

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

Академия Государственной Противопожарной Службы

В.Н. Ильин, С.П. Грабарев, В.Д. Полянин, А.Е. Ефимов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

*Учебное пособие для слушателей и курсантов высших
пожарно-технических образовательных учреждений МЧС России*

*Одобрено редакционно-издательским советом
Академии ГПС МЧС России*

Москва 2008

УДК 539.318(07)

Материаловедение и технология материалов. Учебное пособие / Ильин В.Н., Грабарев С.П., Полянин В.Д., Ефимов А.Е. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 72 с.

Рецензенты: кафедра металловедения и термической обработки металлов Московского Государственного вечернего металлургического института;
кафедра общенаучных дисциплин Академии ГЗ МЧС России.

Пособие разработано в соответствии с рабочей программой курса «Материаловедение и технология материалов» и предназначено для слушателей всех факультетов Академии ГПС МЧС России.

Представлены варианты заданий контрольной расчетно-графической работы и примеры их выполнения.

Рассмотрены вопросы оценки напряженно-деформированного состояния в точках материалов и определения их физико-механических свойств в условиях нормальных температур. Дан анализ закономерностей ползучести, релаксации и длительной прочности материалов в условиях повышенных температур при пожаре.

Учебный материал данного пособия предназначен также для слушателей и курсантов других высших пожарно-технических образовательных учреждений МЧС России и может быть полезен различным категориям работников в области пожарной безопасности, в том числе, преподавателям и адъюнктам.

© Академия Государственной противопожарной службы
МЧС России, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	Общие замечания.....	4
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА КУРСА «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ».....		7
ВЫБОР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ, ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....		13
ЗАДАНИЕ 1	Напряженное и деформированное состояния в точке материала.....	16
ЗАДАНИЕ 2	Основные свойства материалов при нормальных температурах.....	25
ЗАДАНИЕ 3	Механические свойства металлов при повышенных температурах.....	31
ЗАДАНИЕ 4	Механические свойства вязкоупругих материалов.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине "Материаловедение и технология материалов".....	50
ЛИТЕРАТУРА	54
ПРИЛОЖЕНИЕ	55

ВВЕДЕНИЕ. Общие замечания

Материаловедение и технология материалов является наукой о строении, свойствах и технологии создания материалов. Эта область знаний относится к числу основополагающих инженерных дисциплин, поскольку изготовление традиционных и разработка новых материалов, изучение их свойств и способы их обработки являются основой современного производства.

Достаточный уровень знаний в области материаловедения и технологии материалов является важнейшим показателем образованности инженера.

Знание свойств традиционных и вновь создаваемых материалов, особенностей их поведения при обычных температурах, а также при повышенных температурах в условиях пожара, необходимо при проектировании и безопасной эксплуатации различных объектов.

Свойства материалов делятся на физические, химические, механические, технологические и специальные.

К механическим свойствам относятся: *прочность* материала (кратковременная и длительная), *твердость*, *упругость*, *пластичность*, *вязкость*, *ползучесть*, *усталость*, *трещиностойкость*, *жаропрочность* и др.

Знание качественных особенностей и количественных параметров, характеризующих механические свойства материалов в различных условиях, особенно важно для специалистов по пожарной безопасности.

Дисциплина «Материаловедение и технология материалов» преподается на всех факультетах Академии ГПС.

В процессе изучения курса выполняется одна контрольная работа, состоящая из четырех заданий (расчетно-графических работ).

Поскольку многие физические, химические и специальные свойства материалов попутно изучаются в специальных дисциплинах, темы заданий данной контрольной работы посвящены в основном изучению механических свойств материалов в условиях обычных и повышенных температур :

1. Оценка параметров напряженно-деформированного состояния в точках материала при растяжении, сжатии, сдвиге и изгибе.
2. Расчет параметров упругих, пластических и прочностных свойств материалов при растяжении, сжатии и сдвиге по данным эксперимента.
3. Расчет параметров ползучести и длительной прочности металлов при повышенных температурах по данным эксперимента.

4. Расчет параметров ползучести, релаксации и длительной прочности вязкоупругих материалов по данным эксперимента.

Тематика заданий с одной стороны практически не дублирует лекционный материал, что важно для небольшого по объему курса (примерно 60 аудиторных часов), с другой стороны, достаточно подробно охватывает многие важные вопросы механического поведения материалов, в том числе и при пожаре, что особенно актуально при изучении дисциплин специальных кафедр Академии ГПС.

Задания пособия носят явно выраженный расчетный характер, что позволит слушателям и курсантам не только лучше освоить обширные сведения о строении, свойствах и технологии изготовления различных конструкционных материалов, но и самостоятельно проводить количественные оценки параметров основных законов их деформирования и условий разрушения.

Кроме того, данное пособие позволит слушателям и курсантам лучше усвоить темы практических лабораторных работ, являющихся важнейшей составляющей частью любого курса материаловедения.

В данном курсе выполняются четыре лабораторные работы по следующей примерной тематике:

1. Макроскопический и микроскопический анализ материалов.
2. Изучение упругих, пластических и прочностных свойств конструкционных материалов при растяжении, сжатии, сдвиге и изгибе.
3. Изучение характеристик твердости конструкционных материалов по Роквеллу, Виккерсу, Бринеллю, Шору и влияние на них различных режимов термообработки.
4. Изучение методов обнаружения дефектов изделий и конструкционных материалов с помощью приборов неразрушающего контроля.

Цель изучения курса – дать теоретические знания по строению материалов, их свойствам и технологии изготовления, а также выработать практические навыки использования данных материаловедения в технических задачах.

В результате изучения курса слушатель должен **знать:**

- физико-механические свойства сплавов черных и цветных металлов и методы их определения, маркировку сплавов и область их применения;
- закономерности поведения материалов в обычных и особых условиях;
- технологические основы производства материалов и их обработки;

уметь:

- пользоваться технической документацией, содержащей сведения о материалах;

- оценивать возможность и целесообразность использования в технике современных материалов;
- количественно оценивать прочностные и другие физико-механические параметры материалов, используемых в промышленности, в том числе и на пожароопасных объектах;

иметь представление:

- о строении традиционных и современных материалов;
- о напряженно-деформированном состоянии в точках материала;
- о ползучести, релаксации и длительной прочности материалов в условиях нормальных и высоких температур;
- о методах экспериментального изучения свойств материалов и обнаружения дефектов при их изготовлении и эксплуатации.

Качество знаний и полученных навыков проверяется в конце курса на дифференцированном зачете. Примерный перечень вопросов к зачету дан в заключении.

В приложении пособия представлены сведения о физико-механических свойствах и назначении некоторых конструкционных материалов, табл. 1 — 18.

При подготовке к сдаче зачета необходимо самостоятельно выполнить данную контрольную работу, изучить теоретический материал по учебникам и пособиям, указанным в списке литературы в соответствии программой курса.

Особое внимание необходимо обратить на определения и физический смысл изучаемых явлений. Заучивать формулировки наизусть не следует, достаточно понять их смысл, а также уметь изложить суть определения или смысл формулы своими словами.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА КУРСА

«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ»

Раздел I. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Тема 1. Введение. Основные понятия материаловедения

Цели и задачи дисциплины «Материаловедение и технология материалов». Роль науки о материалах в подготовке инженеров пожарной безопасности. Классификация современных материалов: конструкционные, функциональные, специальные. Классификация конструкционных материалов.

Агрегатные состояния вещества. Газообразное, жидкое, твердое и плазменное состояния.

Кристаллические и аморфные твердые тела. Строение кристаллических тел. Основные типы кристаллических решеток. Процесс образования кристаллической структуры. Анизотропия. Полиморфизм.

Дефекты кристаллического строения: точечные, линейные, поверхностные. Дислокационная структура и прочность металлов.

Общие понятия о нагрузках, напряжениях, деформациях и разрушении материалов.

Дислокационный механизм упругопластической деформации. Теоретическая и техническая прочность.

Основные феноменологические закономерности механического поведения материалов. Законы упругости, вязкоупругости, пластичности и ползучести.

Тема 2. Физико-механические свойства материалов и методы их исследования

Основные свойства материалов: механические, физические, химические и технологические.

Механические свойства материалов и методы их определения.

Статические испытания: на растяжение, сжатие, кручение, изгиб, твердость и трещиностойкость.

Динамические испытания: на ударную вязкость и хладноломкость.

Испытания при циклическом нагружении.

Испытания на длительную прочность и ползучесть.

Испытания строительных и текстильных материалов. Испытания пластических масс.

Безобразцовый метод определения механических свойств.

Физические свойства материалов и неразрушающие методы контроля.

Тема 3. Основы теории сплавов и термической обработки

Основы теории сплавов. Основные типы диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов. Правило фаз. Связь свойств сплавов с типом диаграммы состояния. Примеры диаграмм состояния сплавов. Диаграмма состояния железо-углерод.

Термическая и химико-термическая обработка металлов. Общие положения и определения. Основные виды термообработки сталей. Превращения в сталях при равновесном нагреве и охлаждении. Изотермическое превращение аустенита. Мартенситное превращение. Влияние вида термообработки на структуру и свойства стали. Выбор температурного режима термообработки. Термомеханическая обработка сталей.

Понятие о термообработке цветных металлов и сплавов.

Поверхностное упрочнение металлов и сплавов. Химико-термическая обработка. Диффузионное насыщение поверхности сплавов. Поверхностная закалка. Лазерная термическая и химико-термическая обработка.

Тема 4. Железо и его сплавы

Структура и основные свойства железа. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей.

Углеродистые стали. Классификация и маркировка углеродистых сталей. Область применения углеродистых сталей.

Чугуны. Классификация и маркировка чугунов. Структура и свойства белого, серого, ковкого и высокопрочного чугуна. Влияние углерода и примесей на свойства чугунов. Область применения чугунов.

Стали и сплавы специального назначения: жаропрочные, износостойкие, инструментальные и штамповочные. Химический состав, основные свойства и классификация специальных сталей и твердых сплавов.

Легированные стали. Классификация и маркировка легированных сталей. Регулирование свойств легированных сталей изменением состава. Область применения легированных сталей.

Тема 5. Цветные металлы и их сплавы

Структура и свойства алюминия и алюминиевых сплавов. Классификация: литейные, деформируемые – упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. Маркировка алюминиевых сплавов. Область применения алюминия и его сплавов.

Структура и основные свойства меди и сплавов на ее основе. Классификация медных сплавов: бронзы, латуни. Маркировка латуней и

бронз. Влияние легирующих элементов и примесей на свойства медных сплавов. Область применения медных сплавов.

Магниевые и титановые сплавы. Классификация и маркировка. Основные свойства магниевых и титановых сплавов. Область применения магниевых и титановых сплавов.

Тема 6. Неметаллические и композиционные материалы

Молекулярная структура, основные свойства и классификация полимеров. Термопластичные и терморезистивные пластмассы. Их основные свойства.

Резины. Состав резиновых смесей, свойства резин, влияние условий эксплуатации на свойства резин.

Клеящие материалы. Состав, свойства, классификация.

Лакокрасочные материалы. Состав, свойства, классификация.

Древесные материалы. Состав, свойства, классификация.

Неорганические материалы. Неорганическое стекло, ситаллы, керамические материалы.

Композиционные материалы. Классификация: по природе компонентов, по геометрии наполнителя, по схеме расположения наполнителя. Основные принципы упрочнения и методы определения прочности композиционных материалов.

Тема 7. Поведение материалов в особых условиях

Жаропрочность и методы ее повышения. Явления ползучести материалов, основные сведения. Испытания на ползучесть. Эмпирические формулы для кривых ползучести. Температурные зависимости. Релаксация напряжений. Простейшие теории ползучести металлов.

Длительная прочность материалов, основные сведения. Температурно-временные зависимости длительной прочности. Вязкое разрушение. Разрушение, сопровождающееся охрупчиванием. Смешанное разрушение.

Простейшие критерии длительной прочности.

Термическая усталость. Влияние температуры испытания.

Влияние на свойства материалов низких температур, радиационного облучения, глубокого вакуума.

Влияние агрессивных внешних сред. Коррозия металлов (химическая, электрохимическая). Формы коррозионных разрушений. Основные способы защиты металлов от коррозии.

Раздел II. ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Тема 8. Основы производства металлов

Исходные материалы и металлургический процесс производства чугуна. Доменное производство. Параметры процесса.

Плавка сталей в конверторах, мартенах и электропечах. Основные параметры процессов. Качество стали. Способы повышения качества сталей.

Получение алюминия и меди.

Литейное производство. Условия кристаллизации металлов и сплавов. Строение слитка. Влияние условий кристаллизации на структуру и свойства металлов и сплавов. Литейные свойства сплавов: жидкотекучесть, усадка, ликвация и газовая пористость.

Технологические основы литейного производства. Получение заготовок методами литья. Классификация основных способов литья: а) литье в песчаные формы; б) специальные способы литья (в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, в кокиль); в) литье с применением внешнего воздействия (под давлением, вакуумным всасыванием, центробежное); г) литье с непрерывным процессом формообразования (непрерывное и полунепрерывное, электрошлаковое). Получение отливок методом направленной кристаллизации. Обеспечение технологичности литых деталей.

Основы порошковой металлургии. Методы получения металлических порошков. Основные физические, механические и химические свойства металлических порошков. Основные способы производства изделий из металлических порошков: прессование, экструзия, прокатка и горячая штамповка. Способы получения пористых и беспористых изделий. Качество изделий.

Тема 9. Обработка металлов давлением

Понятие о механизме и основных параметрах пластического деформирования при обработке давлением. Влияние различных факторов на пластичность и сопротивление деформации металлов. Горячая и холодная обработка давлением.

Нагрев металла и нагревательные устройства. Основные виды обработки давлением: прокатка (производство распространенных видов проката); волочение (производство проволоки); прессование (производство профилей и труб); ковка (производство заготовок для дальнейшей обработки); штамповка – объемная (производство сложных деталей), листовая (изготовление пространственных тонкостенных деталей).

Тема 10. Неразъемные соединения металлов

Определение сварки. Физико-химические основы получения сварного соединения. Особенности применения сварки давлением и плавлением. Термические виды сварки: ручная дуговая, автоматическая дуговая под флюсом и в защитных газах, электрошлаковая, лазерная. Термомеханические методы сварки: контактная, конденсаторная, диффузионная. Механические методы сварки: холодная, взрывом, ультразвуковая. Специальные термические процессы: резка, наплавка, напыление. Прочность сварных швов и ее расчетная оценка.

Пайка металлов. Основные понятия. Способы пайки. Технология пайки. Дефекты сварных и паяных соединений.

Склеивание металлов. Основы технологии получения клееных соединений.

