

29/19/10

Одобрено кафедрой
«Железнодорожный путь,
машины и оборудование»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Руководство к выполнению
лабораторных и практических работ
с методическими указаниями
для студентов III курса

специальностей

- 150800. ВАГОНЫ (В)
- 150700. ЛОКОМОТИВЫ (Т)
- 170900. ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ,
СТРОИТЕЛЬНЫЕ, ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ
И ОБОРУДОВАНИЕ (СМ)
- 181400. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)
- 060800. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА
ПРЕДПРИЯТИИ (ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ
ТРАНСПОРТ) (Э)
- 240100. ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК И
УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕ
(ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ) (Д)



Москва - 2003

Составитель: канд. техн. наук, доц. Е.Г. ЗАРЕМБО

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Цель руководства — помочь студентам подготовиться к выполнению работ по материаловедению, качественно и в срок выполнить их и сдать зачет.

Методические указания, альбом фотографий микроструктур, наглядные пособия предназначены для изучения приборов и оборудования, анализа полученных экспериментальных данных, составления таблиц, графиков, диаграмм, рисунков при оформлении отчетов по лабораторным и практическим работам.

Самостоятельное выполнение студентами работ должно обеспечить выход на более высокий уровень деятельности — уметь применять полученные знания.

Работа на приборах и оборудовании проводится в присутствии преподавателя и лаборанта с соблюдением техники безопасности.

Тематика работ соответствует программе дисциплины, утвержденной Госкомитетом РФ по высшему образованию.

Тематика практических работ (для спец. Э) соответствует лабораторным работам № 1 — первое занятие — 2 часа и № 3 — второе занятие — 2 часа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Изучение основных видов разрушения и повреждения деталей машин в процессе эксплуатации.

Способы их предупреждения

При эксплуатации железнодорожной техники — локомотивов, вагонов, путевых и других машин — наиболее распространенными причинами выхода деталей из строя являются хрупкие и вязкие разрушения усталостного характера, изнашивание и коррозия.

При этом наблюдается взаимное влияние коррозии, трения и усталости. Например, кроме механического изнашивания твердыми частицами (абразивное, гидроабразивное, кавитация, эрозия) имеется усталостное изнашивание рельсов, бандажей и колес, подшипников, деталей автосцепки и т.д., износ увеличивается при одновременном воздействии трения и коррозии, а также при молекулярном или атомном «схватывании» металлов и сплавов.

Знакопеременные нагрузки приводят к преждевременному усталостному разрушению из-за концентрации напряжений вследствие коррозии и износа.

Механические свойства, определяющие поведение деталей в эксплуатации, зависят от особенностей кристаллического строения, что подтверждают достижения физики твердого тела, теорий дислокаций и разрушения.

Поэтому, кроме традиционных механических испытаний для определения характеристик прочности, упругости, выносливости, твердости, вязкости, начали испытывать металлы при разных температурах, скоростях деформации, условиях, близких к эксплуатации, на вязкость разрушения и т.д.

Для исследования тонкой структуры применяют растровую электронную микроскопию, рентгено-структурный и рентгено-спектральный анализы, ядерный гамма-резонанс и другие методы.

Испытания образцов существенно отличаются от испытания натуральных деталей из-за различий в структуре и свойствах

по сечениям, остаточным напряжениям, состоянию поверхности, температуре, параметрам и цикличности нагружения. Поэтому наиболее показательными считаются натурные и особенно эксплуатационные испытания, когда возможна проверка эффективности способов упрочнения и предупреждения разрушения, выхода из строя.

На процессы усталости и изнашивания большое влияние оказывает прочность и твердость, поэтому в ГОСТах на стали предусмотрены такие характеристики, как предел прочности при растяжении и твердость, определенная различными методами. Применение высокопрочных и поверхностно-упрочненных сталей широко практикуется. Для уменьшения влияния коррозии применяются нержавеющие стали, покрытия из коррозионностойких материалов, анодная защита.

Большое внимание уделяют также совершенствованию конструкций машин с целью уменьшения рабочих нагрузок, концентрации напряжений.

Эти меры должны привести к повышению надежности, долговечности, а также экономичности и технологичности деталей железнодорожного подвижного состава, пути и различных машин и устройств.

Механические испытания

Определение характеристик прочности, пластичности, ударной вязкости, выносливости и изнашивания.

1. **Прочность** — способность сопротивляться деформации и разрушению — определяется при статических испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб, кручение (чаще на растяжение). Плоский или круглый образец растягивается и разрывается на специальной машине с записью диаграммы растяжения — зависимости деформации от нагрузки. При этом определяют модуль упругости $E = \sigma / \delta$, как тангенс угла наклона кривой растяжения к оси абсцисс ($\operatorname{tg} \alpha$), предел упругости, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности или временное сопротивление, истинное сопротивление разрыву. Чаще определяют для сталей предел текучести σ_T и предел

прочности σ_b , как отношение соответствующих нагрузок к площади поперечного сечения образца до испытания

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} [\text{МПа}]; \quad \sigma_T = \frac{P_T}{F_0} [\text{МПа}].$$

2. **Пластичность** — способность изменять свою форму, не разрушаясь, и хранить ее после снятия нагрузки. Характеристики пластичности — относительное удлинение (δ) образца и относительное сужение (ψ) после разрыва. Определяют δ при статическом испытании на растяжение, как отношение прироста длины к первоначальной длине, в процентах, ψ , как отношение убыли поперечного сечения образца в месте разрыва (шейка) к первоначальной площади сечения

$$\delta = (l_k - l_0)/l_0 \cdot 100\%; \quad \psi = (F_0 - F_k)/F_0 \cdot 100\%.$$

Характеристики σ_T , σ_b , δ , ψ , реже Е включаются в ГОСТ на поставку материалов, входят в расчеты конструкций.

3. **Ударная вязкость** — способность сопротивляться действию ударных нагрузок — определяется динамическими испытаниями на изгиб на маятниковом копре. Образец квадратного сечения с концентратором напряжений — надрезом разрушается от удара груза маятника. Работа разрушения, отнесенная к площади образца в месте надреза, определяет величину характеристики ударной вязкости. По ГОСТу 9454-78 надрезы могут быть трех видов: с радиусом концентратора 1 мм, 0,25 и углом 45° и усталостной трещиной, заранее созданной вибратором. К — работа на разрушение, КС — ударная вязкость, КСУ, КСВ, КСТ — обозначения ударной вязкости с учетом формы концентратора.

4. **Выносливость** — способность сопротивляться усталости и накоплению повреждений при циклических нагрузках, приводящих к трещинам и разрушению.

Особенностью усталости является две стадии — зарождение и развитие трещины, хрупкое разрушение при напряжениях, гораздо меньших пределов прочности и текучести.

Усталость развивается чаще из-за концентрации напряжений циклического характера. При испытаниях определяют вы-

носливость при симметричном цикле на определенной базе — количестве циклов. Образец нагружают и испытывают до разрушения на специальных машинах при вращении, кручении или изгибе. Нагрузки постепенно снижают, пока образец не пройдет базу без разрушения. Для стали база $N = 10 \cdot 10^6$ циклов, для цветных металлов $N = 100 \cdot 10^6$ циклов. Предел выносливости при симметричном цикле обозначают σ_{-1} , так как

$$\sigma_{-1} = \frac{-\sigma_{\max}}{+\sigma_{\max}}.$$

Имеются зависимости: $\sigma_{-1} = (0,3 \div 0,5) \cdot \sigma_b$; $\sigma_{-1} = \psi \cdot \sigma_b / 100$

5. **Твердость** — способность сопротивляться вдавливанию более твердых тел, а так же царапанию, упругому отскоку. Более точное определение твердости — вдавливанием.

Испытание по Бринеллю (ГОСТ 9012-90) проводится для более мягких образцов, так как необходимо получить отпечаток — лунку и измерить ее диаметр при помощи специального микроскопа со шкалой в мм. На специальной машине — прессе Бринелля (ТШ) — медленно вдавливают стальной закаленный шарик $\varnothing 10$ мм (из стали марки ШХ 15) с определенной нагрузкой (до 30000 Н) в образец, выдерживают под нагрузкой для преодоления упругой деформации (10÷60 с). Твердомер работает в автоматическом режиме.

Характеристикой твердости по Бринеллю является отношение нагрузки к площади лунки.

$$HB = \frac{P}{F} [\text{МПа}],$$

где H — твердость (Härte — твердость, нем.);

B — Бринелль;

P — нагрузка на шарик;

F — площадь лунки, мм².

Преимущества способа — высокая точность, малое влияние неоднородности структуры при высоких нагрузках. Недостаток — можно испытывать лишь мягкие материалы, с твердостью менее 4500 МПа.

Имеется соответствие между твердостью по Бринеллю и пределом прочности при растяжении: $\sigma_b = (0,34 \pm 0,35) HB$, действующее для углеродистой стали. Для цветных металлов $\sigma_b = (0,33 \pm 0,55) HB$, в зависимости от твердости.

Испытание по Роквеллу (ГОСТ 9013-90) проводят, вдавливая стальной закаленный шарик $\varnothing 1,59$ мм в сравнительно мягкие материалы или алмазный (твердосплавный) конус с углом при вершине 120° для твердых закаленных сталей и чугунов. Преимущество — универсальность, большой диапазон по твердости, быстрота определения ($2 \div 3$ с) сразу по шкале. Твердомер (ТК) с нагрузкой от 1000 до 1500 Н, в зависимости от индентора, характеристика твердости — условные единицы по шкалам А, В и С, которые, для сравнения, переводят на HB по специальной таблице.

Обозначение твердости по Роквеллу: HRA, если индентор алмазный конус, а нагрузка 600Н, HRC — при нагрузке 1500 Н, HRB, если индентор — шарик, а нагрузка 1000 Н.

Для неотчетливых деталей с твердостью HRC20-50 применяют твердый сплав вместо алмаза.

Недостаток — меньшая точность, так как могут повлиять неоднородности структуры, поэтому испытание проводят три и более раз, определяя глубину вдавливания индентора после предварительной и затем после основной нагрузки. Образцы следует предварительно сортировать по примерной твердости, определенной напильником или другими способами.

Испытание по Виккерсу (ГОСТ 2999-75) и **на микротвердость** (ГОСТ 9450-75) проводят для тонких поверхностных слоев после цементации, азотирования, для фольги, отдельных структурных составляющих при увеличении до 650 раз. Индентор — алмазная пирамида, по отпечатку которой судят о твердости. Обозначение по Виккерсу HV, а микротвердости — Н. Особенности — применение малых нагрузок (от 50 до 1000 Н по Виккерсу и от 0,05 до 5 Н для микротвердомера ПМТ).

