

Лабораторная работа № 1
по курсу «Триботехническое материаловедение»

Наименование работы: «Определение коэффициента трения при испытании материалов на трение и изнашивание»

Основные положения теории

Трение обусловлено сложными механо- и физико-химическими процессами, протекающими в зонах фактического касания твердых тел. Эти процессы зависят от внешних условий, окружающей среды, температуры, нагрузки, шероховатости поверхностей, механических свойств и природы материалов. В практике проектирования, изготовления эксплуатации машин и оборудования необходимо прогнозировать и знать потери на трение в подвижных сопряжениях, определяющие коэффициент полезного действия изделий. Возникает необходимость выявления таких параметров и соотношений, на основе которых по заданным условиям можно определить важнейшую характеристику – коэффициент трения.

Коэффициент трения определяется как отношение силы сопротивления относительно перемещению T двух твердых тел при трении к нормальной составляющей N реакции внешних сил, действующих на кинематическую пару:

$$f = T/N$$

Цель работы состоит в изучении характера поведения триботехнической системы и определении коэффициента трения в парах сталь-сталь, сталь-бронза при трении скольжения без смазочного материала.

Экспериментальная установка, материалы

Проведение испытаний осуществляется на машине трения СМЦ-2, расположенной в трибоцентре кафедры (а. П-1-45). Кинематическая схема пары трения представлена на рис.1. Испытуемые материалы (сталь 45, бронза ОЦС-5-5-5) выполнены в виде колодки, контртело – ролик диаметром 35 мм

выполнен из стали 40Х13. Кинематическая схема машины трения СМЦ-2 представлена на рис.2.

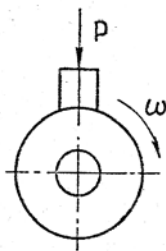


Рис.1 Кинематическая схема пары трения

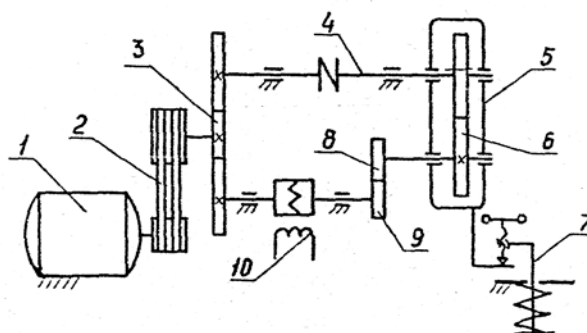


Рис.2 Кинематическая схема машины трения СМЦ-2

От двигателя 1 через клиноременную передачу 2 со сменными шкивами вращение передается к шестерням 3 раздаточной коробки. В каретке 5, поворачивающейся вокруг оси вала 4, расположены сменные шестерни 6 для привода верхнего образца 8, в случае, если используется схема трения качения с проскальзыванием и в качестве образца используется ролик. Нагружение образцов осуществляется пружинным механизмом 7.

Внешний вид машины трения СМЦ-2 представлен на рис.3.

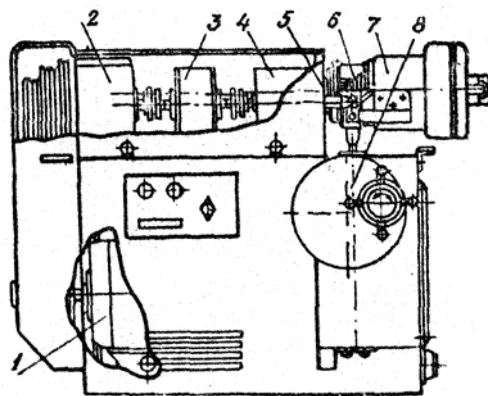


Рис.3 Вид и основные узлы машины трения СМЦ-2

Вращение на бабку 4 и вал 5 нижнего образца передается от электродвигателя 1 через клиноременную передачу и контрпривод 2. Верхний образец размещается в приспособлении на валу 6 в бабке 7. Нагрузка задается устройством 8, содержащим тарировочную пружину и серьгу. Момент трения регистрируется индуктивным датчиком 3 по скручиванию торсионного валика. Основные величины, характеризующие процесс трения, записываются синхронно на ленте электронного потенциометра – самописца КСП-4. Износ определяется микрометрированием или по потере массы образца.

Технические характеристики машины СМЦ-2:

Частота вращения нижнего образца, с ⁻¹	5.0;8.33;16.7
Диапазон измерения момента трения, Нм	1,5 - 15,0
Нагрузка на образцы, кН	0,2 – 2,0
Мощность, потребляемая, кВт	2,2
Масса машины, кг	500

Порядок выполнения работы

Преподавателем выдаются элементы пары трения: ролик $\varnothing$ 35 мм из стали 40Х13, закаленный до твердости HRC 40 и колодки размерами 10х10х10 мм из бронзы ОСЦ 5-5-5 и стали 45 (HRC 35-40).

В начале, перед проведением испытания, пара трения притирается путем трения при незначительной нагрузке, порядка 5-10 кг в течение 20-30 мин. При этом контролируется поведение стрелки на самописце КСП-4. Притирка считается законченной, когда стрелка самописца будет показывать постоянное значение момента трения.

Затем прикладывается испытуемая нагрузка на пару трения – 50-60 кг и проводятся испытания в течение 10 минут. При этом снимаются показания самописца и значения момента трения. Проводятся измерения массы колодки до и после испытания. Таких испытаний с одной колодкой проводят не менее трех. После этого вместо бронзовой колодки устанавливают колодку из стали

45 и по аналогичной схеме проводят притирку, испытания и измерения потери массы.

Обработка результатов работы

Работу следует проводить в следующей последовательности:

- включить все приборы с целью их прогрева;
- установить необходимую частота вращения нижнего образца-ролика;
- закрепить ролик и колодку в приспособлении;
- произвести обжатие образцов при некоторой нагрузке и проворот вала ролика от руки для лучшей самоустановки оправки с верхним образцом;
- на холостом ходу машины произвести прогрев всей измерительной системы момента трения, а также запись нулевой линии момента трения холостого хода;
- осуществить нагружение узла трения.

С целью исключения случайных ошибок образцы перед взвешиванием до испытаний и после эксперимента тщательно очищать. Каждый образец взвешивать до и после испытаний не менее трех раз, после чего определять потерю массы в результате изнашивания.

Линейная скорость скольжения составляет 0,09 м/с (для роликов Ø35 мм при угловой скорости 5 с⁻¹). Первоначальная (притирочная) удельная нагрузка составляет 0,5 - 1 МПа, затем (через 10000 оборотов) нагрузку увеличить до 5 - 6 МПа.

Непрерывная запись динамики изменений момента силы трения в процессе приработки и в установившемся режиме осуществляется потенциометром КСП-4. Точность измерения момента силы трения составляет 0,015 Н·м.

Коэффициент трения рассчитать по формуле:

$$f = \frac{2M}{d \cdot P}, \quad (1)$$

где M - момент силы трения в процессе работы, Н·м;

d - диаметр ролика, м;

P - прижимающая нагрузка, Н.

Затем рассчитать среднее значение коэффициента трения.

Скорость изнашивания V в г/ч рассчитать по формуле:

$$V = \frac{\Delta m}{t}, \quad (2)$$

где: Δm - изменение массы трущегося образца, г;

t – время одного испытания, 20 мин (по достижении 10000 оборотов).

