения образцов и измерялась микротвердость этих поверхностей.

Результаты этой серии опытов подтвердили предположения о резко отличных способностях различных металлов и сплавов схватываться и окисляться, а также образовывать при окислении на поверхностях трения вторичные структуры, предохраняющие

металлы и сплавы от усиленного износа или способствующие увеличению интенсивности износа. На основании полученных результатов разработаны схема (рис. 126) и принцип классификации металлов и сплавов по их износостойкости.

В *первую* группу входят металлы и сплавы, которые проявляют достаточную способность к схватыванию 1-го и 2-го рода. Это железо и его сплавы, медь и некоторые ее сплавы (Бр. АМц,

Группа металлов и сплавов	Склонны к схватыванию	Не склонны к схватыванию	Склонны к окислению		Не склонны к окислению	Оценка износостойкости
			Пленки окислов более износостойкие, чем металл	Пленки окислов менее износостойкие, чем металл		
1						Износостойкие в условиях окислительного износа
2						Износостойкие
3						Износостойкие в условиях, исключаящих окислительный процесс
4						Неизносостойкие

Рис. 126. Схема классификации металлов и сплавов по их износостойкости.

Бр. АЖМц), а также алюминий. В условиях окислительного трения металлы и сплавы этой группы образуют защитные пленки окислов, обладающие более высокой твердостью по сравнению с исходным металлом и хорошо сопротивляющиеся изнашиванию.

Ко *второй* группе относятся металлы и сплавы, не склонные к схватыванию. Это олово и его сплавы и целый ряд антифрикционных металлов и сплавов. При окислительном трении они образуют защитные пленки окислов, хорошо сопротивляющиеся изнашиванию.

В *третью* группу входят металлы и сплавы, не проявляющие способности к схватыванию (сурьма, висмут, кадмий и др.). При окислительном трении они образуют хрупкие, быстро разрушающиеся пленки окислов, резко интенсифицирующие износ.

К *четвертой* группе относятся металлы и сплавы, которые проявляют способность к схватыванию, а в условиях окисли-

тельного трения образуют быстро разрушающиеся пленки окислов, в результате чего интенсивность износа резко увеличивается. Ярким представителем этой группы является цинк.

Пользуясь предложенной классификационной схемой, можно определять условия трения, однако эту схему не следует рассматривать как неизбежную при всех условиях.

Процесс износа при обычных условиях работы машин зависит во многом от внешних механических воздействий и в первую очередь от скорости скольжения поверхностей трения деталей. Эта зависимость изучалась автором во второй серии опытов.

Испытывались образцы из стали, олова, сурьмы и цинка. Опыты проводились при сухом трении скольжения в воздушной среде на универсальной машине КЕ-4. Удельное

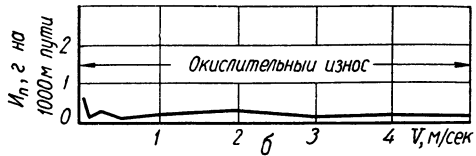
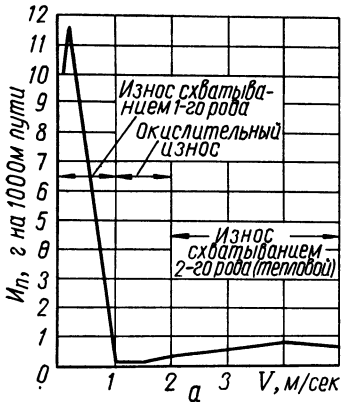


Рис. 127. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов по валу (сталь 45) и удельном давлении 20 кг/см^2 от скорости скольжения:

а — образцы из стали 45; б — из олова.

давление на образец во время испытаний поддерживалось постоянным (20 кг/см^2), а скорость скольжения изменялась от 0,04 до 5 м/сек. Трение осуществлялось по стальному эталонному валу.

На основании результатов испытаний построены графики зависимости износа от скорости скольжения (рис. 127, 128), свидетельствующие о том, что при обычных условиях трения металлы подчиняются основным положениям разработанной классификации.

В металлах первой группы (рис. 127,а) при изменении скорости скольжения наблюдается чередование видов износа в результате схватывания и окисления, причем интенсивность окислительного износа незначительна вследствие образования износостойких пленок окислов.

Металлы второй группы (рис. 127,б) во всем диапазоне изменения скоростей скольжения подвергаются только окислительному виду износа с очень малой интенсивностью, что также объясняется высокой износостойкостью пленок окислов.

Окислительный износ во всем диапазоне изменения скоростей скольжения характерен и для металлов третьей группы (рис. 128,а), однако вследствие образования хруп-

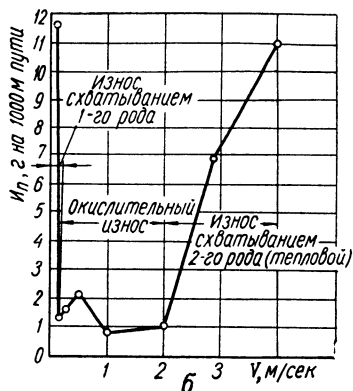


Рис. 128. График зависимости износа при трении без смазки образцов по валу (сталь У8) и удельном давлении 20 кг/см^2 от скорости скольжения: а — образцы из сурьмы; б — из цинка.

ких неизносостойких пленок окислов интенсивность его достигает значительной величины.

В металлах четвертой группы (рис. 128,б) изменение скорости скольжения приводит к чередованию видов износа, причем интен-

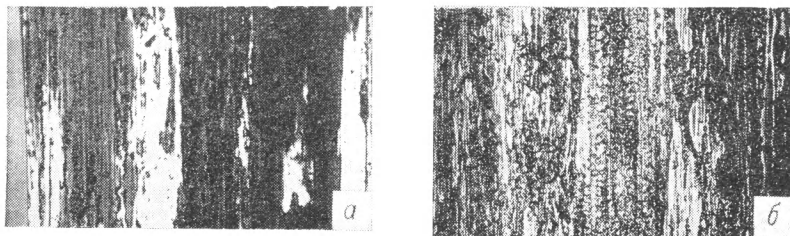


Рис. 129. Поверхности трения образцов (сталь 45), испытанных при скорости скольжения 6 м/сек ($\times 350$) в среде: а — кислорода; б — аргона.

сивность окислительного износа повышена, а диапазон скоростей, в котором наблюдается этот вид износа, ограничен.

Поверхности трения каждой группы металлов имеют свои характерные особенности, отражающие процесс их разрушения

при трении. Так, на поверхностях трения металлов первой группы в результате окислительного износа образуются сплошные пленки окислов (рис. 129,а). Микротвердость поверхностей трения, покрытых пленками окислов, гораздо больше микротвердости исходного металла.

Для образцов из металлов первой группы, износ которых произошел в результате проявления способности к схватыванию, характерна поверхность трения, представленная на рис. 129,б.

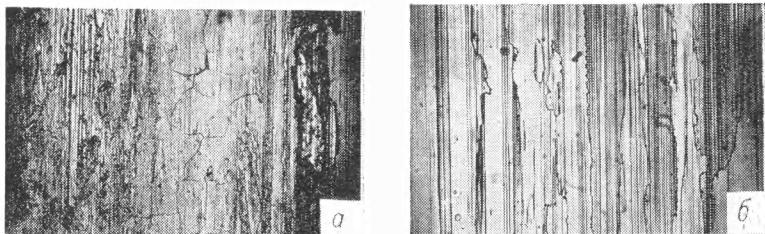


Рис. 130. Поверхности трения образцов (бронза Бр. О14), испытанных при скорости скольжения 6 м/сек ($\times 350$) в среде:
а — кислорода; б — аргона.

На рис. 130,а представлено микрофото поверхности трения, характерной для образцов, изготовленных из металлов второй группы, которые испытывались в окислительных условиях трения: видны сплошные пленки окислов, имеющие большую износостойкость и высокую твердость.

Этого нет при испытании образцов из металлов второй группы в условиях трения, способствующих схватыванию (рис. 130,б).

Поверхность трения, образующаяся в результате износа металлов третьей группы в условиях окислительного трения, показана на рис. 131,а: видны рыхлые неизносостойкие пленки окислов.

В условиях, благоприятных для развития процессов схватывания, металлы третьей группы не проявляют склонности к схватыванию (рис. 131,б).

На поверхностях трения металлов четвертой группы в условиях окислительного износа образуются интенсивно разрушающиеся пленки окислов, а в условиях, благоприятных для развития процессов схватывания, в значительной степени проявляется способность к схватыванию (рис. 132).

Металлы и сплавы первой и второй групп широко применяются для изготовления деталей машин, работающих в условиях

трения качения и трения скольжения. Причем для повышения износостойкости металлов и сплавов первой группы ведется борьба, с одной стороны, за ограничение процессов схватывания путем уменьшения возможностей пластической деформации (специальная механическая, термическая, химико-термическая обработка и др.), с другой стороны, предпринимаются меры для усиления защитного действия окислов (оксидирование, фосфатирование, сульфидирование и др.).

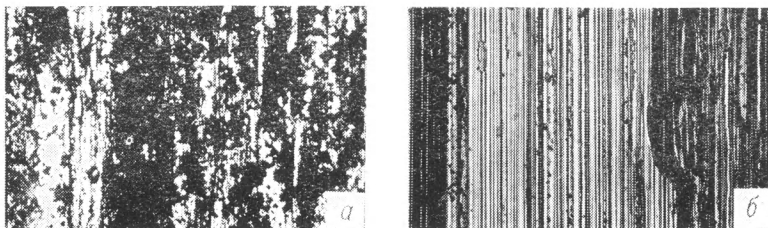


Рис. 131. Поверхности трения образцов (сурьма), испытанных при скорости скольжения 6 м/сек ($\times 350$) в среде: а — кислорода; б — аргона.

Бороться со схватыванием антифрикционных металлов и сплавов (вторая группа) нет надобности. В этом случае ведется борьба, главным образом, за улучшение их вторичных свойств: при-

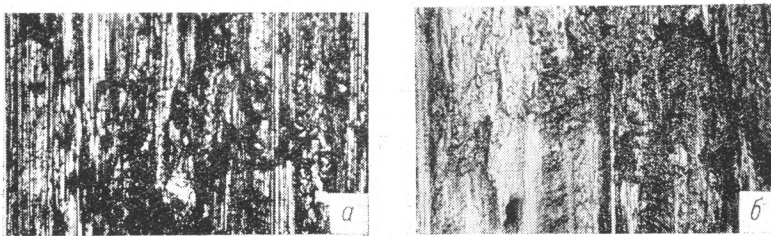


Рис. 132. Поверхности трения образцов (цинк), испытанных при скорости скольжения 6 м/сек ($\times 350$) в среде: а — кислорода; б — аргона.

рабатываемости, снижения коэффициента трения и повышения износостойкости путем введения легирующих присадок и т. д.

Металлы и сплавы третьей и четвертой групп не применяются для изготовления деталей машин, работающих в условиях трения

первого и второго рода, потому что при взаимодействии трущихся поверхностей металла с кислородом воздуха в результате окисления образуются хрупкие разрушающиеся пленки.

Для дальнейшей разработки классификационной схемы проведена вторая серия опытов с более сложными сплавами в более широком диапазоне условий трения.

Образцы из углеродистых, легированных, инструментальных и нержавеющей сталей, различных чугунов, твердых, жаропрочных алюминиевых, магниевых и медных сплавов и баббитов испытывались на износ в паре с нормализованными валами из стали 45 по принятой методике на испытательной машине (рис. 8). Испытания проводились в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—5 м/сек при трении без смазки.

Удельное давление для каждого испытуемого металла было постоянным и соответствовало 0,01 части предела прочности этих металлов.

На рис. 133 представлен график зависимости износа образцов из углеродистых сталей при испытании в паре с нормализованными валами (сталь 45) от скорости скольжения. Образцы из технического чистого железа испытывались при удельном давлении 30 кг/см^2 (кривая 3), из среднеуглеродистой нормализованной стали 45 — при 75 кг/см^2 (кривая 2), из высокоуглеродистой закаленной стали У8 — при 100 кг/см^2 (кривая 1).

Анализ результатов испытаний позволил установить, что в диапазоне малых скоростей скольжения (0,0025—0,25 м/сек) на поверхностях трения образцов из технического чистого железа и среднеуглеродистой стали 45 возникает и интенсивно развивается процесс схватывания 1-го рода, а в диапазоне средних скоростей (0,25—0,5 м/сек) преобладают окислительные процессы и с увеличением скорости скольжения от 0,5 м/сек и выше возникает и развивается процесс схватывания 2-го рода.

При испытании образцов из высокоуглеродистых сталей У8 в диапазоне малых и средних скоростей на поверхности трения

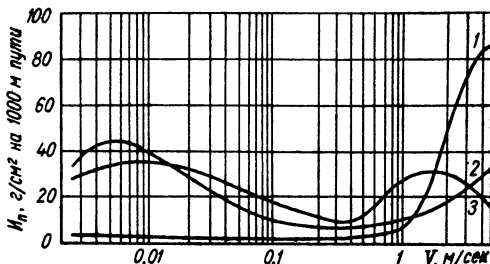


Рис. 133. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

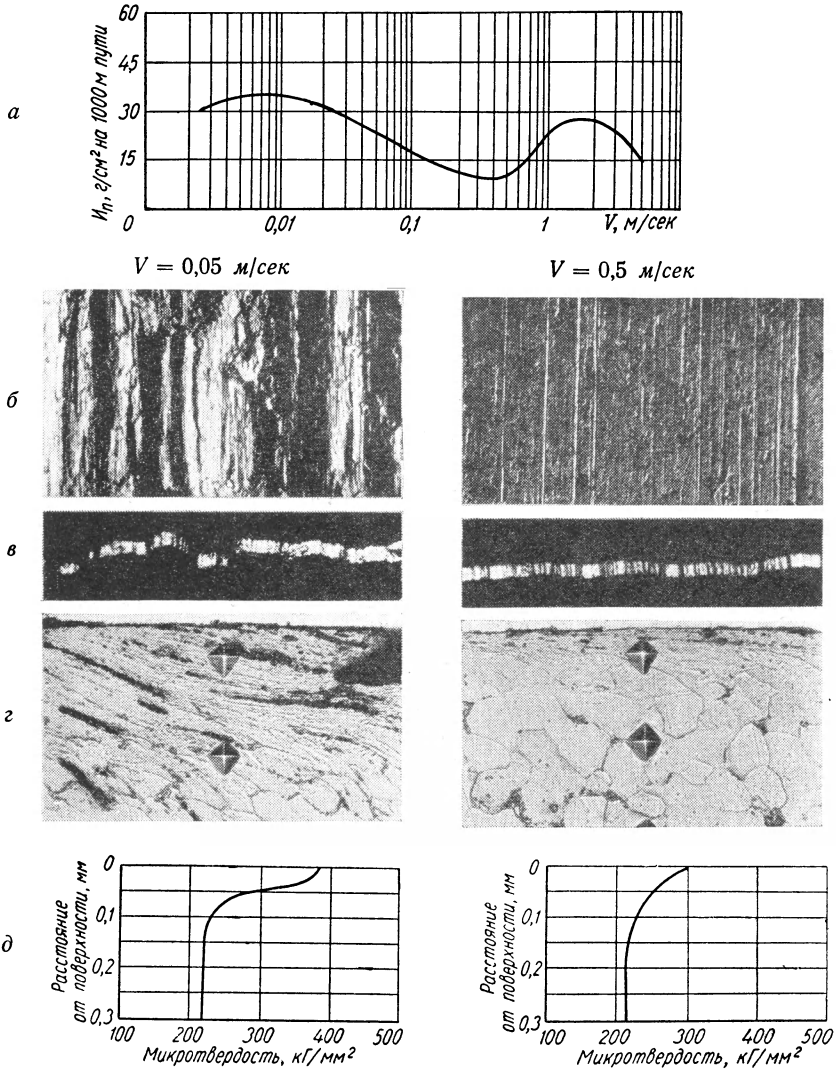


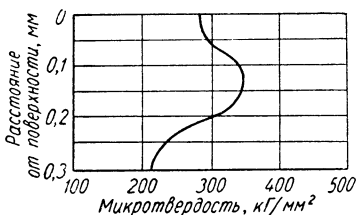
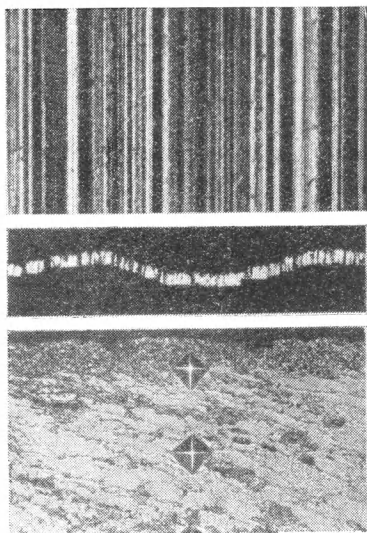
Рис. 134. Результаты испытания образцов из технического чистого железа ном давлением 30 кг/см^2 :

а — график приведенного износа; б — внешний вид поверхностей трения ($\times 20$); в — трения ($\times 80$); г — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); д — поверхностных слоев в сечении.

развивается только окислительный процесс, при скорости скольжения 1 м/сек и выше возникает и развивается с большой интенсивностью процесс схватывания 2-го рода.

На поверхностях трения и в поверхностных слоях металлов, испытанных в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,25 м/сек, имеются изменения, характерные для условий схватывания 1-го рода. Так, образцы, испытанные при 0,05 м/сек, имеют шероховатую поверхность с вырывами частиц металла и следами пластического течения по направлению движения

$$V = 1 \text{ м/сек}$$



при трении без смазки и удель-

в — профилограммы поверхностей
графики изменения микротвердости

(рис. 134,б). Микрорельеф поверхности соответствует 4-му классу чистоты (рис. 134,в), в сечении видны следы пластического деформирования металла на глубину 100—120 мк (рис. 134,г). Микротвердость деформированного слоя повышается на 180—220 кг/см² относительно исходной.