Тема 11. Размерная обработка металлов

Механическая обработка резанием. Сущность и схемы основных способов обработки: точения, сверления, фрезерования, строгания, протягивания, шлифования, хонингования. Конструкция лезвийных режущих инструментов. Кинематические и геометрические параметры процесса резания. Физико-химические и механические основы процесса резания. Параметры износа режущего инструмента. Металлорежущие станки. Область применения способов резания. Обрабатываемость конструкционных материалов резанием.

Сущность и основные параметры физико-химических методов размерной обработки. Электроэрозионная обработка. Электрохимическая обработка. Ультразвуковая абразивная и лучевая обработка.

Тема 12. Основы производства неметаллов

Технология производства пластмасс и резин.

Технология производства клеящих и лакокрасочных материалов.

Основы производства строительных материалов: древесины, стекла, ситаллов, керамики, железобетона.

Физико-технологические основы получения композиционных материалов. Технология изготовления современных композиционных материалов: дисперсно-упрочненных, волокнистых, на неметаллической основе, на металлической основе, гибридных.

Технология изготовления некоторых специальных огнеупорных материалов.

Тема 13. Обработка неметаллических и композиционных материалов

Влияние нагрева и охлаждения на структуру и свойства пластмасс и полимеров. Литье и обработка давлением пластиков.

Особенности обработки термопластичных и термореактивных полимеров и пластмасс. Сварка и склеивание пластмасс.

Основы изготовления резиновых деталей и полуфабрикатов.

Изготовление полуфабрикатов и изделий из композиционных материалов. Особенности получения деталей из порошковых композиционных материалов. Обработка и соединение композиционных материалов.

Тема 14. Современные материалы с особыми свойствами и технология их производства

Материалы с особыми магнитными свойствами. Общие сведения о ферромагнетиках. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

Материалы с особыми электрическими свойствами: с высокой проводимостью, полупроводники, диэлектрики.

Материалы с особыми тепловыми свойствами.

Материалы с особыми прочностными свойствами.

ВЫБОР ВАРИАНТА ЗАДАНИЙ, ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

В соответствии с учебным планом слушатели факультета заочного обучения (ФЗО) Академии должны выполнить одну контрольную расчетно-графическую работу, которая состоит из 4 заданий.

Слушатели и курсанты очного обучения (1-го и 2-го факультетов) Академии выполняют указанные 4 задания поэтапно, как 4 отдельные домашние расчетно-графические работы.

В каждом задании:

- приводятся основные положения теории;
- содержатся расчетные формулы;
- определяются цели, достигаемые в результате его выполнения;
- формулируется само задание, состоящее из нескольких пунктов, там же приводится таблица исходных данных, а также поясняющие рисунки или схемы. Таблица, схемы и рисунки имеют двойную нумерацию: первая цифра повторяет номер задания, вторая – порядковый номер, считая от начала текста текущего задания;
- приводится подробно разобранный пример выполнения задания.

Самостоятельное качественное выполнение данной контрольной работы играет важнейшую роль в освоении дисциплины «Материаловедение и технология материалов», являющейся основой общетехнической и общепрофессиональной подготовки инженера пожарной безопасности.

Вариант задания определяется шифром – совокупностью трех цифр, условно обозначаемой буквами **АБВ** так, что первой цифре соответствует буква **А**, второй – **Б**, а третьей – **В**.

Слушатель заочного факультета шифр **АБВ** выбирает из таблицы «Выбор варианта задания ...», находящейся на странице 15 настоящего пособия, по трем последним цифрам номера своей зачетной книжки – НЗК. Если НЗК > 249, то из него вычитают либо 250, либо 500, либо 750, так, чтобы получить число, находящееся в интервале $000 \div 249$. Последнее и используют в качестве НЗК. В частности, шифр **АБВ** = 342 получают слушатели заочного факультета, номера зачетных книжек которых заканчиваются цифрами 037, 287, 537 и 787.

Слушателям очного обучения и курсантам шифр назначает преподаватель, ведущий практические занятия.

В таблицах исходных данных каждого задания в левом столбце стоят номера строк, а остальные столбцы помечены снизу буквами **А**, **Б** и **В**. Данные к задаче формируются из элементов таблицы, лежащих на пересечении каждого из столбцов со строками, номера которых соответствуют буквам, которыми помечены столбцы.

Пример исходных данных для слушателя, имеющего шифр 342, выделен затемнением в таблице 2.1 задания 2.

Требования, предъявляемые к выполнению контрольной работы.

1. Контрольная работа выполняется в отдельной тетради 12–18 страниц или на сброшюрованных листах формата А4, строго по варианту **АБВ** своего шифра. Все страницы должны иметь поля 20–25 мм.
2. Вначале необходимо записать исходные данные, в масштабе изобразить все рисунки и графики.
3. Решение записывается подробно и аккуратно со всеми вычислениями, вспомогательными чертежами (если они необходимы) и пояснениями.
4. Рисунки выполняются крупно (лучше на отдельной странице), с помощью чертежных инструментов, с указанием всех размеров, числовых данных и осей координат. Углы должны вычерчиваться точно с использованием транспортира.
5. Исправления работы после проверки преподавателем записываются в конце на чистых листах (а не в тексте решения), или в отдельной тетради.
6. Пометки преподавателя не убираются. Следует иметь в виду, что преподаватель при проверке работы отмечает, как правило, лишь место появления ошибки и ее характер.
7. Разобравшись по учебнику и настоящему пособию с теоретическим материалом, слушатель должен исправить допущенную ошибку, а затем внести исправления во все расчеты, оказавшиеся ошибочными, начиная с места появления ошибки и до конца решения задачи.
8. К работе, высылаемой на повторную проверку, в обязательном порядке должен прилагаться ее первоначальный (незачтенный) вариант.

Работа, не соответствующая своему варианту, или выполненная с нарушением изложенных требований, не зачитывается и возвращается для исправления.

Выбор варианта задания **АБВ** в соответствии с НЗК – числом, образованным тремя последними цифрами номера зачетной книжки

НЗК → АБВ		НЗК → АБВ		НЗК → АБВ		НЗК → АБВ		НЗК → АБВ	
000	861	050	549	100	077	150	155	200	624
001	040	051	512	101	374	151	643	201	205
002	603	052	600	102	725	152	935	202	736
003	481	053	483	103	704	153	551	203	916
004	788	054	211	104	015	154	815	204	472
005	270	055	753	105	114	155	286	205	946
006	625	056	046	106	094	156	953	206	555
007	653	057	336	107	291	157	607	207	552
008	722	058	134	108	317	158	949	208	194
009	977	059	268	109	910	159	121	209	020
010	919	060	870	110	757	160	813	210	682
011	403	061	944	111	146	161	252	211	236
012	063	062	187	112	186	162	515	212	238
013	876	063	726	113	320	163	790	213	563
014	884	064	434	114	938	164	902	214	765
015	351	065	756	115	987	165	147	215	372
016	745	066	308	116	008	166	422	216	578
017	108	067	961	117	251	167	312	217	925
018	387	068	036	118	170	168	698	218	098
019	248	069	188	119	892	169	140	219	499
020	697	070	601	120	836	170	319	220	246
021	527	071	660	121	376	171	363	221	689
022	787	072	451	122	314	172	368	222	589
023	213	073	165	123	776	173	881	223	402
024	775	074	287	124	550	174	302	224	609
025	435	075	406	125	081	175	436	225	566
026	594	076	340	126	548	176	777	226	964
027	464	077	867	127	112	177	025	227	277
028	739	078	132	128	686	178	037	228	911
029	569	079	965	129	649	179	669	229	331
030	369	080	618	130	470	180	054	230	066
031	181	081	070	131	637	181	419	231	059
032	869	082	189	132	845	182	664	232	511
033	768	083	294	133	759	183	712	233	705
034	049	084	232	134	479	184	041	234	379
035	473	085	305	135	507	185	936	235	629
036	297	086	991	136	006	186	103	236	071
037	342	087	244	137	364	187	208	237	035
038	163	088	895	138	540	188	518	238	529
039	596	089	285	139	984	189	280	239	475
040	148	090	831	140	615	190	957	240	915
041	466	091	002	141	673	191	234	241	401
042	195	092	532	142	855	192	899	242	695
043	110	093	135	143	992	193	980	243	934
044	257	094	924	144	452	194	968	244	056
045	626	095	854	145	428	195	116	245	266
046	860	096	882	146	586	196	604	246	125
047	430	097	602	147	513	197	443	247	851
048	769	098	346	148	378	198	429	248	460
049	198	099	732	149	572	199	665	249	734

ЗАДАНИЕ 1. Напряженное и деформированное состояния в точке материала

Основные положения. Основными количественными характеристиками, описывающими механическое поведение различных материалов в условиях силовых и температурных воздействий, являются напряжения и деформации.

Напряжение – это мера интенсивности внутренних сил, измеряется в единицах силы, отнесенной к единице площади.

Деформация – это мера изменения взаимного расположения частиц тела.

При изменении наклона площадки, проходящей через какую-либо точку материала, изменяются действующие на ней нормальные и касательные напряжения. При проведении расчетов на прочность необходимо определить наибольшие напряжения, а также положения площадок, на которых они действуют. Таким образом, возникает проблема исследования напряженно-деформированного состояния в точке материала.

Напряженным состоянием в точке называют совокупность всех напряжений, действующих по всем возможным площадкам, проведенным через эту точку.

Деформированным состоянием в точке называют совокупность всех деформаций, возникающих по различным направлениям и в различных плоскостях, проходящих через данную точку.

При исследовании прочности различных материалов существенное значение имеет вид напряженно-деформированного состояния. Большинство материалов по-разному разрушаются в зависимости от того, являются ли напряжения растягивающими или сжимающими. Как показывает опыт, все материалы без исключения способны воспринимать весьма большие напряжения в условиях всестороннего сжатия, в то время как при одноосном растяжении, чистом сдвиге разрушение наступает при сравнительно низких напряжениях.

Существуют напряженные состояния, при которых разрушение происходит хрупко, без образования пластических деформаций, а есть такие, при которых этот же материал способен деформироваться пластически. Свойства самого материала при одном и том же напряженно-деформированном состоянии в значительной степени определяют работоспособность конструкций.

Таким образом, параметры напряженно-деформированного состояния в точках материальных сред играют важнейшую роль в расчетах на прочность и жесткость и позволяют оценить возможность недопустимого деформирования или разрушения конструкций и изделий, выполненных из самых различных материалов. Знание траекторий наибольших напряжений

во многих случаях дает возможность придать рациональную форму проектируемой детали или части конструкции.

Различают объемное, плоское и линейное напряженно-деформированное состояния. В настоящем задании ограничимся рассмотрением плоского напряженно-деформированного состояния.

Расчетные формулы. Нормальные и касательные напряжения σ_φ и τ_φ в зависимости от угла наклона нормали площадки φ определяются по формулам (положительный угол φ отсчитывается от оси z против хода часовой стрелки)

$$\sigma_\varphi = 1/2 (\sigma_z + \sigma_y) + 1/2 (\sigma_z - \sigma_y) \cos 2\varphi - \tau_{zy} \sin 2\varphi,$$

$$\tau_\varphi = 1/2 (\sigma_z - \sigma_y) \sin 2\varphi + \tau_{zy} \cos 2\varphi,$$

где $\sigma_y, \sigma_z, \tau_{zy}$ – исходные напряжения (рис. 1.2).

Здесь и далее в целях наглядности записи используются обозначения $\sigma_z, \sigma_y, \sigma_\varphi, \sigma_{\varphi_0}, \sigma_{\varphi_0+90}$ вместо стандартных обозначений функций: $\sigma(0^\circ), \sigma(90^\circ), \sigma(\varphi), \sigma(\varphi_0), \sigma(\varphi_0+90^\circ)$.

Главные напряжения в плоскости чертежа $\sigma_{1,2}$ вычисляются по формуле

$$\sigma_{1,2} = 1/2 (\sigma_z + \sigma_y) \pm 1/2 [(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2]^{1/2}, \quad (\sigma_1 > \sigma_2).$$

Углы наклона нормалей главных площадок – φ_0 и φ_0+90° – определяются из соотношения

$$\operatorname{tg} 2\varphi_0 = -2\tau_{zy} / (\sigma_z - \sigma_y).$$

Соответствие площадок, на которых действуют напряжения σ_1 и σ_2 определяется подстановкой φ_0 и φ_0+90° в формулу для σ_φ . Полученное σ_{φ_0} должно быть равно σ_1 либо σ_2 , а $\sigma_{\varphi_0+90} = \sigma_2$ либо σ_1 соответственно. При этом, если, например, $\sigma_{\varphi_0} = \sigma_1$, значит на площадке, угол наклона нормали к которой равен φ_0 , действует напряжение σ_1 .

Максимальные касательные напряжения τ_{\max} равны $\tau_{\max} = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_2)$.

Линейные деформации в точке характеризуются величинами относительных удлинений в соответствующих направлениях:

$$\varepsilon_z = \Delta dz / dz, \quad \varepsilon_y = \Delta dy / dy,$$

а угловые – углом сдвига γ_{zy} (рис. 1.1).

Отношение поперечной деформации к продольной, взятое по абсолютной величине при простом растяжении или сжатии, называют коэффициентом Пуассона:

$$\nu = |\varepsilon_y / \varepsilon_z|$$

По закону Гука при плоском напряженном состоянии с учетом изменения температуры деформации в точке линейно-упругого материала равны

$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu \sigma_z) / E + \alpha t; \quad \varepsilon_z = (\sigma_z - \nu \sigma_y) / E + \alpha t; \quad \gamma_{zy} = \tau_{zy} / G,$$

где E – модуль упругости при растяжении, ГПа; ν – коэффициент

Пуассона; G – модуль упругости при сдвиге, вычисляемый для изотропного материала по формуле $G=E/[2(1+\nu)]$, ГПа; α – коэффициент линейного расширения материала, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; t – изменение температуры материала по отношению к его температуре до нагрева, $^{\circ}\text{C}$.

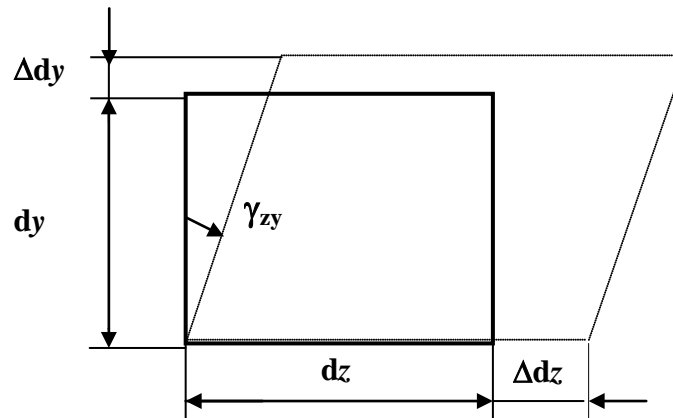


Рис. 1.1

Цель работы – ознакомиться с понятиями напряжений и деформаций. Провести расчет (для случая плоского напряженно-деформированного состояния) нормальных – σ и касательных – τ напряжений в точке материала, действующих на площадках с разными углами наклона, а также вычислить в данной точке линейные и угловые деформации, используя закон Гука.