Интенсивность изнашивания I_g в г/м рассчитать по формуле:

$$I_g = \frac{\Delta m}{L}, \quad (3)$$

где: Δm - изменение массы трущегося образца, г;

L – путь трения, м.

Контрольные вопросы

1. Как определяется коэффициент трения?
2. От каких факторов зависит величина коэффициента трения?
3. Какие существуют пути снижения коэффициента трения?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.
2. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977
3. Михин Н.М., Сляжнев М.А. Средства испытаний материалов на трение и износ. – В кн.: Испытательная техника: Справочник, кн.1-я. М.: Машиностроение, 1982.

Лабораторная работа №2
по курсу «Триботехническое материаловедение»

Наименование работы: «Испытания сталей различных структурных классов на абразивное изнашивание при различных углах атаки»

Основные положения теории.

Механизм газо-абразивного или воздушно-абразивного вида изнашивания включает элементы абразивного изнашивания при трении скольжения и изнашивания при прямом ударе по абразиву. Этому виду изнашивания подвержены трубопроводы различного назначения, детали дробеструйных аппаратов, котельных агрегатов, установок для золоулавливания, различных пневматических конвейеров, детали фонтанной арматуры, используемой при добыче нефти и газа и т.п.

Такой вид изнашивания является сложным, комплексным процессом. В нейтральной среде и при комнатной температуре процесс может включать:

- 1 – разрушение поверхности в результате высоких контактных напряжений;
- 2 – микрорезание поверхности абразивной частицей;
- 3 - контактную усталость;
- 4 – оплавление металла в результате высоких локальных контактных температур.

К наиболее значимым внешним факторам процесса относятся:

α – угол атаки,

V – скорость потока частиц,

$d_{\text{ч}}$ – средний размер частиц

Изменение угла атаки влияет на качественную картину и механизм изнашивания, что обуславливает практически два совершенно различных принципа подбора сталей для каждого режима изнашивания. При углах атаки меньше 45° превалирует ударно-скользящий контакт, а характер изнашивания обуславливает возникновение ориентированных царапин – следов микрорежущего действия абразивных частиц. Эти условия в

определенной мере приближаются к условиям классического абразивного изнашивания при трении скольжения. В этом случае исключительно велика роль твердости, как меры сопротивления внедрению частицы в поверхность металла; поэтому, чем выше твердость, тем меньше износ.

При ударном характере контакта, когда угол атаки приближается к 90^0 , качественная картина изнашивания иная: формирование частиц изнашивания происходит в результате повторного многократного деформирования поверхностного слоя, и в этом случае, чем выше твердость, тем активнее будет процесс трещинообразования. Начальные микротрещины в разных зонах соударения соединяются между собой и облегчают отделение частиц металла путем выкрашивания при малоцикловом воздействии абразивных частиц.

Скорость потока частиц абразива – характеристика энергетическая; этим объясняется увеличение износа при повышении скорости потока частиц абразива.

Зависимость износа стали У12 от угла атаки показана на Рис.1. Увеличение твердости материала смещает максимум в сторону больших углов при $V = 120$ м/с и $d_{\text{ч}} = 250$ мкм.

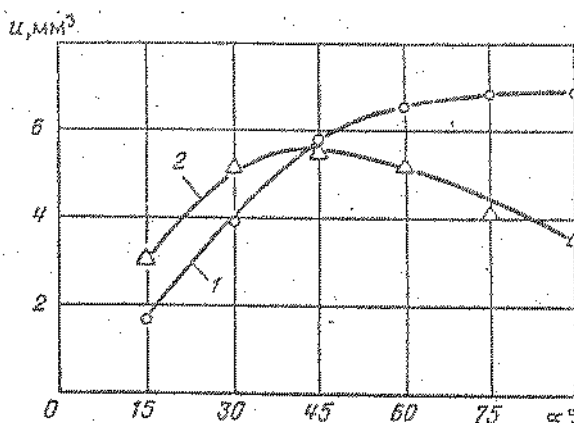


Рис.1 Зависимость износа закаленной и нормализованной стали У12 от угла атаки: 1 – закалка, отпуск при 180^0 ; 2 – нормализация.

Исследованиями в диапазоне углов атаки $15-90^0$ установлено, что определяющими процессами в механизме разрушения являются пластическая

деформация (при скользящих углах атаки) и хрупкий скол (при прямом воздействии потока).

Цель работы состоит в изучении износостойкости сталей различных структурных классов при воздействии абразивных частиц воздушно-абразивного потока, направленного под различными углами атаки к изнашиваемой поверхности.

Экспериментальная установка, приспособление, оборудование, материалы

Испытания проводят с использованием установки пескоструйной очистки. В качестве абразивных частиц используются частицы карбида бора B_4C размером 0,2-0,4 мм. Схема экспериментальной установки изображена на рис.2. Для обеспечения при испытаниях заданного угла атаки используется приспособление, изображенное на рис. 3.

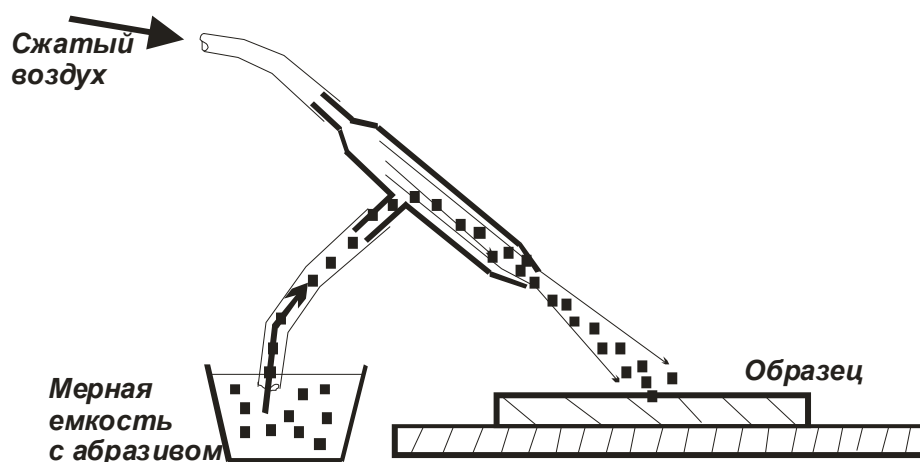


Рис.2 Схема взаимодействия воздушно-абразивного потока с испытуемым образцом.

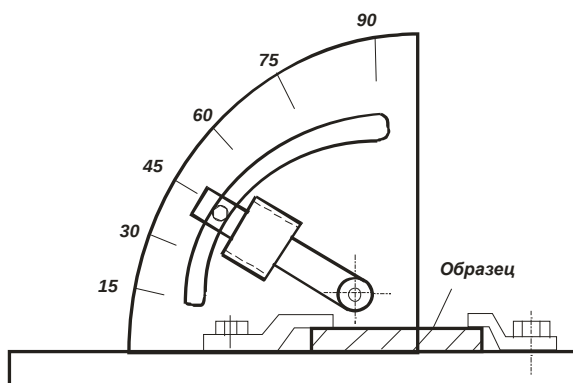


Рис.3 Приспособление для крепления сопла пескоструйной установки

Порядок выполнения работы

Студенты распределяются по группам в 3-4 чел. для снятия показателей при испытаниях. За каждой группой закрепляется соответствующий испытуемый образец стали, с которым эта группа проводит все испытания. На приспособлении устанавливается угол атаки 15^0 . В мерную емкость объемом 1 л. засыпаются до метки абразивные частицы. До испытания проводится взвешивание образца на электронных весах, показания заносятся в таблицу. В приспособлении устанавливается испытуемый образец стали, и само приспособление помещается в корпус установки пескоструйной очистки. Выходная трубка подсоса абразивных частиц выносится наружу, и при включении подачи воздуха осуществляется вылет абразивных частиц из сопла на испытуемую поверхность. Испытания заканчиваются, как только мерная емкость не будет полностью освобождена от абразивных частиц. Таким образом, проводят испытания со всеми образцами сталей. Затем угол атаки изменяют на 30^0 и проводят все то же самое при этом угле, затем аналогично при углах 45^0 , 60^0 , 75^0 и 90^0 .