Образцы, испытанные в условиях окислительного износа в диапазоне скоростей скольжения 0,25—0,5 м/сек, имеют относительно менее шероховатую поверхность со следами окислов (рис. 134,б). Микрорельеф поверхности соответствует 6—7-му классу чистоты (рис. 134,в). Поверхностные слои металлов пластически деформированы на незначительную глубину (рис. 134,г).

На поверхности трения образцов, испытанных в условиях схватывания 2-го рода (в диапазоне 0,5—5 м/сек), происходит размазывание металла по направлению движения (рис. 134,б). Чистота поверхности снижается до 4—5-го класса (рис. 134,в). В поверхностных слоях металлов в начальной стадии развития процесса схватывания видны следы пластического течения металла (рис. 134,г). Ми-

кротвердость поверхностных слоев металла незначительно увеличивается (рис. 134,д).

Образцы, изготовленные из термически обработанных сталей — хромоникельмолибденовой 40ХНМА (рис. 135, кривая 1), хромоникельвольфрамовой 18ХНВА (кривая 4), хромомарганцевокремнистой 30ХГСА (кривая 2), хромистой 38ХА (кривая 3) и хромоникелевой 12ХНЗА (кривая 5), испытывались при по-

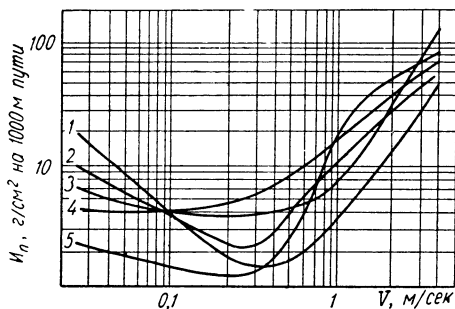


Рис. 135. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из легированных сталей по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

стоянным удельном давлении 100 кг/см^2 . Анализ результатов испытаний позволил установить, что в диапазоне малых скоростей скольжения ($0,025—0,25 \text{ м/сек}$) на поверхности трения испытуемых образцов из легированных сталей 30ХГСА, 38ХА и 12ХНЗА развивается с различной интенсивностью процесс схватывания 1-го рода. В диапазоне средних скоростей скольжения ($0,25—0,5 \text{ м/сек}$) развиваются окислительные процессы. С увеличением скорости скольже-

ния от $0,5 \text{ м/сек}$ развивается с большой интенсивностью процесс схватывания 2-го рода.

При испытании образцов из стали 40ХНМА процесс схватывания 1-го рода развивается в более широком диапазоне скоростей ($0,025—0,4 \text{ м/сек}$), окислительные процессы — в интервале $0,4—0,5 \text{ м/сек}$, процесс схватывания 2-го рода — от $0,5 \text{ м/сек}$ и выше, причем с относительно малой интенсивностью.

При испытании образцов из стали 18ХНВА окислительный процесс как ведущий не развивается. При критической скорости $0,25 \text{ м/сек}$ процесс схватывания 1-го рода переходит в схватывание 2-го рода. Интенсивность износа образцов в условиях схватывания 2-го рода в несколько раз превышает интенсивность износа образцов в условиях схватывания 1-го рода.

Образцы из хромоникельтитанистой стали Я1Т испытывались при удельном давлении 55 кг/см^2 (рис. 136, кривая 1), из хромомолибденованадиевой с вольфрамом ЭИ415 — при 90 кг/см^2 (кривая 2). Анализ результатов испытаний показал, что в диа-

пазоне малых скоростей (от 0,0025 до 0,2—0,5 м/сек) на поверхностях трения обеих жаропрочных сталей развивается с малой интенсивностью процесс схватывания 1-го рода. Однако в этом интервале скоростей наряду с ведущим процессом схватывания 1-го рода развивается и сопутствующий окислительный процесс. В продуктах износа видны как стальная стружка, так и черный порошок окислов.

В диапазоне средних скоростей (0,2—0,5 м/сек) развивается окислительный процесс; в диапазоне 0,5 м/сек и выше — процесс схватывания 2-го рода.

Образцы из фрикционного чугуна ЧНМХ испытывались при удельном давлении 30 кг/см² (рис. 137, кривая 3), из серого чугуна ХМ — при 10 кг/см² (кривая 4), из антифрикционного чугуна ЧМ1,8 — при 30 кг/см² (кривая 2) и из высокопрочного чугуна ВЧ45-5 — при 45 кг/см² (кривая 1).

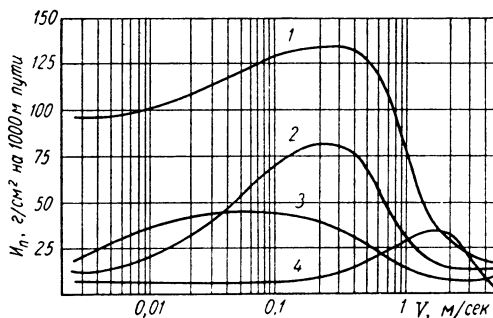


Рис. 137. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из чугуна по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

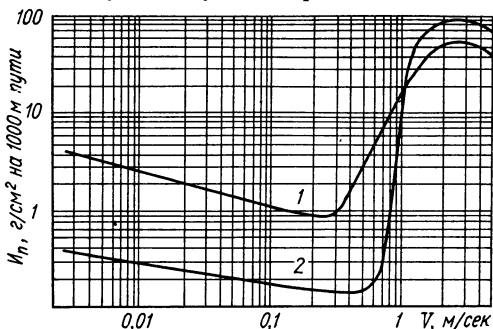


Рис. 136. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из жаропрочных сталей по валу из стали 45: 1 — образцы из стали Я1Т; 2 — из стали ЭИ415.

Результаты испытаний образцов из чугуна значительно отличаются от результатов испытаний стальных образцов.

В диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,05 м/сек на образцах из чугунов ЧНМХ и ЧМ1,8 и в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,5 м/сек на образцах из чугуна ХМ наблюдается

относительно малый износ поверхностей трения в условиях сложных физико-химических взаимодействий кислорода воздуха и гра-

фита чугуна с поверхностными слоями металлов. При испытании образцов из высокопрочного чугуна ВЧ45-5, начиная с самых малых скоростей скольжения и до 2 м/сек, развивается с большой интенсивностью процесс схватывания 1-го рода.

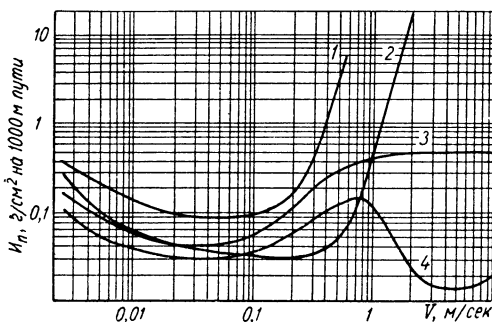


Рис. 138. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из алюминия и алюминиевых сплавов по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

При испытании образцов из чугуна ВЧ45-5, начиная от скорости 2 м/сек, из чугуна ХМ, начиная от 3 м/сек, из чугунов ЧМ1,8

и ЧНМХ, начиная от 1 м/сек и до 5 м/сек износ поверхностей трения происходит с малой интенсивностью. В этих условиях трения в результате взаимодействия кислорода воздуха и графита поверхностных слоев чугуновых образцов с металлическими поверхностями трения протекают физико-химические процессы, в результате которых образуются сложные вторичные структуры, препятствующие развитию процессов схватывания металлов.

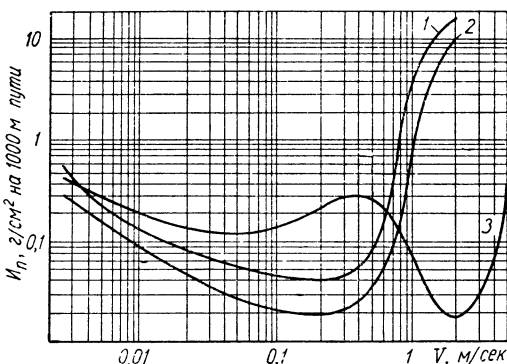


Рис. 139. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из алюминиевых сплавов по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

Образцы из алюминия А1 испытывались при удельном дав-

лении 10 кг/см^2 (рис. 138, кривая 4), из алюминиевого сплава АМг — при 20 кг/см^2 (кривая 3), из высоколегированного дюралюминия Д16Т — при 40 кг/см^2 (кривая 2), из силумина АЛ1 — при 20 кг/см^2 (кривая 1), из алюминиевого сплава АМц — при 20 кг/см^2 (рис. 139, кривая 3), из алюминиевого сплава АК6 — при 40 кг/см^2 (кривая 2) и из алюминиевого сплава В95 — при 50 кг/см^2 (кривая 1). Анализ результатов испытаний свидетельствует, что в диапазоне скоростей скольжения $0,0025\text{—}0,25 \text{ м/сек}$

на поверхностях трения образцов из алюминия А1 и алюминиевых сплавов АЛ1 и АМц и в диапазоне $0,0025\text{—}0,5 \text{ м/сек}$ — на образцах из алюминиевых сплавов АМг, Д16Т, АК6 и В95 развивается с различной интенсивностью окислительный процесс. При скоростях $0,0025\text{—}0,5 \text{ м/сек}$ наряду с ведущим окислительным процессом на всех испытываемых образцах развивается сопутствующий процесс схватывания 1-го рода, способствующий повышению интенсивности износа поверхностей трения.

В диапазоне скоростей скольжения от $0,25 \text{ м/сек}$ на образцах из алюминия А1 и из алюминиевых сплавов АЛ1 и АМц и от $0,5 \text{ м/сек}$ — на образцах из остальных указанных выше алюминиевых сплавов до 5 м/сек развивается с различной интенсивностью процесс схватывания 2-го рода.

Схватывание 1-го рода как ведущий процесс не развивается.

Образцы из магниевого сплава ВМ65-1 испытывались при постоянном удельном давлении 30 кг/см^2 (рис. 140, кривая 2), из магниевого сплава МА8 — при 25 кг/см^2 (кривая 1).

Установлено, что в диапазоне скоростей скольжения $0,0025\text{—}0,5 \text{ м/сек}$ на поверхности трения образцов из магниевого сплава МА8 и в диапазоне $0,0025\text{—}1 \text{ м/сек}$ на образцах из магниевого сплава ВМ65-1 развивается окислительный процесс, при дальнейшем увеличении скорости — процесс схватывания 2-го рода. Интенсивность износа образцов в условиях схватывания 2-го рода относительно мала, а в условиях окислительного процес-

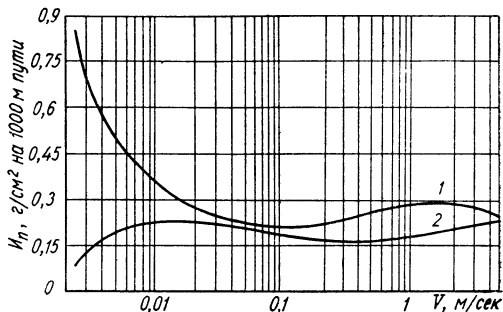


Рис. 140. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из магниевых сплавов по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

са — велика и примерно равна интенсивности износа образцов, испытываемых в условиях схватывания 2-го рода. Это объясняется тем, что в окислительных условиях трения образуются быстро разрушающиеся пленки окислов, в результате чего интенсивность износа резко увеличивается. В условиях схватывания 2-го рода поверхностные слои металлов резко разупрочняются, размазываются тонкой пленкой по валу, образуя своеобразную смазочную пленку, препятствующую интенсивному разрушению нижежащих поверхностных слоев металла.

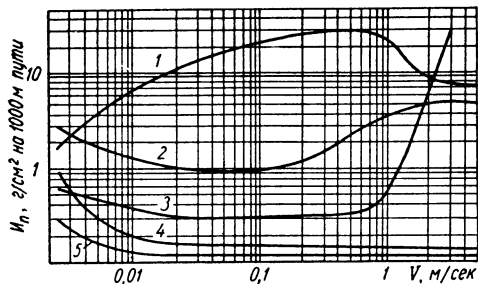


Рис. 141. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из баббита, бронзы, латуни и меди по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

(кривая 3), из свинцовистой латуни ЛС95-1 — при 35 кг/см^2 (кривая 2), из меди — при 20 кг/см^2 (кривая 1).

Результаты испытания показывают, что на поверхностях трения образцов из баббита Б83 во всем диапазоне скоростей скольжения развивается окислительный процесс, вызывающий износ малой интенсивности. На поверхности трения образцов из алюминиевой бронзы Бр.АЖМц в диапазоне скоростей 0,0025—1 м/сек развивается окислительный процесс, вызывающий относительно малый износ. С увеличением скорости скольжения от 1 м/сек и выше развивается с большой интенсивностью процесс схватывания 2-го рода.

На поверхностях трения образцов из свинцовистой латуни ЛС95-1 в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—0,05 м/сек развивается процесс схватывания 1-го рода, 0,05—0,25 м/сек — окислительный и 0,25—5 м/сек — схватывания 2-го рода.

На поверхностях трения образцов из свинцовистой бронзы Бр.С30 в диапазоне скоростей до 0,025 м/сек развивается процесс схватывания 1-го рода, при скорости скольжения от 0,025 м/сек и выше — только окислительный процесс, вызывающий малый износ.

На поверхностях трения образцов из меди при скоростях скольжения до 0,025 м/сек развивается окислительный процесс, с увеличением скорости скольжения постепенно возникает процесс схватывания 1-го рода, который с увеличением скорости свыше 2 м/сек переходит в процесс схватывания 2-го рода.

Сравнивая результаты испытания сложных сплавов различных металлов с результатами ранее проведенных исследований

чистых металлов и простых сплавов, можно сделать вывод, что предложенная классификация металлов и сплавов по их износостойкости справедлива и для этого случая. Линии износа имеют принципиально тот же характер. Отличие заключается лишь в том, что в определенных диапазонах скоростей скольжения отдельные сплавы проявляют более ярко выраженные склонности к схватыванию и окислению. В некоторых случаях при испытании отдельных сплавов процессы схватывания 1-го и 2-го рода развиваются слабо. Таким образом, сложные сплавы входят в основном в первые две группы принятой классификации металлов (по их износостойкости).

В свою очередь первая группа металлов делится на три подгруппы:

1) металлы, на поверхности трения которых возникают и развиваются процессы схватывания 1-го и 2-го рода,— в основном малоуглеродистые, среднеуглеродистые, легированные и жаропрочные стали, отдельные марки латуней;

2) металлы, на поверхности трения которых возникают и развиваются процессы схватывания только 2-го рода,— в основном алюминий и его сплавы, отдельные марки бронзы;

3) металлы, на поверхности трения которых возникают и развиваются процессы схватывания только 1-го рода,— в основном чугуны и свинцовистая бронза Бр. С30.

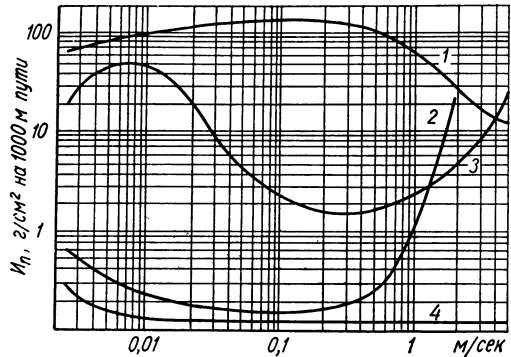


Рис. 142. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из баббита, чугуна, стали и алюминиевого сплава по валу (сталь 45) от скорости скольжения.

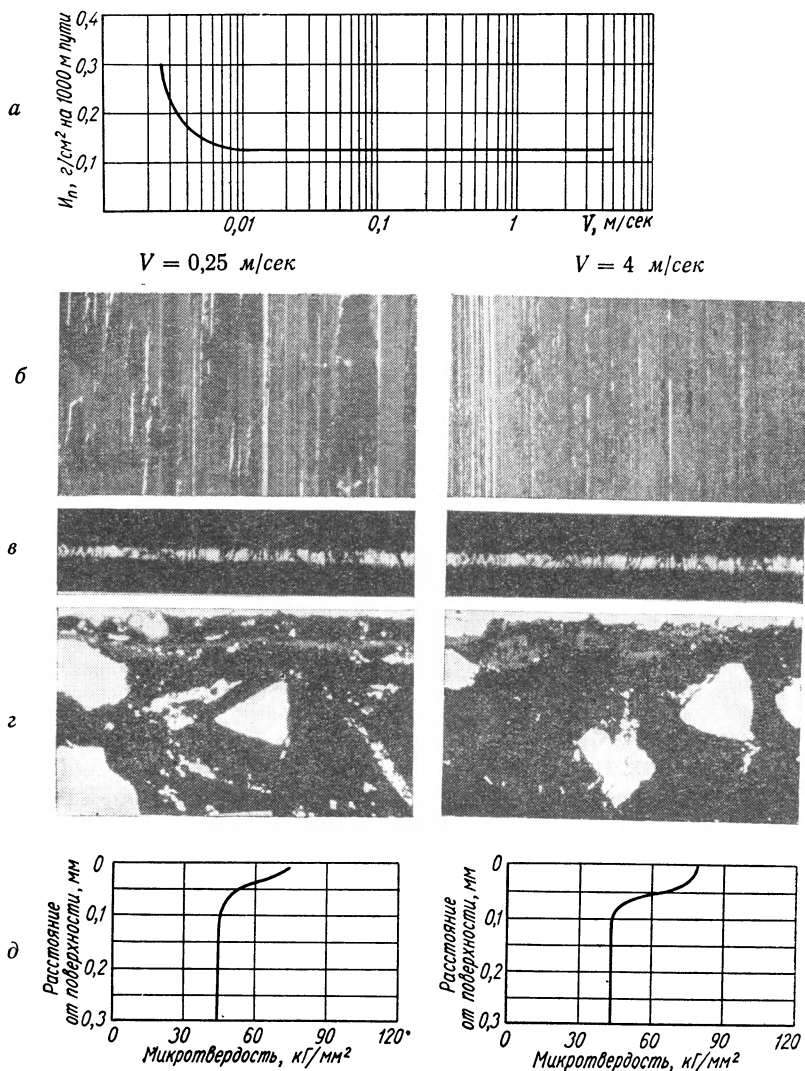


Рис. 143. Результаты испытаний без смазки образцов из баббита Б83 при удельном давлении 10 кг/см^2 :
 а — график приведенного износа; б — внешний вид поверхностей трения ($\times 18$);
 в — профилограммы поверхностей трения ($\times 80$); г — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); д — графики изменения микротвердости поверхностных слоев в сечении.