Испытание по Полюди (ГОСТ 18661-90) проводят ударной нагрузкой по прибору, получая два отпечатка от индентора-стального закаленного шарика $\varnothing 10$ мм (из стали марки ШХ 15): на образце и на эталоне с известной твердостью. Измерив

отпечатки, получают характеристику $HP = HB_s \frac{d_s^2}{d_0^2}$ [МПа]. Твердость HP определяют также по специальной таблице в зависимости от HB_s, d_s, d_0 .

Преимущества — прибор карманный, не нужно вырезать образцы, удобно испытывать твердость непосредственно на машинах, крупных деталях. Недостаток — низкая точность измерений, нужен эталон с известной твердостью.

6. **Испытание на изнашивание** проводят на специальных машинах при трении образцов в условиях, близких к эксплуатации (со смазкой, с абразивом и т.д.).

Износ деталей во многом зависит от твердости поверхностных слоев и условий эксплуатации, от коррозии, от прочности, контактной выносливости металла.

1. Определение характеристик **прочности и пластичности** стали при растяжении образца (ГОСТ 1497-86). Испытания проводятся на разрывной машине со снятием диаграммы растяжения стандартного образца из низкоуглеродистой стали.

2. Определение характеристик **ударной вязкости** стали при ударном изгибе образца (ГОСТ 9454-89).

Таблица 1

Протокол испытаний на растяжение

l_0 , мм	l_1 , мм	$F_{0,2}$, мм ²	$F_{1,2}$, мм ²	R_T , Н	R_B , Н	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %

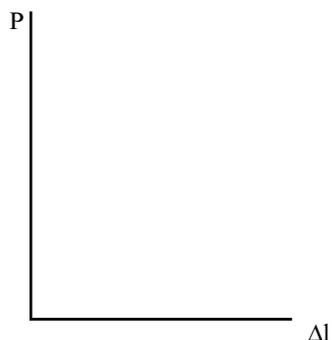


Рис. 1. Диаграмма растяжения

Рис. 2. Эскиз образца на растяжение до и после испытания

Формула для расчета ударной вязкости $KC = \frac{K}{F}$. Испытание проходит на маятниковом копре с автоматическим определением работы, затраченной на разрушение образца (K) в месте надреза (F).

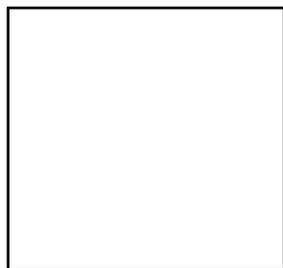


Рис. 3. Схема испытания на ударную вязкость

Рис. 4. Эскиз образца на ударную вязкость с разными надрезами (КСU и КСV)

Таблица 2

Протокол испытаний на ударный изгиб

а, мм.	в, мм	F, мм ²	K _и , Дж	K _в , Дж	KCU, Дж/м ²	KCV, Дж/м ²

3. Определение предела **выносливости** (усталости) стали при знакопеременном симметричном изгибе круглого образца (ГОСТ 25502-89).

Формулы для расчета $\sigma = \frac{P}{F}$; $\sigma_{-1} = \frac{+\sigma_{\max}}{-\sigma_{\max}}$; $\sigma_{-1} = 0,5\sigma_b$.

Испытание проводится на усталостной машине с определением числа циклов (N) и нагрузки на образец (P) после его разрушения.

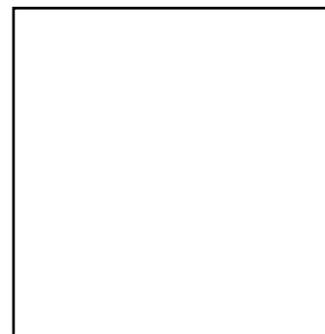


Рис. 5. Схема испытания на выносливость (усталость)

Рис. 6. Эскиз образца на выносливость

Таблица 3

Протокол испытаний на выносливость

(d =; $F = \frac{\pi d^2}{4} = \dots\dots\dots$)

P ₁ =	σ ₁ =	N ₁ =
P ₂ =	σ ₂ =	N ₂ =
P ₃ =	σ ₃ =	N ₃ =
P ₄ =	σ ₄ =	N ₄ =
P ₅ =	σ ₅ =	N ₅ =
P ₆ =	σ ₆ =	N ₆ =

$\sigma_{-1} = \dots \dots \dots$ МПа



Рис. 7. Кривая выносливости

4. Определение твердости образцов стали по диаметру отпечатка стального закаленного шарика (ГОСТ 9012-90, метод Бринелля).

Формула для расчета числа твердости $HB = P/F$.

При диаметре шарика $D=10$ мм и нагрузке $P=30$ кН число твердости HB определяется по таблице. Соотношения для стали с твердостью $HB1200 \div 1750$ МПа – $\sigma_b \approx 0,345 \cdot HB$; для стали с твердостью $HB 1750 \div 4500$ МПа – $\sigma_b \approx 0,35 \cdot HB$.

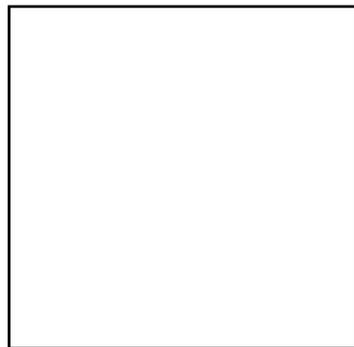


Рис. 8. Схема испытания на твердость по Бринеллю

Рис. 9. Схема измерений отпечатка под микроскопом Бринелля (d , мм)

Таблица 4

Протокол испытаний на твердость по Бринеллю

d_1	d_2	d_3	HB ₁	HB ₂	HB ₃	HB

5. Определение твердости образцов стали по глубине вдавливания алмазного (твердосплавного) конуса или стального закаленного шарика (ГОСТ 9013-90, метод Роквелла).

Таблица 5

Соотношения числа твердости HR по шкалам

Шкала	Обозначение	Пределы по шкале	Твердость по Бринеллю, HB
A	HRA	70-90	Свыше 7000
C	HRC	20-67	2300-7000
B	HRB	25-100	600-2300

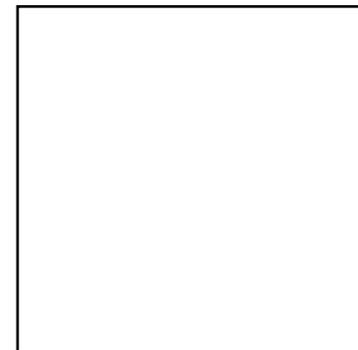


Рис. 10. Схема испытаний на твердость по Роквеллу

Таблица 6

Протокол испытаний на твердость по Роквеллу

Отожженная сталь	HRB	HB	Погрешность, %	Закаленная сталь	HRC	HB

6. Определение твердости образцов стали по диаметрам отпечатков на образце и эталоне после ударного испытания стальным закаленным шариком (ГОСТ 18661-90, метод Польди). Число твердости по Польди определяется по таблице с учетом коэффициента перевода на твердость эталона (k).

Таблица 7

Протокол испытаний на твердость по Полюди

d_0	d_s	НВ _s , МПа	НР ₁	k	НР	НВ, МПа



Рис. 11. Схема испытания на твердость по Полюди

7. Определение твердости стали на образцах по диагонали отпечатка, полученного вдавливанием алмазной пирамиды (ГОСТ 2999-90, метод Виккерса).



Рис. 12. Схема испытания по Виккерсу

Формула для определения числа твердости

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2},$$

где P — нагрузка на пирамиду (от 10 до 1000 Н);

d — длина диагонали отпечатка [мм];

$\alpha = 136^\circ$ — угол между гранями пирамиды;

НV= НВ (при твердости менее 4000 МПа).

8. Определение микротвердости (ГОСТ 9450-90).

Нагрузки на пирамиду на приборе ПМТ-3 от 0,05 до 5 Н.

$$H = 0,189 P/d^2,$$

где P — нагрузка [Н];

d — длина диагонали отпечатка [мм].

Для сравнения, при букве H ставят индекс величины нагрузки, например, $H_5 220$, где 5 — нагрузка [Н].

Выводы:

Дата	
Подпись студента	
Подпись преподавателя	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование превращений в сплавах методом термического анализа (построение диаграммы состояний)

Превращения в металлах и сплавах сопровождаются изменением теплосодержания, теплового расширения, а также электрических и магнитных свойств.

Чаще проводят термический анализ, то есть находят экспериментально критические точки на кривой охлаждения. Наглядно это можно проследить при кристаллизации легкоплавких металлов, образующих эвтектику, например свинец-сурьма, олово-цинк и др.

Для более точного определения критических точек используют дифференциальный термический анализ с нагревом эталонного и испытуемого металлов. Тепловое расширение определяют на dilatометре — приборе, фиксирующем скачкообразное изменение длины образца вследствие превращения. Критические точки определяют непосредственно на кривой охлаждения или нагрева образца.

Диаграмма состояний представляет собой совокупность линий, соединяющих критические точки сплавов и отделяющих фазовые области. Таким образом, чтобы построить диаграмму состояний, необходимо определить критические точки как чистых компонентов, так и их сплавов. Под критической точкой понимают температуру, при которой в металле происходят превращения с тепловым эффектом. Эти превращения могут быть связаны с плавлением или кристаллизацией, полиморфным изменением кристаллической решетки, выделением или растворением в твердом состоянии какой-либо фазы из-за изменения растворимости одного компонента в другом.

Выделение или поглощение скрытой теплоты превращения будет видно на графике термического анализа в координатах температура- время. Обычно строят экспериментальную кривую охлаждения сплавов Pb — Sb или Sn — Zn, получая данные на установке, состоящей из тигельной печи и прибора для измерения температур. Важно, чтобы сплав все время охлаж-

дался. Полученные критические точки следует сопоставить с плакатными данными, а затем по трем — четырем сплавам построить диаграмму состояний. Соединяя верхние критические точки, получают линию диаграммы состояний, отделяющую жидкую фазу (ликвидус), а нижние критические точки составляют линию, отделяющую совершенно твердое состояние (солидус). Самый легкоплавкий сплав — эвтектический.

Характерные микроstructures студенты наблюдают в металлографический микроскоп, находят микрофотографии в альбоме, учебнике, плакате, а затем зарисовывают.

Важно отметить, что сплавы на основе Pb, Sn, Zn широко применяют как антифрикционные в подшипниках скольжения (баббиты) в дизелях тепловозов, в буксах вагонов, на строительных машинах.

С помощью оптического и электронного микроскопов можно проводить исследование микроstructures металлов. Зная структуру, можно предопределить поведение металла в эксплуатации, выявить эффективность и правильность проведенной технологической обработки, соответствие металла сортаменту и ГОСТу. Полезное увеличение оптического микроскопа по условиям дифракции света не превышает 1500 раз, что позволяет видеть структуры размером не менее 0,2 мкм. Электронный микроскоп дает увеличение в сотни тысяч раз.