Обработка результатов работы

Полученные значения весового износа заносят в таблицу вида: Таблица 1

№№ П/п	Материал № образца	Масса испытуемого образца, г									
		15^0		30^0		45^0		60^0		75^0	
		до	после	до	после	до	после	до	после	до	после

Продолжение Таблицы 1

№№ П/п	Материал № образца	Масса образца, г		Износ испытуемого образца, г					
		90^0		15^0	30^0	45^0	60^0	75^0	90^0
		до	после						

По результатам весового износа строят зависимость износа испытанных образцов сталей от угла атаки воздушно-абразивного потока, делаются выводы по полученным данным.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют разновидности абразивного изнашивания?
2. Как влияет угол атаки на износ сталей при воздушно-абразивном воздействии?
3. Как меняется механизм изнашивания сталей при изменении угла атаки?
4. Какими свойствами должны обладать стали при работе в воздушно-абразивном потоке?
5. Опишите схему экспериментальной установки для испытаний?
6. Как влияют механические свойства сталей на их износостойкость?
7. Влияет ли скорость удара частиц на износ?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000, -
2. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970

Лабораторная работа № 3:
по курсу «Триботехническое материаловедение»

Наименование работы: «Изучение поверхности изнашивания и оценка механизма разрушения».

Основные положения теории.

Металлический материал в виде слитка или отливки, получаемый при затвердевании залитого в полость литейной формы жидкого металла, обычно имеет строение из разветвленных кристаллов древовидной формы, называемых *дендритами*. Макроструктура слитка, как правило, состоит из двух основных широких зон и небольшой зоны мелких неориентированных кристаллов у поверхности (корковая зона).

Наружная зона имеет удлиненные малоразветвленные столбчатые кристаллы, располагающиеся примерно перпендикулярно к охлаждающимся поверхностям слитка. Во внутренней части слитка располагается зона более или менее равноосных разветвленных кристаллов-дендритов. Такое строение имеют, в частности, слитки хорошо раскисленной сильными восстановителями (Mn, Si, Al) *спокойной стали*. Иногда зона столбчатых кристаллов образуется в большей части объема слитка. В верхней части слитка спокойной стали расположена усадочная раковина конусной формы.

В случае выплавки стали с пониженным содержанием такого раскислителя, как кремний, при затвердевании слитка выделяется значительное количество газов ($\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$). Большая часть газовых пузырей остается в слитке такой *кипящей стали* и располагается ближе к поверхности. Усадочная раковина в этих слитках не образуется.

В металлургических производствах слитки далее подвергаются нескольким горячим и холодным прокаткам, иногда ковке (обработке давлением). При этом дендритные кристаллы сплющиваются и вытягиваются по направлению деформации, превращаясь в волокна. Газовые пузыри завариваются. Следовательно, деформированный с большими обжатиями материал получает *волокнистую макроструктуру* с различными

механическими свойствами вдоль и поперек проката (анизотропия свойств). Промышленность выпускает горячекатаный сортовой прокат (круглый, квадратный, шестигранный и др.), толстолистовой (толщина от 4 мм до 160 мм), холоднокатаный прокат тонколистовой (толщина 0,2...5,0 мм), ленту холоднокатаную, трубы бесшовные, поковки и другую металлопродукцию.

Горячая и холодная обработки давлением, в частности, *горячая штамповка*, широко применяются и на машиностроительных заводах для изготовления заготовок деталей машин. Волокна в них должны располагаться вдоль контура заготовки, совпадая с направлением действия механических сил на деталь.

В процессе обработок возможно образование различных дефектов материалов в виде неоднородности химического состава (ликвация), нарушения сплошности (трещины), крупнозернистого строения и др. Разработаны методы изучения и контроля структуры и возможных дефектов материалов, используемые в исследовательских организациях и производственной практике. В настоящей работе рассматриваются два из этих методов: макроструктурный анализ (макроанализ) и фрактография.

Макроанализ - изучение строения шлифованных и протравленных поверхностей материалов невооруженным глазом или с помощью лупы при небольших увеличениях.

Исследуемая плоская поверхность предварительно подвергается механической обработке резанием, шлифованию, полированию, а затем травлению специальными химическими реактивами. Наблюдаемое строение называется *макроструктурой*. При оценке степени развитости макродефектов используют ГОСТ 10243 «Сталь. Метод испытаний и оценки макроструктуры». Макродефект определяют путем сравнения изучаемого макрошлифа материала с набором фотографий стандарта и установления номера балла дефекта.

Фрактография - изучение поверхностей разрушения (изломов) или изнашивания материалов. Исследования проводят как без использования

приборов и при небольших увеличениях до 50 (макрофрактография), так и при увеличениях до десятков тысяч кратных с помощью электронных микроскопов (микрофрактография). Методы фрактографии дают информацию о микромеханических разрушениях материалов, используются при анализе повреждений и изнашивания деталей машин, происходящих в процессе их эксплуатации,

Микрофрактография позволяет изучить вид разрушения заготовки или изнашивания детали машины. Для вязкого разрушения характерен ямочный (чашечный) рельеф разрушения, а для хрупкого разрушения - «ручьистая» поверхность скола, подобная излому хрупких силикатных стекол при комнатной температуре (см. рис. 1).

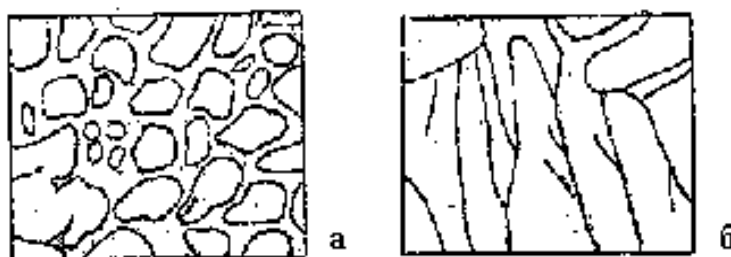


Рис. 1. Схемы строения поверхностей разрушения:

а- вязкого; б-хрупкого ($\times 5000$)

Цель работы состоит в изучении макроструктуры поверхностей изнашивания и анализе механизмов их разрушения при трении.

Экспериментальная установка, оборудование, материалы

При подготовке образцов для макроанализа в практической части работы используются станок для приготовления шлифов, тиски, наждачная бумага, вытяжной шкаф, травители. Приготовленные шлифы рассматриваются под микроскопом НЕОРНОТ при различных увеличениях. Студентам предоставляются готовые микрошлифы, образцы с изношенными поверхностями, а также образцы для практической части работы.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа состоит из двух частей:

- изучение макроструктуры и поверхностей разрушения металлических материалов по коллекциям образцов;
- выполнение практического задания по макроструктурному анализу механизма изнашивания.