На рис. 142 приведен график зависимости износа образцов из сплавов первых двух групп принятой классификации металлов от скорости скольжения: баббита Б83 (кривая 4), чугуна ВЧ45-5 (кривая 1), стали 45 (кривая 3) и алюминиевого сплава Д16Т (кривая 2).

На поверхностях трения образцов из баббита Б83 в диапазоне скоростей 0,0025—5 м/сек и удельных давлений 10 кг/см² процессы схватывания 1-го и 2-го рода не развиваются, а происходит окислительный износ поверхностей трения с относительно малой интенсивностью.

О развитии окислительных процессов при испытании образцов из баббита Б83 во всем диапазоне изменения скоростей скольжения (0,25—4 м/сек) свидетельствуют фотоснимки внешнего вида поверхностей трения (рис. 143,б), профилограммы поверхностей трения (рис. 143,в), микроструктуры поверхностных слоев (рис. 143,г) и графики изменения микротвердости поверхностных слоев образцов (рис. 143,д). На гладких поверхностях видны пленки окислов, микрорельеф поверхностей соответствует 6—7-му классу чистоты, в сечении на поверхности трения видны пленки окислов и следы пластически деформированных тончайших слоев баббита. Микротвердость в поверхностных слоях незначительно повышается.

На поверхности трения образцов из чугуна ВЧ45-5 в диапазоне малых скоростей (0,0025—2 м/сек) возникают и развиваются только процессы схватывания 1-го рода с большой интенсивностью износа и характерными внешними проявлениями. Образцы, испытанные в этих условиях, имеют шероховатую поверхность, наблюдаются вырывы и налипание частиц металла (рис. 144,б).

Микрорельеф поверхности соответствует 3—4-му классу чистоты (рис. 144,в), в сечении видны следы пластически деформированного металла (рис. 144,г). Микротвердость деформированного слоя достигает 350 кг/мм².

При скорости скольжения 2 м/сек процесс схватывания 1-го рода переходит в сложные физико-химические процессы, обуславливающие износ поверхностей трения с малой интенсивностью. Поверхности трения образцов, испытанных в этих условиях, становятся относительно гладкими (рис. 144,б), микрорельеф поверхности соответствует 5—6-му классу чистоты (рис. 144,в), в поверхностных слоях металлов видны следы пластически деформированного металла (рис. 144,г). Микротвердость поверхностных слоев достигает 300 кг/мм².

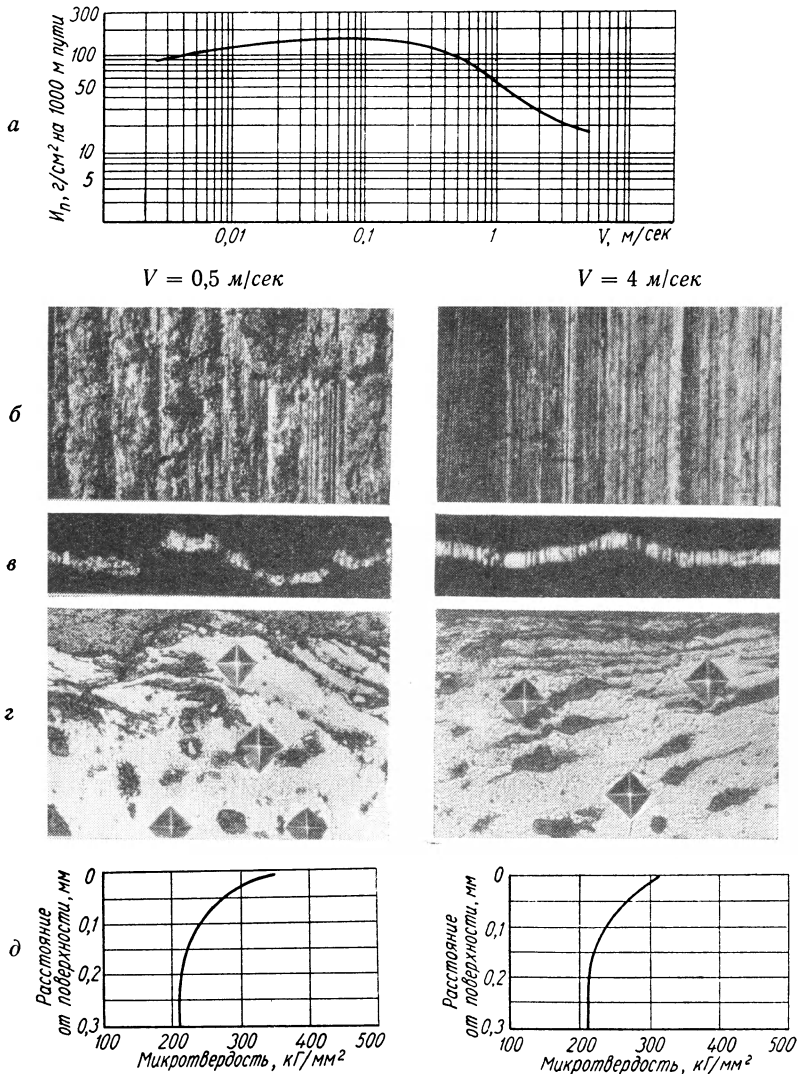


Рис. 144. Результаты испытаний без смазки образцов из высокопрочного чугуна ВЧ45-5 при удельном давлении 45 кг/см^2 :

а — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *в* — профилограммы поверхностей трения ($\times 80$); *г* — микроструктуры поверхностных слоев ($\times 280$); *д* — графики изменения микротвердости поверхностей слоев в сечении.

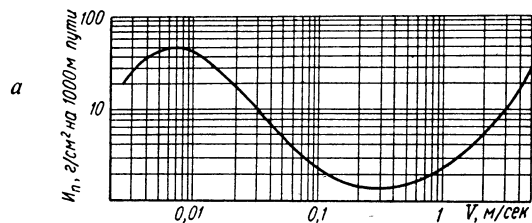
На поверхностях трения образцов из стали 45 в диапазоне малых скоростей скольжения (0,0025—0,15 м/сек) развивается процесс схватывания 1-го рода с характерными внешними проявлениями. Образцы, испытанные в этих условиях, имеют шероховатую поверхность со следами вырывов и налипания частиц металла (рис. 145,б). Микрорельеф поверхности трения соответствует 3-му классу чистоты (рис. 145,в). В поверхностных слоях металлов видны следы интенсивного деформирования металлов на глубину до 150 мк (рис. 145,г). Микротвердость деформированных поверхностных слоев увеличивается относительно исходной в 2—2,5 раза (рис. 145,д).

В диапазоне скоростей скольжения 0,015—0,5 м/сек развиваются окислительные процессы. Поверхности трения образцов, испытанных в этих условиях, гладкие, с пленками окислов (рис. 145,б). Микрорельеф поверхности соответствует 6—7-му классу чистоты (рис. 145,в). В тонких поверхностных слоях металлов видны следы пластического деформирования металлов (рис. 145,г). Микротвердость достигает 450 кг/мм² (рис. 145,д).

В диапазоне скоростей скольжения 0,5—5 м/сек развиваются процессы схватывания 2-го рода. На поверхностях трения образцов при скорости 2 м/сек видны следы размазывания разупрочненного металла и чередующиеся надрывы металла, свидетельствующие о начальной стадии развития процессов схватывания 2-го рода (рис. 145,б). Микрорельеф поверхности соответствует 4-му классу чистоты (рис. 145,в), в сечении видны следы интенсивного деформирования металла (рис. 145,г). Микротвердость поверхностного слоя значительно увеличивается (рис. 145,д).

На поверхностях трения образцов из алюминиевого сплава Д16Т в диапазоне 0,0025—0,3 м/сек развиваются окислительные процессы. При критической скорости 0,3 м/сек окислительный процесс переходит в схватывание 2-го рода с характерными для этого вида износа вырывами, налипанием и размазыванием металлов на поверхностях трения и большой интенсивностью износа. Характерные изменения поверхностей трения испытываемых образцов представлены на рис. 146.

На закономерности развития процессов схватывания 1-го и 2-го рода, как показали результаты лабораторных испытаний, значительно влияют методы обработки металлов (механическое упрочнение, закалка, химико-термическая обработка, электролитическое покрытие поверхностей трения металлами, диффузионное упрочнение поверхностных слоев металла различными элементами при совместном пластическом деформировании в усло-



$V = 0,05 \text{ м/сек}$

$V = 0,05 \text{ м/сек}$

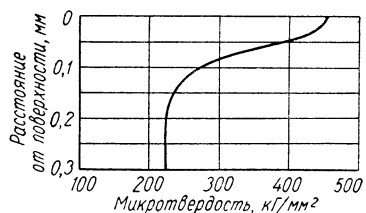
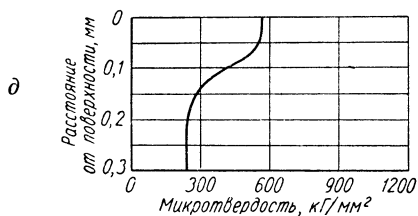
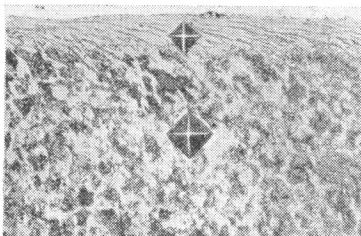
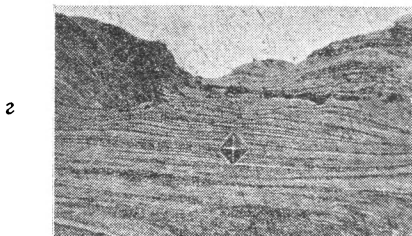
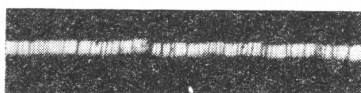
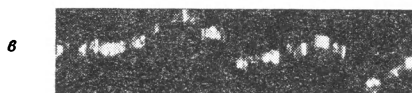
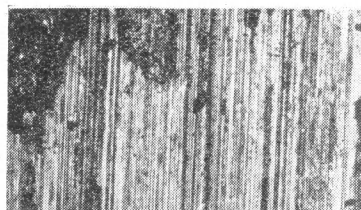


Рис. 145. Результаты испытаний без смазки образцов из стали 45 при удельном *a* — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 15$); *в* — профи *г* — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); *д* — графики изменения микро

виях трения, повышение теплоустойчивости металлов легированием редкими металлами и т. п.).

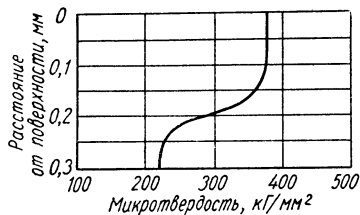
На рис. 147 дан график износа закаленных образцов из стали 45 с твердостью HRC 10, 20, 30, 40, 50 и 60 при испытании в паре с твердыми закаленными валами из стали У8 (HRC 55—58) в зависимости от продолжительности испытаний. Испытания проводились при трении без смазки, при постоянной скорости скольжения $0,065$ м/сек и удельном давлении 800 кг/см².

На поверхности трения образцов, имеющих твердость HRC 10, 20 и 30, с первого момента и до конца испытаний (в течение 20 мин) с различной интенсивностью развивается процесс схватывания 1-го рода (кривые 1, 2 и 3).

На поверхности трения образцов твердостью HRC 40 (кривая 4) процесс схватывания 1-го рода развивается в течение первых 10 мин испытаний, после чего переходит в стадию окислительного износа. Этот переход связан с повышением твердости поверхностных слоев металла до критической в результате пластических деформаций при трении.

На поверхности трения образцов твердостью HRC 50 и 60 (кривые 5 и 6) в течение всего времени испытаний происходит окислительный износ.

Вторая серия опытов проведена на закаленных образцах из стали 45 с твердостью HRC 10, 20, 30, 40 и 50 в паре с закаленными валами из стали У8 (HRC 55—58) при трении без смазки, удельном давлении 100 кг/см², в диапазоне скоростей скольжения $0,25$ — 1 м/сек. Установлено, что в диапазоне скоростей $0,5$ — $0,8$ м/сек независимо от твердости образцов на их поверхностях тре-



давлению 75 кг/см²:
 лограммы поверхностей трения ($\times 80$);
 твердости поверхностных слоев в се-

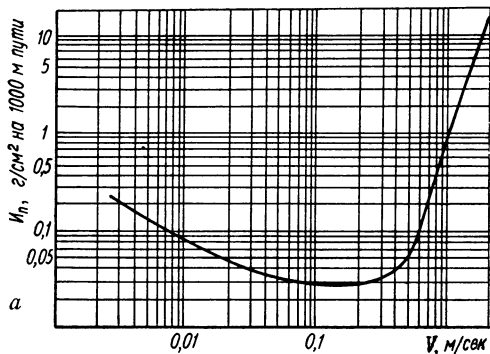


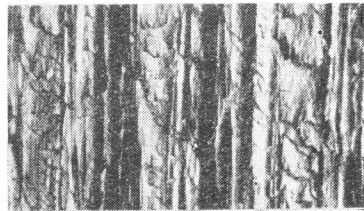
Рис. 146. Результаты испытаний без смазки образцов из алюминиевого сплава Д16Т при удельном давлении 40 кг/см^2 :

a — график приведенного износа; *б* — внешний вид поверхностей трения ($\times 18$); *в* — профилограммы поверхностей трения ($\times 80$); *г* — микроструктуры поверхностных слоев в сечении ($\times 300$); *д* — графики изменения микротвердости поверхностных слоев в сечении.

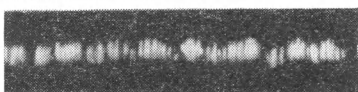
$V = 0.25 \text{ м/сек}$

$V = 2 \text{ м/сек}$

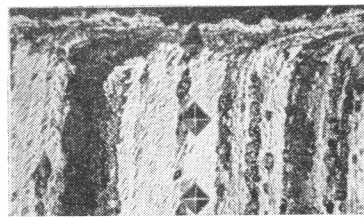
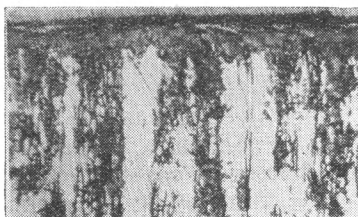
б



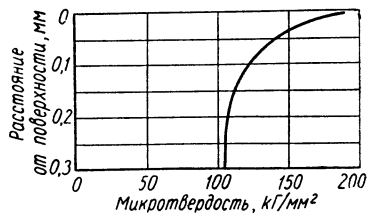
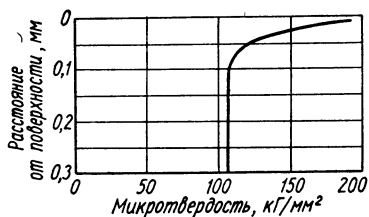
в



г



д



ния возникают и с дальнейшим увеличением скорости интенсивно развиваются процессы схватывания 2-го рода (рис. 148).

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что повышение твердости сопряженных поверхностей трения способствует предотвращению процессов схватывания 1-го рода и не оказывает заметного влияния на развитие процессов схватывания 2-го рода.

Проведена также серия испытаний металлов с различной теплоустойчивостью при трении без смазки в диапазоне скоростей скольжения 0,0025—11 м/сек, удельном давлении 25 кг/см² (рис. 149). Образцы были изготовлены из сталей У8, Р18, РК10 и имели твердость HRC 55—60.

Из данных, приведенных в литературе, известно, что сталь РК10 сохраняет твердость при повышении температуры до 600° С, сталь Р18 — до 550° С и сталь У8 — до 300° С.

В результате опытов установлено, что на поверхностях трения образцов, изготовленных из указанных сталей, имеющих большую и примерно одинаковую твердость, в диапазоне малых скоростей (0,0025—0,3 м/сек) процесс схватывания 1-го рода не возникает — происходит окислительный износ с очень небольшой интенсивностью.

При скорости 0,6—0,7 м/сек поверхностные объемы металлов в результате трения нагреваются до критической температуры 380—420° С, при которой происходит разупрочнение образцов из стали У8, возникает процесс схватывания 2-го рода, растет интенсивность износа.

При испытании образцов из сталей РК10 и Р18 в диапазоне скоростей 2—3 м/сек и выше процесс схватывания 2-го рода сопутствует ведущему виду износа — окислительному. Заметные проявления сопутствующих процессов схватывания для стали Р18 наступают при скорости скольжения 2 м/сек, а для стали РК10 — при скорости скольжения 3 м/сек. В связи с повышенной теплоустойчивостью сталей Р18 и РК10 в зоне больших скоростей скольжения процессы теплового износа (схватывания 2-го рода) не имеют сколько-нибудь значительного развития.

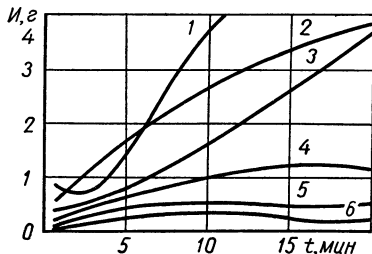


Рис. 147. График зависимости износа при трении без смазки закаленных образцов (сталь 45) с различной твердостью по закаленному валу (сталь У8) от продолжительности испытаний.

На поверхностях трения образцов из легированных инструментальных сталей РК10 (рис. 150, кривая 3), P18 (кривая 2) и ХВГ (кривая 1), обладающих различной теплостойкостью и примерно одинаковой твердостью, при испытании их без смазки, удельном давлении 100 кг/см² процесс схватывания 1-го рода не возникает, а при критических скоростях (температурах) — 0,5 м/сек для стали ХВГ, 1 м/сек для стали P18 и 2 м/сек для стали РК10 — возникает и развивается с большой интенсивностью процесс схватывания 2-го рода. Смещение критических точек возникновения процесса схватывания 2-го рода в сторону повышенных скоростей (температур) в основном связано с различной теплостойкостью испытуемых металлов.