Для того, чтобы увидеть микроstructure, необходимо сначала изготовить путем шлифования и полирования металлографический шлиф-образец, затем протравить его специальным химическим реактивом (для черных металлов — сталей и чугунов — 3–5%-м раствором азотной кислоты в спирте, для латуней и бронз — хлорным железом и т.д.), промыть и высушить. Рассмотрев шлиф в микроскоп, следует сравнить его с фотографией (в альбоме, в учебнике, на плакате) определить структурные составляющие, их количественное соотношение. После этого микроstructure зарисовывают и описывают.

Металлографический микроскоп представляет собой комбинацию двух оптических систем — объектива и окуляра.

Общее увеличение определяется по фокусному расстоянию объектива и увеличению окуляра (по таблице). Подбирать увеличение необходимо, начиная с меньшего. Увеличение микроскопа примерно равно произведению увеличения окуляра и объектива, его можно проверить объект — микрометром или линейкой, установленной вместо шлифа. С помощью окуляр-микрометра (стекла с делениями, вставленного в окуляр), можно определить протяженность и размеры структурной составляющей, глубину насыщения поверхности углеродом и пр. Настройка микроскопа производится так, чтобы луч света попал через отверстие предметного столика на поверхность шлифа. Затем, вращая рукоятку грубой наводки на фокус и микровинт точной фокусировки, получают резкое, четкое изображение.

Менять видимое поле можно, вращая винты предметного столика и перемещая шлиф в разных направлениях. Структуру можно сфотографировать с помощью встроенной фотокамеры, пользуясь светофильтрами.

Структура стали в отожженном (равновесном) состоянии меняется с увеличением содержания углерода согласно диаграмме состояний железо-цементит.

Структура стали с содержанием углерода до 0,006% при 20°C называется ферритом (от лат. феррум — железо). Феррит — твердый раствор углерода в железе-альфа (Fe- α). Зерна феррита не травятся, выделяются границы зерна. Если в стали углерода больше, чем предел растворимости в Fe- α , можно увидеть третичный цементит, который выделяется из феррита при охлаждении и располагается по границам зерен, где больше дефектов и облегчена диффузия углерода. Повышение содержания углерода более 0,025% приводит к появлению эвтектоида-перлита — двухфазной механической смеси (феррит и цементит). В перлите 0,8% углерода. Перлит, как структура из двух фаз, травится сильнее, чем чистая фаза феррит, поэтому выглядит как темные зерна. При большом увеличении (500–1000раз) можно увидеть неоднородность перлита: пластинки цементита на ферритном фоне. Поэтому условно

перлитные зерна изображают полосатыми. В заэвтектоидной стали кроме перлита имеются включения цементита, который образовался вследствие выделения углерода из аустенита при охлаждении, так как растворимость углерода уменьшается по линии диаграммы состояний ES от 2,14 до 0,8%. Наиболее благоприятной является зернистая форма цементита, получаемая в результате правильно проведенной прокатки,ковки и отжига. Если же ковка закончилась при высокой температуре, а отжиг был проведен при температуре выше линии ES, то вследствие перегрева образуется сетка или иглы цементита, что вызывает снижение прочности и вязкости. По площади, занимаемой перлитом, можно определить содержание углерода, марку стали и ее свойства по ГОСТам, а также область применения.

Стали доэвтектоидные, не содержащие структурно-свободного цементита (твердого, но хрупкого), применяются в конструкциях, работающих на удар, поэтому и называются конструкционными. Стали заэвтектоидные применяются в качестве инструментальных, так как содержат цементит.

Практически сложно определить содержание цементита в структуре — определяют содержание углерода. Поэтому на диаграмме состояний железо-цементит имеются две шкалы.

Фазами системы являются: жидкий раствор, твердый раствор углерода в Fe- α — феррит, твердый раствор углерода в Fe- γ — аустенит и цементит — химическое соединение Fe₃C.

Следует иметь в виду, что в любой области диаграммы состояний имеются одна или две фазы, т.е. части сплава, отделенные поверхностью раздела и обладающие специфическими свойствами. Определить эти фазы можно, проводя горизонталь до пересечения с фазовыми (сплошными) линиями диаграммы. Правило отрезков (рычага) позволяет определить процентное соотношение фаз в любой точке. Достаточно отрезки горизонтали соотнести (в обратной пропорциональности) с объемом (массой) фаз.

Линия MO — магнитное превращение; ниже $t=768^{\circ}$ (точка Кюри) сплав ферромагнитен.

Критические точки на линии PSK обозначают A_1 , на линии MO — A_2 , на линии ES — A_{cm} , на линии GOS — A_3 . Поскольку при ускоренном нагреве или охлаждении критические точки не совпадают (тепловой гистерезис), добавляют индекс с (при нагреве) или г (при охлаждении). Например, A_{c_1} или A_{r_3} .

Если кристаллизация связана с жидким раствором, ее называют первичной (ABCD и AECF), если с превращениями в твердом состоянии — вторичной кристаллизацией (GOS, SE, PSK, PQ).

Структурная диаграмма позволяет определить процентное соотношение структурных составляющих в сплавах системы железо-цементит.

Диаграмма состояний железо-цементит продолжает уточняться и приводится в современном виде. Видно, что цементит может быть твердым раствором, а его стабильность нарушается и он расплавляется при температуре 1250°C .



Рис. 13. Диаграмма состояний для сплавов свинец-сурьма или олово-цинк (эвтектического типа)

Рис. 14. Схема установки для определения критических точек

Описание превращений на линиях диаграммы состояний.

AB-

BC-

DE-

Таблица наблюдений за температурой сплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t^{\circ}\text{C}$												
№	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$t^{\circ}\text{C}$												
№	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$t^{\circ}\text{C}$												



Рис. 15. График термического анализа сплава (кривая охлаждения)

Таблица 8

Протокол испытаний термическим анализом

Период	Состояние	Количество фаз	Название фаз	$t_{кр}^{верх}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{кр}^{ниж}$, $^{\circ}\text{C}$	Состав сплава, %

Доэвтектический	Эвтектический	Заэвтектический

Рис. 16. Схемы микроструктур сплава и их описание

Описание превращений на линиях диаграммы состояний при охлаждении сплавов.

ABCD-

AECF-

ABC-

CD-

AE-

ES-

PSK-

GOS-

OM-

Формулы для определения содержания углерода в доэвтек-

тоидной стали $C = \frac{0,8П}{100}\%$, в заэвтектоидной стали

$$C = 0,8П/100 + 6,67(100 - П)/100,$$

где П — площадь, занимаемая перлитом, в % от всей площади поля зрения шлифа под микроскопом.

Все образцы после шлифования и полирования протравлены 5%-ным раствором азотной кислоты в спирте.

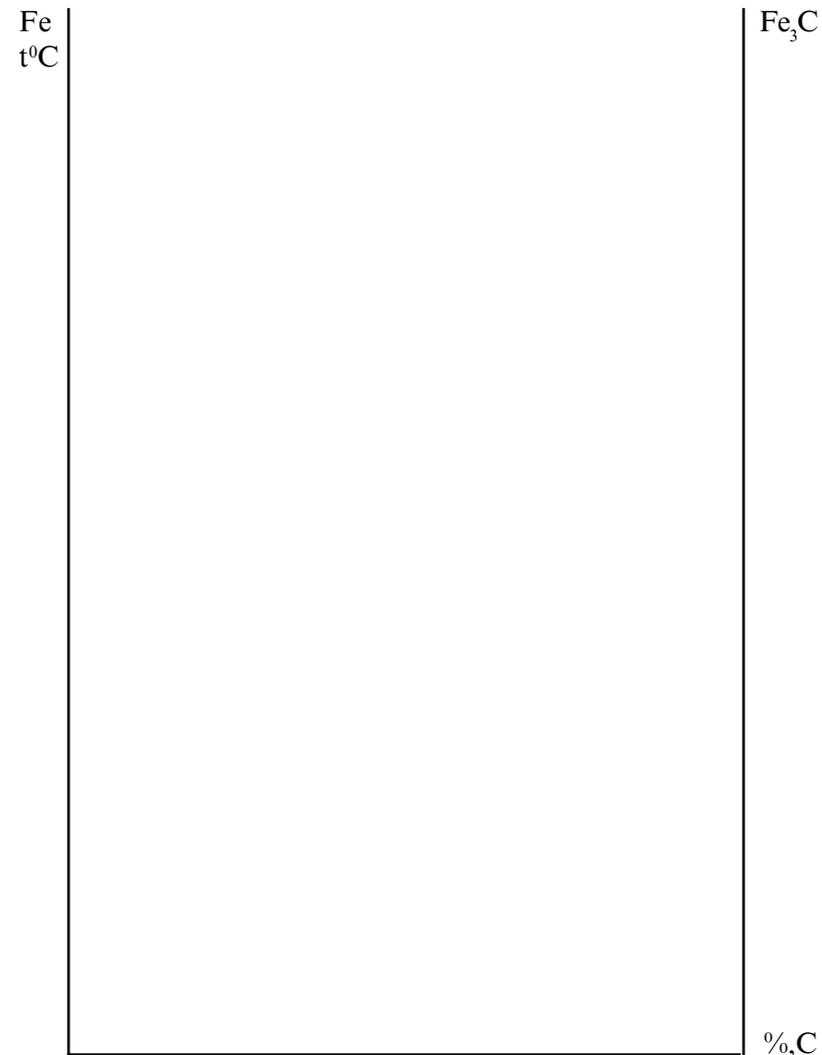


Рис. 17. Диаграмма состояний железо-цементит

Таблица 9

**Протокол испытаний металлографическим анализом
Схемы микроструктур и их описание**

	x	Состав	% С	Свойства	ГОСТ
1				НВ= σ_B = δ =	
2				НВ= σ_B = δ =	
3				НВ= σ_B = δ =	
4				НВ= σ_B = δ =	
5				НВ= σ_B = δ =	
6				НВ= σ_B = δ =	

Выводы:

Дата	
Подпись студента	
Подпись преподавателя	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

***Влияние режимов термической обработки на структуру
и свойства стали***

Собственно термическая обработка, химико-термическая обработка, термомеханическая обработка, а также электрофизические, лучевые и другие способы обработки сильно изменяют структуру стали, а значит ее свойства. Закалка, например, может увеличить прочность и твердость стали в 2-3 раза, но придать при этом хрупкость.

Чаще применяют объемную термическую обработку: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск стали. Химико-термическая обработка-цементация, азотирование, диффузионная металлизация — направлена на обработку поверхностных слоев детали.

Термомеханическая обработка проводится для некоторых сталей путем деформации с высокой степенью укова при повышенных температурах, в состоянии аустенита. При этом достигают повышения как прочности, так и пластичности стали.

Определение температуры нагрева стали под закалку

Целью закалки стали является получение высокой твердости и прочности путем изменения структуры. Изменить структуру можно термическим способом, т.е. нагревом, выдержкой и охлаждением.

Нагревом до температур, превышающих критические точки, можно получить Fe- γ с большим пределом растворимости углерода.