В первой части работы студенты просматривают без применения приборов образцы из коллекций макрошлифов и изломов. Используя данные табл. 1 и 2, и схемы строения образцов (рис. 2), устанавливают характерные особенности строения и дефектов каждого образца в связи с их обработкой.

Во второй части работы выполняется одно из нижеприведенных заданий. Студентам выдаются образцы с изношенной поверхностью и предлагается описать по виду поверхности характерный вид изнашивания.

Обработка результатов работы

Часть 1. По данным табл.1 и табл.2 и изображениям на рис.2

Таблица 1. Коллекция макрошлифов металлических материалов

№№ образца	Наименование образца	Описание макроструктуры
1.	2.	3.
Литая и деформированная сталь		
1.	Макрошлиф продольного разреза слитка «спокойной» стали	Две основные зоны из кристаллов дендритного строения: столбчатых кристаллов и равноосных кристаллов. В верхней части расположена усадочная раковина; центральная часть имеет темные мелкие усадочные поры.
2.	Макрошлиф поперечного разреза слитка «кипящей» стали	Слиток имеет большое количество газовых пузырей, которые сплюсываются и завариваются при последующей многократной горячей прокатке.
5.	Макрошлиф образца, подвергнутого горячей обработке давлением	Волокнистая макроструктура. Волокна расположены по конфигурации заготовки.
Ликвация в литой стали		
3.	«Серный» отпечаток на фотобумаге с продольного разреза слитка стали	Светло- и темно-коричневые участки, характеризующие неравномерное распределение в стали сульфидов MnS, т.е. серы.
Макродефекты деформированных материалов		

6.	Макрошлиф рельса с ликвационной зоной	В верхней части рельса имеются несплошности и ликвационная зона с повышенным содержанием серы и фосфора, образовавшаяся при литье и сохранившаяся в прокатанном рельсе.
7.	Макрошлиф стали с крупной ковочной трещиной	В центре крестообразная трещина, образовавшаяся при горячей ковке литой стали с повышенной пористостью (усадочной рыхлостью).
8.	Образец стали с надрывами	По краям проката из недостаточно раскисленной стали образовались надрывы (рванины).
9.	Образец стали с расслоением	Образец расслоился на две части. Причиной является наличие шлаковых включений, газовых пузырей с загрязненной поверхностью, усадочной рыхлости.
10.	Образец стали с волосовинами	На поверхности проката мелкие «волосные» трещины, образовавшиеся из различных несплошностей литого металла.

МАКРОШЛИФЫ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ		
16.	Макрошлиф образца, подвергнутого поверхностной индукционной закалке	Видна разная степень потемнения закаленной зоны у поверхности и незакаленной внутренней зоны вследствие различий в микроструктуре.
17.	Макрошлиф образца, подвергнутого химико-термической обработке (цементации)	Видны две зоны, отличающиеся по степени потемнения: поверхностный слой с повышенным содержанием углерода и структурой, отличающейся от структуры сердцевины образца, имеющей пониженное содержание углерода.

Таблица 2. Коллекция изломов поверхностей разрушения металлических материалов

№№ образца	Вид излома	Описание поверхности разрушения
1.	2.	3.
4.	Излом образца литого металла небольшого размера	Столбчатые кристаллы по всему сечению излома.
11.	Продольный излом прокатанной стали с флокенами	На темно-серой поверхности разрушения видны небольшие светлые участки овальной формы («флокены»). В этих участках разрушение произошло по поверхности образовавшихся в стали небольших внутренних трещин.
12.	Камневидный излом	Хрупкое разрушение по границам крупных зерен, образовавшихся при сильном

13.	Нафталиновый излом	перегреве стали (высокой температуре нагрева). Хрупкое разрушение по объему зерен перегретой быстрорежущей стали (Fe-C-W-Mo-Cr-V) Гладкая поверхность разрушения с характерным блеском плоскостей крупных зерен.
14.	Шиферный излом	Поверхность разрушения имеет слоистое строение вследствие наличия повышенного количества неметаллических включений при недостаточном раскислении стали (излом вдоль волокон деформированной стали).
15.	Усталостный излом вала	Две зоны поверхности разрушения: гладкая фарфоровидная поверхностная зона усталости и более крупнокристаллическая внутренняя зона «долома» хрупкого или вязкого разрушения.