Задание 1. В соответствии с данными табл. 1.1 требуется:

1. Найти напряжения σ_{φ} , $\sigma_{\varphi+90}$ и τ_{φ} и изобразить их на чертеже, рис.1.2.
2. Найти главные напряжения σ_1 , σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2$), положение главных площадок (углы наклона нормалей которых равны φ_0 и φ_0+90°), и показать их на отдельном чертеже.
3. Найти максимальные касательные напряжения τ_{\max} , а также положение площадок, на которых они действуют (под углами 45° к главным площадкам); вычислить нормальные напряжения σ , действующие на этих площадках. Изобразить на отдельном рисунке τ_{\max} и σ . Сравнить τ_{\max} с заданным пределом прочности при сдвиге τ_B .
4. Используя закон Гука при плоском напряженном состоянии, найти линейные – ϵ_y , ϵ_z и угловую – γ_{zy} деформации в данной точке

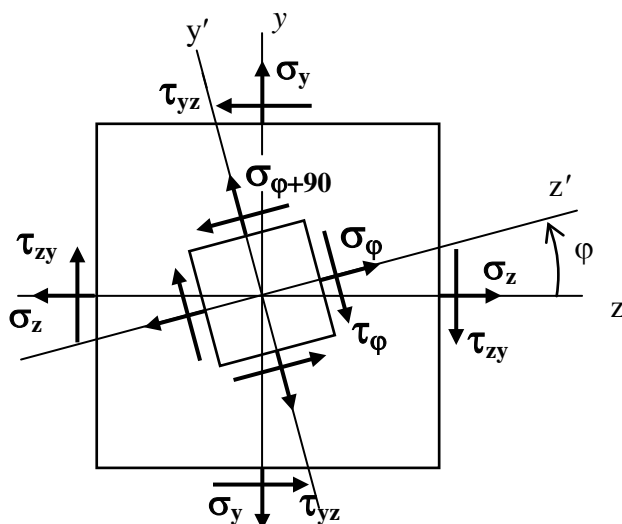


Рис.1.2

Исходные данные к заданию 1

Таблица 1.1

Номер строки	σ_z ,	σ_y ,	τ_{zy} ,	φ ,	t ,	E ,	ν	$\alpha \cdot 10^6$,	τ_B ,	Материал
	МПа	МПа	МПа	градус	°С	ГПа		°С ⁻¹	МПа	
0	30	20	-10	25	100	210	0,27	12,5	235	Сталь углеродистая
1	40	-30	20	-30	10	72	0,31	25,5	190	Сплавы алюминия
2	50	40	-30	35	20	115	0,32	16,7	120	Медь
3	60	-50	40	-40	30	100	0,33	20,0	150	Латунь
4	70	60	-50	45	40	137	0,26	11,0	100	Чугун
5	80	-70	60	-50	50	19	0,17	12,0	0,5	Бетон
6	90	80	-70	55	60	11	0,15	3,5	7	Сосна
7	100	-90	80	-60	70	112	0,30	18,0	320	Сплавы титана
8	110	100	-90	65	80	10	0,15	35,0	50	Текстолит
9	120	-110	100	-70	90	35	0,13	50,0	20	Стеклопластик
Шифр	А		Б		В					

Пример выполнения задания 1

Условия задания 1 даны в табл. 1.1.

Исходные данные примера представлены в табл. 1.2

Исходные данные примера задания 1

Таблица 1.2

σ_z	σ_y	τ_{zy}	φ	t	E	ν	$\alpha \cdot 10^6$	τ_B	Материал
МПа	МПа	МПа	градус	°С	ГПа		°С ⁻¹	МПа	
-60	20	40	-10	15	220	0,25	12,8	235	Сталь углерод.

Примечание. При выполнении задания аналогичные данные, соответствующие своему шифру, необходимо взять из табл. 1.1.

Решение

1. *Определение напряжений σ_φ , $\sigma_{\varphi+90}$ и τ_φ на наклонных площадках.* Исходное напряженное состояние показано на рис. 1.3

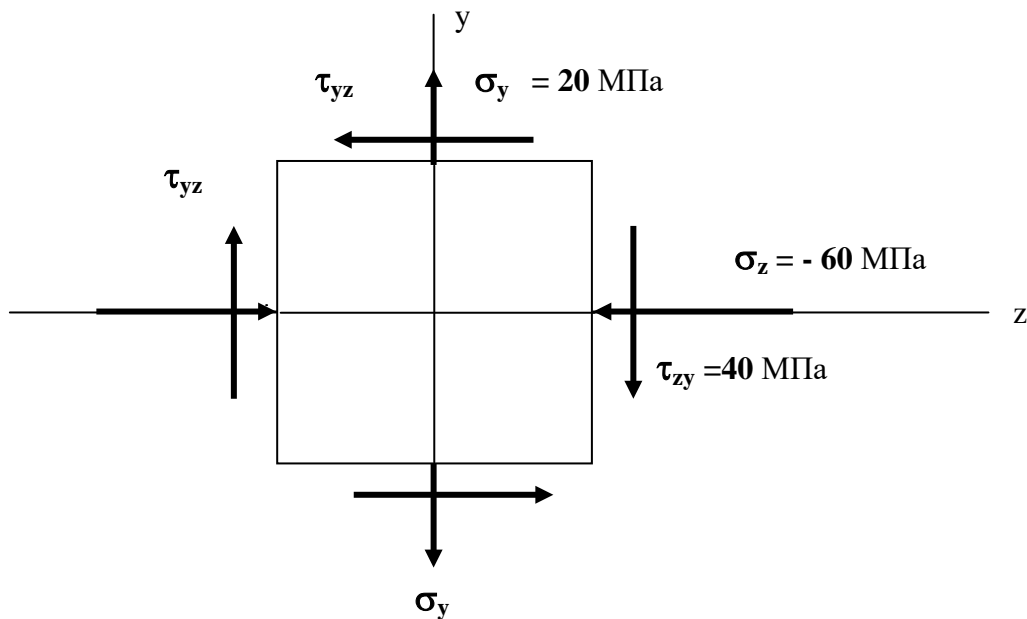


Рис 1.3

Вычисление напряжений σ_φ , $\sigma_{\varphi+90}$ и τ_φ .

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi &= \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_z - \sigma_y) \cos 2\varphi - \tau_{zy} \sin 2\varphi = \\ &= \frac{1}{2} (-60 + 20) + \frac{1}{2} (-60 - 20) \cos (2 \cdot (-10^\circ)) - 40 \sin (2 \cdot (-10^\circ)) = \\ &= -20 + (-40) \cdot 0,940 - 40 \cdot (-0,342) = -20 - 37,6 + 13,7 = -\mathbf{43,9} \text{ МПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi+90} &= \frac{1}{2} (-60 + 20) + \frac{1}{2} (-60 - 20) \cos (2 \cdot (-10+90)^\circ) - 40 \sin (2 \cdot (-10+90)^\circ) = \\ &= -20 + (-40) \cdot (-0,940) - 40 \cdot 0,342 = -20 + 37,6 - 13,7 = \mathbf{3,90} \text{ МПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{\varphi} &= \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_y) \sin 2\varphi + \tau_{zy} \cos 2\varphi = \\ &= \frac{1}{2}(-60 - 20) \sin(2 \cdot (-10)^\circ) + 40 \cos(2 \cdot (-10)^\circ) = -40 \cdot (-0,342) + \\ &+ 40 \cdot 0,940 = 13,7 + 37,6 = \mathbf{51,3 \text{ МПа}}.\end{aligned}$$

Площадки, проходящие через данную точку материала, на которых действуют напряжения σ_{φ} , $\sigma_{\varphi+90}$ и τ_{φ} , показаны на рис.1.4

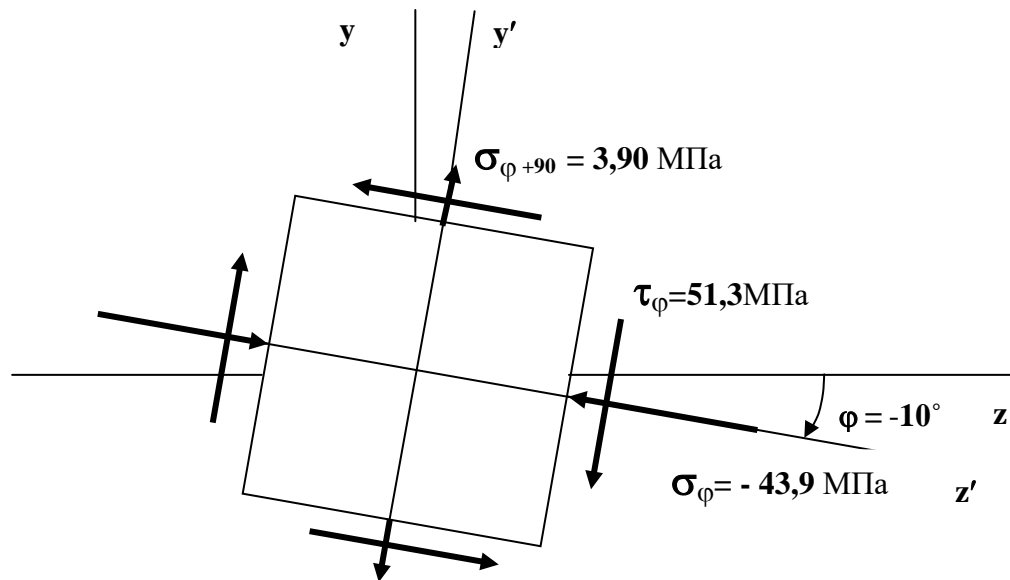


Рис. 1.4

2. *Определение главных напряжений σ_1 , σ_2 и положения главных площадок.*

Вычисление главных напряжений :

$$\begin{aligned}\sigma_{1,2} &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_y) \pm \frac{1}{2}[(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2]^{1/2} = \\ &= \frac{1}{2}(-60 + 20) \pm \frac{1}{2}[(-60 - 20)^2 + 4 \cdot 40^2]^{1/2} = \\ &= -20 \pm \frac{1}{2}((-80)^2 + 4 \cdot 40^2)^{1/2} = -20 \pm 56,6.\end{aligned}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{36,6 \text{ МПа}}, \quad \sigma_2 = \mathbf{-76,6 \text{ МПа}} \quad (\sigma_1 > \sigma_2).$$

Вычисление углов наклона нормалей главных площадок φ_0 и $\varphi_0 + 90^\circ$

$$\begin{aligned}\operatorname{tg}(2\varphi_0) &= -2\tau_{zy} / (\sigma_z - \sigma_y) = -2 \cdot 40 / (-60 - 20) = 1; \quad 2\varphi_0 = 45^\circ; \\ \varphi_0 &= \mathbf{22,5^\circ}; \quad \varphi_0 + 90^\circ = \mathbf{112,5^\circ}.\end{aligned}$$

Соответствие площадок, на которых действуют σ_1 и σ_2 , определяется подстановкой φ_0 и $\varphi_0 + 90^\circ$ в формулу для вычисления σ_{φ} .

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi_0} &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_y) \cos 2\varphi_0 - \tau_{zy} \sin 2\varphi_0 = \\ &= \frac{1}{2}(-60 + 20) + \frac{1}{2}(-60 - 20) \cos(2 \cdot 22,5^\circ) - 40 \sin(2 \cdot 22,5^\circ) = \\ &= -20 + (-40) \cdot 0,707 - 40 \cdot 0,707 = -20 - 28,3 - 28,3 = \mathbf{-76,6 \text{ МПа}},\end{aligned}$$

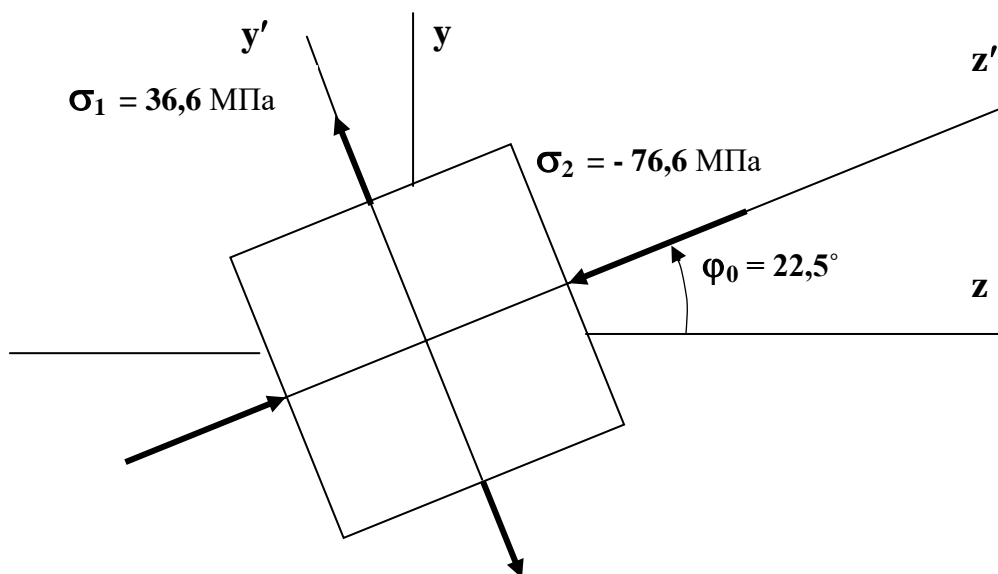


Рис. 1.5

Получили $\sigma_{\varphi_0} = \sigma_2$. Таким образом, на площадке, угол нормали к которой равен φ_0 действует напряжение σ_2 (рис. 1.5). Следовательно на площадке, угол наклона нормали которой равен $\varphi_0 + 90^\circ$ должно действовать напряжение σ_1 . Проверим это:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi_0+90} &= \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_z - \sigma_y) \cos(2(\varphi_0 + 90)) - \tau_{zy} \sin(2(\varphi_0 + 90)) = \\ &= \frac{1}{2} (-60 + 20) + \frac{1}{2} (-60 - 20) \cdot \cos(2 \cdot (22,5 + 90)^\circ) - 40 \cdot \sin(2 \cdot (22,5 + 90)^\circ) = \\ &= -20 + (-40) \cdot (-0,707) - 40 \cdot (-0,707) = -20 + 28,3 + 28,3 = \mathbf{36,6 \text{ МПа}}. \end{aligned}$$

Получили $\sigma_{\varphi_0+90} = \sigma_1$. Главные напряжения σ_1 и σ_2 вычислены верно.