Выдерживая сталь при этой температуре, добиваемся насыщения железа углеродом. Затем охлаждаем сталь ускоренно, чтобы при обратном превращении Fe- γ в Fe- α и падении растворимости углерода от 0,8 до 0,025% часть углерода осталось в Fe- α , исказив решетку железа, увеличив тем самым твердость и прочность. Легированные стали требуют нагрева до высоких температур, плохо проводят тепло, поэтому их нагревают медленно (иногда в два этапа), чтобы не вызвать напряжений. То

же относится к деталям сложной конфигурации и массивным. Выдержка выбирается в зависимости от параметров диффузии углерода, температуры, толщины образца, расположения его в печи, и в среднем бывает равна 1 мин на 1 мм сечения образца (без учета времени на прогрев образца).

Скорость охлаждения должна быть достаточно большой (больше критической), чтобы получить пересыщенный углеродом твердый раствор в Fe- α (мартенсит). Для охлаждения при закалке применяют воду, растворы солей, масло.

Углеродистые стали обычно закачивают в воде с температурой 18°C. Нагретая вода охлаждает значительно медленнее, поэтому нужен контроль температуры воды.

Дозвтектоидные стали, как видно из диаграммы состояний железо-цементит, следует нагревать под закалку на 30÷50°C выше критической A_{c3} , чтобы избавиться от мягкого феррита (полная закалка), поэтому $t_{\text{зак}}$ будет зависеть от содержания углерода в стали. Эвтектоидную и заэвтектоидные стали следует нагревать под закалку на 30÷50°C выше A_{c1} , чтобы сохранить в структуре твердый, а поэтому полезный для инструмента цементит (неполная закалка); $t_{\text{зак}}$ будет при этом одинаковой (примерно 760°C). Так как состав аустенита перед закалкой у заэвтектоидных сталей одинаков, твердость этих сталей после закалки тоже примерно одинакова и почти не растет, начиная с 0,7%С. Перегрев стали приводит к росту зерна аустенита и пластинок мартенсита, большому количеству остаточного аустенита, напряжениям и трещинам из-за большего перепада температур и поэтому не допускается.

Определение скорости охлаждения при закалке стали

Охлаждение — заключительный этап термической обработки закалки и поэтому наиболее важный. От скорости охлаждения зависит образование структуры, а значит, и свойства образца.

Если раньше переменным фактором была температура нагрева под закалку, то теперь скорость охлаждения будет разная (в воде, в соленой воде, на воздухе, в масле и с печью).

С увеличением скорости охлаждения растет и степень переохлаждения аустенита, понижается температура распада аус-

тенита, число зародышей увеличивается, но вместе с тем замедляется диффузия углерода. Поэтому феррито-цементитная смесь становится более дисперсной, а твердость и прочность повышаются. При медленном охлаждении (с печью) получается грубая смесь Ф+Ц, т.е. перлит, это отжиг второго рода, с фазовой перекристаллизацией. При ускоренном охлаждении (на воздухе) — более тонкая смесь Ф+Ц — сорбит. Такая обработка называется нормализацией.

Закалка в масле дает тростит — высокодисперсную смесь Ф+Ц.

Твердость этих структур растет с дисперсностью смеси (НВ=2000÷4000 МПа). Эти структуры можно получить и способом изотермической закалки.

Рассматривая термокинетическую диаграмму, т.е. диаграмму изотермического распада аустенита вместе с векторами скоростей охлаждения, видим, что увеличивая скорость охлаждения, можно получить тростит вместе с мартенситом закалки. Если скорость охлаждения больше критической, получим мартенсит закалки и остаточный аустенит, избавиться от которого можно, если охладить сталь до температуры ниже линии окончания мартенситного превращения (M_k).

У мартенсита объем больше, чем у аустенита, поэтому при закалке на мартенсит появляются не только термические, но и структурные напряжения. Форма детали может исказиться, в ней могут появиться микро- и макротрещины. Коробление и трещины неисправимый брак, поэтому сразу же после закалки на мартенсит следует производить нагрев детали для снятия напряжений и стабилизации структуры, такая операция термической обработки называется отпуском.

После закалки образцов, изучения микроструктур и определения твердости строятся графики зависимости твердости от содержания углерода. Чем больше углерода в аустените стали перед закалкой, тем более искаженной получается решетка мартенсита (с большей степенью тетрагональности) и поэтому выше твердость.

Сталь с содержанием 0,2%С не принимает закалку, так как кривые изотермического распада аустенита вплотную приближаются к оси ординат. Даже очень большая скорость охлаждения не дает

мартенсита, так как аустенит начнет раньше распадаться на смесь Ф+Ц. Поэтому сталь закаливают, если углерода более 0,3%С, поскольку углерод сдвигает вправо кривые изотермического распада аустенита, уменьшая тем самым критическую скорость закалки.

Определение свойств и структуры стали после отпуска

Полученный после закалки мартенсит обладает большой твердостью и прочностью, но низкой пластичностью и вязкостью. Это объясняется большими внутренними напряжениями, которые бывают термическими (перепад температуры, резкое охлаждение) и структурными (объем мартенсита больше, чем аустенита, сорбита, тростита и перлита). После закалки необходимо сразу производить отпуск, т.е. нагрев до определенных температур, выдержку и охлаждение. При этом снижаются напряжения, меняется структура и свойства стали. Температура отпуска выбирается ниже A_{c1} , чтобы сохранить эффект упрочнения при закалке. Различают низкий отпуск (150–200°C), средний (350–450°C) и высокий (500–650°C).

Если при низком отпуске снижаются напряжения, уменьшается искаженность (тетрагональность) решетки мартенсита и она снова становится кубической, остаточный аустенит переходит в мартенсит кубический, то при среднем и высоком отпуске происходит распад мартенсита на смесь Ф+Ц.

После низкого отпуска твердость и прочность остаются на высоком уровне (HRC 58-63). Режущий и измерительный инструмент, детали после химико-термической обработки (цементации) подвергают низкому отпуску.

1. Определение наилучшей температуры закалки для стали с содержанием 0,4% углерода — доэвтектоидная сталь — и с содержанием 1,0% углерода — заэвтектоидная сталь.

Т а б л и ц а 10

Протокол испытаний на твердость после закалки с разных температур в воде

НВ после отжига		НВ после закалки, 0,4%С			НВ после закалки, 1,0%С		
0,4%С	1,0%С	t=760°C	T=840°C	T=1000°C	T=760°C	T=840°C	T=1000°C



Рис. 18. График зависимости твердости стали от температуры закалки

2. Определение наилучшей скорости охлаждения стали с содержанием углерода 0,4%.

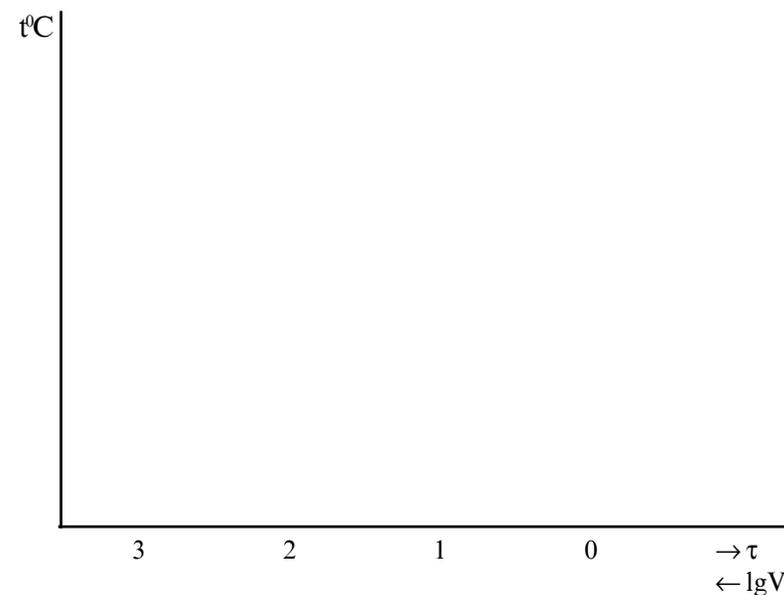


Рис. 19. Термокинетическая диаграмма

0,4%С			
х	х	х	х
отжиг	закалка 760 ⁰ С	закалка 840 ⁰ С	закалка 1000 ⁰ С
		1,0%С	
х	х	х	х
отжиг	закалка 760 ⁰ С	закалка 840 ⁰ С	закалка 1000 ⁰ С

Рис. 20. Схемы микроструктур сталей до и после закалки с разных температур. Описание структур

$$\begin{aligned}
 V_{\text{печь}} &= 1^{\circ}\text{C}/\text{с}; & \lg 1 &= 0; \\
 V_{\text{воздух}} &= 15^{\circ}\text{C}/\text{с}; & \lg 15 &= 1,2; \\
 V_{\text{масло}} &= 150^{\circ}\text{C}/\text{с}; & \lg 150 &= 2,2; \\
 V_{\text{вода}} &= 600^{\circ}\text{C}/\text{с}; & \lg 600 &= 2,8; \\
 V_{\text{солен..вода}} &= 1000^{\circ}\text{C}; & \lg 1000 &= 3.
 \end{aligned}$$

Таблица 11

Протокол испытаний твердости после охлаждения в различных средах. Схема микроструктур

Печь	Воздух	Масло	Вода	Соленая вода
х	х	х	х	х
НВ=	НВ=	НВ=	НВ=	НВ=

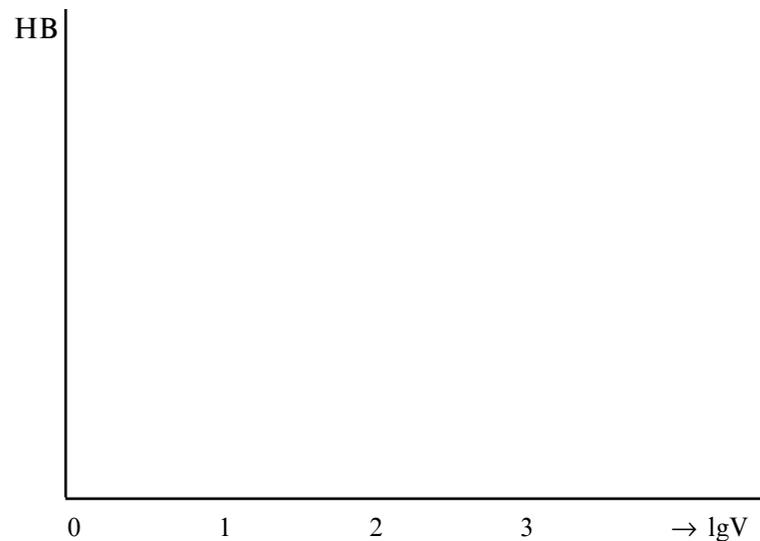


Рис. 21. График зависимости твердости от скорости охлаждения

3. Определение структуры и твердости стали с содержанием углерода 0,4% при отпуске, после закалки в воде с температуры 840⁰С.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование микроструктуры чугуна и цветных металлов и сплавов

Изучение микроструктуры чугуна

В белых чугунах весь углерод связан в цементите, излом имеет белый цвет. Вследствие хрупкости белый чугун практически не используют; его переделывают в сталь или отжигают на ковкий чугун. При разложении цементита ($Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$) получают феррит и графит. Такой чугун называют серым (в изломе серый цвет).