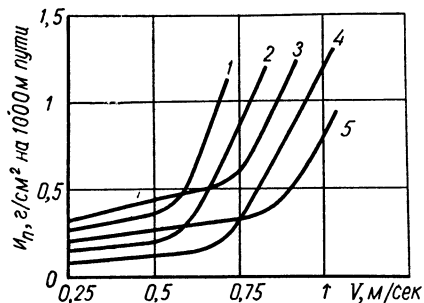


Рис. 148. График зависимости приведенного износа при трении без смазки закаленных образцов (сталь 45) с различной твердостью по закаленному валу (сталь У8) при постоянном удельном давлении 100 кг/см² от скорости скольжения:

1—при HRC 10; 2—HRC 20; 3— HRC 30; 4—HRC 40; 5—HRC 50.

1—при HRC 10; 2—HRC 20; 3— HRC 30; 4—HRC 40; 5—HRC 50.

Таким образом, металлы и их сплавы в зависимости от физи-

ко-химических и механических свойств в исходном состоянии и свойств, возникающих в процессе трения, обладают различной склонностью к схватыванию и способностью образовывать на поверхностях трения защитные пленки с различными свойствами в широком диапазоне изменений условий трения. Это обстоятельство позволяет широко использо-

вать некоторые свойства материалов и методы их обработки при решении проблемы борьбы со схватыванием металлов. При соответствующем выборе металлов для сопряженных пар и методе их

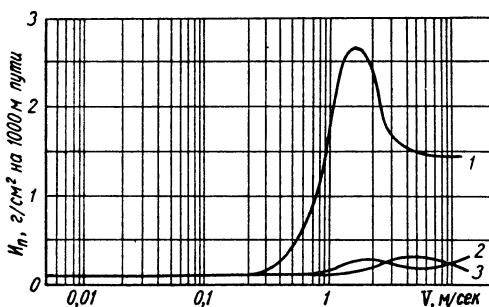


Рис. 149. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из стали У8 (кривая 1), РК10 (2) и P18 (3) по валу (сталь У8) при постоянном удельном давлении 25 кг/см² от скорости скольжения.

обработки можно изменять интенсивность и границы развития либо полностью устранять (в определенных условиях трения) процессы схватывания 1-го и 2-го рода.

На основании результатов исследований намечаются основные пути борьбы с нежелательными процессами схватывания в машинах, а именно:

со схватыванием 1-го рода:

1) повышение твердости (уменьшение пластичности) трущихся поверхностных слоев различными методами (механическое упрочнение, закалка, химико-термическая обработка, нанесение электролитических покрытий и т. п.);

2) создание защитных прочных неметаллических пленок (травление растворами кислот и щелочей, фосфатирование, сульфидирование и т. п.) и особых вторичных структур на поверхностях трения и в поверхностных слоях металлов (диффузия кислорода, углерода и т. д.);

3) подбор металлов сопряженных поверхностей, не склонных к взаимному схватыванию;

со схватыванием 2-го рода;

1) увеличение теплостойкости металлов сопряженных пар трения (легирование другими компонентами в сочетании со специальной термической обработкой и др.);

2) обеспечение условий, снижающих работу трения за счет уменьшения коэффициента трения с помощью специальных смазок и различных присадок к ним графита, металлозелей, химически и физически активных веществ и т. п.;

3) уменьшение температуры поверхностных слоев металлов, повышающейся в результате трения (обдувка воздухом, охлаждение различными жидкостями, увеличение теплоемкости деталей и др.).

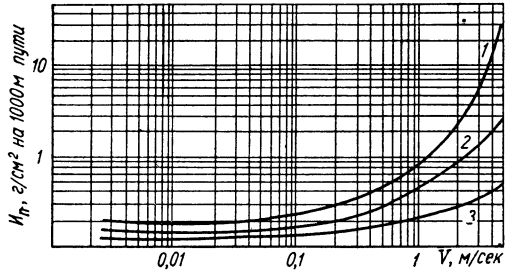


Рис. 150. График зависимости приведенного износа при трении без смазки образцов из стали по валу (сталь У8) и постоянном удельном давлении 100 кг/см^2 от скорости скольжения.

СКЛОННОСТЬ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ К СХВАТЫВАНИЮ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Как известно, схватывание — это процесс образования металлических связей между двумя сопряженными поверхностями металлов. Следовательно, характеристики схватывания зависят от строения металлов и сплавов, в частности, от строения их атомов. А так как строение атомов различных металлов неодинаково, то они обладают и неодинаковой склонностью к схватыванию. Кроме того, схватывание металлов во многом зависит от прочности, условий возникновения и разрушения поверхностных защитных пленок.

Для изучения различной склонности металлов к образованию металлических связей, т. е. возникновению схватывания, разработана специальная методика и установка (рис. 20) для испытания металлов в высоком вакууме (10^{-9} — 10^{-10} мм рт. ст.). Выбор степени вакуума обуславливается продолжительностью пребывания в нем чистых металлов.

Испытанию подвергались двадцать девять чистых металлов (представители почти всех групп периодической системы элементов): магний, алюминий, скандий, титан, ванадий, хром, железо, кобальт, никель, медь, цинк, иттрий, цирконий, ниобий, молибден, серебро, кадмий, индий, олово, сурьма, лантан, празеодим, неодим, диспрозий, эрбий, платина, таллий, свинец и висмут.

Опыты проводились при комнатной температуре со скоростью перемещения контактирующих поверхностей $0,001$ м/сек и при сжатии без относительного перемещения. Удельные давления выбирались с учетом прочностных характеристик испытуемых металлов и составляли $0,05 \sigma_b$.

Критерием определения склонности металлов к схватыванию служили два фактора: изменение коэффициента трения, а также внешнего вида поверхностей трения и структуры поверхностных слоев металла после испытания.

В первой серии опытов исследовалась склонность к схватыванию одноименных металлов: железо — железо, медь — медь, ниобий — ниобий и т. д. Установлено, что при трении в условиях высокого вакуума чистые одноименные металлы схватываются и образуют прочные связи. При этом коэффициент трения для различных металлов колеблется в пределах $0,8$ — $6,5$. Он зависит от механической прочности испытуемых металлов, от величины удельного давления и от развития интенсивности процессов схватывания.

Вторая серия опытов была посвящена исследованию склонности металлов к схватыванию в зависимости от степени их взаимной растворимости. Испытанию подвергались: а) металлы, склонные к взаимной растворимости: железо — хром (растворимость хрома в железе при комнатной температуре 100%), железо — алюминий (растворимость алюминия — 32%), железо — титан (растворимость титана — 3%), железо — сурьма (растворимость сурьмы — 7%), железо — цирконий (растворимость циркония — 0,15%) и б) метал-

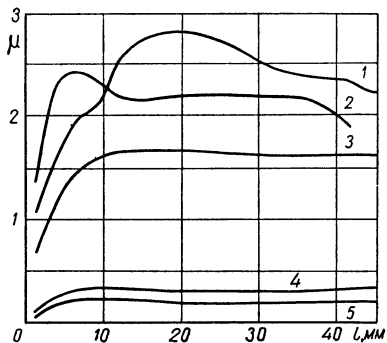


Рис. 151. График зависимости коэффициента трения металлов, склонных к взаимной растворимости, от пути их относительного перемещения.

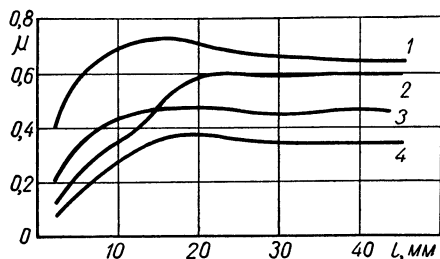


Рис. 152. График зависимости коэффициента трения металлов, не склонных к взаимной растворимости, от пути их относительного перемещения.

лы, не склонные к взаимной растворимости и не образующие сплавов: железо — серебро, железо — скандий, железо — магний, молибден — медь.

Установлено, что некоторые металлы, склонные к взаимной растворимости, при трении схватываются. К таким парам металлов относятся железо — хром (рис. 151, кривая 1), железо — титан (кривая 2), железо — алюминий (кривая 3). При этом коэффициент трения достигает 1,4—2,7. На поверхностях трения наблюдаются следы пластического течения металла, налипание и вырывы частиц металла.

Другие же металлы, склонные к взаимной растворимости, при трении не схватываются. Это железо — сурьма (кривая 4) и железо — цирконий (кривая 5). Коэффициент трения этих металлов имеет низкие значения — 0,15—0,4.

Молибден — медь (рис. 152, кривая 1) и железо — серебро (кривая 2), не склонные к взаимной растворимости, при трении схватываются частично: на поверхностях трения видны отдель-

ные риски, налипание и вырывы незначительных частиц металла. Коэффициент трения при этом находится в пределах 0,58—0,72. Железо — скандий (кривая 3) и железо — магний (кривая 4) при трении не схватываются. В этом случае коэффициент трения имеет низкие и устойчивые значения — 0,3—0,48. Поверхности трения металлов после испытания гладкие, без видимых признаков схватывания.

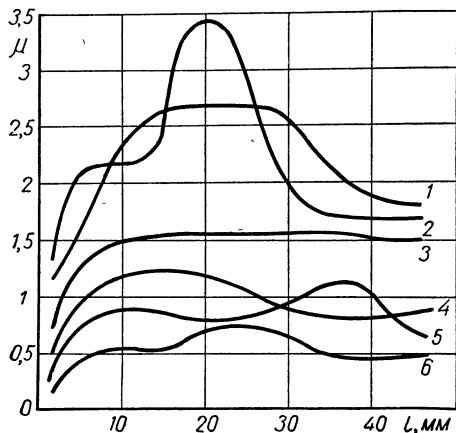


Рис. 153. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов:

1 — железо — хром; 2 — железо — медь; 3 — железо — алюминий; 4 — висмут — сурьма; 5 — празеодим — неодим; 6 — иттрий-диспрозий.

Таким образом, взаимная растворимость металлов не оказывает влияния на образование и развитие процессов схватывания. Металлы, склонные в большей или меньшей степени к взаимной растворимости, так же, как

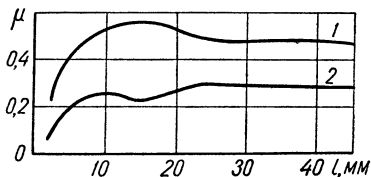


Рис. 154. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов:

1 — кобальт — иттрий; 2 — железо — свинец.

и металлы, не склонные к взаимной растворимости, могут образовывать естественные связи, т. е. схватываться.

Третья серия опытов проведена с целью изучения склонности к схватыванию металлов с различным строением кристаллических решеток и неодинаковой величиной атомных диаметров.

Анализ результатов испытаний показал, что металлы, имеющие одинаковую форму кристаллической решетки и малое различие в атомных диаметрах (до 15—18%), склонны к схватыванию. При этом коэффициент трения имеет высокое значение — 0,52—3,3 (рис. 153), а на поверхностях трения наблюдаются пластические деформации, вырывы и налипание частиц металла. Металлы с одинаковой формой кристаллической решетки и большим различием в атомных диаметрах (более 15—18%) не схва-

тываются. Коэффициент трения этих металлов находится в пределах 0,22—0,55 (рис. 154).

Металлы с различной формой кристаллических решеток и небольшим различием в атомных диаметрах (от 1,5 до 15%) схватываются (рис. 155). При этом коэффициент трения имеет высокие значения — 0,88—2,3.

Металлы с различной формой кристаллических решеток и большим различием в атомных диаметрах (от 19 до 43%) не

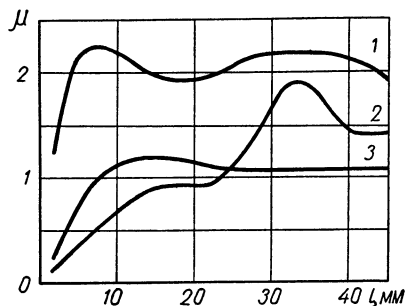


Рис. 155. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов: 1 — железо — титан; 2 — железо — цинк; 3 — железо — кобальт.

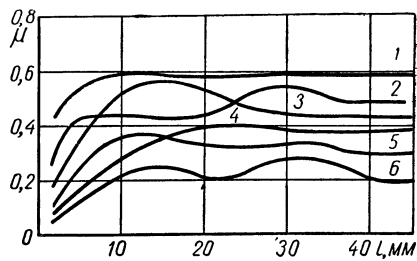


Рис. 156. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов: 1 — железо — иттрий; 2 — железо — скандий; 3 — кобальт — иттрий; 4 — железо — магний; 5 — железо — сурьма; 6 — железо — висмут.

схватываются (рис. 156). При этом коэффициент трения находится в пределах 0,2—0,56.

Четвертая серия опытов была посвящена изучению склонности к схватыванию чистых металлов при очень малых удельных давлениях (до 0,001 кг/см²), без относительного перемещения испытуемых образцов, т. е. в условиях отсутствия заметных пластических деформаций в макро- и микрообъемах металлов при сжатии.

Для получения чистых недеформированных металлов без каких-либо пленок на поверхностях различные чистые металлы осаждались методом напыления их в высоком вакууме (10⁻⁹—10⁻¹⁰ мм рт. ст.) на гладкую полированную стеклянную поверхность (стеклянные образцы имели цилиндрическую форму). Торцовые поверхности, на которые напылялся металл, соответствовали 14-му классу чистоты. Площадь контактирующих поверхностей образцов была равна 1 см². Высокий класс чистоты стек-

лянных поверхностей обуславливал высокий класс чистоты поверхности напыленного металла и фактический контакт на большой площади при соприкосновении двух поверхностей с очень малыми нагрузками.

Для осаждения применялись металлы, не подверженные аллотропическим превращениям. Температура осажденного металла при испытаниях находилась в пределах 15—18° С и контролировалась в течение всего опыта.

Испытывались как одноименные (алюминий — алюминий, медь — медь, серебро — серебро), так и разноименные (серебро — медь, алюминий — медь) осажденные металлы. Анализ результатов исследования показал, что при кратковременном соприкосновении металлических поверхностей (в течение 1—2 сек) при незначительных удельных давлениях (до 0,001 кг/см²) и без относительного перемещения происходит схватывание металлов на 35—40% поверхности контакта.

Для устранения явлений схватывания 1-го рода в деталях машин, работающих в сложных условиях трения — без смазки, при высоких удельных давлениях и малых скоростях скольжения, в инертных газовых средах и в вакууме, можно рекомендовать применение сопряженных металлов, размеры атомных диаметров которых отличаются друг от друга больше, чем на 15—18%.

Если детали изготовлены из сплавов на железной основе, то можно рекомендовать покрытие сопряженных с ними деталей тонким слоем (до 15 мк) сурьмы, висмута, иттрия, диспрозия, эрбия, индия, олова и свинца. Выбор металла для покрытия деталей необходимо производить с учетом условий трения и прочностных свойств металлических покрытий.

ВЛИЯНИЕ ПЛЕНОК ОКИСЛОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

На поверхностях деталей машин и механизмов при их работе в атмосферных условиях адсорбируются молекулы кислорода из окружающей среды, происходит взаимодействие их с металлом и образуются пограничные защитные слои. Действуя подобно смазке, эти слои играют существенную роль при трении твердых тел, так как контакт металлов пары трения заменяется контактом пленок окислов.

Наличие на поверхности металла невидимых простым глазом пленок изменяет условия трения и величину коэффициента трения.

Как показали опыты, металлы, поверхности которых полностью лишены каких-либо пленок, при соприкосновении сцепляются даже в условиях приложения незначительных удельных давлений и без касательных перемещений (т. е. при отсутствии заметных пластических деформаций). Различная склонность к схватыванию при трении обуславливается не только физико-химическими свойствами металлов сопряженных пар, но и физико-химическими свойствами образующихся на поверхностях или искусственно нанесенных пленок.

Для изучения влияния различных пленок на поверхностях металлов на развитие процессов схватывания в условиях трения проведены специальные исследования на машине трения (рис. 4) 18 чистых металлов (медь, свинец, алюминий, железо, олово, никель, молибден, хром, висмут, кадмий, цинк, кобальт, титан, магний, цирконий, итрий, платина и лантан). Испытывались специально обработанные образцы из одноименных металлов (парно).

Для первой серии опытов образцы после механической обработки выдерживались продолжительное время (в течение двух суток) при комнатной температуре на воздухе. На поверхностях трения образцов создавалась естественная пленка окислов, толщина и свойства которой обуславливались свойствами металла образца.

Вторая серия опытов проведена с образцами, которые после механической обработки помещались в печь и выдерживались при температуре 150—200° С в течение 2 ч. В этих условиях на поверхности трения образцов получалась пленка окислов значительно большей толщины, чем у образцов первой серии.

В третьей серии опытов образцы подвергались испытанию сразу же после механической обработки их поверхностей трения. В этом случае на поверхностях трения успевала образоваться пленка окислов очень малой толщины.

Четвертая серия опытов проведена с образцами, механическая обработка и испытание которых осуществлялись в среде аргона, что практически исключало образование пленок окислов на поверхностях трения.

Развитие процессов схватывания металлов определялось по изменению величины коэффициента трения в зависимости от пути относительного перемещения при постоянном удельном давлении, а также по качественным изменениям макро- и микроструктуры поверхностных слоев металлов.

В связи с тем что испытывались металлы, прочностные свой-

ства которых значительно отличались друг от друга, величина удельного давления взята различной для различных металлов в зависимости от их временного сопротивления. Нагрузка для всех испытуемых металлов составляла около 5% от их временно-го сопротивления, что примерно соответствует средней нагрузке, допускаемой в узлах трения при эксплуатации машин.