3. *Определение максимальных касательных напряжений τ_{\max} , соответствующих нормальных напряжений σ и площадок, на которых они действуют. Сравнение τ_{\max} с заданным пределом прочности при сдвиге τ_B .*

Вычисление τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{1}{2} (36,6 - (-76,6)) = \mathbf{56,6 \text{ МПа}}.$$

Сравним τ_{\max} с τ_B :

для углеродистой стали $\tau_{\max} = \mathbf{56,6 \text{ МПа}} < \tau_B = \mathbf{235 \text{ МПа}}$. Условие прочности выполняется. Это означает, что разрушения в данной точке материала не происходит.

Вычисление углов наклона площадок, на которых действуют τ_{\max} :

$$\varphi_1 = \varphi_0 + 45^\circ = 22,5^\circ + 45^\circ = \mathbf{67,5^\circ}.$$

Направление τ_{\max} на площадке с углом наклона нормали φ_1 определяется знаком величины τ_{φ_1} :

$$\begin{aligned}\tau_{\varphi_1} &= \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_y) \sin 2\varphi_1 + \tau_{zy} \cos 2\varphi_1 = \\ &= \frac{1}{2}(-60 - 20) \sin(2 \cdot 67,5^\circ) + 40 \cos(2 \cdot 67,5^\circ) = \\ &= -40 \cdot 0,707 + 40 \cdot (-0,707) = -28,3 - 28,3 = -56,6 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Площадки, на которых действуют τ_{\max} , а также их направления с учетом закона парности касательных напряжений, показаны на рис. 1.6.

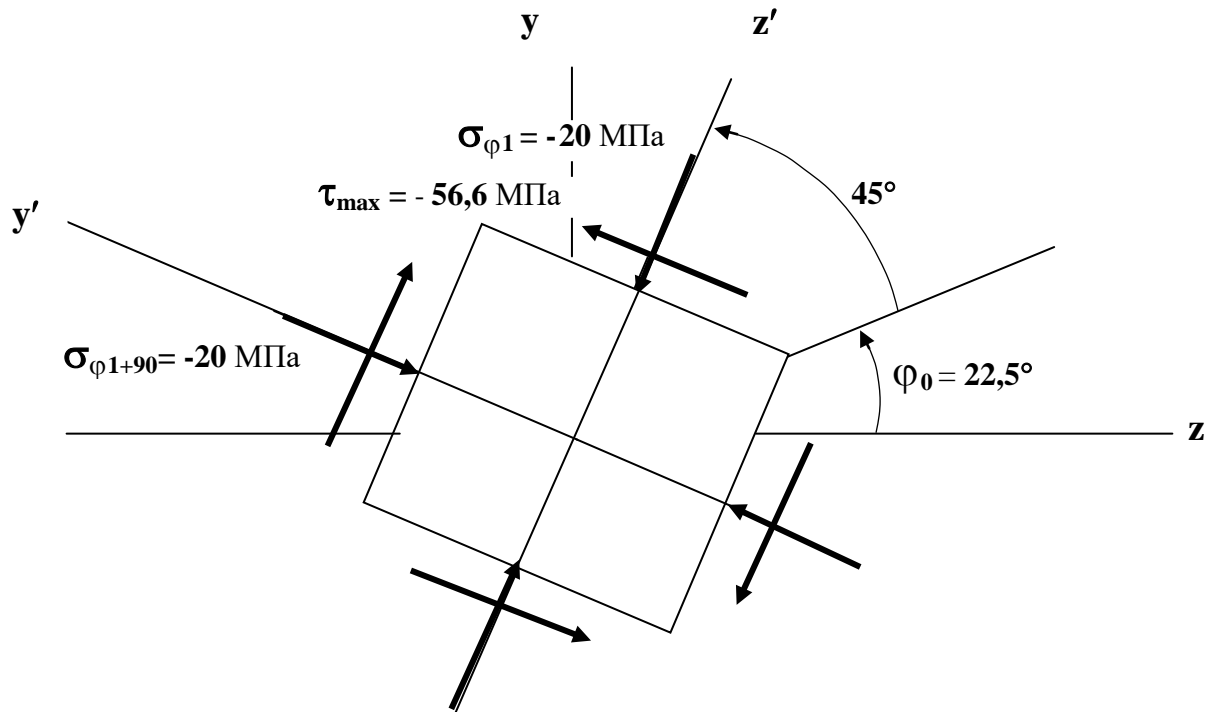


Рис 1.6

Вычисление нормальных напряжений σ , действующих на этих площадках (рис. 1.6).

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi_1} &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_y) \cos 2\varphi_1 - \tau_{zy} \sin 2\varphi_1 = \\ &= \frac{1}{2}(-60 + 20) + \frac{1}{2}(-60 - 20) \cos(2 \cdot 67,5^\circ) - 40 \sin(2 \cdot 67,5^\circ) = \\ &= -20 + (-40) \cdot (-0,707) - 40 \cdot 0,707 = -20 + 28,3 - 28,3 = -20 \text{ МПа}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi_1+90} &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_y) \cos(2(\varphi_1 + 90^\circ)) - \tau_{zy} \sin(2(\varphi_1 + 90^\circ)) = \\ &= \frac{1}{2}(-60 + 20) + \frac{1}{2}(-60 - 20) \cos(2(67,5+90)^\circ) - 40 \sin(2(67,5+90)^\circ) = \\ &= -20 + (-40) \cdot 0,707 - 40 \cdot (-0,707) = -20 - 28,3 + 28,3 = -20 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Можно вычислить σ_{φ_1} и σ_{φ_1+90} другим способом, а именно:

$$\sigma_{\varphi_1} = \sigma_{\varphi_1+90} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_y) = \frac{1}{2}(-60 + 20) = -20 \text{ МПа}.$$

4. Вычисление продольных – ϵ_y , ϵ_z и угловой – γ_{zy} деформаций в точке линейно-упругого материала.

В соответствии с законом Гука для линейно-упругого материала с учетом изменения температуры, получим

$$\epsilon_y = (\sigma_y - \nu\sigma_z) / E + \alpha t = (20 \cdot 10^6 - 0,25 \cdot (-60 \cdot 10^6)) / 220 \cdot 10^9 + 12,8 \cdot 10^{-6} \cdot 15 = 0,159 \cdot 10^{-3} + 0,192 \cdot 10^{-3} = \mathbf{0,351 \cdot 10^{-3}} ;$$

$$\epsilon_z = (\sigma_z - \nu\sigma_y) / E + \alpha t = (-60 \cdot 10^6 - 0,25 \cdot 20 \cdot 10^6) / 220 \cdot 10^9 + 12,8 \cdot 10^{-6} \cdot 15 = -0,295 \cdot 10^{-3} + 0,192 \cdot 10^{-3} = \mathbf{-0,103 \cdot 10^{-3}} .$$

Модуль сдвига для изотропного материала вычисляется по формуле:

$$G = E / [2(1+\nu)] = 220 \cdot 10^9 / (2 \cdot (1 + 0,25)) = 88 \cdot 10^9 \text{ Па} = \mathbf{88 \text{ ГПа}} ,$$

тогда угол сдвига равен

$$\gamma_{zy} = \tau_{zy} / G = 40 \cdot 10^6 / 88 \cdot 10^9 = \mathbf{0,455 \cdot 10^{-3}} .$$

Ответ:

$$\sigma_\varphi = -43,9 \text{ МПа} , \quad \sigma_{\varphi+90} = 3,91 \text{ МПа} , \quad \tau_\varphi = 51,3 \text{ МПа} ;$$

$$\varphi_0 = 22,5^\circ , \quad \varphi_{0+90} = 112,5^\circ ;$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\varphi_0+90} = 36,6 \text{ МПа} , \quad \sigma_2 = \sigma_{\varphi_0} = -76,6 \text{ МПа} ;$$

$$\varphi_1 = 67,5^\circ , \quad \tau_{\max} = -56,6 \text{ МПа} , \quad \sigma_{\varphi_1} = \sigma_{\varphi_1+90} = -20 \text{ МПа} ;$$

$$\epsilon_y = 0,351 \cdot 10^{-3} , \quad \epsilon_z = -0,103 \cdot 10^{-3} , \quad \gamma_{zy} = 0,455 \cdot 10^{-3} ;$$

$$G = 88 \text{ ГПа} .$$

ЗАДАНИЕ 2. Основные свойства материалов при нормальных температурах

Основные положения и расчетные формулы. Прочность материала, его твердость, упругость, пластичность, вязкость, ползучесть относятся к механическим свойствам. Они являются основными свойствами конструкционных материалов и определяются по результатам испытаний. Наиболее важными из них являются статические испытания на растяжение. Пример диаграммы такого испытания приводится на рис.2.1. Здесь по оси абсцисс откладывается *продольная относительная деформация* образца – $\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0$, выраженная в процентах. По оси ординат откладывается *нормальное напряжение* в поперечном сечении образца – $\sigma = F/A_0$, Па. В формулах использованы следующие обозначения: l_0 , м – длина ненагруженного измеряемого участка, l – его длина при действии нагрузки F , Н и A_0 , м² – площадь поперечного сечения ненагруженного образца.

Основные механические свойства материалов при нормальных температурах характеризуются параметрами упругости, пластичности и прочности.

К *упругим* параметрам относятся:

модуль упругости при растяжении (сжатии), или *модуль Юнга I рода*,

$$E = \sigma / \varepsilon = F l_0 / (\Delta l A_0), \text{ Па}; \quad (2.1)$$

коэффициент Пуассона –

$$\nu = |\varepsilon' / \varepsilon|, \quad 0 < \nu < 0,5, \quad (2.2)$$

где ε' – поперечная относительная деформация;

модуль сдвига, или *модуль Юнга II рода*,

$$G = M l_0 / (\varphi I_p), \text{ Па}, \quad (2.3)$$

определяемый при испытаниях образцов на кручение, здесь M , Н·м – величина *крутящего момента*, φ – *угол поворота сечения* под действием момента M ; $I_p = \pi d^4 / 32 \approx 0,1d^4$, м⁴ – *полярный момент инерции поперечного сечения образца*.

Для изотропного материала упругие параметры связаны следующей зависимостью:

$$G = E / [2 (1 + \nu)]. \quad (2.4)$$

Пластичность материала характеризуют следующие параметры:

относительное остаточное удлинение –

$$\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

где l_k – длина измеряемого участка после разрыва образца;

относительное остаточное сужение –

$$\psi = [(A_0 - A_k) / A_0] \cdot 100\% , \quad (2.6)$$

где A_k – минимальная площадь поперечного сечения измеряемого образца после его разрыва.

Прочность материала определяют параметры :

предел пропорциональности –

$$\sigma_{пц} = F_{пц} / A_0 , \quad (2.7)$$

наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука

$$\sigma = E \varepsilon , \quad (2.8)$$

предел текучести –

$$\sigma_T = F_T / A_0 , \quad (2.9)$$

напряжение, при котором рост деформации происходит без заметного увеличения нагрузки (для диаграмм I, IV, V, VII, VIII, и IX с выраженной площадкой текучести);

условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – величина напряжения, при котором остаточная деформация $\varepsilon_{ост} = 0,002$ или 0,2% для диаграмм II, III, VI, и X, на которых площадка текучести отсутствует;

предел прочности (или временное сопротивление) –

$$\sigma_B = F_B / A_0 , \quad (2.10)$$

отношение максимальной нагрузки F_B , которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения.

Цель работы – ознакомиться с основными понятиями (упругость, пластичность, прочность) механических свойств материалов; вычислить основные параметры механических свойств материалов по результатам статических испытаний на растяжение и кручение; приобрести навыки работы с диаграммами растяжения.

Задание 2. В соответствии с данными табл.2.1 требуется:

1. Определить E , ν и G – параметры упругих свойств материала.
2. Определить δ и ψ – параметры пластических свойств материала.
3. По заданной диаграмме рис. 2.2 определить $\sigma_{пц}$, σ_B , σ_T (или $\sigma_{0,2}$) – параметры прочностных свойств материала (для диаграммы с выраженной площадкой текучести найти σ_T , если площадка текучести отсутствует – оценить величину $\sigma_{0,2}$).
4. Определить G , исходя из данных, полученных в эксперименте на кручение образца.

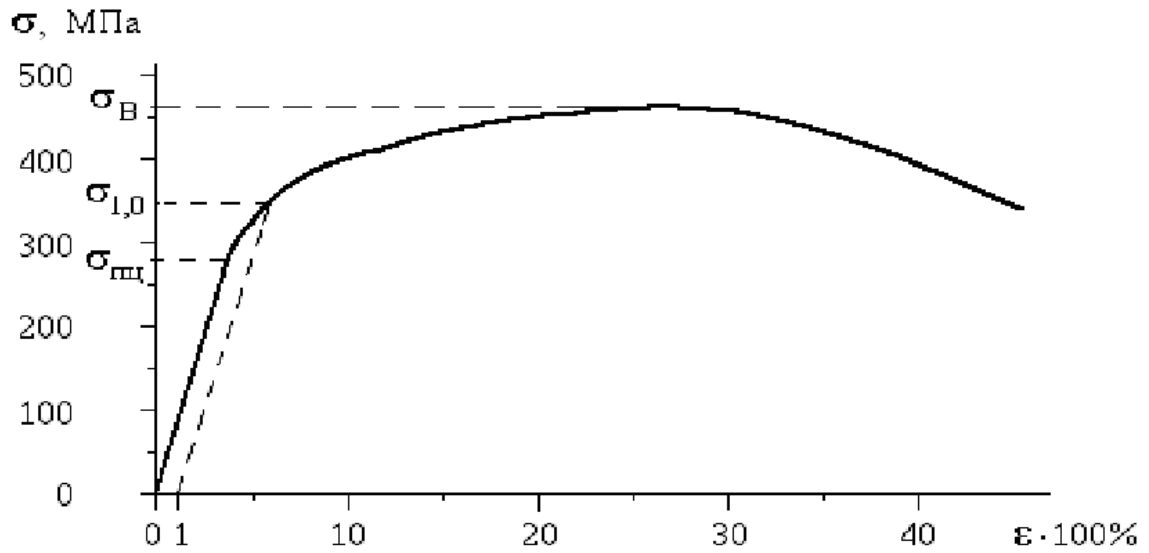


Рис. 2.1. Пример диаграммы растяжения

Исходные данные к заданию 2

Таблица 2.1.

Номер строки	l_0 , мм	A_0 , мм ²	F , Н	$\Delta l \cdot 10^3$ мм	A_k , мм ²	l_k , мм	ε' , %	ε , %	M , Н м	φ , рад	d , мм	Номер диаграммы
0	125	490	3090	3,7	392	150	-0,05	0,3	100	0,004	25	X
1	100	320	1680	2,5	272	130	0,06	-0,25	90	0,005	24	I
2	80	180	810	2,0	135	104	-0,02	0,25	80	0,003	22	II
3	75	80	530	2,6	57	84	0,08	-0,35	60	0,014	15	III
4	50	50	360	1,7	35	56	-0,15	0,38	50	0,03	18	IV
5	40	30	190	1,6	24	50	0,05	-0,40	30	0,02	16	V
6	30	20	160	1,2	18	39	-0,13	0,32	20	0,009	20	VI
7	25	12	82	1,0	10	35	-0,09	0,37	10	0,01	10	VII
8	20	10	72	0,6	7,5	24	0,14	-0,33	8	0,008	25	VIII
9	15	8	24	0,5	6,2	18	-0,13	0,31	6	0,009	12	IX
шифр	А						Б		В			

Примечание. Затемнением в таблице выделены исходные данные для шифра АБВ = 342.