Некарбидообразующие элементы Si, Al, Ni способствуют графитизации, карбидообразующие Mn, Cr, W, V — наоборот, тормозят ее. Поэтому можно получить чугун с разной степенью разложения цементита. Если в структуре феррит и графит (весь цементит разложился), чугун называют серым на ферритной основе. Если же часть цементита осталась (в перлите), то чугун может быть серым с ферритоперлитной или перлитной основой. В половинчатых чугунах часть углерода — в виде графита, а структура металлической основы зависит от количества связанного углерода. Если связанного углерода чуть больше эвтектоидной концентрации (1%), то в основе будет ледебурит и перлит.

Свойства серых чугунов зависят не только от основы, но и от формы графита. Пластинчатая грубая форма неблагоприятна: развивается хрупкость. Путем введения модификаторов (ферросилиций, алюминий, силико-кальций, магний) добиваются размельчения и равномерного распределения графитных включений.

Двойным модифицированием (магнием и ферросилицием) получают шаровидную форму графита и увеличивают прочность. Такой чугун называют высокопрочным.

Путем отжига белого доэвтектического чугуна можно получить серый чугун с хлопьевидной формой графита на ферритной, ферритоперлитной или перлитной основе. Такие чу-

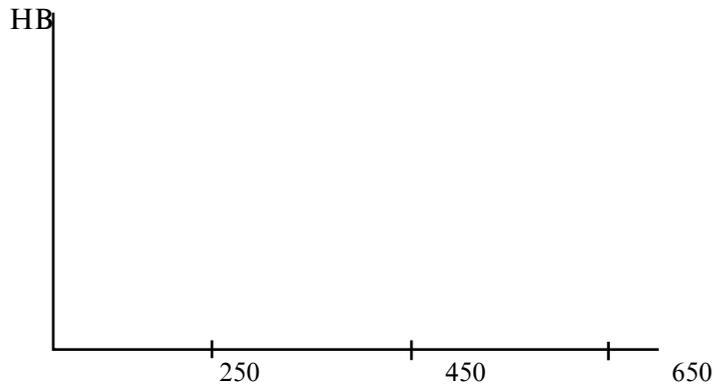


Рис. 22. График зависимости твердости от температуры отпуска стали

Таблица 12

Схемы структур и твердость

t°С отпуска	250°С	450°С	650°С
НВ			
Увеличение	x	x	x
Схемы структур			
Описание структур			

Выводы:

Дата	
Подпись студента	
Подпись преподавателя	

гуну называют ковкими, так как у них ^большая пластичность. Однако они, конечно, не куются, так как ударная вязкость и пластичность чугуна низкие.

При ускоренном охлаждении массивных отливок из чугуна можно получить на поверхности белый чугун, где графитизация не успела пройти, далее — половинчатый, а в середине — серый. Отбел применяется при производстве валков прокатных станов, колес вагонов узкой колеи и др.

Структурные диаграммы позволяют предопределить структуру (а значит, свойства) чугуна в зависимости от скорости охлаждения (толщины стенки отливок) и содержания углерода и кремния-графитизатора. Для тонкостенных отливок применяют чугун с повышенным содержанием кремния и углерода, чтобы ускорить графитизацию и повысить пластичность.

Изучение микроструктуры цветных сплавов. Медные сплавы

Медь обладает высокой пластичностью, тепло- и электропроводимостью. Плотность меди $9,8 \text{ г/см}^3$, больше, чем у железа. Различают две группы медных сплавов — латуни и бронзы. Латуни — сплавы меди с цинком, могут быть одно- и двухфазные. Однофазные латуни пластичны, хорошо прокатываются даже в холодном состоянии. Для снижения наклепа проводят рекристаллизационный отжиг при 600°C . Двухфазные латуни деформируются лишь при нагреве выше 500°C , так как содержат в структуре, кроме пластичного твердого раствора цинка в меди (α -фаза), вторую фазу β — хрупкую и твердую, представляющую собой твердый раствор цинка в электронном соединении CuZn .

Латуни с содержанием цинка больше 45% не применяют, так как у них сильно снижаются и пластичность и прочность.

Кроме простых, бывают сложные латуни. Добавки Al, Ni, Mn повышают прочность, коррозиестойчивость, Pb улучшает антифрикционные свойства. Bi и Sb — вредные примеси, приводящие к краснотекучести латуней.

Однофазные латуни под микроскопом после прокатки и отжига видны как кристаллиты с двойниками разного цвета,

что объясняется оптической аннизотропностью, а двухфазные наблюдаются после травления, как темные поля сложной β -фазы и светлые зерна α - фазы. Поскольку интервал кристаллизации у латуней сравнительно мал, степень ликвации примесей также невелика, и дендритной структуры не наблюдается.

Если у меди прочность ($\sigma_{\text{в}}$) 250 МПа, то у простых латуней она доходит до 350 (однофазные) и 450 (двухфазные), а у сложных — до 550 МПа.

Вторая группа медных сплавов — бронзы, гораздо разнообразнее, так как к ним относятся сплавы меди с различными элементами (Al, Sn, Si, Be, Pb). Например, широко применяют оловянные бронзы, которые могут быть одно- и двухфазными. Путем наклепа пластичной однофазной оловянной бронзы (до 8% Sn) можно получить $\sigma_{\text{в}} > 400$ МПа. Двухфазные бронзы из-за твердой хрупкой составляющей — эвтектоида ($\alpha + \beta$) применяются лишь в отливках, а их структура под микроскопом выглядит как дендриты α -фазы — твердого раствора Sn в Cu (темные) и междендритные пространства, обогащенные оловом, вследствие ликвации (светлые). Большая степень ликвации из-за большого интервала кристаллизации — явление вредное, так как делает сплав хрупким. Более низкая температура плавления, затвердевания, при постоянной температуре образования эвтектики способствуют улучшению литейных свойств двухфазных латуней и бронз. У них лучшая жидкотекучесть — способность заполнять форму, поэтому из них делают сложные отливки.

Оловянные и свинцовые бронзы обладают антифрикционными свойствами и применяются в подшипниках, втулках, шестернях.

Баббиты

Подшипниковые сплавы должны иметь низкий коэффициент трения (в паре со сталью), повышенную износоустойчивость, прирабатываемость, способность противостоять статическим и динамическим нагрузкам. Поэтому структура таких

сплавов должна быть двухфазной: мягкая основа, состоящая из твердого раствора примесей в меди, олове, свинце, и вторая, твердая фаза — химические соединения.

Лучшим является баббит оловянистый марки Б83; его структура состоит из основы — твердого раствора (α) сурьмы и меди в олове (темный фон). Это мягкая составляющая, в которую при нагрузке вдавливаются твердые включения второй фазы (β) — химических соединений SnSb и Cu_3Sn (белые иглы и звезды). Баббит хорошо прирабатывается и не задирает шейку вала.

Более дешевым является баббит с меньшим содержанием олова (БС, Б16) или вообще без олова (БК). Основой баббита БС является эвтектика Pb+Sb, а твердыми составляющими — химические соединения. Баббиты не выдерживают больших удельных давлений и высоких температур (до 120°C). В грузовых вагонах применяют баббит БК (кальциевый), структура которого содержит твердый раствор натрия в свинце, а твердыми включениями служат химические соединения (Pb_3Ca).

Применяется также цинковый сплав ЦАМ9-1,5 с температурой плавления около 400°C, удовлетворительный по коэффициенту трения, прочности и твердости, но сравнительно хрупкий. Б83 применяют в подшипниках двигателей тепловоза, Б16 — в двигателе автомобиля, БК — в грузовых вагонах, ЦАМ — в подвижном составе, путевых и строительных машинах.

Алюминиевые сплавы

Алюминий распространен в земной коре больше, чем железо и другие металлы. Плотность низкая — 2,7 г/см³, прочность $\sigma_v = 60$ МПа, коррозиестоек в атмосфере, имеет высокую электропроводимость и ковкость.

Сплавы на основе алюминия — деформируемые, без термической обработки, содержат магний или марганец; с термической обработкой — медь, цинк и другие элементы.

Микроструктура дуралюмина после отжига: светлые зерна твердого α -раствора меди в алюминии и включения химичес-

кого соединения $CuAl_2$ (крупные черные). После закалки — только зерна, после закалки и старения — включения $CuAl_2$, а также светлые включения других нерастворившихся дисперсных фаз — химических соединений (Mg_2Si).

Термообработка резко повышает прочность сплавов типа В95 до $\sigma_v = 600$ МПа и более (после нагартовки — наклепа).

Литейные сплавы — с кремнием (10–13% Si, чтобы получить эвтектику), обладают хорошей жидкотекучестью, тепло- и жаростойкостью, теплопрочностью.

Микроструктура силумина, модифицированного натрием (0,1% Na) для придания кристаллам дисперсности, что повышает механические свойства, состоит из эвтектики (α — твердый раствор плюс Si) и мелких белых кристаллов твердого α — раствора кремния в алюминии. Спеченные сплавы — порошки Al и глинозема Al_2O_3 после прессования и спекания (САП) имеют высокую жаростойкость и жаропрочность.

Маркировка чистого алюминия от А999 до АО, в зависимости от примесей; деформируемых сплавов с магнием — АМг1 — АМг6, с марганцем — АМц, АМцС, с медью — Д1-Д18, с цинком и медью — В95-В65, литейных с кремнием, медью — чушковый АК4М4, в отливках АЛ2 — АЛ9.

Исследование микроструктуры чугунов, цветных металлов и сплавов

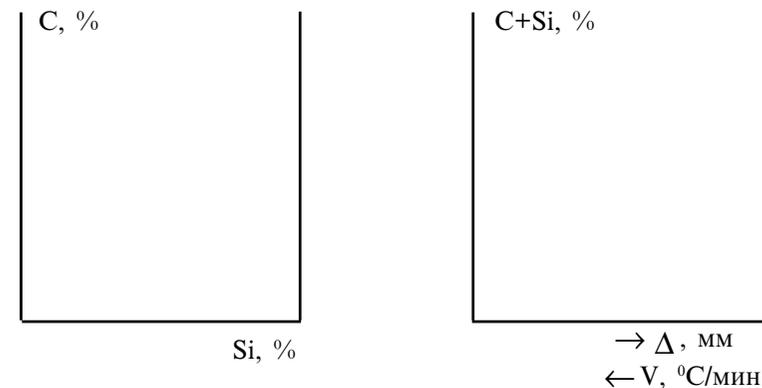


Рис. 23. Структурные диаграммы чугунов

1. Микроструктура чугунов

а) белый чугун

Доэвтектический Эвтектический Заэвтектический

х	х	х

б) серый чугун

С ферритовой основой С феррито-перлитовой основой С перлитовой основой

х	х	х

Область, занимаемая чугуном на структурной диаграмме, маркировка по ГОСТу, механические свойства. Применение. Описание структуры.