№ 1



№ 2



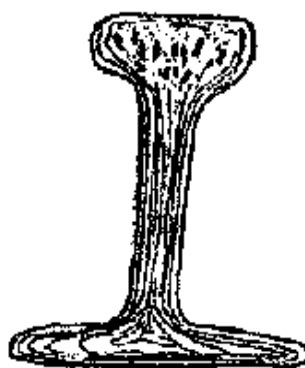
№ 3



№ 4



№ 5



№ 6



№ 7

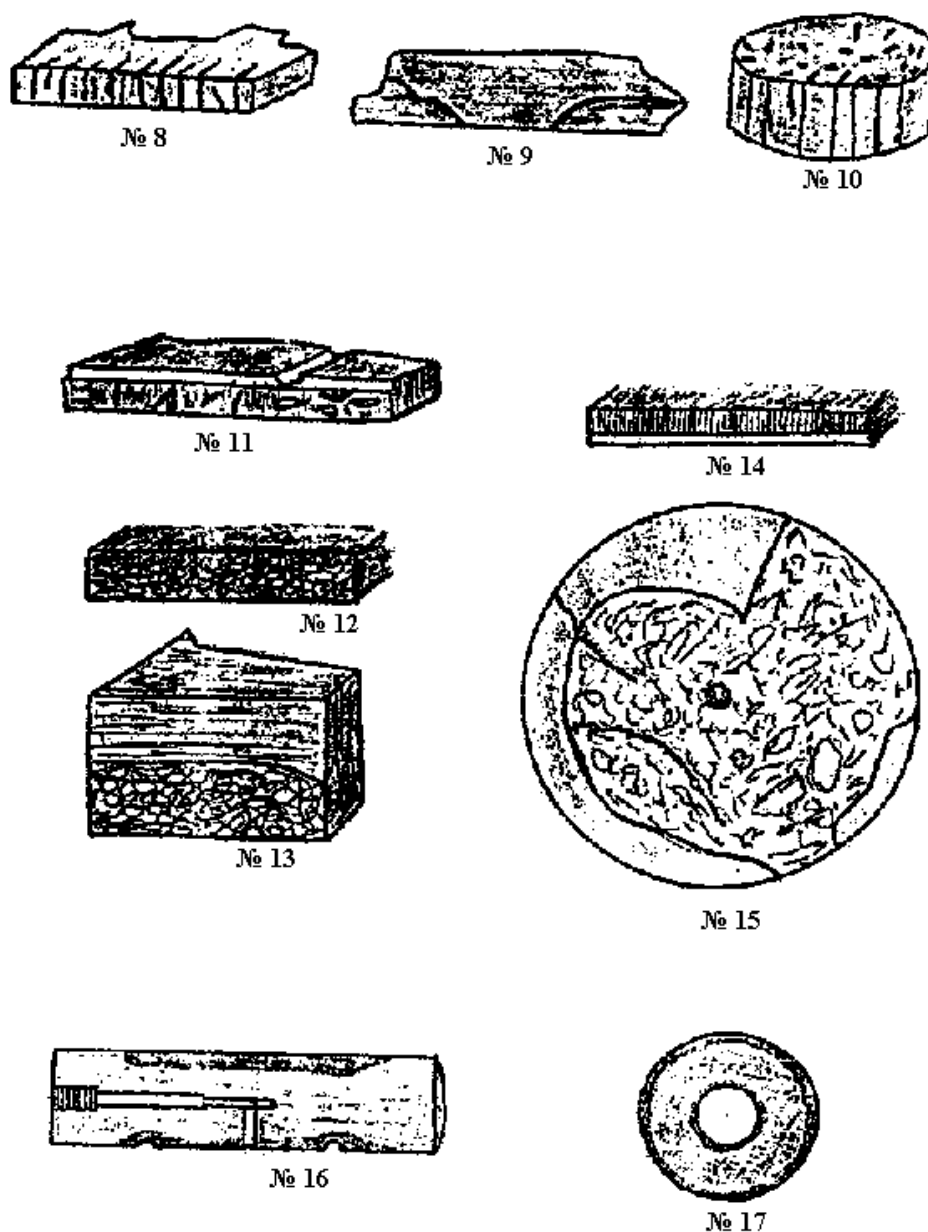


Рис.2 Схемы макроструктур и поверхностей разрушения металлических материалов.

Часть 2. Практическое задание. Анализ поверхности изнашивания

Просмотреть представленный преподавателем шлиф с изношенной поверхностью, зарисовать в отчете и определить с помощью линейки размеры и характер повреждений поверхностного слоя. Описать выявленный механизм изнашивания.

Содержание отчета: Итоги проведенной работы оформляют в отчете, который должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.

2. Оборудование, приборы и материалы, использованные при выполнении работы.

3. Теоретические положения: понятие макроанализа и фрактографии, описание макроструктуры литого и горячедеформированного материалов, перечень макродефектов и изломов лабораторной коллекции образцов.

4. Методика проведения работы и полученные результаты:

- Наименование, зарисовка и описание строения типовых образцов №№ 1,2,5,7,14,17.

Наименование практического задания, последовательность его выполнения, зарисовка и описание макроструктуры.

Контрольные вопросы

1. Понятие макроанализа и фрактографии.
2. Какую макроструктуру имеют литые и горячедеформированные металлические материалы?
3. Какое строение имеют слитки спокойной и кипящей стали?
4. Назовите примеры макродефектов прокатанных материалов.
5. Какое строение имеет поверхность разрушения в случаях нафталинистого излома и шиферного излома?
6. Какие две зоны имеют поверхность разрушения в случае усталостного излома вала?
7. Какой вид имеют поверхности вязкого и хрупкого разрушения при их изучении с помощью электронного микроскопа?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностр. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин; под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. 862 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.

Лабораторная работа №4
по курсу «Триботехническое материаловедение»

Наименование работы: «Обобщенные сведения о фазовом и структурном состоянии сталей. Структурные классы сталей».

Основные положения теории.

В машиностроении используются детали из заготовок, полученных способами обработки давлением или литьем. Широкое применение имеют стали и чугуны. Стали являются деформируемым материалом, иногда применяется стальное литье. Чугуны представляют собой, как правило, литейные материалы. Примеры использования этих материалов даны ниже. Легковой автомобиль среднего класса массой 1000...1100 кг имеет детали из разных сталей, составляющие 57...60 % его массы (США, Западная Европа). В станкостроении общая масса чугунных деталей равна в среднем 70...80 % от массы металлорежущего станка.

Основу химического состава сталей и чугунов составляет железо с добавками углерода менее 2,14 % (стали) или более 2,14 % (чугуны). У многих марок этих материалов дополнительно содержатся легирующие химические элементы (хром, кремний, марганец, никель, молибден и др.). Перечень основных видов сталей по государственным стандартам приведен в табл. 1. В машиностроении преимущественно применяются конструкционные стали и отливки из чугунов, используемые для изготовления деталей машин и различных сооружений, и инструментальные стали для металлорежущих, штамповых, измерительных и других инструментов.

При изучении строения и определении качества металлических материалов в материаловедении широко используется микроструктурный анализ.

Микроанализ - изучение строения поверхностей шлифованных, полированных и протравленных образцов - микрошлифов с помощью

металлографических оптических микроскопов при увеличениях обычно от $\times 100$ до $\times 1000$.

Наблюдаемое при этом строение поверхности шлифа называется **микроструктурой**. Микроструктура разных по химическому составу материалов и после их различной обработки отличается по размеру, геометрической форме, цвету, взаимному расположению отдельных структурных составляющих

Микроанализ основан на использовании законов отражения и поглощения световых лучей от поверхности непрозрачных металлических материалов (рис. 1). Полированная металлическая поверхность отражает направленные на нее перпендикулярно световые лучи и видна в окуляр микроскопа как светлая. При наличии в материале неметаллических составляющих структуры они видны как темные, так как поглощают световые лучи.

Стали, получаемые кислородно - конверторным, электро-сталеплавильным и другими способами, содержат **нематаллические включения**. Это химические соединения металлов (железа, алюминия, и др.) с неметаллами (серой, кислородом, азотом и др.).

Таблица 1. Перечень основных разновидностей сталей по государственным стандартам

№№ ГОСТа	Наименование стандарта
380-88	Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.
535-88	Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия.
1050-88	Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия.
1414-75Е	Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия
1435-90	Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали
4543-71	Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия
5632-72	Стали высоколегированные и сплавы

5950-73	коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Прутки и полосы из инструментальной легированной стали. Технические условия
14959-79	Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия.
19265-73	Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия.

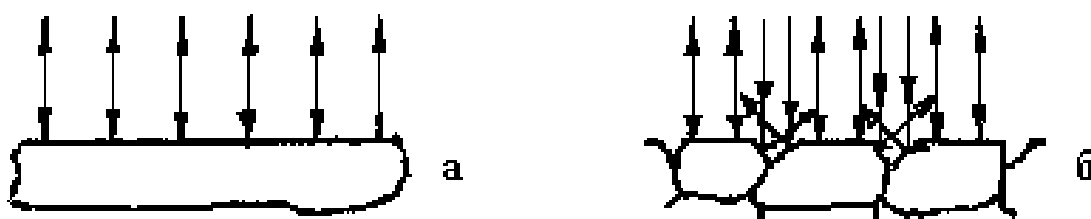


Рис. 1. Схема отражения световых лучей от поверхности полированного (а) и подвергнутого травлению (б) микрошлифа.

Основными видами неметаллических включений в стали по ГОСТ 1778-70 являются оксиды, сульфиды, силикаты, нитриды и карбонитриды (MnS , SiO_2 , TiN , $n\text{FeO} \cdot m\text{MnO} \cdot p\text{SiO}_2$ и др.). Оксиды и нитриды являются хрупкими и при прокатке стали располагаются в виде строчек или рассредоточенных точечных частиц. Пластичные сульфиды получают форму продолговатых линз. Силикаты имеют сложный химический состав и могут быть пластичными или хрупкими.