Характерным для всех металлов является резкое возрастание коэффициента трения в начале испытания с последую-

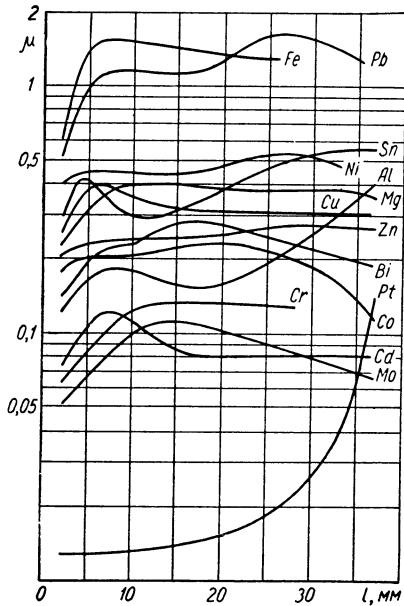


Рис. 157. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов из чистых металлов с естественными пленками окислов на поверхностях трения при испытании в среде воздуха и постоянном удельном давлении $P = 0,05 \sigma_B$.

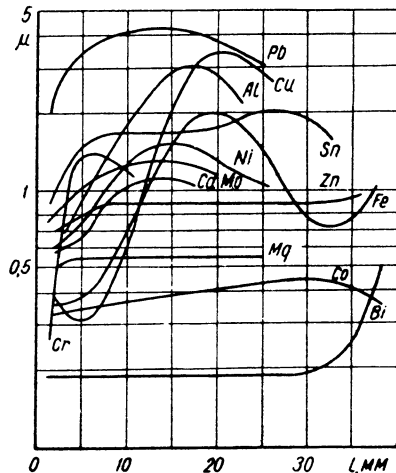


Рис. 158. График зависимости коэффициента трения образцов из чистых металлов с пленками на поверхности трения, полученными при нагреве, при испытании в среде воздуха и постоянном удельном давлении $P = 0,05 \sigma_B$.

щей стабилизацией его на определенном уровне. Это объясняется тем, что в начальный период трения происходит в основном внешнее трение.

В дальнейшем в местах фактического контакта (на выступах) под действием нормальных и тангенциальных усилий возникают напряжения, превышающие предел текучести метал-

лов. Происходит пластическое деформирование металлов, разрушение пленок окислов, возникновение металлических контактов и схватывание металлов. В первый период образуется небольшое количество узлов схватывания, а затем в результате

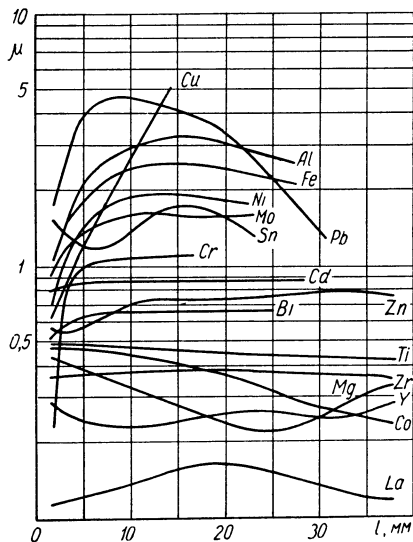


Рис. 159. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов из чистых металлов, поверхности трения которых очищены от пленок окислов, при испытании в среде воздуха и постоянном удельном давлении $P = 0,05 \sigma_B$.

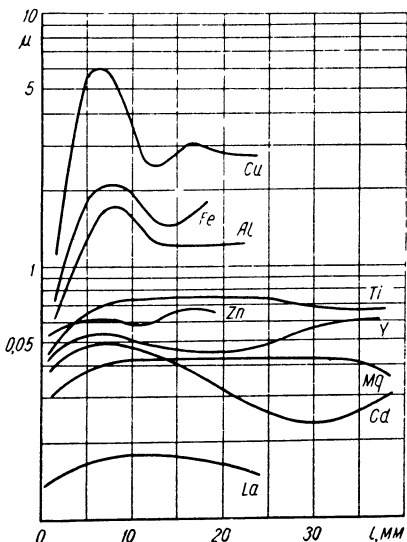


Рис. 160. График зависимости коэффициента трения от пути относительного перемещения образцов из чистых металлов, поверхности трения которых очищены от пленок окислов, при испытании в среде аргона и постоянном удельном давлении $P = 0,05 \sigma_B$.

совместного действия нормальных и тангенциальных усилий количество и размеры их резко увеличиваются. Это в свою очередь приводит к увеличению сопротивления трению. При определенной величине пути трения суммарный рост числа узлов схватывания стабилизируется, так как наряду с образованием новых узлов происходит разрушение ранее образовавшихся. Развитие процесса схватывания в условиях, когда на поверхности трения имеется пленка окислов, в значительной степени зависит от свойств этой пленки и свойств металла. Коэффициент трения (максимальный) для различных металлов колеблется от 0,018 до 4,1 (рис. 157, 158).

Искусственное увеличение толщины пленки окислов на поверхностях трения металлических образцов приводит к значительному облегчению возникновения и развития процесса схватывания металлов. Это объясняется тем, что толстые пленки более хрупкие, легко разрушаются под действием тангенциальных усилий при пластических деформациях поверхностных слоев ме-

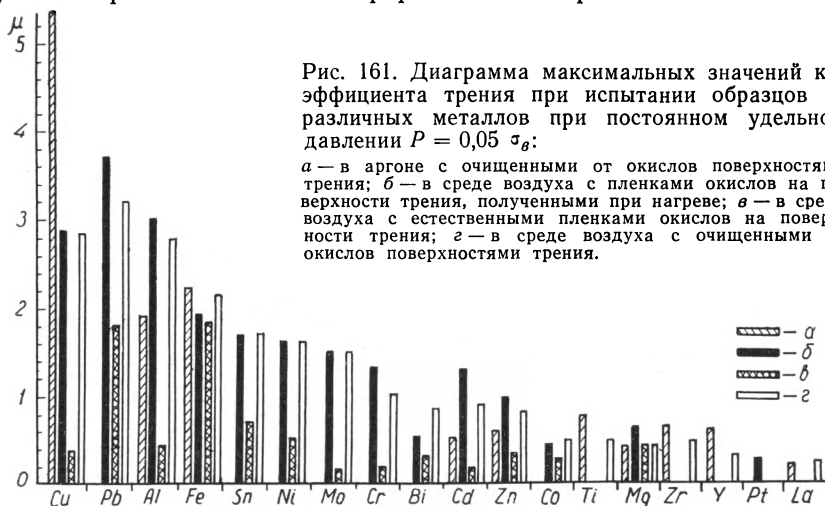


Рис. 161. Диаграмма максимальных значений коэффициента трения при испытании образцов из различных металлов при постоянном удельном давлении $P = 0,05 \sigma_g$:

a — в аргоне с очищенными от окислов поверхностями трения; b — в среде воздуха с пленками окислов на поверхности трения, полученными при нагреве; γ — в среде воздуха с естественными пленками окислов на поверхности трения; ε — в среде воздуха с очищенными от окислов поверхностями трения.

талла. Толстая и хрупкая пленка окислов при пластическом течении поверхностного слоя металлов легко разрушается, обнажая ювенильные микроучастки поверхности металла. Под действием нормальных усилий происходит контакт ювенильных участков металла и образование узлов схватывания.

Так, при трении меди по меди коэффициент трения при наличии на поверхностях трения обычной пленки окислов достигал 0,4, при трении медных образцов, предварительно выдержанных в печи, коэффициент трения увеличивается до 3,5, т. е. почти в девять раз. При трении свинцовых образцов в аналогичных условиях коэффициент трения увеличивается от 1,8 до 4,1, а при трении алюминиевых образцов — от 0,4 до 3,0 и т. д. Полученные результаты хорошо согласуются с данными И. В. Крагельского [68] и С. Б. Айнбиндера [1, 2].

Развитие процессов схватывания некоторых металлов (железо, висмут, кобальт и др.) с естественными пленками окислов незначительно отличается от развития этих процессов в указанных металлах с пленками, полученными при нагреве (150—200° С).

Процесс схватывания большинства металлов, на поверхностях трения которых образуется тонкая пленка окислов, развивается значительно интенсивнее (рис. 159), чем в условиях первой серии опытов. Объясняется это тем, что тонкие пленки окислов очень быстро разрушаются и в меньшей степени препятствуют образованию контактов чистых ювенильных участков поверхностей трения металлов. Так же, как и очень толстые, хрупкие пленки в меньшей степени препятствуют развитию процессов схватывания металлов.

Трение металлов в условиях отсутствия пленок окислов сопровождается наиболее интенсивным развитием процессов схватывания в основном с очень высокими значениями коэффициентов трения (рис. 160, 161).

Таким образом, возникновение и развитие процессов схватывания металлов при трении определяется физико-химическими свойствами образующихся или нанесенных искусственно тонких пленок окислов на поверхностях трения. Отсутствие пленок приводит к интенсивному развитию процессов схватывания одноименных металлов с переходом внешнего трения во внутреннее. Вместе с тем образование на поверхностях трения толстых, хрупких пленок окислов облегчает интенсивное развитие процессов схватывания.

Окисные пленки большинства испытанных металлов, образованные в естественных условиях, обладают достаточно высокой сцепляемостью с основным металлом и прочностью. Они оказывают эффективное сопротивление развитию процессов схватывания.

При отсутствии пленок окислов процессы схватывания развиваются наиболее интенсивно в среде аргона.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗА В ЗОНЕ СХВАТЫВАНИЯ

Исследования узлов схватывания металлических тел показывают, что в металле поверхностных слоев возникают большие пластические деформации [20, 59, 105]. К настоящему времени накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал по изучению физической природы пластичности твердых тел [77, 89, 102, 125].

Сдвиговая пластическая деформация присуща кристаллическим телам. Наиболее значительным фактом, относящимся к деформации металла, является возможность протекания процесса

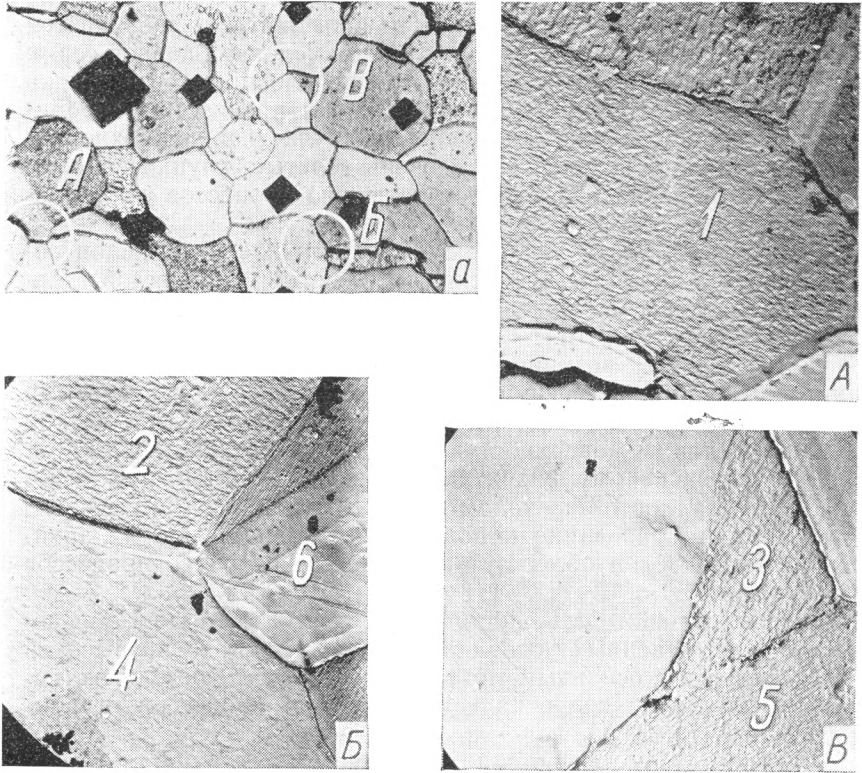
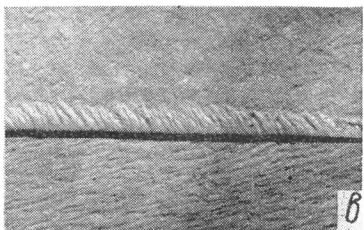
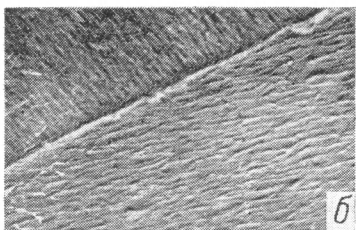
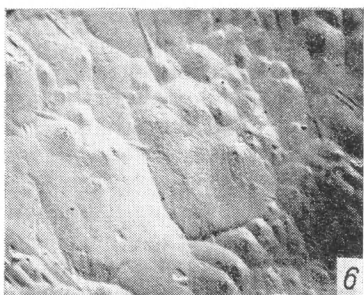
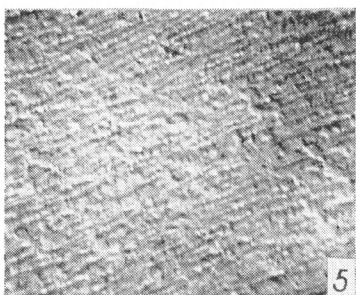
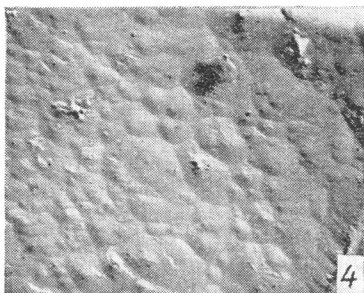
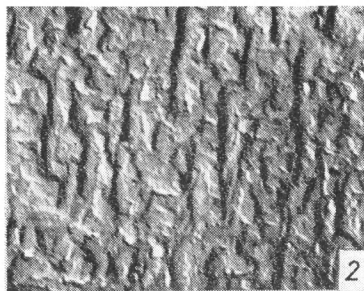
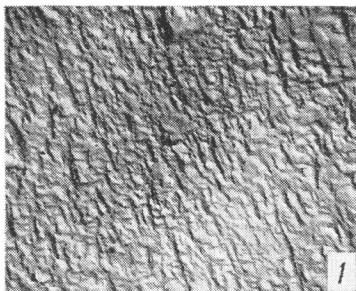


Рис. 162. Исходная структура технически чистого железа:

a — микроструктура ($\times 300$); *A, Б, В* — блочная структура в различных зернах ($\times 3000$); *1-6* — различная кристаллографическая ориентировка блоков относительно поверхности шлифа ($\times 9000$); *б, в* — границы отдельных зерен ($\times 9000$).

деформации внутри кристалла без его разрушения. Пластическая деформация зарождается в ограниченной области кристалла и распространяется по определенным кристаллографическим направлениям. Результаты изучения особенностей строения пластически деформированных металлов свидетельствуют о том, что пластическая деформация сопровождается изменением тонкой кристаллической структуры металлов, характеризующейся искажением решетки.

В процессе пластической деформации кристаллы (зерна) разбиваются на фрагменты со значительной разницей в кристалло-



графической ориентировке. Размеры отдельных фрагментов составляют 10^{-3} — 10^{-4} см, в свою очередь они разбиваются на блоки — области когерентного рассеяния — величиной 10^{-5} — 10^{-6} см.

Для изучения особенностей развития пластической деформации в условиях схватывания металлов автором применялись методы рентгеноструктурного анализа, оптической и электронно-микроскопической металлографии.

Первая часть исследований заключалась в выявлении тонкой структуры ферритных зерен технически чистого железа в недеформируемом состоянии (исходная структура).

На рис. 162 представлен фотоснимок микроструктуры технически чистого железа с группами зерен *A*, *B* и *B*, выделенными для изучения, а также фотоснимки субмикроструктуры этих зерен с различной ориентировкой блоков относительно поверхности микрошлифа.

В зернах феррита (рис. 162, 1—3) блоки выявляются в виде пластинок прямоугольной формы, приближающейся к симметрии кристалла. В этом случае плоскость шлифа совпадает с гранью куба (100). В других зернах выявляются блоки разнообразной формы, так как они различно ориентированы относительно поверхности шлифа (4—6).

В группах зерен *A*, *B* и *B* обнаруживается взаимная ориентация блоков и переходные зоны между зернами. При большой взаимной разориентации зерен переходная зона выявляется в виде больших широких полос (рис. 162, б, в).

Во второй части работы проводились исследования изменений тонкой структуры в узлах схватывания с различной степенью развития этого процесса и в ферритных зернах с различной степенью деформации в направлении от узла схватывания в глубь металла. Исследования выполнялись на электронном микроскопе УЭМВ-100 по методике, изложенной на стр. 9. Схватывание двух образцов производилось на специальной установке при трении без смазки с удельным давлением 100 кг/см^2 и скоростью относительного перемещения $0,005 \text{ м/сек}$ в среде воздуха. Сдвиг образцов относительно друг друга производился на величину, при которой наступало схватывание поверхностей скольжения, и прекращался, когда коэффициент трения достигал величины 2—2,5. Возрастающие тангенциальные усилия фиксировались на осциллографе.

Исследовались фиксированные участки зоны узла схватывания и отдельные деформированные зерна, которые одной своей

частью находятся в зоне узла схватывания, а другой — в малодеформированных слоях металла образца.

Микрофото зерна (рис. 163) дает возможность наглядно проследить за развитием пластической деформации в поверхностных слоях металла при схватывании. Под действием внешних напряжений зерно приобретает клиновидную форму. Количество полос скольжения и их интенсивность увеличиваются в направлении к узлу схватывания. Разрушение межкристаллитных прослоек (границ) свидетельствует об одновременном развитии скольжения как внутри зерна, так и по его границам.

По степени пластической деформации зерно можно разделить условно на четыре зоны (рис. 163, б).

Зона *I* представляет собой пластически недеформированную исходную структуру зерна и находится на расстоянии 50—60 мк от условной линии соединения.

Зона *II* — это область начальной стадии пластической деформации зерна. Она находится на расстоянии 40—50 мк от условной линии соединения.

Зона *III* характеризуется более высокой степенью пластической деформации зерна и находится на расстоянии от 25—30 до 40 мк от условной линии соединения.