в) ковкий чугун

не травлено	травлено
х	х

г) высокопрочный чугун

не травлено	травлено
х	х

Описание структуры, маркировка по ГОСТу и механические свойства. Применение.

2. Медные сплавы

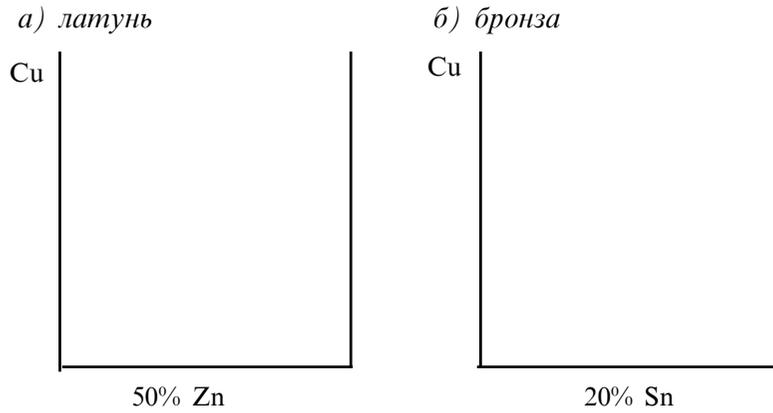


Рис. 24. Диаграммы состояний Cu-Zn (а) и Cu-Sn (б)

Медь	Латунь	Бронза
x	x	x

Описание структур, маркировка по ГОСТу и свойства.
Применение.

3. Алюминиевые сплавы

а) литейные (силумины) б) деформируемые (дуралюмины)

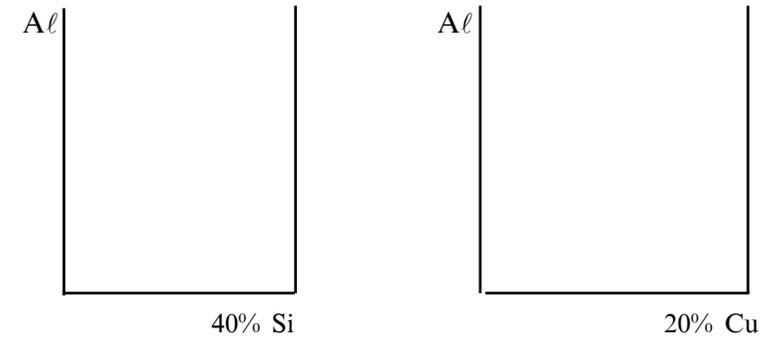


Рис. 25. Диаграммы состояний Al-Si (а) и Al-Cu (б)

а) силумин (12% Si)

Без натрия	С натрием
x	x

б) дуралюмин (4% Cu)

Отжиг	Закалка	Старение
х	х	х

Описание структур, маркировка по ГОСТу и свойства.
Применение.

Выводы:

4. Баббиты

Оловянные	Кальциевые	Свинцовые
х	х	х

Описание структур, маркировка по ГОСТу и свойства.
Применение.

Дата	
Подпись студента	
Подпись преподавателя	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование влияния состава пластмасс на их физико-механические свойства. Изготовление деталей из пластмасс горячим прессованием. Определение их твердости

Для переработки полимерных материалов применяют разные способы: горячее прессование, выдавливание (экструзия), литье под давлением, вакуумформование и др.

Метод горячего прессования чаще используют для переработки терморезистивных материалов, которые бывают пластичными только во время прессования, а затем затвердевают в горячем состоянии. Поэтому не нужно ждать, пока прессформа остынет, как при переработке термопластичного материала.

Наиболее распространены пресс-материалы на основе терморезистивной фенолформальдегидной смолы с наполнителем в виде порошка, волокон или слоев из различных материалов.

Полимер до прессования находится в стадии резолы (размягчается при нагреве), а во время прессования становится резитом, благодаря необратимой реакции образования межмолекулярных связей. Получается полимер с пространственной структурой и высокой твердостью, прочностью; он не размягчается при повторном нагреве.

В процессе отверждения поликонденсационных смол выделяются пары воды и летучих веществ, что разрушает материал. Поэтому удельное давление должно быть высоким (15–80 МПа). Температура прессования должна быть оптимальной (140–200°C). Более высокая температура приводит к слишком быстрому отверждению полимера, и он теряет пластичность еще до заполнения формы.

Выдержка при прессовании зависит от температуры, давления, конструкции детали и прессформы, скорости реакции полконденсации. Выдержка должна быть от 0,5 мин для пластмасс без наполнителя и до 2 мин на 1 мм толщины изделия для наполненных пластмасс. Волокнистые наполнители требуют большей выдержки (до 5 мин).

Горячее прессование термопластичных полимеров также возможно, причем их способность повторно размягчаться при нагреве определяет возможность переработки отходов (пластолома). Температура прессования должна превышать температуру перехода в текучее состояние для данного полимера (140–360°C), но не быть слишком высокой, чтобы не вызвать разложения (термодеструкции).

Давление прессования у термопластов ниже и составляет 3–15 МПа. Выдержка термопласта под давлением должна длиться до температуры стеклования данного полимера. Поэтому производительность прессования термопластов ниже, чем реактопластов.

Таким образом, для горячего прессования необходимо:

1. Выбрать прессматериал, пригодный по физико-механическим свойствам для изготовления данной детали.
2. Нагреть прессформу до необходимой температуры.
3. Взвесить необходимое количество прессматериала.
4. Засыпать взвешенный прессматериал в прессформу и собрать ее.
5. Установить прессформу на гидропресс и прессовать, определяя давление по манометру согласно формуле

$$P_{уд} = \frac{S_1}{S_2}$$

где $P_{уд}$ — удельное давление; S_1 — площадь проекции прессуемой детали, см²;

S_2 — площадь поршня силового цилиндра гидропресса, см².

Режим прессования выбирается по табл. 13.

Определение твердости пластмасс

Твердость пластмасс определяется вдавливанием стального шарика диаметром 5 мм в испытуемый образец, по глубине погружения шарика, мм.

Особенности пластмасс по сравнению с металлами — ползучесть, т.е. развитие пластической деформации под нагрузкой в течение определенного времени, а также высокоэласти-

Таблица 13

Состав прессматериалов и режим прессования

Группа материалов	Название материала	Наполнитель	Связующее вещество	Режим прессования		
				Удельное давление, МПа	Температура, °С	Выдержка, мин/мм
1	2	3	4	5	6	7
Пресспо- рошки	Карболит (черный) К-18-2	Древесная мука, сажа	Фенолформальдегидная смола	25-35	145-155	0,8-1,0
	Карболит (коричневый), К-21-22	Древесная мука	То же и крезольноформальдегидная (резольная)	15-35	145-155	1,0
	Аминопласт А	Сульфатная целлюлоза	Мочевинноформальдегидная (резольная) смола	25-35	135-145	1,0

ческая деформация, сильно зависящая от температуры испытания.

Поэтому нагружение должно быть постепенным и плавным в течение 30 с, затем оставаться постоянным в течение 60 с, что может обеспечить специальный твердомер ТШСП-500.

1. Изготовление деталей из пластмасс горячим прессованием. Определение твердости деталей.

Рис. 26. Эскизы пресс-формы (в сборе) и детали

Таблица 14

Состав композиции

Наименование компонента	Назначение компонента

Таблица 15

Режим прессования, протокол испытаний

Показатель	Значение	Показатель	Значение
t^0 прессования		Выдержка на 1 мм толщины детали, мин	
Удельное давление, МПа		Толщина детали, мм	
Площадь детали, см ²		Общее время выдержки, мин	
Общее давление, МПа		Твердость НВ, МПа	

2. Испытание полимерных защитных покрытий:

а) испытание на коррозиестойкость

Химический состав покрытия: а) марка _____

б) марка _____

Произвести испытание покрытий на коррозиестойкость в растворе хлористого натрия, занести данные в таблицу.

Таблица 16

Протокол испытаний покрытий на коррозию

Состояние покрытий	Марка а)	Марка б)
Изменение декоративных свойств: Глянец		
Цвет		
Разрушения: Растрескивание		
Сыпь		
Пузыри		
Коррозия под пленкой		
Отслаивание		

б) испытание на твердость

Определить твердость покрытий на маятниковом приборе М-3.



Время затухания колебаний на покрытии
 $t = \dots\dots\dots$ с.

Время затухания колебаний на стекле
 $t_1 = \dots\dots\dots$ с.

Твердость покрытия (колебания от 5 до 2⁰):

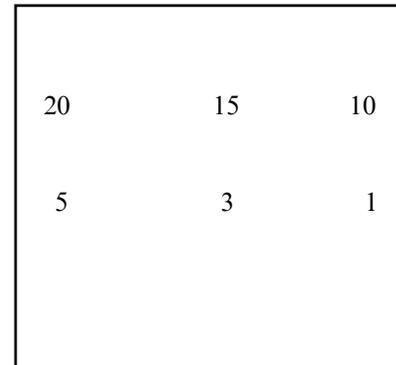
а) $X = t/t_1 = \dots\dots$;

б) $X = t/t_1 = \dots\dots$

Рис. 27. Схема прибора М-3

в) испытание на прочность (пластичность)

Определить прочность покрытий при изгибе (пластичность) на шкале пластичности.



Прочность покрытий при изгибе (пластичность):

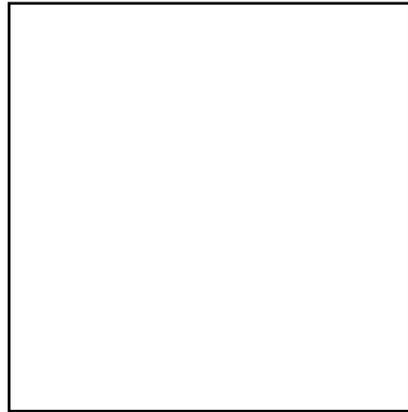
а) _____

б) _____

Рис. 28. Шкала пластичности

2) испытание на удар

Определить сопротивление покрытий удару на приборе У-1.



Сопротивление покрытий удару:

а) $h = \dots \text{ см};$

б) $h = \dots \text{ см};$

Рис. 29. Схема прибора У-1

Выводы:

Дата	
Подпись студента	
Подпись преподавателя	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Повышение конструкционной прочности стали

Работа носит заключительный, итоговый характер, может быть использована, как форма промежуточного, рубежного контроля успеваемости студентов с последующим зачетом по лабораторным работам. Работа выполняется с использованием справочных данных, приведенных в приложениях, в учебниках, учебных пособиях и справочниках, альбомах и плакатах, а также результатов испытаний, полученных при выполнении предыдущих лабораторных работ.