После травления шлифа химическим реактивом различные структурные составляющие материала растворяются в разной степени, т.е. возникает некоторый рельеф поверхности (наличие выступающих и углубленных участков). На отдельных участках этого рельефа световые лучи отражаются в разной степени и участки поверхности шлифа видны в окуляр как светлые и темные различных оттенков.

Данные о фазовом строении и структуре материалов в равновесном состоянии получают из приведенных в учебниках и справочниках диаграмм состояния. Такие диаграммы состояния в координатах «температура - химический состав» содержат информацию о фазах (первичных составляющих микроструктуры), имеющих в отдельных областях диа-

грамм, разделенных сплошными линиями. Эти данные относятся к равновесному состоянию сплавов. Применительно к сталям и чугунам диаграмма состояния железо – углерод дана на рис. 2.

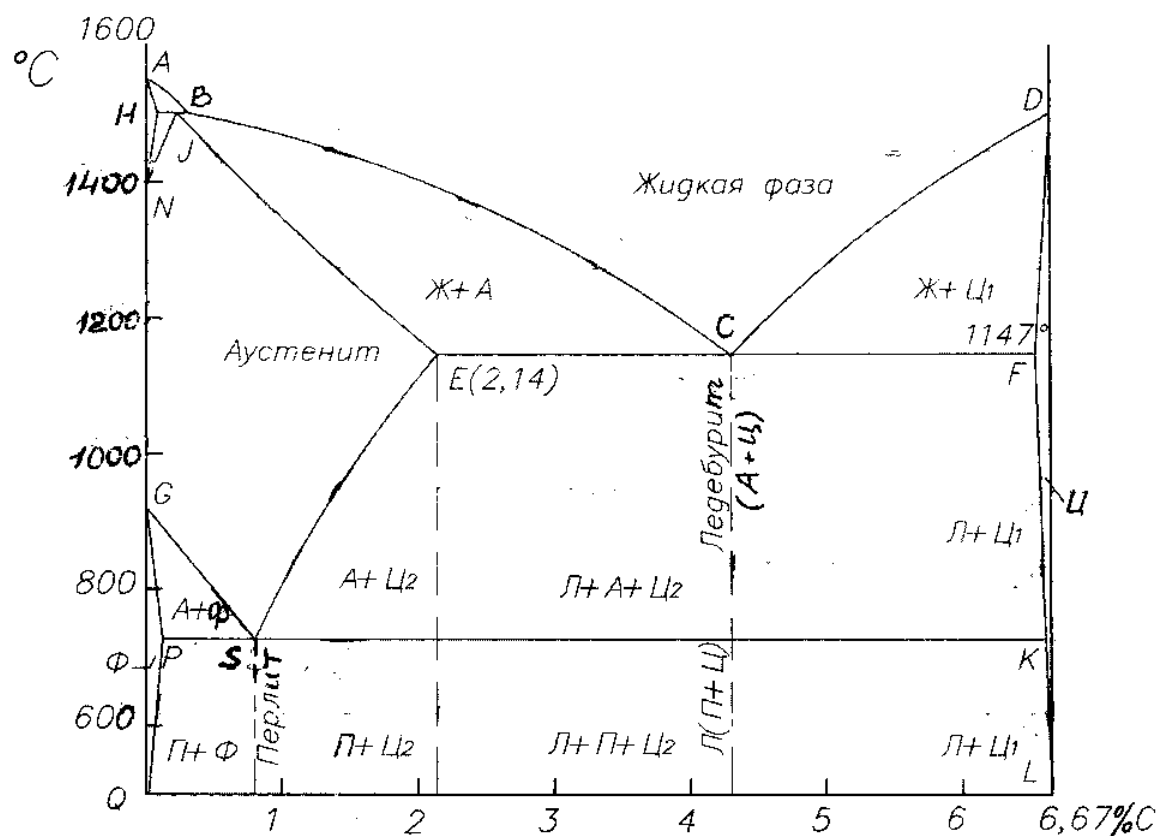
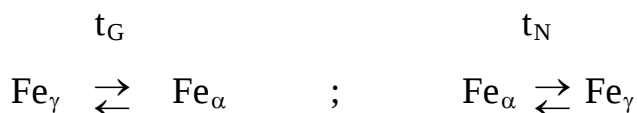


Рис. 2 Диаграмма состояния железо-углерод

Метастабильная диаграмма состояния железо-углерод относится к случаю полной растворимости компонентов в жидком состоянии выше линии ликвидуса ABCD и ограниченной растворимости углерода в железе в твердом состоянии. У железа наблюдаются два полиморфных превращения:



Железо модификаций α и γ имеет соответственно кристаллические решетки объемноцентрированного куба (ОЦК) и гранецентрированного куба (ГЦК). В связи с наличием у железа полиморфных превращений на диаграмме состояния железо-углерод образуются три области твердых растворов углерода в железе:

- область NJESGN твердого раствора γ (аустенита А), т.е. раствора углерода в Fe_γ (ГЦК);

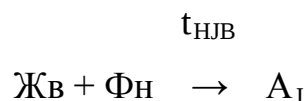
- две области QPGQ и AHNA твердого раствора α (феррита Ф), т.е. раствора углерода в Fe_α (ОЦК).

В правой части метастабильной диаграммы состояния железо-углерод имеется узкая область DFKLD твердого раствора небольшого количества железа в химическом соединении Fe_3C , т.е. цементита Ц.

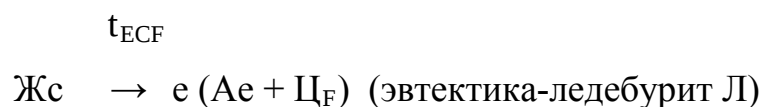
Следовательно, в сплавах метастабильной диаграммы состояния железо-углерод существуют следующие фазы: жидкий раствор углерода в железе, феррит, аустенит, цементит. Остальные области диаграммы состояния, ограниченные сплошными линиями, являются двухфазными, т.е. состоят из тех или иных двух фаз.

На диаграмме состояния имеются также горизонтальные линии трехфазных равновесий при постоянных температурах, где в равновесном состоянии существуют по три фазы:

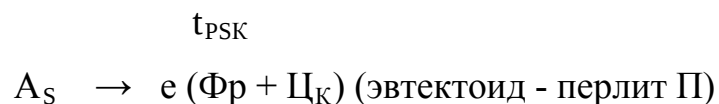
- линия HJB перитектического превращения:



- линия ECF эвтектического превращения:



- линия PSK эвтектоидного превращения:



В сплавах железо – углерод - кремний в зависимости от количества углерода и кремния, численной величины скорости охлаждения существуют две разновидности диаграммы состояния железо-углерод: метастабильная (железо-цементит) и стабильная (железо - графит).

У сталей и чугунов в равновесном состоянии имеются следующие фазы:

Жидкий раствор (Ж) на основе железа.

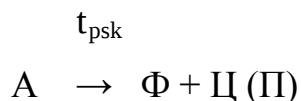
Феррит (Ф) - твердый раствор углерода и легирующих элементов в железе Fe_α с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба (ОЦК). Феррит имеет твердость HB 80-90, пластичен (относительное удлинение 50 %).

Аустенит (А) - твердый раствор углерода и легирующих элементов в железе Fe_γ с кристаллической решеткой гранецентрированного куба (ГЦК).

Цементит (Ц) - раствор небольшого количества железа в карбиде железа Fe_3C .