Зона *IV* характеризуется максимальной степенью пластической деформации зерна и находится на расстоянии 0—20 мк от условной линии соединения.

Различные зоны исследуемого зерна под действием нормальных и тангенциальных усилий воспринимают различные напряжения.

Зона *I* воспринимает напряжения в пределах упругих деформаций. Никаких видимых изменений в субмикроструктуре зерна не происходит, четко проявляется исходная блочная структура ферритного зерна (рис. 163, б, в, г).

В зоне *II* усилия соответствуют пределу текучести. Начинает развиваться процесс пластической деформации. Проявляются тонкие линии сдвигов, ориентированные параллельно друг другу (рис. 163, б, д, е).

Степень пластической деформации в зоне *III* (рис. 163, б, ж, з) возрастает по мере приближения зерна к линии соединения. Эта стадия пластической деформации протекает с интенсивным развитием линий скольжения: к действующим линиям скольжения добавляются новые. Увеличение интенсивности развития происходит за счет усиления процесса микроскольжения в зоне элементарных сдвигов и увеличения их длины слиянием нескольких на-

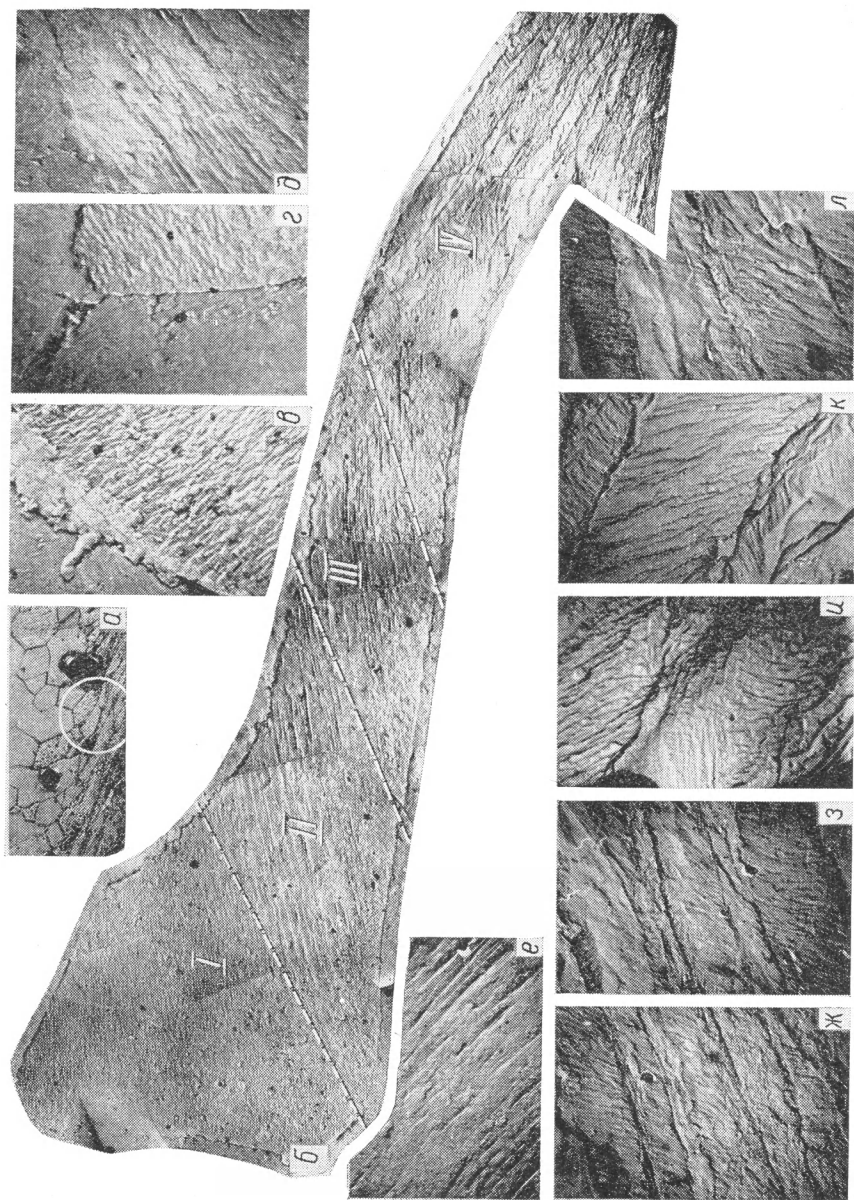


Рис. 163. Развитие пластической деформации в условиях схватывания в поверхностном зерне технически чистого железа:

а — микроструктура поверхностного слоя ($\times 300$); *б* — микроструктура деформированного зерна ($\times 3000$); *в*, *г* — блочная структура зерна в зоне *I*; *д*, *е* — то же в зоне *II*; *ж*, *з* — то же в зоне *III*; *и*, *к*, *л* — то же в зоне *IV*.

чальных линий скольжения. При этом происходит слияние не только линий скольжения, лежащих в одной плоскости, но и линий, расположенных на параллельных плоскостях, что приводит к образованию волнистых полос скольжения (зона *IV*). На этой стадии развития пластической деформации возникают поперечные линии скольжения (рис. 163, *б*, *и*, *к*, *л*).

Зона *IV* подвержена максимальной нагрузке, соответствующей пределу прочности. Происходит интенсивная деформация, состоящая в дальнейшем развитии сдвигов, образовании микрополос скольжения. Волнистость отдельных полос скольжения и разрывы участков между полосами свидетельствуют о том, что скольжение сопровождается частичным поворотом зон между полосами скольжения. В этой зоне еще больше измельчаются блоки. В зоне схватывания наблюдается большое течение тонких микрослоев зерна, вытянутых параллельно линии скольжения в виде тонких пластинок. Это способствует более тесному контакту поверхностей, а также, что особенно важно, возможности взаимодействия микрообъемов кристаллов двух поверхностей, контактирующих по плоскостям скольжения.

Исследование процессов пластической деформации микрослоев металла в узле схватывания выполнялось в три этапа по зонам в соответствии со схемой, приведенной на рис. 164, *а*.

На рис. 164 представлены фотоснимки микроструктуры узла схватывания двух образцов, условно разделенных на три зоны, а также субмикроструктуры узла схватывания (зона *I*) и близлежащих деформированных участков металла.

В зоне *I* видны участки шести зерен металлов двух сваренных образцов (рис. 164, *а*, *б*). Зерна 2—6 являются частью первого (левого) образца, зерно 1 — второго образца. Между зернами 1 и 2 видна линия схватывания (соединения), параллельно которой расположены границы зерен. Зерна пластически деформированы с различной интенсивностью: наибольшая степень деформации у зерен, расположенных ближе к линии схватывания. В зерне 6, расположенном на расстоянии 40 мк от линии схватывания, видны чет-

кие линии скольжения и на участках между ними — блочная структура металла. Интенсивность полос скольжения в зернах возрастает по мере приближения их к линии схватывания (рис. 164, в, з), за исключением зерна 4, в котором не обнаружено полос скольжения, хотя в соседних зернах 3 и 5 видны довольно интенсивные линии скольжения. Это объясняется тем, что в зерне 4 имеет место «неблагоприятная» кристаллографическая ориентировка блоков по отношению к действующим касательным напряжениям.

Необходимо отметить отсутствие четко выраженных границ между зернами. Это связано с тем, что наряду с большой деформацией металла внутри зерен происходит деформация и по их границам, в результате чего прежние, исходные, полосы границ разрушаются.

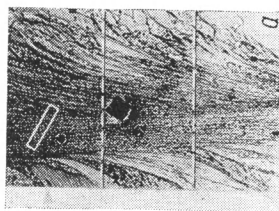
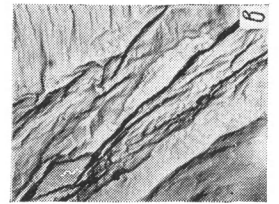
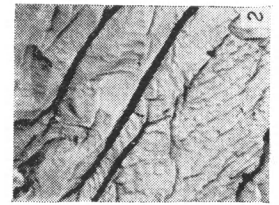
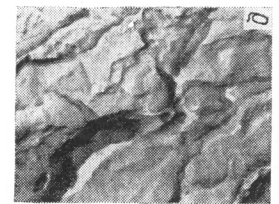
В зоне I схватывание (соединение) двух поверхностей образцов произошло частично, не по всей поверхности (рис. 164, б, д). Линия соединения прерывистая, имеются отдельные островки сварки и между ними просматривается линия раздела поверхности. По линии раздела и в обе стороны от нее наблюдаются темные участки продолговатой формы размером до 1 мк с острыми краями. Наличие этих участков в районе схватывания позволяет предположить, что это участки раздела двух поверхностей.

Зона более полной сварки (зона II) в узле схватывания показана на рис. 165. Пластическая деформация в зоне II протекает более интенсивно, чем в зоне I. Причем степень пластической деформации в узле схватывания изменилась как в направлении развития узла схватывания, так и в глубь образцов.

В зоне II не наблюдается больших полос скольжения, подобных тем, которые показаны на рис. 164, хотя очевидно, что пластические деформации в этой зоне значительно более интенсивные, чем в зоне I.

Можно прийти к выводу, что чем выше степень пластической деформации, вызванной большими напряжениями, тем значительно возрастает число полос скольжения и тем тоньше участки металла между соседними полосами скольжения. Поэтому в относительном скольжении принимает участие все большее число микрослоев металла. Так, схватывание двух образцов в зоне II более полное, а линия разъема двух поверхностей почти полностью отсутствует. Число несоединившихся мест (темные участки) уменьшилось.

Полная сварка поверхностей двух образцов показана на рис. 166. Начальная линия контактирования поверхностей сколь-



Зона I

Зона II

Зона III

14*

Зерно 6 Зерно 5 Зерно 4 Зерно 3 Зерно 2 Зерно 1

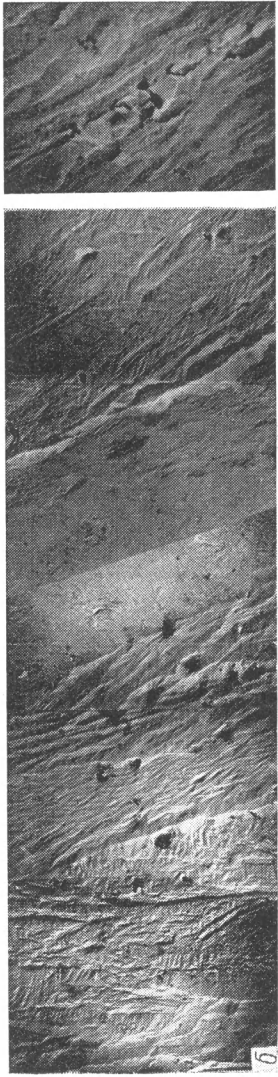
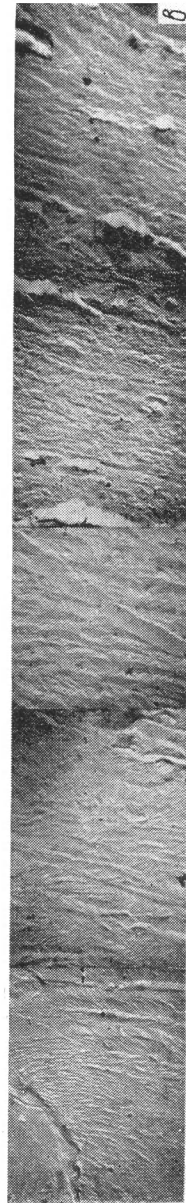
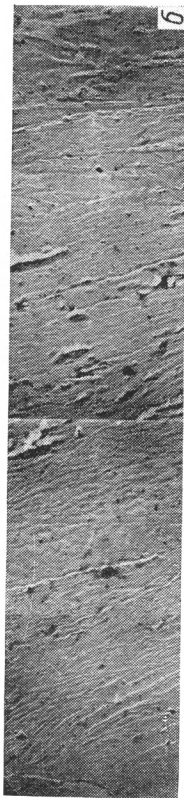


Рис. 164. Структура узла схватывания в сечении: а — микроструктура ($\times 550$); б — субмикроструктура в зоне I ($\times 9000$); в, з — субмикроструктура отдельных элементов деформированных зерен I и 2 ($\times 12\ 000$); д — субмикроструктура металла в зоне схватывания двух поверхностей ($\times 15\ 000$).

Зона III



Зона сварки



Зона сварки

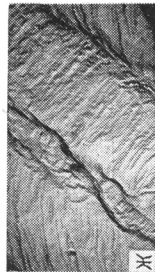
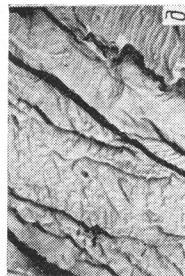
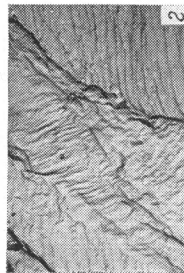


Рис. 165. Структура узла схватывания в сечении (зона I/1):
а — микроструктура ($\times 550$); б — субмикроструктура ($\times 3000$); в — то же ($\times 9000$); г, д, е, ж — субмикроструктуры отдельных элементов деформированного металла ($\times 15\ 000$).

Зона III

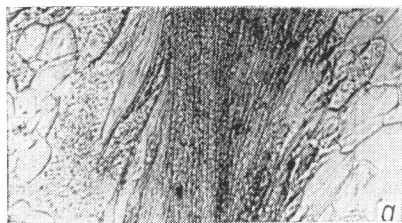
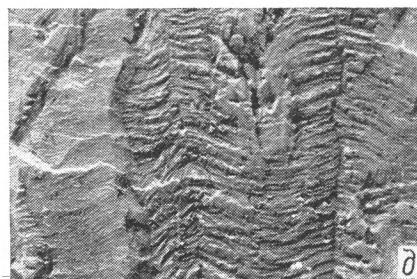
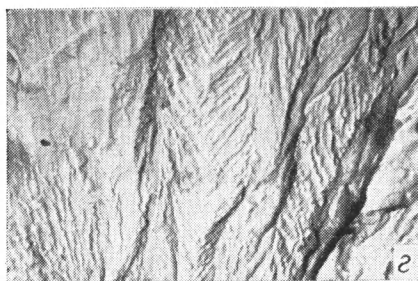
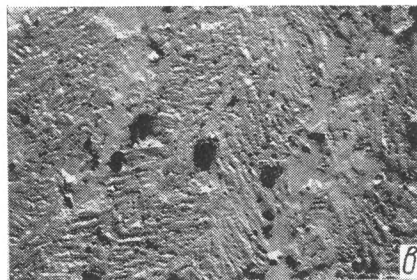
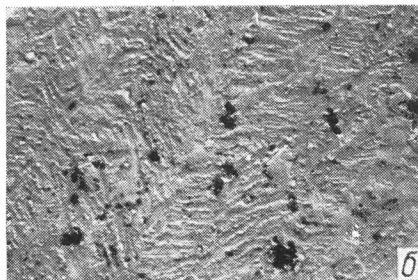


Рис. 166. Структура узла схватывания в сечении (зона III):

a — микроструктура ($\times 550$); *б, в* — блочная структура узла схватывания в зоне соединения образца ($\times 9\ 000$); *г, д* — то же ($\times 12\ 000$).



жения двух образцов полностью отсутствует. Видна предельно измельченная структура в месте сварки.

Характерной особенностью субмикроструктуры узла схватывания (в зоне III) является наличие поперечных линий скольжения между обычными продольными линиями, направленными вдоль действия касательных напряжений.

Итак, качество сварки поверхностей двух образцов при трении скольжения соответствует степени пластической де-

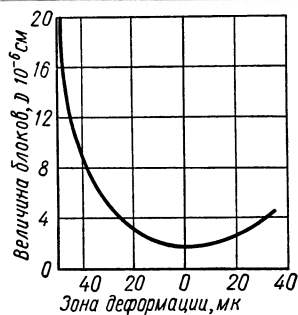


Рис. 167. Кривая изменения величины блоков в зоне узла схватывания.

формации в поверхностных слоях металлов — в узле схватывания.

Исследование с помощью методов рентгеноструктурного анализа состояния блочной структуры узла схватывания двух образцов показывает, что по мере приближения к зоне схватывания величина блоков значительно уменьшается, достигая максимального измельчения (на глубину 10—12 мк) непосредственно в зоне сварки (рис. 167).

Значительное изменение блочной структуры испытуемых образцов свидетельствует о том, что явления схватывания металлов в реальных условиях сопровождаются интенсивным развитием пластической деформации контактирующих поверхностей.

§ 4. КИНЕТИКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

Исследованию механизма схватывания металлов посвящен ряд работ [3, 4, 105]. Однако опыты проводились в основном не при трении, а при совместном пластическом деформировании металлов. Исследовались поврежденные участки поверхностей контакта и по окончательной внешней картине изменений, возникших в результате схватывания металлов, изучался этот процесс. Поэтому многие авторы, располагая данными об изменениях на поверхности трения, происшедших только за какой-то период развития процесса схватывания, и не проследив всего механизма схватывания (от начальных до конечных стадий), вынуждены опираться на умозрительные соображения, которые не всегда совпадают с действительной картиной механизма схватывания. Кроме того, применяемые машины и методики изучения механизма схватывания не всегда позволяют в ходе испытания исключить такие явления, как врезание одного образца в другой, перекосы, неравномерное распределение давления на поверхности, краевой эффект и т. д., а это искажает действительную картину механизма схватывания.

Во многих работах проводилось лишь визуальное наблюдение изменений, происшедших на поверхностях трения, не изучалась структура поверхностных слоев металлов пар трения с применением современных методов исследования.

По нашему мнению, обязательными методическими принципами исследования механизма схватывания металлов являются

следующие. Исследование процесса схватывания необходимо проводить в кинетике, наблюдая за ним в течение всего периода его развития. Структуру металла в поверхностных слоях надо исследовать непосредственно в процессе опыта. При испытаниях нужно по возможности исключить различные побочные явления (перекосы, врезания и т. п.). Не следует качественную картину механизма схватывания металлов рассматривать в отрыве от количественных данных о трении и износе в условиях схватывания.