Каждый студент выполняет индивидуальное задание. Кроме стандартных испытаний лабораторных образцов для определения твердости (НВ), прочности (σ_b , σ_T), пластичности (β , α), ударной вязкости (КСУ) существуют критерии работоспособности материала, детали, конструкции в целом, определяющие их поведение в конкретных условиях эксплуатации.

Конструкционная прочность — комплексное понятие, сочетающее прочность, надежность и долговечность, она может быть существенно увеличена путем термической обработки.

Долговечность — это период, во время которого сохраняется работоспособность материала. Зависит долговечность от условий эксплуатации и определяется специальными испытаниями на усталость, ползучесть, изнашивание, коррозию или их комбинациями.

Механические свойства, определяющие конструкционную прочность, зависят от структуры и состава сплава. Наиболее эффективным методом изменения структуры, а значит и свойств металла, является термическая обработка. Многие детали подвижного состава, машин и механизмов, пути подвергаются термической обработке, как предварительной, так и окончательной (упрочняющей).

Надежность материала в изделии определяют на основе положений механики разрушения. В основе методики определения вязкости разрушения, работы, затрачиваемой на рас-

пространение трещины, и т.д. лежат статические и динамические испытания образцов с трещинами, которые получают в эксплуатации (трещины усталости, надрезы, микропустоты, неметаллические включения).

Сочетание различных видов испытаний позволяет более полно охарактеризовать работоспособность материала в детали и оценить эффективность упрочняющей обработки.

Методы повышения конструкционной прочности стали

Требования по механическим свойствам удовлетворяются химсоставом, термообработкой, качеством стали. Углерод упрочняет, снижая пластичность и вязкость, облегчает развитие трещины. Каждая 0,1% углерода повышает порог хладноломкости на 20–30°C.

В конструкционных сталях сера снижает работу зарождения трещины, а фосфор, кроме того, повышает порог хладноломкости на 25°C (на каждую 0,01% P).

Легирование повышает прокаливаемость, снижая критическую скорость закалки, а значит и напряжения, делает сталь мелкозернистой, повышая вязкость.

Усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость зависят от состояния поверхности детали, поэтому часто решающими являются поверхностное упрочнение химико-термической обработкой (цементация, азотирование), или поверхностной пластической деформацией (накатка, обдувка дробью). Повышение твердости и создание остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, (обратных по знаку вредным растягивающим), затрудняют появление и развитие трещин усталости.

Удаление неметаллических и вредных примесей (S, P, O, N, N) достигается обработкой жидкого металла в вакууме и под шлаком. Применяют вакуумно-дуговой (ВДП), электронно-лучевой (ЭЛП), электрошлаковый (ЭШП) переплавы, вакуумно-индукционную плавку (ВИ), рафинирование стали синтетическим шлаком. В вакууме металл лучше очищается от газов (O, N, H), а обработка шлаком удаляет серу.

Повышение металлургического качества дает большую пластичность и вязкость, значит можно повысить прочность и надежность за счет увеличения содержания углерода. Таким путем можно уменьшить сечение несущих элементов, снизить массу конструкции, экономить металл.

Способ плавки	Остаток удаляемых элементов, %			
	S	O	N	H
Электродуговая	0,01-0,02	0,004-0,006	0,007-0,015	0,0004
ЭШП	0,02-0,008	0,003-0,004	0,007-0,01	0,0002
ВДП	Не изменяется	0,002-0,003	0,004-0,006	0,0002
ЭЛП	0,01-0,015	0,0015-0,0025	0,004-0,005	0,0002
ВИ	Не изменяется	0,0015-0,0025	0,004-0,006	0,0002

Содержание фосфора при переплавах не изменяется (0,01–0,02%).

Определение механических свойств металлов

Механические свойства металла характеризуют его поведение под нагрузкой и зависят от вида напряженного состояния, структуры, вида испытаний, качества металла, его обработки и других факторов. Поэтому металл, используемый для тяжело нагруженных и ответственных деталей (оси, рессоры, пружины, рельсы, шестерни, рамы), подвергают нескольким видам испытаний: статическим (напряжение, сжатие, изгиб, кручение), динамическим (ударная вязкость), при переменных нагрузках (усталость), на вязкость разрушения, при низких и повышенных температурах (хладноломкость и ползучесть), а также на твердость при разных температурах. Механические испытания могут быть проведены на лабораторных или натурных образцах и в эксплуатации.

Наиболее распространены испытания на образцах простой формы — на растяжение, когда определяют характеристики прочности (временное сопротивление или предел прочности σ_b , предел текучести σ_T), пластичности (относительное удлинение β , относительное сужение ψ).

При необходимости возможно определение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ и предела упругости $\sigma_{\text{упр}}$, а также модуля упругости E . При растяжении испытание получается «жестким», так как преобладает доля максимальных растягивающих напряжений, определяющих однородное напряженное состояние по сечению образца (гладкого цилиндрического или плоского).

Испытания при сжатии наиболее «мягкие», а при кручении и изгибе — средние по жесткости.

Поэтому испытания на растяжение дают большую информацию о свойствах металла и применяются чаще.

Возможно также испытание механических свойств на образцах сложной формы, чтобы определить поведение металла в более сложном напряженном состоянии. Например, растяжение совместно с изгибом, растяжение образца с надрезом, полых образцов с внутренним гидростатическим давлением, на вязкость разрушения, на усталость под влиянием коррозии и др.

Еще более «жестким» испытанием является удар, когда при большой скорости деформирования возможно обнаружить хрупкость, которая не проявляется при растяжении. Поэтому ударную вязкость определяют, когда деталь работает при ударных нагрузках в эксплуатации (КСУ).

Более полную характеристику вязкости получают при испытании на вязкость разрушения, для этого образец с трещиной растягивают, определяя по диаграмме разрушения величину коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины (K_{Ic} в МПа·м^{1/2}) или силу, необходимую для продвижения трещины на единицу длины (G_{Ic} в Н·м) — вязкость разрушения.

При низких температурах металлы ведут себя иначе, проявляя хрупкость, поэтому образцы сначала охлаждают, вплоть до температуры — 269°С, а затем испытывают обычными способами.

При повышенных температурах, (выше 300°С для сталей), появляется ползучесть, то есть медленная пластическая дефор-

мация под нагрузкой. Чем выше температура и длительнее выдержка, тем значительнее снижение прочности. Образец нагревают до заданной температуры, выдерживают 60 мин и нагружают сначала на 10% от заданной нагрузки, а затем плавно, до предела, измеряя при этом удлинение образца. Условный предел ползучести определяется на четырех образцах для большей достоверности.

Длительную прочность определяют под действием длительно приложенной нагрузки при разных схемах нагружения (растяжение, изгиб, кручение) и при постоянной температуре (изотермический метод).

Бывает необходимо измерять твердость при высоких температурах, при этом чтобы исключить влияние окисления поверхности, измерение вдавливанием алмазной пирамиды проводят в вакууме и в инертных газах.

Многие детали подвижного состава и пути работают при переменных нагрузках и разрушаются при гораздо меньших напряжениях, чем предел прочности. Поэтому проводят испытания при переменных нагрузках на усталость, определяя предел выносливости. Предел выносливости сильно зависит от состояния поверхности: риски, надрезы снижают σ_{-1} . Упрочняя поверхность наклепом (обкатка осей, дробеметная обработка рессор и пружин), можно повысить σ_{-1} , увеличить надежность и долговечность изделий. Найдена связь σ_{-1} с относительным сужением, так как пластичность способствует релаксации напряжений в вершине трещины усталости: $\sigma_{-1} \equiv \sigma_b \psi$.

Определение износостойкости металлов

Изнашивание происходит путем упругого и пластического среза внедрившимся материалом, или путем схватывания и разрушения пленок, или путем глубинного выкрашивания.

Износ зависит от свойств материала и условий трения на рабочей поверхности (смазка, давление, температура, скорость скольжения и пр.). Определяют износостойкость взвешиванием образцов до и после испытания, при трении на

специальных машинах, а также измерением величины износа при вырезании лунки индентором и др.

Выбор способа термической обработки

В случае механической обработки (вал, шестерня) назначают предварительную термообработку для получения лучшей обрабатываемости резанием. Это отжиг (реже нормализация), который бывает полным, неполным (для заэвтектидной стали), рекристаллизационным (после холодной деформации), диффузионным (если велика ликвация). Окончательная (упрочняющая) термообработка бывает различной, но, как правило, это закалка с отпуском (реже нормализация с отпуском).

При этом можно применять поверхностную закалку (если в стали углерода больше 0,4%), химико-термическую обработку, т.е. насыщение поверхности углеродом (с последующей закалкой и отпуском) — цементацию, нитроцементацию, азотирование и др. Технология закалки бывает различной: в одном и двух охладителях, с подстуживанием, ступенчатой, изотермической. Выбор технологии закалки диктуется маркой стали, конфигурацией детали, ее массой, условиями работы и т.д. Отпуск (низкий, средний или высокий) назначается в зависимости от требований к детали и состава стали.

Температуры критических точек с учетом теплового гистерезиса приведены в прил. 1.

Номера ГОСТов, где имеются сведения о применяемых на железнодорожном транспорте сталях, чугунах и цветных сплавах, а также об упрочняющей обработке, приведены в прил. 2.

Поскольку необходимо учитывать технико-экономическую эффективность при решении задачи повышения конструкционной прочности, в прил. 3 приведены относительная стоимость и содержание металлов в земной коре, определяющие их дефицитность.

Примеры индивидуальных заданий

Исследование влияния термической обработки и микроструктуры стали на конструкционную прочность (наименование детали, узла, машины).

Желательно выбирать детали подвижного состава, строительных и путевых машин, различных узлов и машин, применяемых при строительстве и эксплуатации железных дорог. Например, шестерни и зубчатые колеса тяговых передач тепловозов, электровозов, дрезин, шпиндели станков, болты клеммовых соединений, крышки цилиндров, дисковые пилы, кондукторные втулки, накладки направляющих станков, буксы, рельсы, колеса, пружины, рессоры и т.д.

Студент выполняет задание следующим образом:

1. Выясняет, в каких условиях работает заданная деталь, каким нагрузкам подвергается, по каким причинам выходит из строя, выполняет эскизы детали и узла.

2. Выбирает марку стали по ГОСТу или ТУ, или обосновывает выбор, сделанный ранее, приводит влияние углерода и легирующих элементов на структуру и свойства, приводит критические точки, расположение кривых изотермического превращения аустенита и критическую скорость закалки.

3. Разбирает технологические особенности этой стали, а также экономические соображения (стоимость, дефицитность легирующих элементов).