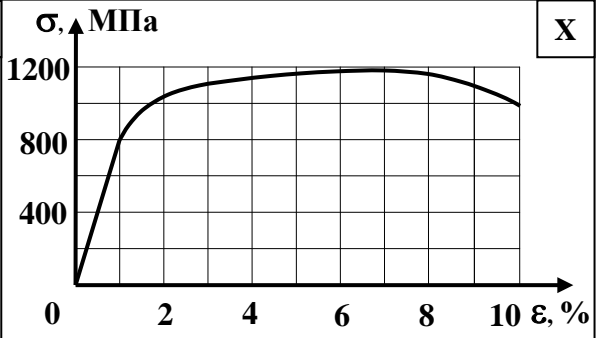
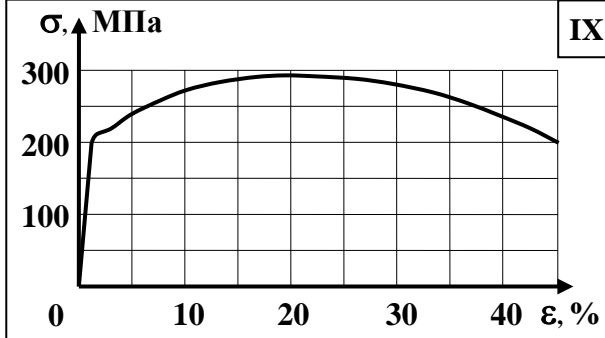
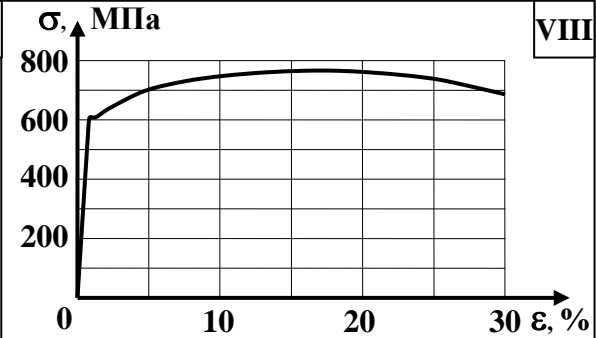
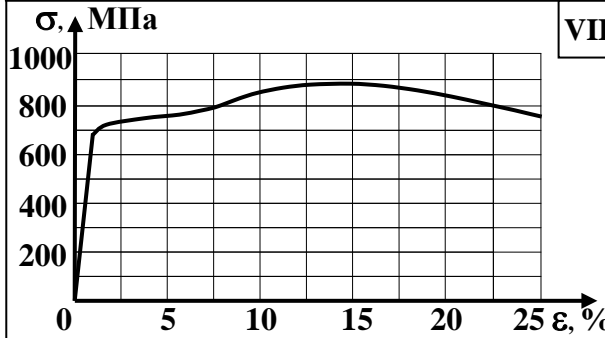
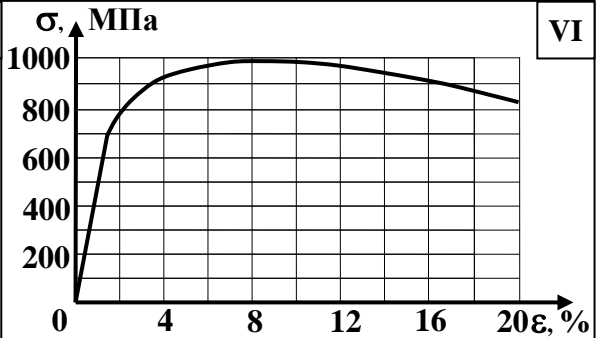
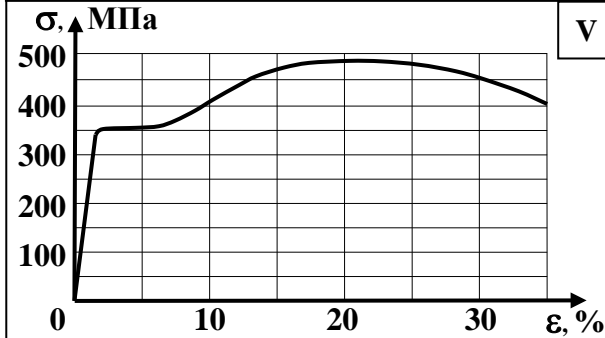
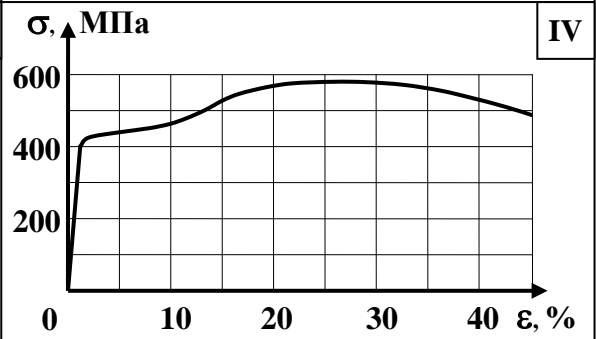
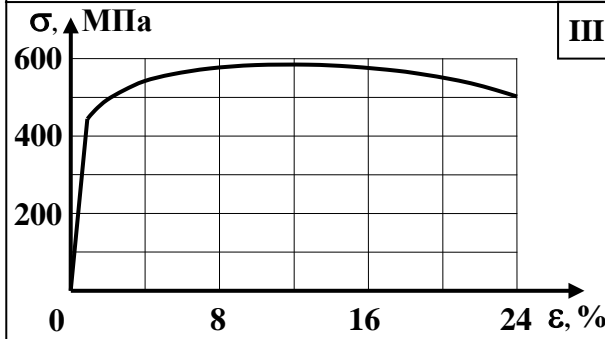
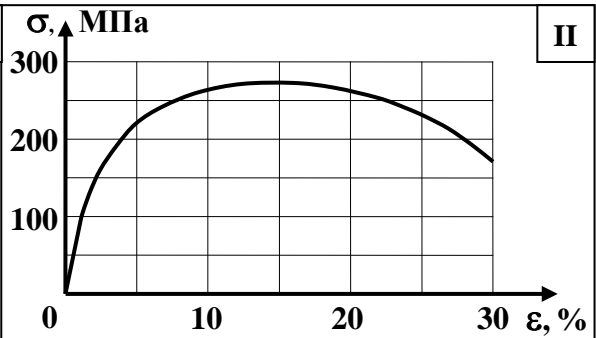
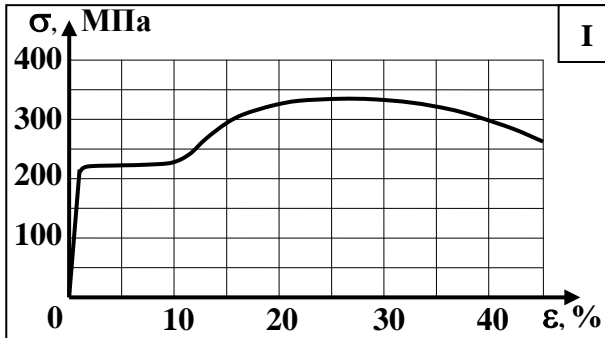


Рис. 2.2. Условные диаграммы растяжения материалов.

Пример выполнения задания 2

Условия задания 2 даны в табл. 2.1.

Исходные данные примера представлены в табл. 2.2.

Данные к примеру задания 2

Таблица 2.2

Номер строки	l_0 , мм	A_0 , мм ²	F , Н	$\Delta l \cdot 10^3$, мм	A_k , мм ²	l_k , мм	ε' , %	ε , %	M , Н·м	φ , рад	d , мм	Диаграмма
Пример	70	85	520	2,4	67	78	0,08	0,25	63	0,014	15	Рис. 2.1
	А						Б		В			

Примечание. При выполнении работы аналогичные данные и диаграмму, соответствующие своему шифру необходимо выписать из таблицы 2.1.

Решение

1. Находим упругие и пластические параметры материала l , используя данные, относящиеся к продольному растяжению (столбцы **А**, и **Б**): модуль упругости при растяжении (сжатии) находим по формуле (2.1)

$$E = \sigma / \varepsilon = F l_0 / (\Delta l A_0) = 520 \cdot 70 \cdot 10^{-3} / (2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 85 \cdot 10^{-6}) = 178 \cdot 10^9 \text{ Па} = 178 \text{ ГПа} .$$

коэффициент Пуассона находим по формуле (2.2)

$$\nu = |\varepsilon' / \varepsilon| = |0,08 / 0,25| = 0,32 .$$

Полагая материал изотропным, модуль сдвига найдем через модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν по формуле (2.4)

$$G = E / 2 (1 + \nu) = 67600 \text{ МПа} = 67,6 \text{ ГПа} .$$

Находим относительное остаточное удлинение, используя формулу (2.5),

$$\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100\% = (78 - 70) / 70 \cdot 100\% = 11,4 \%$$

и относительное остаточное сужение, используя формулу (2.6),

$$\psi = [(A_0 - A_k) / A_0] \cdot 100\% = (85 - 67) / 85 = 21,5 \%$$

2. Параметры прочностных свойств материала 2 находим по диаграмме растяжения, изображенной на рис. 2.1 (для материала, имеющего явно выраженную площадку текучести, необходимо найти не $\sigma_{0,2}$, а σ_T).

Проследим особенности кривой на диаграмме нагружения, начиная от точки с координатами $(0; 0)$, что соответствует изначально недеформированному образцу. На некотором участке (до точки с

координатами 270; 3,5) график прямолинейен, далее он искривляется. Это означает, что при дальнейшем нагружении материал 2 уже не следует закону Гука, поэтому принимаем значение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} \approx 270$ МПа .

Поскольку на диаграмме нет явно выраженной площадки текучести, оценим условный предел текучести $\sigma_{0,2}$. Масштаб диаграммы не позволяет точно найти $\sigma_{0,2}$, поэтому установим пределы, в которых заключена искомая величина : $\sigma_{\text{пц}} < \sigma_{0,2} < \sigma_{1,0}$, то есть $270 \text{ МПа} < \sigma_{0,2} < 350 \text{ МПа}$, где $\sigma_{1,0} = 350$ МПа – напряжение, которому соответствует остаточная деформация, равная 1,0 % (см. диаграмму). Можно уточнить величину $\sigma_{0,2}$, полагая, что кривую на участке от $\sigma_{\text{пц}}$ до $\sigma_{1,0}$ можно заменить отрезком прямой. При этом предположении приблизительное значение условного предела текучести можно получить при помощи формулы :

$$\begin{aligned} \sigma_{0,2} &= \sigma_{\text{пц}} + (\sigma_{1,0} - \sigma_{\text{пц}}) \cdot 0,2 / 1,0 = \\ &= 270 + (350 - 270) \cdot 0,2 / 1,0 = 286 \text{ МПа} . \end{aligned}$$

(Уточненное значение $\sigma_{0,2}$ вычислять в работе не обязательно.)

Проследивая характер кривой при возрастании нагрузки, доходим до точки с координатами (24; 460). Это точка экстремума на кривой диаграммы, поэтому значение предела прочности (временного сопротивления) принимаем равным $\sigma_B \approx 460$ МПа .

3. По формуле (2.3) подсчитаем модуль упругости при сдвиге для материала 3, используя данные, относящиеся к кручению круглого образца. (столбец **В** и l_0 из столбца **А**).

$$\begin{aligned} G_3 &= M l_0 / (\varphi I_p) = \\ &= 63 \cdot 70 \cdot 10^{-3} / (0,014 \cdot 0,1 \cdot (15 \cdot 10^{-3})^4) = 62,2 \cdot 10^9 \text{ Па} = 62,2 \text{ ГПа} . \end{aligned}$$

Ответ:

$$E = 178 \text{ ГПа} , \quad \nu = 0,32 , \quad G = 67,6 \text{ ГПа} ;$$

$$\delta = 11,4 \% , \quad \psi = 21,5 \% ;$$

$$\sigma_{\text{пц}} \approx 270 \text{ МПа} , \quad \sigma_{0,2} = 286 \text{ МПа} , \quad \sigma_B \approx 460 \text{ МПа} ;$$

$$G_3 = 62,2 \text{ ГПа} .$$

ЗАДАНИЕ 3. Механические свойства металлов при повышенных температурах

Основные положения. Многие конструкционные материалы, в частности металлы, проявляют при высоких температурах ($\geq 300^\circ\text{C}$) свойства ползучести.

Ползучестью называется явление изменения параметров напряженно-деформированного состояния от времени при постоянной нагрузке.

Изменение (уменьшение) во времени напряжений при постоянной деформации называется *релаксацией* и является частным случаем ползучести.

Основные сведения о ползучести материалов получают из опытов на одноосное растяжение образцов при постоянных температуре $T = \text{const}$ и напряжении $\sigma = \text{const}$. Характерные для металлов кривые ползучести $\varepsilon_c(\tau)$, где ε_c – деформация ползучести и τ – время, показаны на рис.3.1. Кривые релаксации $\sigma(\tau)$ могут быть получены непосредственно из семейства кривых ползучести рис.3.2.

Особенностью деформаций ползучести металлов $\varepsilon_c(\sigma, T, \tau)$ является их необратимость, нелинейная зависимость от σ , T и неограниченность на бесконечном интервале времени.

При высоких температурах эксплуатации конструкций или в экстремальных условиях пожара наряду с чрезмерными деформациями ползучести возможно разрушение материала.

Способность материала длительное время сопротивляться разрушению (как правило, при высоких температурах) называется *длительной прочностью*.

При исследовании длительной прочности материала испытывают несколько одинаковых образцов при заданной температуре T и различных напряжениях σ и устанавливают время τ_* разрушения каждого образца. По результатам испытаний строят графики $\sigma(\tau_*, T)$ рис.3.3, которые обычно аппроксимируют аналитическими зависимостями, имеющими в логарифмических или полулогарифмических координатах вид прямой или ломаной рис.3.4.