Автором проведена серия опытов по изучению кинетики схватывания металлов. Для этого разработаны специальная методика и установка (см. стр. 35), позволяющие исследовать механизм схватывания от начальных стадий образования узлов схватывания и вплоть до полного их разрушения, вести визуальные наблюдения, фотографирование и кино съемку всех процессов, протекающих на контактирующих поверхностях при трении,— процессов пластической деформации поверхностных слоев металла, образование узлов схватывания, их развитие и разрушение.

Исследование кинетики схватывания металлов проводилось на образцах из технически чистого железа при постоянной скорости скольжения $0,005$ м/сек и переменном удельном давлении $0,25—100$ кг/см².

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что процесс развития схватывания металлов при трении можно разбить на четыре этапа.

Первый этап характеризуется началом сдвига, относительным скольжением сопряженных тел до возникновения узлов схватывания. Скольжение тел происходит в основном по поверхностным пленкам в условиях упругих деформаций металлов поверхностей трения в местах фактического контакта.

Второй этап характеризуется локальным развитием пластической деформации металлов, разрушением поверхностных пленок под действием нормальных и тангенциальных усилий, выходом на поверхность трения ювенильных металлов, контактированием чистых металлов и образованием узлов схватывания.

Третий этап характеризуется развитием узлов схватывания в поверхностных слоях металлов.

Четвертый этап характеризуется вырождением (разрушением) узлов схватывания, образованием наростов на поверхностях трения, абразивным действием наростов, интенсивным деформированием поверхностей металлов.

Изучение механизма схватывания необходимо вести с учетом градиента напряженного состояния поверхностей трения.

Как известно, металлические поверхности даже после самой высококачественной механической обработки имеют микронеровности, высота которых достигает нескольких сотых или десятых долей микрона. Контактное взаимодействие металлических тел с шероховатыми поверхностями происходит не по всей поверхности, а на отдельных участках, в местах выступов микронеровностей. При сообщении усилий на этих участках возникают различные по величине напряжения, происходят местные деформации, степень которых зависит от механических свойств металлов, величины нормальных усилий и качества поверхности.

Во многих случаях при приложении нормальных усилий, соответствующих нагрузкам в деталях машин, в отдельных точках контакта величина возникающих напряжений может превысить предел текучести металла. В этих местах происходит интенсивная пластическая деформация, разрушение поверхностных пленок и выход ювенильных металлов на поверхность. Образование узла схватывания возможно только на отдельных микроскопических объемах металлов.

Рассмотрим общий случай образования схватывания при трении.

Если при наличии нормальных усилий к металлическим телам приложить тангенциальные усилия и перемещать одно сопряженное тело относительно другого, положение точек фактического контакта будет меняться. Произойдет перераспределение напряжений в местах контакта. В начале сдвига в основном происходит внешнее трение тел по поверхностным пленкам сопряженных металлов. В этот момент нормальные и возникающие тангенциальные усилия сравнительно невелики и равномерны распределены на поверхности.

В последующий момент сдвига сопряженных тел может произойти встреча максимальных выступов обеих поверхностей. В месте этой встречи возникают критические максимальные напряжения, происходит резкое перераспределение нормальных усилий с концентрацией их в местах контакта выступов и падением вокруг зон контакта. Вместе с максимальными нормальными усилиями возникают максимальные касательные напряжения.

Критические напряжения, вызванные совместным действием нормальных и тангенциальных усилий, вызывают пластическое течение металлов в направлении, противоположном движению тел. Это приводит к разрушению поверхностных пленок, обнаже-

нию металлических поверхностей и образованию узлов схватывания. Происходит переход внешнего трения во внутреннее в местах образования узлов схватывания.

Образовавшийся узел схватывания упрочняется за счет дальнейшего его пластического деформирования. Скорость пластической деформации металла в узле схватывания изменяется от нуля до скорости скольжения сопряженных тел и зависит от степени упрочнения металла. В глубине металла скорость деформации равна нулю. Максимальная скорость деформации металла наблюдается на некотором расстоянии от места схватывания, так как металл в зоне схватывания в первый период своего развития деформирован в большей степени и более упрочнен, чем соседние слои металла. Скорость деформации металла в месте схватывания относительно невелика или равна нулю.

При соответствующем сочетании нормальных и тангенциальных усилий, превышающих критические, узел схватывания развивается в глубь металла. В пластическую деформацию вовлекаются новые глубинные слои металла. Если же тангенциальные усилия ниже критических, прекращается развитие узла схватывания и относительное перемещение сопряженных тел, происходит так называемое заедание этих тел.

В случае, когда нормальные и тангенциальные усилия выше критических и развивающийся узел схватывания встречает на своем пути значительное препятствие в одном из сопряженных тел в виде новых неровностей или упрочненного металла, возникшего в результате ранее образовавшегося и затем разрушенного узла схватывания, и сопротивление этого препятствия превышает суммарные тангенциальные усилия, узел развивается только в одном направлении, в сторону сопряженного тела, с меньшей сопротивляемостью развитию узла схватывания.

В зависимости от величины нормальных и тангенциальных усилий, сопротивления препятствия и механической прочности узла схватывания скорость перемещения узла схватывания относительно сопряженных тел изменяется от нуля до скорости, равной скорости относительного скольжения сопряженных тел.

Дальнейшее развитие узла схватывания может происходить в нескольких направлениях. Одностороннее развитие узла схватывания происходит до тех пор, пока не появится на втором теле новое препятствие, сопротивление которого равно или больше сопротивления препятствия первого тела. Если оба препятствия имеют равное сопротивление, то скорость относительного перемещения узла схватывания равна нулю, при этом происходит

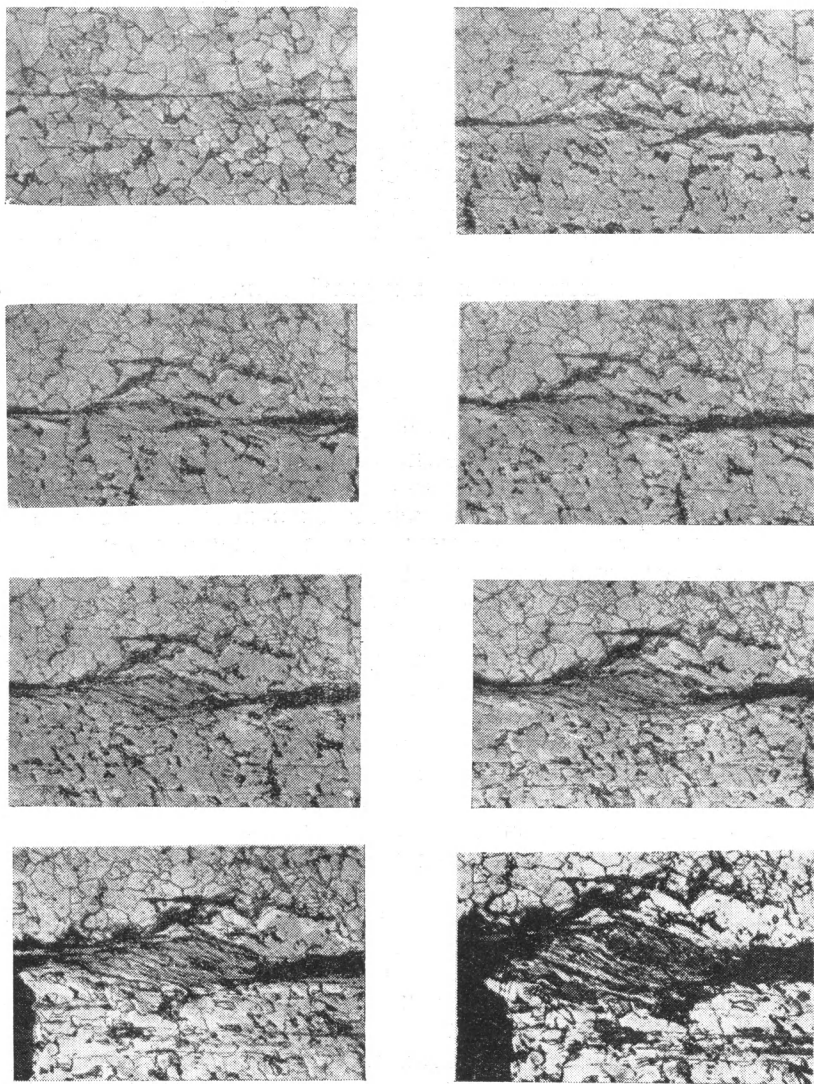


Рис. 168. Стадии развития узла схватывания в сечении двух сопряженных образцов из технического чистого железа при сжатии с удельным давлением 60 кг/см^2 и скорости скольжения $0,005 \text{ м/сек}$.

ярко выраженное внутреннее трение металла, выражающееся в пластическом течении металла с заметным градиентом скорости его деформации. Если же сопротивление второго препятствия больше первого, узел схватывания развивается в сторону первого тела.

Таким образом, при перемещении узла схватывания пластически деформируются и упрочняются все новые слои металла то на одной, то на другой сопряженной паре вплоть до разрушения узла схватывания.

При перемещении узел схватывания производит работу, часть которой затрачивается на скольжение по поверхности, упругие и пластические деформации, упрочнение металла обеих поверхностей и разрушение узла. Когда скорость узла равна нулю, внешнее трение поверхностей переходит во внутреннее. Происходит течение металла обеих сопряженных поверхностей и обтекание неподвижного узла схватывания. Если скорость перемещения узла равна скорости скольжения тела, то узел скользит по поверхности трения, производя работу внешнего трения.

Чаще всего скорость перемещения узла больше нуля, но меньше скорости скольжения сопряженных поверхностей, тогда происходит совместно внутреннее трение двух поверхностей по обе стороны узла схватывания и внешнее трение поверхностей за счет проскальзывания одной поверхности относительно второй.

Узел схватывания в своем развитии упрочняется и приобретает склонность к вырождению по следующим причинам: во-первых, в связи с большой пластической деформацией металла узла и его охрупчиванием, во-вторых, в связи с уменьшением нормальных усилий ниже критических и, в-третьих, в связи с выходом узла схватывания на границу сопряженных тел.

Последовательные стадии развития узла схватывания до момента его вырождения на границе одного из испытываемых образцов показаны на рис. 168. При относительном перемещении сопряженных тел по разным причинам происходит уменьшение нормальных усилий в узле схватывания. Одной из главных причин может быть встреча двух новых максимальных выступов, больших предыдущих, в рядом лежащих участках поверхности трения. В результате происходит перераспределение нормальных усилий, узел схватывания разгружается и под действием касательных усилий разрушается.

В зависимости от условий трения и механической прочности металла узла схватывания механизм разрушения может

быть различным. Разрушение узла схватывания происходит в местах, обладающих наименьшей прочностью, на одном из сопряженных тел или между ними. Во всех случаях узел схватывания разрушается подобно образцам при их испытании на растяжение.

В результате разрушения узла схватывания, как правило, на одной из поверхностей образуется вырыв, на другой — налипание частиц металла в виде наростов. При дальнейшем перемещении наросты могут, подобно абразиву, диспергировать и деформировать сопряженную поверхность. Они могут служить также препятствием, вызывающим изменение характера развития близлежащих узлов схватывания и перераспределение нормальных и тангенциальных усилий, а также способствовать образованию и развитию новых узлов схватывания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айнбиндер С. Б., Холодная сварка металлов, Изд-во АН Латв. ССР, 1957.
2. Айнбиндер С. Б., Новые способы сварки давлением, Изд-во АН Латв. ССР, 1960.
3. Айнбиндер С. Б., Клокова Э. Ф., О механизме возникновения сцепления при холодной сварке металлов, «Известия АН Латв. ССР», 1954, № 10.
4. Айнбиндер С. Б., Пранч А. С., О механизме возникновения и разрушения сцепления в процессе трения металлов, «Известия АН Латв. ССР», 1958, № 10.
5. Афанасьев Н. Н., Фактор формы и масштабный эффект, Сб. «Доклады по динамической прочности деталей машин», Изд-во АН СССР, 1946.
6. Ахматов А. С., Силы атомно-молекулярных взаимодействий, формирование и структура граничных смазочных слоев, Сб. «Труды 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. III, Изд-во АН СССР, 1949.
7. Ахматов А. С., Граничный смазочный слой как квазитвердое тело, Сб. «Труды 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. III, Изд-во АН СССР, 1949.
8. Безбородько М. Д., Виноградов Г. В. и др., О противозносных свойствах смазочных материалов и о влиянии различных факторов на противозносные свойства нефтяных масел, «Известия АН СССР», ОТН, 1958, № 12.
9. Болховитинов Н. Ф., Металлография и термическая обработка, ОНТИ, 1936.
10. Большанина М. А., Кунин Н. Ф., Напряжение, деформация и работа при пластических деформациях, Сб. «Труды 1-й краевой конференции физиков Западной Сибири», вып. 2, 1934.
11. Боуден Ф. П., Тейбор Д., Природа износа металлов, Сб. «Трение и граничная смазка», Изд-во иностр. лит., 1953.
12. Боуден Ф. П., Тейбор Д., Трение и смазка, Машгиз, 1960.
13. Вейлер С. Я., Лихтман В. И., Действие смазок при обработке металлов давлением, Изд-во АН СССР, 1960.
14. Виноградов Г. В., Безбородько М. Д., Павловская Н. Т., Противозносные свойства нефтепродуктов, Сб. «Химический состав и эксплуатационные свойства смазочных материалов», Гостоптехиздат, 1957.
15. Виноградов Г. В., Кусаков М. В., Исследование взаимодействия масел с металлами, «Вестник АН СССР», 1955, № 9.
16. Гаркунов Д. Н., Крагельский И. В., Об атомарном схватывании материалов при трении, «ДАН СССР», 1957, т. 113, № 2.
17. Гаркунов Д. Н., Повышение износостойкости деталей самолетов, Оборонгиз, 1960.
18. Голего Н. Л., Методика исследования явлений изнашивания в деталях машин, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ по трению и износу деталей машин», Редиздат Аэрофлота, 1956.

19. Голего Н. Л., Внешние признаки видов изнашивания деталей машин, КИГВФ, 1961.
20. Голего Н. Л., Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах, Машгиз, 1961.
21. Голего Н. Л., Топеха П. К., Пространственные диаграммы и износ металлов, Сб. «Труды КИГВФ», 1959.
22. Грозин Б. Д., Износ и механическая обработка металла, Изд-во АН УССР, 1948.
23. Грозин Б. Д., Исследование активных слоев металла деталей, работающих в условиях трения, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.
24. Даниелян А. М., Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов, Машгиз, 1954.
25. Дерягин Б. В., Проволочный прибор для оценки смазочной способности масел в условиях граничной смазки, Сб. «Труды 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. III, 1949.
26. Дерягин Б. В., Лазарев В. П., Применение обобщенного закона трения к граничной смазке и механическим свойствам смазочного слоя, Сб. «Труды 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. III, Изд-во АН СССР, 1949.
27. Дерягин Б. В., Пичугин Е. Ф., Граничная вязкость и граничные фазы смазочных пленок, Сб. «Труды 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. III, Изд-во АН СССР, 1949.
28. Дерягин Б. В., Пичугин Е. Ф., Применение шуповых профилометров к изучению граничного смазочного действия и оценке маслянистости, Сб. «Трение и износ в машинах», т. VIII, Изд-во АН СССР, 1953.
29. Джонсон Р. Л., Свикерт М. А., Биссон Е. Е., Влияние скорости скольжения и температуры на износ и трение некоторых материалов, «Машиностроение», 1956, № 7.
30. Дьяченко П. Е., Качество поверхности деталей авиационного мотора, Изд-во АН СССР, 1946.
31. Дьяченко П. Е., Об износе деталей машин, Сб. «Вопросы машиноведения», Изд-во АН СССР, 1950.
32. Дьяченко П. Е., Метод определения глубины наклепанного слоя металла без разрушения изделия, Сб. «Труды семинара по качеству поверхностей», т. I, Изд-во АН СССР, 1951.
33. Еремин А. Н., Физическая сущность явлений при резании, Машгиз, 1951.
34. Залецкий Г. И., Влияние масштабного фактора на величину износа металлов при трении скольжения, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ», Редиздат Аэрофлота, 1956.
35. Заморев Г. М., Пластическая деформация и структурные изменения поверхностных слоев стали при изнашивании, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Машгиз, 1956.
36. Запольский Н. В., Износ и восстановление деталей судовых двигателей внутреннего сгорания, «Речной транспорт», 1960.

37. Иньшаков Н. Н., Износ литой стали при сухом трении скольжения, Сб. «Труды 1-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. 1, 1939.
38. Ишлинский А. Ю., Крагельский И. В., О скачках при трении, ЖТФ, 1944, т. 14, вып. 4—5.
39. Кардонский В. М., Курдюмов Г. В., Перкас М. Д., «Физика металлов и металловедение», 1959, № 7.
40. Кайдановский Н. Л., Хайкин С. Э., Механические релаксационные колебания, ЖТФ, 1933, т. III, вып. 1.
41. Кайдановский Н. Л., Природа механических автоколебаний, возникающих при сухом трении, ЖТФ, 1949, т. XIX.
42. Каширин А. И., Исследование вибрации при резании металлов, Изд-во АН СССР, 1944.
43. Кашеев В. Н., Исследование наростов, образующихся при трении сплавов, Сб. «Труды СФТИ», вып. 24, 1947.
44. Кашеев В. Н., Ткаченко Н. Я., Трение бронзы по бронзе при различных скоростях и нагрузках, «Известия МВО. Физика», 1958, № 2.
45. Кедрин Л. Ф., Исследование трения металлов в различных средах, «Машиностроение», 1956, № 11.
46. Кислик В. А., Вкладыши подшипников с тонким слоем баббита, Информ. письмо № 114, Трансжелдориздат, 1946.
47. Кислик В. А., Износ деталей паровозов, Трансжелдориздат, 1948.
48. Кислик В. А., Износ и повреждения поверхности катания колес грузовых вагонов, Тезисы докладов 3-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, 1957.
49. Кокс М., Роль атмосферного окисления при скольжении металлических поверхностей с высокой скоростью, «Машиностроение», 1958, № 5.
50. Конвисаров Д. В., Трение и износ металлов, Машгиз, 1947.
51. Костерин Ю. И., Крагельский И. В., Релаксационное колебание в упругих системах трения, Сб. «Трение и износ в машинах», т. XII, Изд-во АН СССР, 1958.
52. Костецкий Б. И., Износостойкость деталей машин, Машгиз, 1950.
53. Костецкий Б. И., Износ металлов и масштабный эффект, «ДАН УССР», 1951, № 2.
54. Костецкий Б. И., Явления схватывания при трении металлов, «ДАН УССР», 1952, № 1.
55. Костецкий Б. И., Основные вопросы теории трения и изнашивания деталей машин, Машгиз, 1955.
56. Костецкий Б. И., Основные вопросы в проблеме сопротивления изнашиванию деталей машин, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ по трению и износу деталей машин», Редиздат Аэрофлота, 1956.
57. Костецкий Б. И., Основные вопросы в проблеме сопротивления изнашиванию машин, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.
58. Костецкий Б. И., Основные положения теории изнашивания деталей машин, КИГВФ, 1958.