4. Разрабатывает режим и технологию термической обработки: предварительной и окончательной (упрочняющей). Это делается на основе литературных (справочных) данных с обоснованием температур и скоростей нагрева и охлаждения, выдержки, охлаждающей среды и изображением графика термической обработки.

5. Описывает структурные превращения в стали по этапам термической обработки, рисует соответствующие структуры, пользуясь альбомами, учебниками, плакатами.

6. Описывает (кратко) необходимое оборудование и приборы для проведения термической обработки изделий и контроля ее эффективности, а также приводит основные правила техники безопасности.

Индивидуальные задания

Исследование влияния термической обработки и микроструктуры стали на конструкционную прочность

.....
(наименование детали, узла, машины).

Для студентов специальности В

1. Рессорный лист эллиптической рессоры грузового вагона.
2. Цилиндрическая винтовая пружина центрального подвешивания тележки пассажирского вагона.
3. Корпус автосцепки.
4. Корпус поглощающего аппарата автосцепного устройства.
5. Цельнокатаное колесо пассажирского вагона.
6. Цельнокатаное колесо грузового вагона.
7. Ролик подшипника качения буксового узла пассажирского вагона.
8. Колесо подшипника качения буксового узла грузового вагона.
9. Планка вертикального скользуна надрессорной балки тележки пассажирского вагона.
10. Надрессорная балка тележки грузового вагона.
11. Сверло винтовое.
12. Фреза дисковая отрезная.

Для студентов специальности Т

13. Коленчатый вал.
14. Гильза цилиндра.
15. Коническая шестерня вертикальной передачи.
16. Поршень из алюминиевого сплава.
17. Поршневой палец.
18. Шатун.
19. Болт шатуна.
20. Кулачковый распределительный вал.
21. Клапан.

22. Пружина клапана.
23. Игла распылителя форсунки.
24. Корпус распылителя форсунки.

Для студентов специальности СМ

25. Гильза цилиндра двигателя автомобиля.
26. Полуось.
27. Шатун.
28. Коленчатый вал.
29. Крестовина кардана.
30. Шестерня коробки передач.
31. Пружина подвески.
32. Вал коробки передач.
33. Клапан.
34. Червяк рулевого механизма.
35. Зуб ковша экскаватора.
36. Рессорный лист.

Отчет и выводы

Дата	
Подпись студента	
Подпись преподавателя	

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Температуры критических точек качественной
конструкционной углеродистой стали различных марок**

Марка стали	Температура, °С			Марка Стали	Температура, °С		
	A_{C_1}	A_{C_3}	A_{r_3}		A_{C_1}	A_{C_3}	A_{r_3}
08	727	870	820	65	727	750	600
10	727	860	810	70	727	745	695
15	727	850	800	75	727	735	685
20	727	840	790	15Г	721	840	790
25	727	830	780	20Г	721	830	780
30	727	820	770	30Г	721	810	760
35	727	805	775	40Г	721	785	735
40	727	790	740	45Г	721	770	720
45	727	775	725	50Г	721	760	710
50	727	765	715	60Г	721	750	700
55	727	760	710	65Г	721	745	695
60	727	755	705	70Г	721	740	690

Примечание. Температуры критических точек A_{r_3} даны для охлаждения на воздухе с температуры нагрева.

**Температуры критических точек наиболее распространенных
легированных сталей**

Марка стали	Температура, °С			Марка стали	Температура, °С		
	A_{C_1}	A_{C_3}	A_{r_3}		A_{C_1}	A_{C_3}	A_{r_3}
1	2	3	4	5	6	7	8
35Г2	718	790	740	45ХН	725	775	725
40Г2	718	780	730	38ХЮ	770	880	830
45Г2	718	765	715	38ХС	765	820	770
30Х	735	810	760	16ХСМ	735	840	790
35Х	735	800	750	20ХФ	740	820	770
38ХА	735	790	740	40ХФА	740	790	740
40Х	735	780	730	38ХНВА	720	790	740
45Х	735	765	715	33ХНЗВА	720	790	740
50Х	735	755	705	30ХНЗА	710	780	730
30ХГС	755	850	800	30ХГНА	725	790	740
35ХГС	755	840	790	55С2	760	820	740
40ХН	725	780	730	50СГ	755	800	740

ГОСТы и ТУ на стали и сплавы

Наименование металла	Марка	ГОСТ, ТУ
1	2	3
Сталь низколегированная	09Г2Д	19281-89
	09Г2СД	19282-89
Сталь низколегированная	10Г2БД	19281-89
	15ХСНД	19282-89
	10ХНДП	
Сталь углеродистая обыкновенного качества	ВСт3	
	ВСт5	380-88
Сталь тонколистовая малоуглеродистая качественная	08Ю	9045-80
Сталь углеродистая качественная конструкционная	08, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	1050-88
Сталь углеродистая конструкционная для мостостроения	16Д	6713-75
Сталь коррозионно- стойкая (нержавеющая)	12Х13, 12Х18Н10Т	5632-90
Сталь тонколистовая коррозионностойкая	12Х18Н10Т 08Х22Н6Т	7350-77
Сталь рессорно-пружинная	55С2	14959-79
	52С2А	
	60С2	
	60С2А 60С2ХФА	
Отливки из конструкционной нелегированной и легированной стали	20Л, 20ГЛ, 20ФЛ, 20ГФЛ	977-88
Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая	ВСт3сп5, 12Х18Н10Т, 20К	380-88 10885-75
	10Х17Н13М2Т	

Продолжение прил. 2

1	2	3
Сталь для литых деталей аппаратов поглощающих	30ГСЛ-5 32Х06Л-У	22253-76
Детали литые 1 гр. Для автосцепного устройства подвижного состава	20ГЛ-Б 20ГФЛ	22703-91
Литые боковые рамы и наддресорные балки двухосных тележек грузовых вагонов	20Л 20ГФЛ	24.153.80-78 977-88 22703-91
Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов	АМг-6 АМг-5 и др.	8817-75
То же	1915Т 1935Т	ТУ-1-9-346-77
Листы из алюминия и алюминиевых сплавов	АМг-6 АМг-5 и др.	21631-76
Отливки из серого чугуна	СЧ 10 СЧ 15 СЧ 18 СЧ 20	1412-85
Чугун передельный		805-80
Отливки из ковкого чугуна	КЧ45-7	1215-86
Отливки из высокопрочного чугуна	ВЧ80	7293-85
Сталь прокатная широкополосная		82-70
Сталь инструментальная углеродистая	У7, У13	1435-86
Сталь инструментальная легированная	6ХВГ, Х, ХВ4, 9ХС	5950-86
Сталь быстрорежущая инструментальная	Р12, Р6М5, Р18К5Ф2	19265-86
Медь	М00, ...М3	859-78
Латуни литейные	ЛЦ40С	17711-80
Латуни, обрабатываемые давлением	Л96, ЛС59-1	15527-70
Бронзы литейные оловянные	БрО10С10, БрО5Ц5С5	613-76
Бронзы, обрабатываемые давлением	БрОФ7-0,2	5017-74

Продолжение прил. 2

1	2	3
Алюминиевые деформируемые сплавы	АДОО, Амц АМг3, Мг6	4784-74
Алюминиевые литейные сплавы	АЛ4, АЛ19	2685-75
Сталь жаропрочная	25Х1МФ, 45Х14Н14В2М, 40Х10С2М	5632-90
Сталь легированная конструкционная	15Х, 40Х, 30ХГСА, 20ХН3А	4543-88
Сталь подшипниковая легированная	ШХ15, ШХ20СГ, ШХ4	801-87
Крестовины железнодорожные	110Г13Л	7370-76
Твердые сплавы спеченные	ВК6, Т15К4, ТТК12	3882-86
Колодки тормозные, чугунные, для мотор-вагонного подвижного состава	Ф, Р	28186-89
Бандажи из углеродистой стали для подвижного состава	1,2	398-81
Титановые сплавы деформируемые	ВТ5, ОТ4	19807-74
Титановые сплавы литейные	ВТ31Л, ВТ21Л	19807-74
Провода неизолированные для электроснабжения железных дорог	ПБСМ, ПБСМ2	4775-75
Баббиты кальциевые в чушках	БК2	1209-78
Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки	Э42...Э60	9466-75
Прутки для наплавки		21449-75
Бандажи для локомотивов		3225-80
Оси локомотивные		3281-81
Оси вагонов магистральных железных дорог		4008-79
Колеса цельнокатаные		10791-81

Окончание прил. 2

1	2	3
Рельсы типа Р75		16210-77
Упрочнение химико-термической обработкой		19905-74
Обработка поверхностным пластическим деформированием		20299-74

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Относительная стоимость металлов

Железо Fe	1	Хром Cr	25	Ванадий V	750
Алюминий Al	6	Кобальт Co	35	Рубидий Rb	2200
Медь Cu	7,5	Вольфрам W	75	Палладий Pd	5000
Магний Mg	8	Титан Ti	160	Золото Au	11000
Никель Ni	17	Молибден Mo	170	Иридий Ir	25000
Олово Sn	22	Серебро Ag	290	Платина Pt	27000
				Родий Rt	45000

Содержание металлов в земной коре, %

Железо — 5,1

Алюминий — 8,8

Магний — 2,1

Титан — 1,0

Медь, марганец, хром, ванадий, цирконий, никель — сотые доли процента; цинк, олово, кобальт, ниобий — тысячные доли процента;

остальные — редкие

ЛИТЕРАТУРА

1. Фетисов Г.П. и др. Материаловедение и технология металлов. — М.: Высшая школа, 2000.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990.
3. Жадан В.Т. и др. Материаловедение и технология материалов. — М.: Metallurgia, 1994.
4. Травин О.В. и др. Материаловедение. — М.: Metallurgia, 1989.
5. Кнорозов Б.В. и др. Технология металлов и материаловедение. — М.: Metallurgia, 1987.
6. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник в 3 томах. — М.: Metallurgia, 1983.
7. Зарембо Е.Г. Материаловедение. Превращения в структуре стали и ее свойства. — М.: РГОТУПС, 1995.
8. Минкевич А.Н. Материалы и технология упрочнения деталей тепловозных дизелей. — М.: МГУПС, 1989.
9. Костяев П.С., Захаров Б.В. Промышленные материалы и топливо на железнодорожном транспорте. — М.: Транспорт, 1986.

Канд. техн. наук, доц. Е.Г. Зарембо

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Руководство к выполнению лабораторных
и практических работ

Редактор *Е.А. Ямщикова*
Компьютерная верстка *Н.Ф. Цыганова*

ЛР № 020307 от 28.11.91

Тип. зак.	Изд. зак. 102	Тираж 5000 экз.
Подписано в печать 06.03.03	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 4,25	Уч.-изд. л.	Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Издательский центр РГОТУПСа,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2
Типография РГОТУПСа, 107078, Москва, Басманный пер., 6