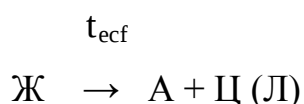
Образуются также и более сложные структурные составляющие из двух фаз, наблюдаемые в микроструктуре:

Перлит (П) в виде темных (коричневых) участков, состоящий из ферритной основы и кристаллов цементита пластинчатой формы (пластинчатый перлит). Он образуется при медленном охлаждении в сталях и чугунах в результате следующего фазового превращения аустенита:



Особой термической обработкой может быть получен зернистый перлит, состоящий из феррита и частиц цементита в форме мелких зерен.

Ледебурит (Л) в виде пестрых бело-темных участков, состоящий из белого цементита - основы и темного перлита в виде округлых или удлиненных частиц (ниже $727^\circ C$). Выше температуры $727^\circ C$ этот ледебурит состоит из цементита и аустенита :



Многочисленные стали разных марок, отличающиеся химическим составом, по микроструктуре в равновесном состоянии разделяются на шесть основных структурных классов (табл. 2).

Таблица 2. Структурные классы сталей в равновесном состоянии

Структурный класс стали	Химический состав		Микроструктура	Типовое применение в машиностроении
	Углерод C	Типичные легирующие элементы		
Дозвтектоидные стали	$C_p < C < C_s$	Cr, Mn, Ni и др.	Феррит + перлит	Конструкционные стали
Эвтектоидные стали	$C = C_s$	Cr, W, V и др.	Перлит	Инструментальные стали
Заэвтектоидные стали	$C_s < C < C_E$	Cr	Перлит и карбиды вторичные	Инструментальные стали
Стали карбидного (ледебуритного) класса	$C_E < C < 2,14\%$	Хром, вольфрам (до 6...12 %)	Перлит, карбиды первичные и вторичные	Инструментальные стали
Стали аустенитного класса	Десятые доли % и менее	Никель, марганец (до 13...20 %)	Аустенит легированный	Коррозионно-стойкие стали. Жаропрочные стали
Стали ферритного класса		Кремний, хром	Феррит легированный	Электротехнические стали. Кислотостойкие стали

Цель работы состоит в изучении классификации, структуры и микроструктуры, а также свойств и назначения сталей различных классов.

Экспериментальная установка, оборудование, материалы

В работе используются металлографические микроскопы и коллекции микрошлифов. Микроскопы выпускаются различной конструкции. Основными их частями являются: основание, корпус, предметный столик для установки микрошлифа, механизмы грубой фокусировки с макровинтом и микроподачи с микровинтом для точной наводки на фокус, оптическая система, осветитель.

Способность оптической системы микроскопа изображать отдельно две точки (разрешающая способность δ , мкм) определяется по формуле:

$$\delta = \lambda / 2A ; (A = n \sin (\alpha/2)),$$

где λ - длина волны световых лучей, мкм; n - показатель преломления световых лучей средой, находящейся между поверхностью микрошлифа и объективом микроскопа; α - отверстие угол объектива; A - числовая апертура микроскопа (обычно $A = 0,17 \dots 1,25$). При $A = 1,25$ и $\lambda = 0,55$ мкм для видимых лучей спектра микроскоп позволяет видеть структурные составляющие размером $\delta = 0,2$ мкм.

Порядок выполнения работы

Практическая часть работы заключается в изучении микроструктуры сталей, как правило, при увеличении микроскопа $\times 100$, а в некоторых случаях до $\times 600$. Студентам предоставляются лабораторные коллекции микрошлифов, подготовленные для исследований.

Предварительно студенты знакомятся с устройством и работой микроскопа под руководством преподавателя и лаборанта. Для рассмотрения микроструктуры шлиф, запрессованный в пластилин на стеклянной пластинке, устанавливается на предметный столик микроскопа. После включения источника света проводится наводка на фокус сначала с помощью макровинта, а затем более точно микровинтом. Далее изучается микроструктура шлифов типовых сплавов, описание которых дано в табл. 3. С помощью описания, схем микроструктур (рис. 3) и находящихся в лаборатории фотографий устанавливают, какие структурные составляющие имеет каждый образец, наименование, состав и структурный класс.

Более подробная оценка микроструктуры сталей, проводится по следующему государственному стандарту: ГОСТ 8233. Сталь. Эталоны микроструктуры.

Путем сравнения микроструктуры изучаемой стали со шкалами структур ГОСТ, определяется количественная характеристика или номер балла по соответствующему признаку. Применительно к равновесному состоянию сплава использование ГОСТ 8233 позволяет определить процентное соотношение между ферритом и перлитом в доэвтектоидных

сталих, соотношение количества пластинчатого и зернистого перлита, дисперсность пластинчатого и зернистого перлита. Для оценки неметаллических включений и различных видов неоднородности микроструктуры в сталях имеются отдельные государственные стандарты: ГОСТ 1763-68, ГОСТ 1778-70, ГОСТ 5640-68.

Обработка результатов работы

Имея количественные данные в процентах о площади, занимаемой в шлифе сплава различными структурными составляющими (П - перлит, Ц - цементит, Л - ледебурит, Г - графит), можно выполнить расчет примерного количества углерода в сталях и чугунах по следующей общей формуле:

$$C = 0,8П + 6,67Ц + 4,3Л / 100 + 30Г / 100, \%$$

Вычисления по приведенной формуле действительны для сплавов, находящихся в равновесном состоянии.

Примеры вычислений:

Сталь доэвтектоидная: 40 % П; 60 % Ф: $C = 0,8 \cdot 40/100 = 0,32 \%$.

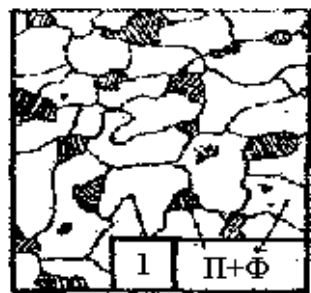
Сталь заэвтектоидная: 88% П; 12 % Ц₂: $C = 0,8 \cdot 88/100 + 6,67 \cdot 12/100 = 1,50 \%$.

Таблица 3. Перечень микрошлифов сталей из лабораторных коллекций (типовые примеры)

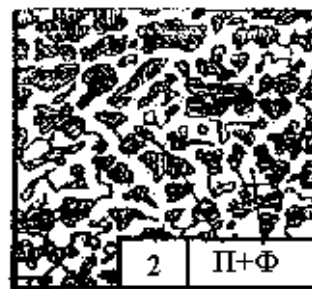
№№ Микро- шлифа	Материал	Химический состав, %		Структурный класс	Описание микроструктуры
		углерод С	другие компоненты		
1	2	3	4	5	6
УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ					
1.	Углеродистая качественная конструкционная сталь 20, ГОСТ 1050-88	0,20	-	Доэвтектоид- ная сталь	Светлые зерна феррита и темные участки перлита
3.	Инструментальная нелегированная сталь У8, ГОСТ 1435-90	0,80	-	Эвтектоидн- ая сталь	Перлит пластинчатый