Таким образом, основными параметрами свойств металлов при высоких температурах следует считать параметры ползучести и длительной прочности. К ним относятся:

– все константы, входящие в физические соотношения между ε , σ и их скоростями $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\sigma}$ (в феноменологическое уравнение состояния материала)

$$\Phi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \sigma, \dot{\sigma}, T, q_j) = 0 ,$$

где q_j – некоторые структурные параметры, а точка над символом функции означает общепринятое обозначение производной этой функции по времени τ , например $\dot{\epsilon} \equiv d\epsilon/d\tau$;

– $\sigma_{\epsilon/\tau}^t$, $\sigma_{\tau_*}^t$ – соответственно пределы ползучести и длительной прочности (параметры жаропрочности, имеющие смысл при сравнительной оценке различных материалов);

– $\min \dot{\epsilon}_c$ – скорость установившейся ползучести, τ_* – время разрушения или достижения какого-либо предельного состояния и другие параметры.

Пределом ползучести $\sigma_{пл} = \sigma_{\epsilon/\tau}^t$ называется напряжение, которое при одноосном растяжении вызывает заданную деформацию ползучести ϵ_c за установленное время τ при заданной температуре t .

Пределом длительной прочности $\sigma_{дл} = \sigma_{\tau_*}^t$ называется напряжение, при котором происходит разрушение за заданное время τ_* при заданной температуре t . При записи формул принято деформацию ползучести ϵ_c указывать в процентах, время τ – в часах, температуру t – в °С.

Расчетные формулы. Наиболее изученной экспериментально является стадия установившейся ползучести (для кривой σ_3 – участок II на рис.3.1), на которой $\dot{\epsilon}_c = \min \dot{\epsilon}_c$.

Соответственно и расчетные формулы для этой стадии являются самыми достоверными. Так, например, уравнение состояния $\Phi = 0$ в этом случае может быть записано в виде экспоненциальной зависимости от σ (для достаточно больших значений σ)

$$\dot{\epsilon}_c = K_0 \cdot \exp[-(U_0 - \gamma \cdot \sigma) / RT]$$

или в более удобном для расчетов виде степенной зависимости от σ

$$\dot{\epsilon}_c = B_0 \cdot \exp(-U_0 / RT) \cdot \sigma^n,$$

где K_0 , B_0 , U_0 , γ , n – константы свойств материала, T – температура, °К, $R = 8,31451$ Дж/(моль °К) – газовая постоянная,

Параметр U_0 называется энергией активации ползучести, кДж/моль; γ – структурно-чувствительным коэффициентом, кДж/(моль МПа); n – показателем ползучести. Как γ , так и n сильно зависят от состояния структуры материала и мало от T .

Предел ползучести $\sigma_{\epsilon/\tau}^t$ при заданных t , ϵ_* и τ_ϵ определяется, например, из степенного закона ползучести по формуле

$$\sigma_{\varepsilon/\tau}^t = \{ \varepsilon_* / [\tau_* \cdot B_0 \cdot \exp(-U_0 / RT)] \}^{1/n},$$

где учтено, что $e_c = \varepsilon_* / \tau_*$.

Предел длительной прочности $\sigma_{\tau_*}^t$ при заданных t и τ_* определяется, как правило, по экспериментально полученным зависимостям типа

$$\tau_* = C(T) \sigma^{-a} \quad \text{или} \quad \tau_* = B(T) \exp[-\beta(T) \sigma],$$

позволяющим экстраполировать данные испытаний малой длительности на большие временные интервалы. Например, известная формула С.Н. Журкова имеет вид последнего из указанных выше двух соотношений

$$\tau_* = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma \sigma) / RT],$$

где τ_0 – постоянная, численно близкая к периоду тепловых колебаний атомов, сек; откуда для предела длительной прочности $\sigma_{\tau_*}^t$ следует

$$\sigma_{\tau_*}^t = [U_0 - RT \ln(\tau_* / \tau_0)] / \gamma.$$

Строить диаграмму длительной прочности при $T = \text{const}$ удобно в логарифмических ($\log \tau_*$, $\log \sigma$) или полулогарифмических ($\log \tau_*$, σ) координатах, например, из формулы Журкова имеем

$$\ln \tau_* = C_1 - C_2 \sigma,$$

где $C_1 = \ln \tau_0 + U_0 / RT$, $C_2 = \gamma / RT$.

Задаваясь двумя значениями σ , например σ_1 и σ_2 получим соответствующие значения $\ln \tau_{*1}$, $\ln \tau_{*2}$, откладывая которые в осях $\ln \tau_*$, σ , строим прямую линию – диаграмму длительной прочности для данной температуры T .

Существуют и другие, широко используемые на практике параметрические зависимости, позволяющие по двум из трех величин (σ , T , τ_*) находить третью, например зависимость Ларсена–Миллера :

$$T(C + \lg \tau_*) = F_1(\sigma),$$

зависимость Мэнсона–Хафферда :

$$(T - T_a) / (\lg \tau_* - \lg \tau_a) = F_2(\sigma),$$

зависимость Орра–Шерби–Дорна :

$$\tau_* \exp(-Q / RT) = F_3(\sigma),$$

где C , T_a , τ_a , Q – параметры свойств материала.

Расчеты по этим зависимостям в данное задание не входят.

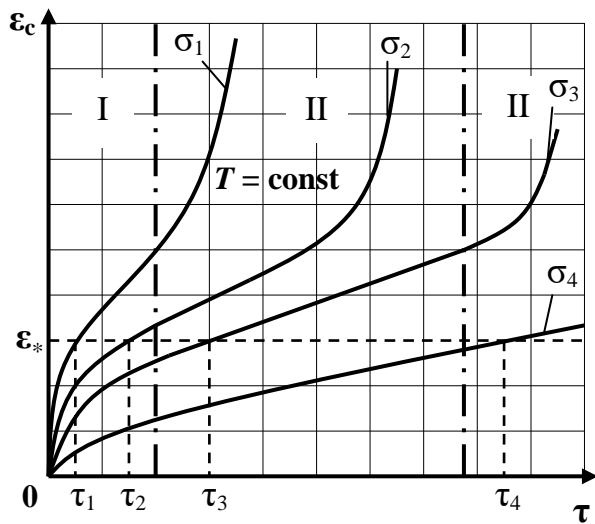


Рис.3.1. Кривые ползучести
($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$)

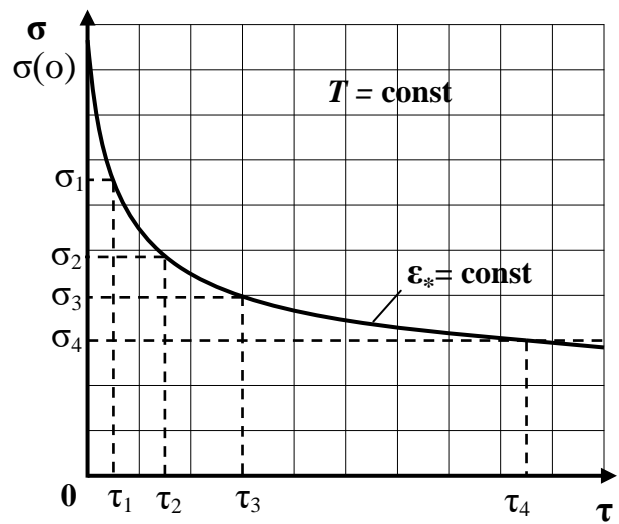


Рис.3.2. Кривая релаксации

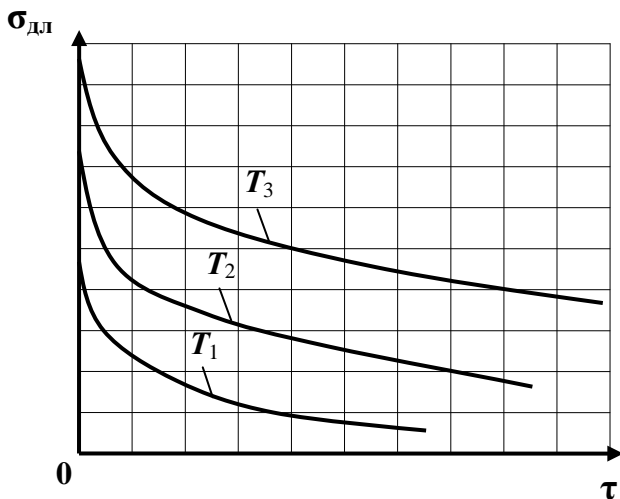


Рис.3.3. Диаграмма длительной прочности ($T_1 > T_2 > T_3$)

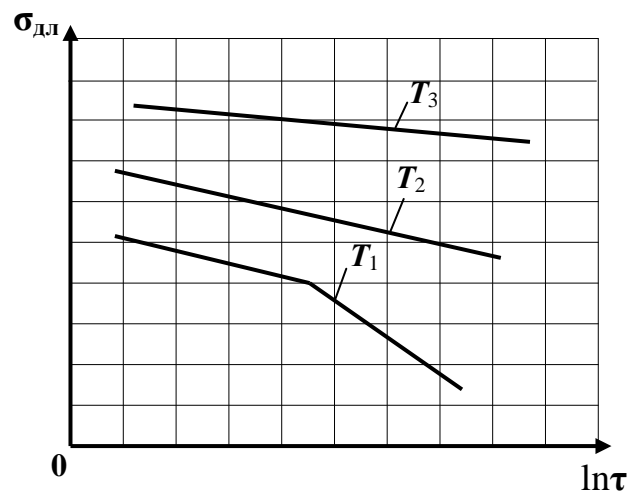


Рис.3.4. Диаграмма длительной прочности в полулогарифмических координатах

Цель работы – ознакомление с основными механическими свойствами металлов в условиях высоких температур и вычисление для них конкретных параметров ползучести и длительной прочности по данным экспериментов.

Задание 3. В соответствии с данными табл.3.1 требуется:

1. Вычислить скорость установившейся ползучести $\dot{\epsilon}_c$ углеродистой стали для заданных σ и T , используя степенную зависимость $\dot{\epsilon}_c(\sigma)$, и построить соответствующую этой скорости кривую ползучести при начальном условии $\tau=0, \epsilon_c=0$.
2. Вычислить предел ползучести $\sigma_{\epsilon/\tau}^t$ того же материала для заданных T, τ_ϵ и предельной деформации ϵ_* , используя степенную зависимость. Проверить правильность полученного результата.
3. Построить диаграмму длительной прочности жаропрочной стали (в координатах $\ln \tau_*, \sigma$) для заданных температуры T и выбранного диапазона напряжений σ , используя формулу Журкова.
4. Вычислить предел длительной прочности $\sigma_{\tau_*}^t$ материала из п.3 при заданном времени разрушения τ_* и проверить полученный результат численно и графически, используя построенную диаграмму.

Исходные данные к заданию 3

Таблица 3.1

Номер строки	B_0 , (МПа) ⁻ⁿ / час	U_0 , кДж/ моль (углеродистая сталь)	t , °C	n	σ , МПа	τ_ϵ , час	ϵ_* , %	$\tau_0 \cdot 10^{12}$, сек	U_0 , кДж/ моль (жаропрочная сталь)	γ , кДж/ (моль МПа)	τ_* , час
0	0,0332	320	1000	5,2	120	10000	1,0	10	450	0,30	5000
1	0,0427	310	950	5,1	140	5000	1,1	1	405	0,21	30
2	0,0562	300	900	5,0	160	2500	1,2	2	410	0,22	50
3	0,0758	290	850	4,9	180	1000	1,3	3	415	0,23	100
4	0,1050	280	800	4,8	200	500	1,4	4	420	0,24	150
5	0,1503	270	750	4,7	220	250	1,5	5	425	0,25	300
6	0,2231	260	700	4,6	240	100	1,6	6	430	0,26	600
7	0,3456	250	650	4,5	260	50	1,7	7	435	0,27	1200
8	0,5630	240	600	4,4	280	20	1,8	8	440	0,28	2000
9	0,9737	230	550	4,3	300	10	1,9	9	445	0,29	4000
Шифр	А				Б			В			

Пример выполнения задания 3

Условия задания 3 даны. в табл. 3.1.

Исходные данные примера представлены в табл. 3.2

Исходные данные примера задания 3

Таблица 3.2

B_0 , (МПа) ⁻ⁿ / час	U_0 , кДж/ моль (углеродистая сталь)	t , °C	n	σ , МПа	τ_ε , час	ε_* , %	$\tau_0 \cdot 10^{12}$, сек	U_0 , кДж/ моль (жаропрочная сталь)	γ , кДж/ (моль МПа)	τ_* , час
0,423	277	630	7,3	56	400	0,5	1,23	362	0,213	1000

Примечание. При выполнении задания аналогичные данные, соответствующие своему шифру, необходимо взять из табл. 3.1.

Решение

1. *Вычисление скорости установившейся ползучести $\dot{\varepsilon}_c$ углеродистой стали для заданных σ и T . Построение кривой ползучести.*

Степенная зависимость для скорости установившейся ползучести $\dot{\varepsilon}_c(\sigma)$ имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_c = B_0 \exp(-U_0 / RT) \sigma^n .$$

В соответствии с исходными данными имеем

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_c &= 0,423 \exp(-277 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 903) \cdot 56^{7,3} = 0,423 \exp(-36,9) \cdot 5,78 \cdot 10^{12} = \\ &= 0,423 \cdot 9,49 \cdot 10^{-17} \cdot 5,78 \cdot 10^{12} = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}, \end{aligned}$$

где учтено, что $R = 8,31451$ Дж/(моль °К) и $T = t + 273 = 630 + 273 = 903^\circ\text{К}$.

Введем обозначение для вычисленной скорости установившейся ползучести

$$\dot{\varepsilon}_c = v(\sigma, T) = \text{const}$$

или

$$d\varepsilon_c/d\tau = v = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1} .$$

Интегрируя, получим

$$\varepsilon_c(\tau) = v \tau + C .$$

Из начального условия $\varepsilon_c(0) = 0$ следует $C = 0$, тогда зависимость для деформации ползучести $\varepsilon_c(\tau)$ имеет вид

$$\varepsilon_c(\tau) = v \tau ,$$

а соответствующий график, построенный по двум точкам

$$\tau = 0, \quad \varepsilon_c = 0;$$

$$\tau = 1 \text{ час}, \quad \varepsilon_c = v \cdot 1 = 2,32 \cdot 10^{-4},$$

показан на рис.3.5

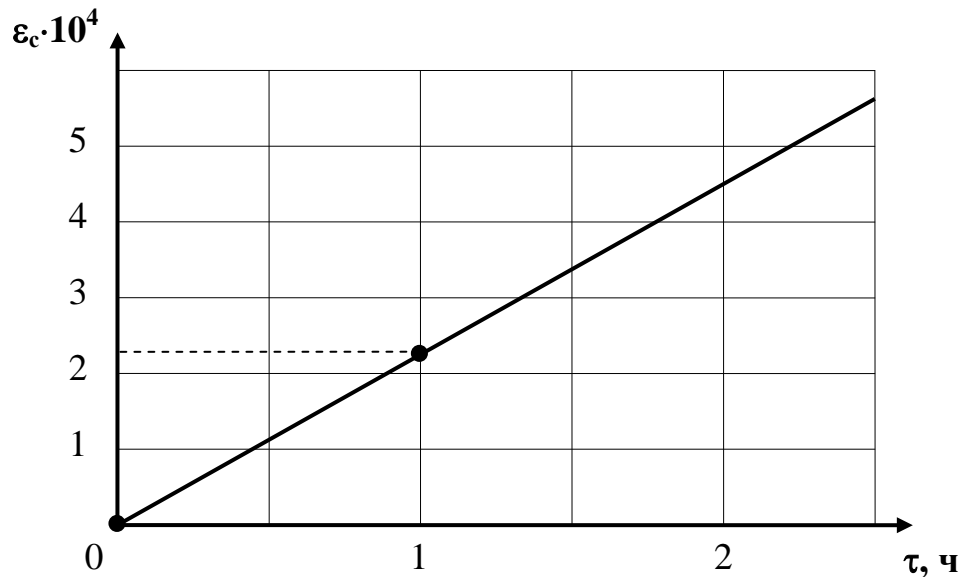


Рис.3.5. Зависимость $\varepsilon_c(\tau)$

2. Вычисление предела ползучести $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$ углеродистой стали для заданных T , τ_ε и предельной деформации ε_* .