59. Костецкий Б. И., Соппротивление изнашиванию деталей машин, Машгиз, 1959.

60. Костецкий Б. И., Голего Н. Л., Метод и машина для исследования механических свойств поверхностей трения, КИГВФ, 1958.

61. Костецкий Б. И., Ивженко И. П., Натансон М. Э., Сравнительные характеристики профилей пятен обсыхания, образующихся при проведении спектрального анализа поверхностей трения деталей машин, Сб. «Трение, смазка и износ деталей машин», вып. III, КИГВФ, 1962.

62. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Голего Н. Л., Топеха П. К., Классификация металлов и сплавов по их износостойкости, Сб. «Труды КИГВФ», 1959.

63. Костецкий Б. И., Прейс Г. А., Елисеев В. Д., Испытание металлов на износ, Машгиз, 1955.

64. Крагельский И. В., О зависимости силы трения скольжения от скорости, Сб. «Трение и износ в машинах», т. 1, Изд-во АН СССР, 1941.

65. Крагельский И. В., Молекулярно-механическая теория трения, Сб. «Труды 2-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. III, 1949.

66. Крагельский И. В., О моделировании процессов, протекающих на поверхностях трения, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Машгиз, 1956.

67. Крагельский И. В., Наука о сухом трении, ее состоянии и пути развития, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.

68. Крагельский И. В., Трение и износ, Машгиз, 1962.

69. Крагельский И. В., Виноградова И. Э., Коэффициенты трения, Машгиз, 1955.

70. Крагельский И. В., Чичинадзе А. В., Методика испытаний фрикционных материалов на новой машине трения И-47 ИМАШ АН СССР, «Заводская лаборатория», 1954, № 5.

71. Крагельский И. В., Швецова Е. М., О видах процесса изнашивания в условиях сухого трения, «ДАН СССР», 1950, т. XXV, № 5.

72. Крагельский И. В., Швецова Е. М., Влияние скорости скольжения на изнашивание одноименных металлов, Сб. «Трение и износ в машинах», т. X, Изд-во АН СССР, 1955.

73. Крагельский И. В., Щедров В. С., Развитие науки о трении, Изд-во АН СССР, 1956.

74. Кривоухов В. А., Деформирование поверхностных слоев металла в процессе резания, Машгиз, 1945.

75. Кривоухов В. А., Воронов А. Л., Высокочастотные вибрации реза при точении, Оборонгиз, 1956.

76. Куделя Е. С., Спектральный анализ металлов и сплавов, Гостехиздат УССР, 1961.

77. Кузнецов В. Д., Физика твердого тела, т. IV, Томск, 1947.

78. Кузнецов В. Д., Роль наростов при трении, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.

79. Кузнецов В. Д., Наросты при резании и трении, ГИТТЛ, 1956.

80. Кунин Н. Ф., Ломакин Г. Д., Внешнее трение и механические колебания, ЖТФ, 1953, т. 23, вып. II.

81. Курдюмов Г. В., Перкас М. Д., Хандрос Л. Г., «Физика металлов и металловедение», 1959, № 7.

82. Куюн А. И., Исследование тепловых явлений при трении и износе, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ по трению и износу деталей машин», Редиздат Аэрофлота, 1956.

83. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В., Металловедение сварки, Машгиз, 1954.

84. Лихтман В. И., Ребиндер П. А., Карпенко Г. В., Влияние поверхностно-активной среды на процесс деформации металлов, Изд-во АН СССР, 1954.

85. Лихтман В. И., Шукин Е. Д., Ребиндер П. А., Физико-химическая механика металлов, Изд-во АН СССР, 1962.

86. Малевский Ю. Б., Даровский Г. Ф., Атлас макро- и микроструктур сварных соединений, Машгиз, 1961.

87. Маталин А. А., Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин, Машгиз, 1956.

88. Матвеевский Р. М., Температурный метод оценки предельной смазочной способности машинных масел, Изд-во АН СССР, 1956.

89. Мороз Л. С., Тонкая структура и прочность стали, Металлургиздат, 1957.

90. Носовский И. Г., Исследование изнашивания металлов в различных газовых средах, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ по трению и износу деталей машин», Редиздат Аэрофлота, 1956.

91. Носовский И. Г., Влияние температуры контакта на скорости процессов окисления и схватывания при износе металла, Сб. «Трение, смазка и износ деталей машин», вып. II, КИГВФ, 1961.

92. Полосаткин Г. Д., Материалы по физике износа и трения, ЖТФ, т. XVI, вып. 12, 1946.

93. Пре́йс Г. А., Исследование влияния метода закалки на износостойкость стали 45, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ по трению и износу деталей машин», Редиздат Аэрофлота, 1956.

94. Пре́йс Г. А., Лаврук И. В., Влияние удельного давления на износ различных чугунов, Сб. «Труды 1-й научно-технической конференции КИГВФ по трению и износу деталей машин», Редиздат Аэрофлота, 1956.

95. Рабинович И. П., Исследование пар сталь — сталь, сталь — чугун и чугун — чугун при трении без смазки, Сб. «Исследование материалов с/х машин», ЦБТИ Минского завода тракт. и с/х машиностроения, 1956.

96. Раевский С. П., Техника микроскопического исследования металлов, Metallurgizdat, 1938.

97. Ребиндер П. А., Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел, Изд-во АН СССР, 1947.

98. Ребиндер П. А., Епифанов Г. И., Об энергетическом балансе процесса резания металлов, «ДАН СССР», Новая серия, 1949, т. XVI, № 4.

99. Ребиндер П. А., Епифанов Г. И., Влияние поверхностно-активной среды на граничное трение и износ, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.
100. Ребиндер П. А., Петрова Н. Н., Физико-химические основы явлений износа трущихся поверхностей, Сб. «Труды 1-й Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах», т. I, Изд-во АН СССР, 1939.
101. Розенберг А. М., Экспериментальное исследование процесса образования металлической стружки, «Известия Сибирского технологического института», 1929, 51, вып. 4.
102. Савицкий К. В., Природа пластической деформации поверхностей трения, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Машгиз, 1956.
103. Семенов А. П., Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании, Изд-во АН СССР, 1953.
104. Семенов А. П., Новая методика исследования схватывания металлов, Сб. «Трение и износ в машинах», т. VIII, Изд-во АН СССР, 1953.
105. Семенов А. П., Схватывание металлов, Машгиз, 1958.
106. Суходольская Е. А., Повышение износостойкости поршневых колец, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Машгиз, 1953.
107. Топеха П. К., Экспериментальное исследование окислительного и теплового износа в металлах, «Сб. трудов Института строительной механики АН УССР», 1952, № 16.
108. Топеха П. К., Основные виды износа металлов, Машгиз, 1952.
109. Ужик Г. В., О влиянии абсолютных размеров деталей машин на их прочность, Сб. «Вопросы расчета и конструирования деталей машин», Изд-во АН СССР, 1941.
110. Хайкин С. Э., Соломонович А. Е., Лисовский Л. П., О силах сухого трения, Сб. «Труды 1-й конференции по трению и износу в машинах», т. 1, Изд-во АН СССР, 1939.
111. Хрущов М. М., Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф, Изд-во АН СССР, 1945.
112. Хрущов М. М., Современные теории антифрикционности подшипниковых сплавов, Сб. «Трение и износ в машинах», т. VI, Изд-во АН СССР, 1950.
113. Хрущов М. М., Развитие теории абразивного изнашивания, Сб. «Развитие теории трения и изнашивания», Изд-во АН СССР, 1957.
114. Хрущов М. М., Беркович Е. С., Новые методы определения износа цилиндров двигателей и их значение, «Вестник машиностроения», 1950, № 8.
115. Хрущов М. М., Матвеевский Р. М., Новый вид испытания смазочных масел, «Вестник машиностроения», 1954, № 1, 12.

116. Чатынъян Л. А., Исследование износа металлов и сплавов при сухом трении и высоких температурах, Сб. «Трение и износ в машинах», т. X, Изд-во АН СССР, 1955.
117. Челноков А. Ф., Влияние химико-термической обработки стали на ее сопротивляемость схватыванию, КИГВФ, 1959.
118. Чернышев В. В., Перераспределение углерода в специальных поверхностях трения, Сб. «Трение и износ в машинах», т. VII, Изд-во АН СССР, 1953.
119. Чернышев В. В., Структурные изменения и влияние внешних факторов при работе стали на истирание, Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин», Машгиз, 1953.
120. Швецова Е. М., Крагельский И. В., Классификация видов разрушения поверхностей деталей машин в условиях сухого и граничного трения, Сб. «Трение и износ в машинах», т. VIII, Изд-во АН СССР, 1953.
121. Шевандин Е. М., Маневич Ш. С., Эффект масштаба при хрупком разрушении сталей, ЖТФ, II, 1946.
122. Щедров В. С., О прочности граничных пленок на соприкасающихся твердых поверхностях, Сб. «Трение и износ в машинах», т. IV, Изд-во АН СССР, 1951.
123. Щедров В. С., К теории абразивного изнашивания металлов, Сб. «Трение и износ в машинах», т. III, Изд-во АН СССР, 1949.
124. Щедров В. С., Температура на скользящем контакте, Сб. «Трение и износ в машинах», т. X, Изд-во АН СССР, 1955.
125. Якутович М. В., Труды института физики металлов, вып. 12, Изд-во АН СССР, 1949.
126. Block H., Fundamental Mechanical Aspects of Boundary Lubrication, "Journ. Soc. Aut. Eng." Vol. 46, № 2, 1940.
127. Bowden F. P., Hughes T. P., The Friction of Clean Metals and the Influence of Adsorbed Gases, "Proc. of the Royal Society", A172, 1939.
128. Bowden F. P., Leben L., The Nature of Sliding and the Analysis of Friction, "Proc. of the Roy. Soc.", Vol. 109, № 938, 1939.
129. Bowden F. P., Moore A. F. W., Tabor D., The Ploughing and Adhesion of Sliding Metals, "Journ. of Appl. Physics", Vol. 14, № 2, 1943.
130. Bowden F. P., Tabor D., Friction and Lubrication of Solids, Oxford, 1950.
131. Bowden F. P., Tabor D., The Seizure of Metals, "The Engineer", Vol. CLXXXVII, № 4863, April 8, 1949; The Seizure of Metals, "The Inst. of Mechanical Engineers" (Journ. Dec. 1949 and Proceedings, 1949, Vol. 160, № 3).
132. Bowden F. P., Tabor D., The Influence of Surface Films on the Friction and Deformation on Surfaces, "Properties of Metallic Surfaces", Monograph and Report, Series № 13, London, 1953.
133. Clayton D., The Behaviour of Various Engine and Gear Lubricants in Seizure, Test I, Inst. Petr. 25, 1939.
134. Cold Welding, "The Engineer", Vol. CLXXXV, № 4814,

№ 4819, April 30, 1948; "Machinery", Vol. 72, №1857; Vol. 73, № 1886, 1948; "Automobile Engineer", Vol. 38, № 503, 1948; "The Welding Engineer", Vol. 34, № 34, № 1, 1949; Vol. 35, № 2, 1950; "Mass Production", Vol. 27, № 4, 1951.

135. Erdmann - Jesnitzer F., Wichmann W., Gesetzmäßigkeiten bei Vermachungsvorgängen von Kristallen. Theorie zur Präßschweißung metallischer Körper, „Zeitschrift für Metallkunde“, Band 46, Heft 12, 1955.

136. Finch G. J., The Sliding Surface, "Proc. Physic. Soc.", B, Vol. 63, Part 7, № 367B, 1950.

137. Finch G. J., Quarrell A. G., Willmann H., Trans. Farad. Soc., 31, 1935.

138. Finch G. J., Spurr R. T., Surface Welding and the Extreme Pressure Lubricant, "Physics of Lubrication", Supplement № 1, 1951.

139. Fink M., Hoffmann U., Metallwirtschaft, 13, 623, 1934; Zeitschr. Anorg. Chem. 210, 100, 1932; Archiv Eisenhütten, n. 4, v. 6, 161, 1932.

140. Goodzeit C. L., The Seizure of Metal Pairs during Boundary Lubrication, "Friction and Wear", Michigan, 1959.

141. Green A. P., Proc. Roy. Soc., Ser. A, 228 (1173), 1955; см. также «Машиностроение», № 8 (26), 1955.

142. Morgan F., Muskat M., Reed D. W., Sampson I. B., Friction Behaviour during the Slip Portion of the Stick — Slip Process, "Journ. of Applied Physics", Vol. 14, № 12, 1943.

143. Parks J. M., Rekrystallization Welding, "The Welding Journal", Vol. 32, № 5, May 1953.

144. Kell B., Siebel E., Untersuchung über das Verschleißverhalten der Metalle bei gleitender Reibung, „Archiv für das Eisenhüttenwesen“, v. 9, № 11, 1936.

145. Shaw P. E., Leavey E. W., On the Friction of Dry Solids in Vacuo, "Phil. Mag", 10, 1930.

146. Swift H. W., "Engineering", 131, 1931.

147. Thomlinson G. A., A Molecular Theory of Friction, "Phil. Mag.", Series 6, Vol. 7, № 46, suppl. June 1929.

148. Tonn W., „Archiv für das Eisenhüttenwesen“, 10, 1935.

149. Wilson R. W., "Proc. Roy. Soc.", Ser. A(212), 1952.

СОДЕРЖАНИЕ	Введение	5
	<i>Глава 1. Методика, машины и установки для исследования процессов схватывания металлов при трении</i>	7
§ 1.	Выбор метода исследования	7
§ 2.	Основная методика исследований	9
	Анализ структуры металла поверхностей трения и поверхностных слоев	9
	Исследование химического состава поверхностных слоев металла эмиссионно-спектральным методом	13
	Исследование микротвердости поверхностей трения и поверхностных слоев металла	14
	Исследование микрогеометрии поверхностей трения	15
	Измерение температур в поверхностных слоях металла при трении	15
	Измерение нормальных и тангенциальных усилий при трении	17
	Паспортизация деталей машин	18
	Определение ведущих видов износа деталей машин по внешним признакам	20
	Комплексный метод исследования количественных и качественных характеристик процессов трения и износа в условиях схватывания металлов	21
§ 3.	Машины и установки	23
	Машина для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях малых скоростей скольжения	24
	Машина для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях высоких скоростей скольжения	27
	Машина для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях сверхвысоких скоростей скольжения	29
	Машина и установки для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях вибраций	30
	Установка для исследования процессов схватыва-	

ния металлов при трении в условиях низких температур	33
Установка для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях повышенных температур	35
Установка для исследования механизма процессов схватывания металлов при трении	37
Установка для исследования процессов схватывания металлов при трении в условиях высокого вакуума	38
Глава 2. Исследование процессов схватывания металлов при трении в деталях машин	42
§ 1. Схватывание металлов при трении	42
Схватывание 1-го рода	48
Схватывание 2-го рода	53
Глава 3. Экспериментальные исследования процессов схватывания металлов при трении	60
§ 1. Влияние внешних механических воздействий на закономерности развития процессов схватывания металлов при трении	61
Влияние скоростей скольжения, удельного давления и вибраций на закономерности развития процессов схватывания	61
Влияние температуры на закономерности развития процессов схватывания	101
Влияние размеров сопряженных тел на развитие процессов схватывания	122
Влияние периодов работы машины на возникновение и развитие процессов схватывания металла	131
§ 2. Влияние газовых, жидких сред и твердых смазок на закономерности развития процессов схватывания металлов при трении	134
Роль газовых и жидких сред в процессе трения и износа	134
Влияние твердых смазок на закономерности развития процессов схватывания	163
§ 3. Влияние материалов и методов обработки на закономерности развития процессов схватывания металлов при трении	166

Классификация металлов и сплавов по их износостойкости	168
Склонность чистых металлов к схватыванию в условиях высокого вакуума	194
Влияние пленок окислов на развитие процессов схватывания металлов	198
Изменение структуры железа в зоне схватывания	203
§ 4. Кинетика возникновения и развития процессов схватывания металлов при трении	214
Л и т е р а т у р а	221

Николай Лукич Голего

**Схватывание в машинах
и методы его устранения**

Редактор издательства

Е. Е. Лесовая

Художник

Ф. И. Юрьев

Художественный редактор

Б. В. Валуенко

Технический редактор

В. Н. Куренной

Корректоры

В. Н. Науменко, И. Д. Тетерук

Сдано в набор 10.VI 1965 г. Подписано
к печати 10.XII 1965 г. Формат бумаги
60×84¹/₁₆. Объем: 14,5 физ. л., 13,485 усл. л.,
13,18 учет.-изд. л. Тираж 2200 Зак. № 272
БФ 36689, Цена 86 коп.

Издательство «Техніка», Киев, 4,
Пушкинская, 28.

Книжная фабрика «Октябрь»
Государственного комитета
Совета Министров УССР по печати,
Киев, Артема, 23 а.