4.	Инструментальная нелегированная сталь У8, ГОСТ 1435-90, после отжига	0,80	-	Эвтектоидная сталь	Перлит зернистый
5.	Инструментальная нелегированная сталь У10, ГОСТ 1435-90	1,00	-	Заэвтектоидная сталь	Темные участки перлита и светлая тонкая сетка вторичного цементита
КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ С СТРУКТУРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ					
7.	Сталь конструкционная после перегрева	0,40	-	Доэвтектоидная сталь	Крупные темные участки перлита и светлая широкая сетка феррита
8.	Сталь конструкционная с полосчатостью феррито-перлитной структуры	0,25	-	Доэвтектоидная сталь	Перлит и феррит расположены в виде чередующихся полос.
9.	Сталь инструментальная с обезуглероживанием поверхностного слоя	0,80	-	Эвтектоидная сталь	Перлит в сердцевине, феррит и перлит в поверхностном слое
ОБРАЗЕЦ СТАЛИ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ					
10.	Сталь с неметаллическими включениями (полированный шлиф без травления)	данных нет	-	-	Темные неметаллические включения, вытянутые по направлению деформации
ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ					
34.	Легированная конструкционная сталь 40Х, ГОСТ 4543-71	0,40	0,8...1,1 Сг	Доэвтектоидная сталь	Темные участки перлита и светлый феррит

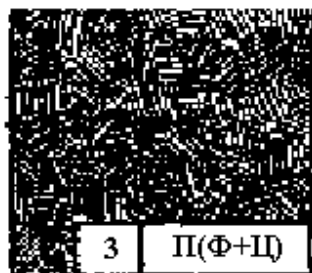
38.	Инструментальная легированная сталь X12, ГОСТ 5950-73	2,0	11,5...13,0 Cr	Сталь карбидного класса	Перлит мелкозернистый, крупные белые первичные карбиды и более мелкие вторичные карбиды
39.	Коррозионностойкая сталь 12X17, ГОСТ 5632-72	менее 0,12	16...18 Cr	Сталь ферритного класса	Светлые зерна легированного феррита
40.	Коррозионностойкая сталь 12X18Н10Т, ГОСТ 5632-72	менее 0,12	17...19 Cr; 9...11 Ni; не более 0,5 Ti	Сталь аустенитного класса	Светлые зерна легированного аустенита



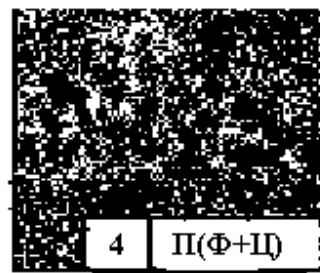
x100



x100



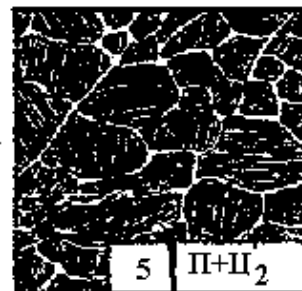
x600



x 100



x600



x100

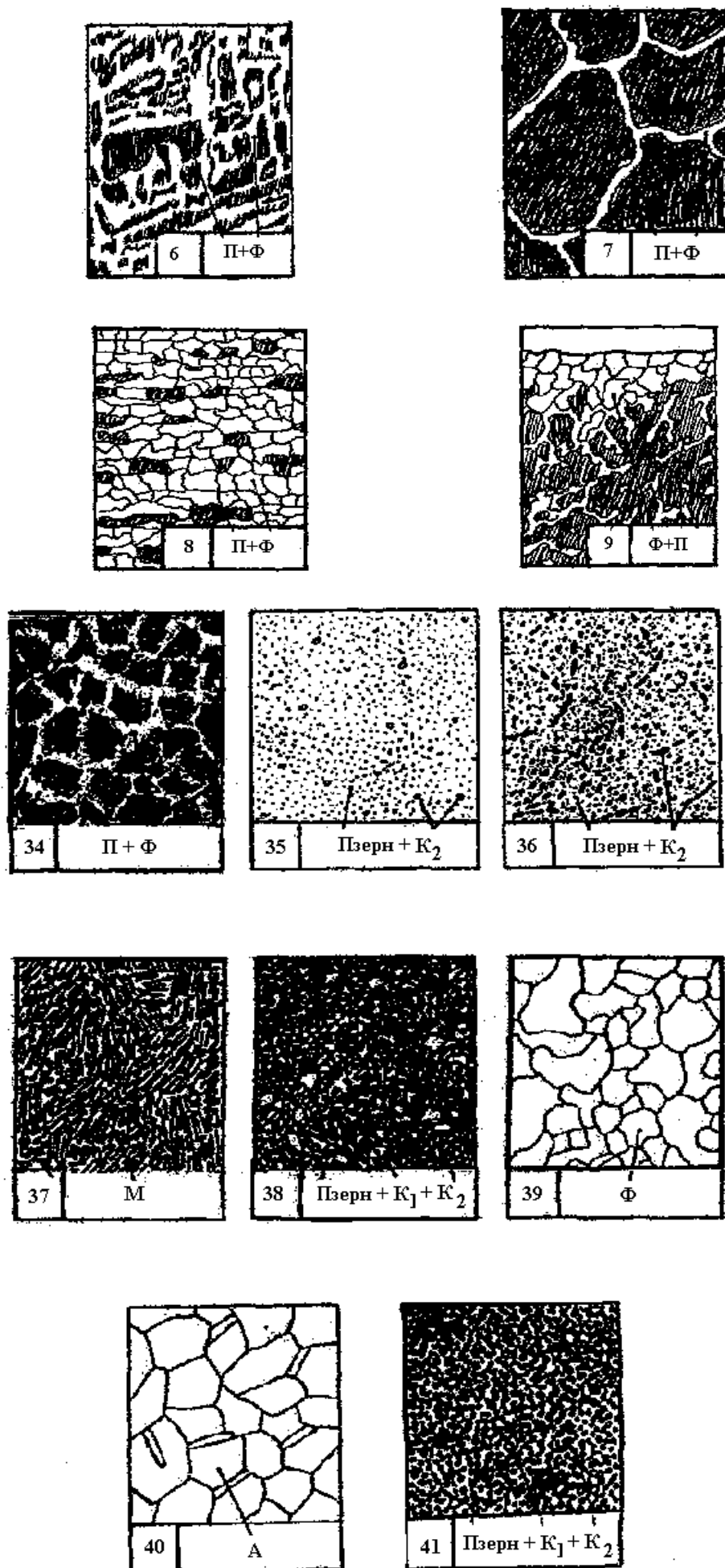


Рис. 3 Схемы микроструктур в соответствии с табл.3

Содержание отчета: Итоги проведенной работы оформляют в отчете, который должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Оборудование, приборы и материалы, использованные при выполнении работы.
3. Теоретические положения: понятие о микроанализе и микроструктуре. Характеристика фаз и структурных составляющих сталей. Перечисление структурных классов сталей.
4. Методика проведения работы и полученные результаты. Зарисовка схем микроструктур всех изученных сплавов, наименование и марка материала, составляющие структуры, химический состав.

Контрольные вопросы

1. Понятие микроанализа и микроструктуры материалов.
2. Какие основные части имеет металлографический микроскоп?
3. В какой последовательности проводится рассмотрение микрошлифа и изучение микроструктуры?
4. Что понимается под числовой апертурой микроскопа?
5. Из каких химических элементов (компонентов) состоят стали и чугуны?
6. Что представляют собой феррит, цементит, перлит, ледебурит?
7. Какие структурные классы имеют стали?

ЛИТЕРАТУРА:

3. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностр. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин; под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. 862 с.
4. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.