Из степенного закона ползучести, разрешенного относительно напряжения σ , имеем

$$\sigma = \{ \varepsilon_c / [B_0 \exp(-U_0 / RT)] \}^{1/n},$$

откуда для предела ползучести $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$, с учетом того, что $\dot{\varepsilon}_c = \varepsilon_* / \tau_\varepsilon$ можно записать

$$\sigma_{\varepsilon/\tau}^t = \{ \varepsilon_* / [\tau_\varepsilon \cdot B_0 \exp(-U_0 / RT)] \}^{1/n}.$$

В соответствии с исходными данными для углеродистой стали имеем

$$\sigma_{\varepsilon/\tau}^t = \sigma_{0,5/400}^{630} = [0,005 / 400 \cdot 0,423 \cdot \exp(-277 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 903)]^{1/7,3} =$$

$$= [0,005 / 400 \cdot 0,423 \cdot 9,49 \cdot 10^{-17}]^{0,137} = (0,005 / 1,61 \cdot 10^{-14})^{0,137} = 37,5 \text{ МПа}.$$

Итак, в нашем случае предел ползучести равен

$$\sigma_{\varepsilon/\tau}^t = \sigma_{0,5/400}^{630} = 37,5 \text{ МПа.}$$

Проверим полученный результат.

Из зависимости $\varepsilon_c(\tau) = \nu\tau$, полученной ранее при

$t = 630^\circ\text{C}$, $\sigma = 37,5 \text{ МПа}$, $\tau = 400 \text{ час}$, следует :

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= B_0 \exp(-U_0/RT) \sigma^n \cdot \tau = 0,423 \cdot \exp(-277 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 903) \cdot 37,5^{7,3} \cdot 400 = \\ &= 0,423 \cdot \exp(-36,9) \cdot 3,10 \cdot 10^{11} \cdot 400 = 0,423 \cdot 9,49 \cdot 10^{-17} \cdot 1,24 \cdot 10^{14} = \\ &= 4,97 \cdot 10^{-3} \approx 0,005 = 0,5\%. \end{aligned}$$

Таким образом, при напряжении $\sigma = 37,5 \text{ МПа}$ и температуре $t = 630^\circ\text{C}$ за время $\tau = 400 \text{ час}$ достигается деформация $\varepsilon_c = 0,5\%$, что подтверждает правильность вычисления соответствующего предела ползучести $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t = \sigma_{0,5/400}^{630} = 37,5 \text{ МПа}$.

3. Построение диаграммы длительной прочности жаропрочной стали при заданной температуре T с использованием экспоненциальной зависимости $\tau_*(\sigma, T)$.

Простейшая зависимость времени разрушения материала τ_* от σ и T при испытаниях на длительную прочность (формула Журкова) имеет вид :

$$\tau_* = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma) / RT].$$

Логарифмируя это соотношение по основанию e , получим

$$\ln \tau_* = C_1 - C_2 \cdot \sigma,$$

где $C_1 = \ln \tau_0 + U_0 / RT$, $C_2 = \gamma / RT$.

В соответствии с исходными данными для жаропрочной стали константы C_1, C_2 равны :

$$C_1 = \ln(1,23 \cdot 10^{-12}) + 362 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 903 = -27,4 + 48,2 = 20,8 ,$$

$$C_2 = 0,213 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 903 = 0,0284 .$$

Итак, в нашем случае при $t = 630^\circ\text{C}$ ($T = 903^\circ\text{K}$) зависимость длительной прочности в полулогарифмических координатах имеет вид линейной функции $\ln \tau_* = 20,8 - 0,0284\sigma$.

Соответствующий график, построенный по двум точкам (диапазон σ выбирается произвольно, но так, чтобы выполнялось условие $\ln \tau_* > 0$)

$$\sigma = 100 \text{ МПа}; \quad \ln \tau_* = 20,8 - 0,0284 \cdot 100 \approx 18,0 ;$$

$$\sigma = 600 \text{ МПа}; \quad \ln \tau_* = 20,8 - 0,0284 \cdot 600 \approx 3,77 ,$$

показан на рис.3.6.

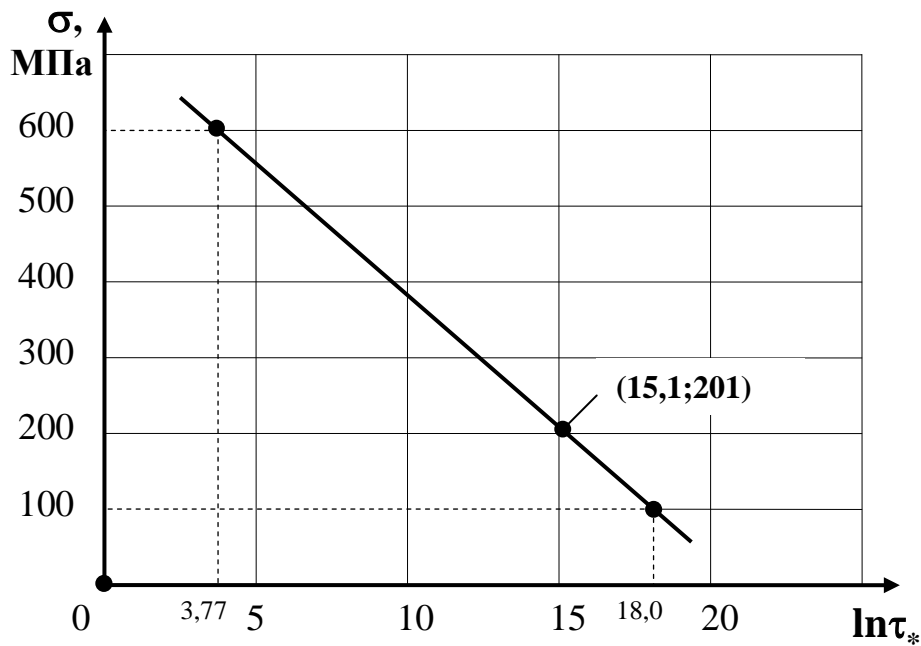


Рис.3.6. Зависимость длительной прочности в координатах σ , $\ln \tau_*$ (при $T = 903^\circ\text{K}$)

4. Вычисление предела длительной прочности жаропрочной стали при заданных температуре T и времени разрушения τ_* .

Разрешая экспоненциальную зависимость для времени разрушения $\tau_*(\sigma, T)$ относительно напряжения σ , получим для предела длительной прочности формулу

$$\sigma_{\tau_*}^t = [U_0 - RT \cdot \ln(\tau_* / \tau_0)] / \gamma.$$

В соответствии с исходными данными для жаропрочной стали имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau_*}^t &= \sigma_{1000}^{630} = [362 \cdot 10^3 - 8,3145 \cdot 903 \cdot \ln(1000 \cdot 3600 / 1,23 \cdot 10^{-12})] / 0,213 \cdot 10^3 = \\ &= [362 - 7,51 \cdot \ln(2,93 \cdot 10^{18})] / 0,213 = (362 - 319,0) / 0,213 \approx 201 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Проверим полученный результат численно, подставив $\sigma = 201$ МПа в формулу Журкова для $\tau_*(\sigma, T)$:

$$\begin{aligned} \tau_* &= 1,23 \cdot 10^{-12} \cdot \exp[(362 \cdot 10^3 - 0,213 \cdot 10^3 \cdot 201) / 8,3145 \cdot 903] = \\ &= 1,23 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(42,5) = 1,23 \cdot 10^{-12} \cdot 2,93 \cdot 10^{18} \approx 3,60 \cdot 10^6 \text{ сек} \approx 1000 \text{ час}. \end{aligned}$$

Таким образом, при напряжении $\sigma = 201$ МПа и температуре $t = 630^\circ\text{C}$ разрушение материала происходит за время $\tau_* = 1000$ час, что подтверждает правильность вычисления соответствующего предела длительной прочности $\sigma_{\tau_*}^t = \sigma_{1000}^{630} \approx 201$ МПа.

Проверим полученный результат графически, изобразив точку с координатами $(\ln \tau_*, \sigma)$ на рис. 3.6.

$$\ln \tau_* = \ln(1000 \cdot 3600) = \ln(3,6 \cdot 10^6) \approx 15,1.$$

Изображая соответствующую точку с координатами (15,1; 201) на рис.3.6, убеждаемся в том, что она принадлежит построенной ранее линии длительной прочности (прямой в полулогарифмических координатах $\ln \tau_*, \sigma$), следовательно, расчет $\sigma_{\tau_*}^t = \sigma_{1000}^{630} \approx 201$ МПа проведен правильно.

Ответ:

$$e_c = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1},$$

$$\sigma_{\varepsilon/\tau}^t = \sigma_{0,5/400}^{630} = 37,5 \text{ МПа},$$

$$\ln \tau_* = 20,8 - 0,0284 \sigma,$$

$$\sigma_{\tau_*}^t = \sigma_{1000}^{630} \approx 201 \text{ МПа}.$$

ЗАДАНИЕ 4. Механические свойства вязкоупругих материалов

Основные положения. Свойствами *вязкоупругости* обладают многие полимерные материалы, бетоны, грунты, горные породы, материалы органического происхождения.

При быстром нагружении (почти мгновенном) такие материалы ведут себя как упругие, а при достаточно медленном (в том числе постоянном) подобно вязкой жидкости. При этом скорость деформации $\dot{\epsilon} = d\epsilon/d\tau$, где ϵ – деформация, τ – время, как правило, линейно зависит от действующего напряжения σ .

Вязкоупругий материал как бы “помнит” нагружение, проведенное в моменты времени, предшествующие данному, и постепенно “забывает” результаты действия снятого нагружения. Характерная зависимость $\epsilon(\tau)$ при мгновенно приложенном (в момент времени $\tau = 0$) напряжении σ_0 и снятии его при $\tau = \xi$ показана на рис.4.1, где ϵ_0 – упругая (мгновенная) деформация.

Кривая релаксации $\sigma(\tau)$ при $\epsilon = \text{const}$ показана на рис.4.2, где τ_r – время релаксации, характерное время, за которое начальное напряжение σ_0 снижается в $e = 2,718$ раз.

Таким образом, у вязкоупругих материалов, как и у металлов при высоких температурах, основными механическими свойствами являются свойства ползучести, релаксации и длительной прочности, но с рядом особенностей.

Особенностями деформаций ползучести линейно вязкоупругих материалов являются их обратимость, ограниченность на бесконечном интервале времени (при достаточно невысоких уровнях напряжений σ) и возникновение уже при нормальных температурах.

Суть явлений, происходящих в вязкоупругих материалах, хорошо иллюстрируется на механических моделях вязкоупругих тел Максвелла, Фохта и Кельвина, составленных из простейших комбинаций упругих $\sigma = E\epsilon$ и вязких $\sigma = \eta\dot{\epsilon}$ элементов, где E – модуль упругости, η – коэффициент вязкости (рис.4.3, рис.4.4).

Модель Максвелла хорошо описывает процесс релаксации $\sigma(\tau)$ при $\epsilon = \text{const}$, но приводит к линейной зависимости $\epsilon(\tau)$ при $\sigma = \text{const}$ (т.е. неограниченной ползучести на бесконечном интервале времени), что не отражает свойств реальных вязкоупругих материалов.

Модель Фохта, наоборот, хорошо описывает свойства ограниченной ползучести $\epsilon(\tau)$ при $\sigma = \text{const}$, но совершенно не отражает процесс релаксации.

Модель Кельвина является простейшей моделью, свободной от указанных выше недостатков, и в первом приближении удовлетворительно описывает поведение реальных вязкоупругих материалов.

Существуют и другие, более точные модели реальных вязкоупругих материалов с более сложной комбинацией упругих и вязких элементов, что приводит к физическим соотношениям вида

$$\sum a_j \cdot d^j \varepsilon / d\tau^j = \sum b_k \cdot d^k \sigma / d\tau^k,$$

а также модели, построенные на основе теорий линейной и нелинейной наследственной вязкоупругости. Математические модели наследственных теорий сводятся к достаточно сложным интегральным уравнениям и в данном задании не рассматриваются.

Расчетные формулы. Будем полагать, что исследуемый материал с достаточной для практики точностью описывается моделью Кельвина. Уравнение состояния материала при этом имеет вид

$$\varepsilon + \eta e / E_2 = \sigma (1/E_1 + 1/E_2) + \eta s / E_1 E_2.$$

Нетрудно показать, что из модели Кельвина как частные случаи следуют модель Максвелла (при $E_2 = 0$) и модель Фохта (при $E_1 = \infty$).

При быстром нагружении из этого уравнения следует соотношение $e = s/E_1$, а при медленном – $\varepsilon = \sigma (1/E_1 + 1/E_2)$, что указывает на существенное влияние скорости нагружения на процесс деформирования материала и позволяет ввести понятия мгновенного E_m и длительного E_d модулей упругости.

Вводя другие обозначения для параметров свойств материала $\mu = E_2/\eta$, $E_m = E_1$, $E_d = E_1 E_2 / (E_1 + E_2)$, где E_m называется мгновенным, а E_d – длительным модулем упругости (очевидно, что $E_d < E_m$), получим уравнение состояния в виде

$$\mu \varepsilon + e = \mu \sigma / E_d + s / E_m.$$

Рассмотрим решения этого уравнения в частных случаях.

Случай ползучести ($\sigma = \sigma_0 = \text{const}$).

$$\text{Решение уравнения } d\varepsilon/d\tau + \mu \varepsilon = \mu \sigma_0 / E_d$$

при начальном условии $\varepsilon(0) = \varepsilon_0 = \sigma_0 / E_m$ имеет вид

$$\varepsilon(\tau) = \sigma_0 [1 - (1 - E_d / E_m) \exp(-\mu\tau)] / E_d.$$

График полученной зависимости $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ является кривой ползучести.

Случай релаксации ($\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$).

Решение уравнения $d\sigma/d\tau + \mu E_M \sigma / E_d = \mu E_M \varepsilon_0$

при начальном условии $\sigma(0) = \sigma_0 = E_M \varepsilon_0$ имеет вид

$$\sigma(\tau) = \sigma_0 \left[(1 - E_d / E_M) \cdot \exp(-\mu E_M \cdot \tau / E_d) + E_d / E_M \right].$$

График зависимости $\sigma = \sigma(\tau)$ является кривой релаксации.

Проблема длительной прочности вязкоупругих материалов является достаточно сложной, особенно в случаях ярко выраженных анизотропных свойств (что характерно для композитов), смешанного разрушения (вязкого и хрупкого), переменного нагружения и сложного напряженно-деформированного состояния.

Ограничимся рассмотрением длительной прочности изотропных полимерных материалов в условиях постоянного нагружения при растяжении, опираясь на простые эмпирические зависимости экспоненциального

$$\tau_* = B(T) \exp[-\beta(T)\sigma]$$

и степенного вида

$$\tau_* = C(T) \cdot \sigma^{-\alpha},$$

где τ_* – время разрушения.

Так, например, оценить длительную прочность полимерного материала типа полиэтилена низкого давления можно по известной формуле С.Н. Журкова

$$\tau_* = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma) / RT],$$

а полимерного материала типа ненаполненной резины по степенной формуле

$$\tau_* = C_0 \exp(U_0 / RT) \sigma^{-\alpha},$$

где $\tau_0, U_0, \gamma, C_0, \alpha$ – параметры свойств материала, $R=8,31451$ Дж/(моль °К) – газовая постоянная, T – температура, °К.

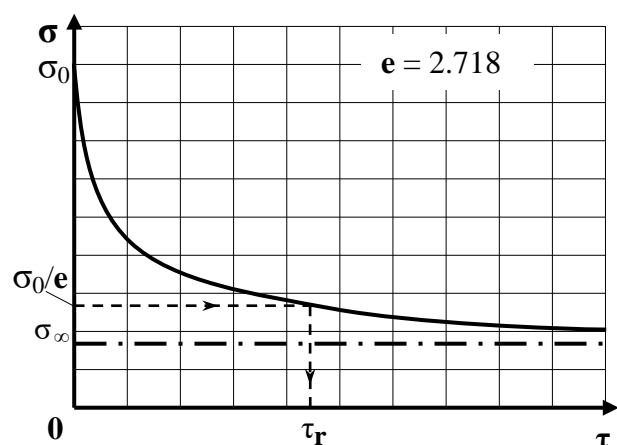
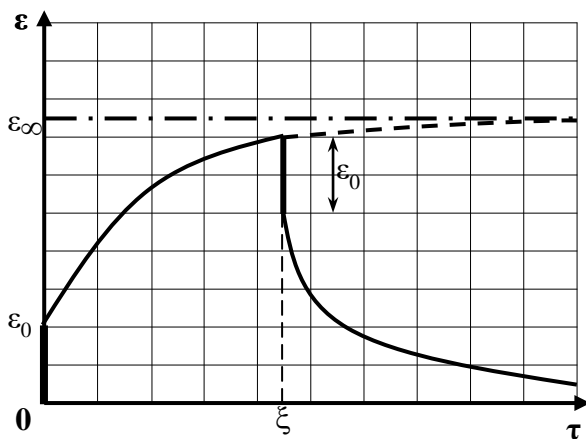


Рис.4.1. Зависимость ползучести $\varepsilon(\tau)$

Рис.4.2. Кривая релаксации $\sigma(\tau)$

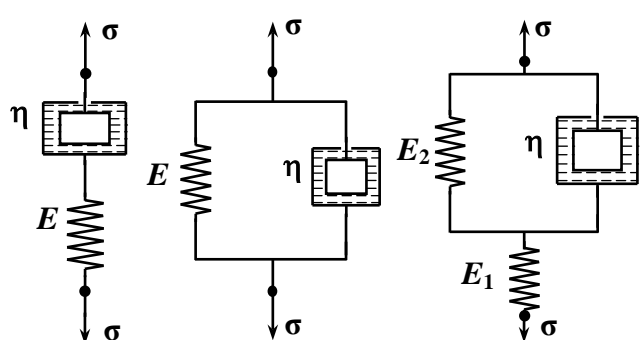
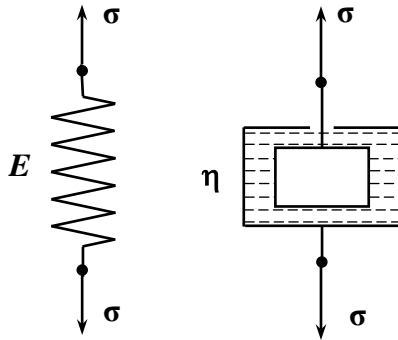


Рис.4.3. Упругий и вязкий элементы

Рис.4.4. Модели материала Максвелла, Фохта и Кельвина (слева направо)

Цель работы – ознакомление с основными свойствами вязкоупругих материалов и расчет для них конкретных характеристик ползучести, релаксации и длительной прочности по данным экспериментов.

Исходные данные к заданию 4

Таблица 4.1

Номер строки	σ_0 , МПа	E_M , ГПа	E_d / E_M	μ , час ⁻¹	$\tau_p \cdot 10^{13}$, сек	U_0 , кДж/моль (полиэтилен)	γ , кДж/моль (МПа) (полиэт.)	t , °C	σ_* , МПа, (полиэтилен)	$C_0 \cdot 10^4$, сек/ (МПа) ^{-α}	U_0 , кДж/моль (резина)	α	σ_* , МПа, (резина)
0	40	60	0,34	0,10	10	160	0,10	100	200	1,0	70	4,0	25
1	22	15	0,16	0,01	1	106	0,01	10	110	0,1	61	3,1	2,5
2	24	20	0,18	0,02	2	112	0,02	20	120	0,2	62	3,2	5,0
3	26	25	0,20	0,03	3	118	0,03	30	130	0,3	63	3,3	7,5
4	28	30	0,22	0,04	4	124	0,04	40	140	0,4	64	3,4	10,0
5	30	35	0,24	0,05	5	130	0,05	50	150	0,5	65	3,5	12,5
6	32	40	0,26	0,06	6	136	0,06	60	160	0,6	66	3,6	15,0
7	34	45	0,28	0,07	7	142	0,07	70	170	0,7	67	3,7	17,5
8	36	50	0,30	0,08	8	148	0,08	80	180	0,8	68	3,8	20,0
9	38	55	0,32	0,09	9	154	0,09	90	190	0,9	69	3,9	22,5
Шифр	А				Б				В				

Задание 4. В соответствии с данными табл.4.1 требуется:

1. Построить кривую ползучести при $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ для вязкоупругого материала с заданными параметрами свойств E_m , E_d и μ , используя модель Кельвина.
2. Построить кривую релаксации при $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$ для того же вязкоупругого материала, используя модель Кельвина. Определить графически и численно время релаксации τ_r .
3. Вычислить время разрушения τ_* полимерного материала типа полиэтилена низкого давления при заданных пределе длительной прочности σ_* и температуре T , используя экспоненциальную зависимость $\tau_*(\sigma)$ (формула Журкова). Проверить полученный результат.
4. Вычислить время разрушения τ_* полимерного материала типа ненаполненной резины при заданных пределе длительной прочности σ_* и температуре T , используя степенную зависимость $\tau_*(\sigma)$. Проверить полученный результат.

Пример выполнения задания 4

Условия задания 4 даны в табл. 4.1.

Исходные данные примера представлены в табл. 4.2

Исходные данные к примеру задания 4

Таблица 4.2

σ_0 , МПа	E_m , ГПа	E_d/E_m	μ , час ⁻¹	$\tau_0 \cdot 10^{13}$, сек	U_0 , кДж/моль (полиэтилен)	γ , кДж/моль (полиэтилен)	t , °C	σ_* , МПа, (полиэтилен)	$C_0 \cdot 10^4$, сек / (МПа) ^{-α}	U_0 , кДж/моль (резина)	α	σ_* , МПа (резина)
42	70	0,17	0,13	0,8	125	0,0732	70	100	1,14	73	2,8	11

Примечание. При выполнении задания аналогичные данные, соответствующие своему шифру, необходимо взять из табл. 4.1.

Решение

1. *Построение кривой ползучести вязкоупругого материала с использованием модели Кельвина.*

Модель Кельвина дает следующую зависимость $\varepsilon(\tau)$ при $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ (случай ползучести)

$$\varepsilon(\tau) = \sigma_0 [1 - (1 - E_d/E_m) \exp(-\mu\tau)] / E_d$$

при начальном условии $\epsilon(0) = \epsilon_0 = \sigma_0/E_M$.

В нашем случае начальная деформация и длительный модуль упругости соответственно равны $\epsilon_0 = 42/70 \cdot 10^3 = 0,6 \cdot 10^{-3}$; $E_d = 0,17 \cdot E_M = 0,17 \cdot 70 = 11,9$ ГПа = $11,9 \cdot 10^3$ МПа, тогда

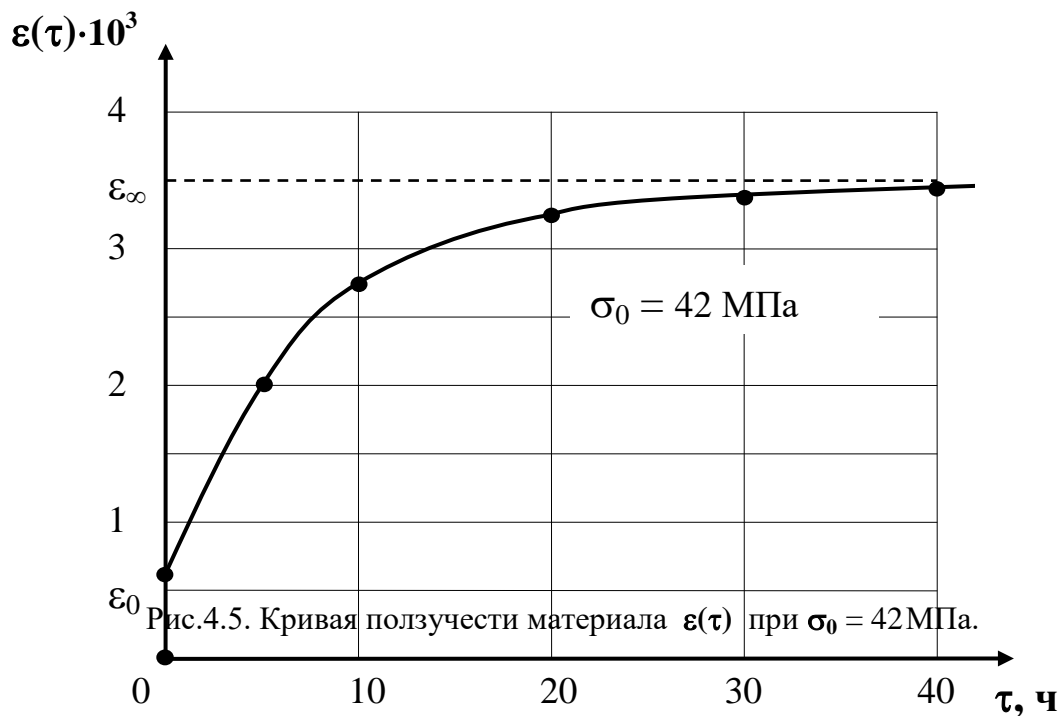
$$\epsilon(\tau) = 42 \cdot [1 - (1 - 0,17) \cdot \exp(-0,13\tau)] / 11,9 \cdot 10^3 = 3,53 \cdot 10^{-3} [1 - 0,83 \cdot \exp(-0,13\tau)] = 3,53 \cdot 10^{-3} - 2,93 \cdot 10^{-3} \exp(-0,13\tau).$$

Итак, окончательно $\epsilon(\tau) = 3,53 \cdot 10^{-3} - 2,93 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-0,13\tau)$.

Результаты расчета функции $\epsilon(\tau)$ сведены в табл. 4.3

τ , час	$-0,13\tau$	$\exp(-0,13\tau)$	$\epsilon(\tau)$
0	0	1	$0,60 \cdot 10^{-3}$
5	-0,65	0,522	$2,00 \cdot 10^{-3}$
10	-1,3	0,273	$2,73 \cdot 10^{-3}$
20	-2,6	0,0743	$3,31 \cdot 10^{-3}$
30	-3,9	0,0202	$3,47 \cdot 10^{-3}$
40	-5,2	0,0055	$3,51 \cdot 10^{-3}$
∞	$-\infty$	0	$3,53 \cdot 10^{-3}$

График зависимости $\epsilon(\tau)$, построенный по данным табл. 4.3, показан на рис. 4.5.



2. Построение кривой релаксации вязкоупругого материала с использованием модели Кельвина.

Модель Кельвина дает следующую зависимость $\sigma(\tau)$ при $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$ (случай релаксации) :

$$\sigma(\tau) = \sigma_0 \left[(1 - E_d/E_M) \exp(-\mu E_M \tau/E_d) + E_d/E_M \right]$$

при начальном условии $\sigma(0) = \sigma_0 = E_M \varepsilon_0$

В нашем случае начальное напряжение равно $\sigma_0 = 42$ МПа, а отношение модулей $E_M/E_d = 1/(E_d/E_M) = 1/0,17 = 5,88$, тогда

$$\sigma(\tau) = 42 \cdot [(1 - 0,17) \exp(-0,13 \cdot 5,88 \cdot \tau) + 0,17] = 42 \cdot [0,83 \exp(-0,765 \cdot \tau) + 0,17] = 34,9 \cdot \exp(-0,765 \cdot \tau) + 7,14.$$

Итак, окончательно $\sigma(\tau) = 34,9 \exp(-0,765 \tau) + 7,14$.

Результаты расчета функции $\sigma(\tau)$ сведены в табл. 4.4

Результаты расчета функции $\sigma(\tau)$

Таблица 4.4

τ , час	$-0,765\tau$	$\exp(-0,765\tau)$	$\sigma(\tau)$
0	0	1	42
1	-0,765	0,465	23,4
2	-1,53	0,217	14,7
3	-2,30	0,101	10,7
4	-3,06	0,0469	8,77
5	-3,82	0,0218	7,90
∞	$-\infty$	0	7,14

График зависимости $\sigma(\tau)$, построенный по данным табл. 4.4, показан на рис. 4.6.

Вычисление времени релаксации τ_r .

По определению $\sigma(\tau_r) = \sigma_0/e$, где $e \approx 2,718$.

В нашем случае $\sigma(\tau_r) = 42/2,718 = 15,5$ МПа. Время τ_r , соответствующее напряжению $\sigma(\tau_r) = \sigma_0/e = 15,5$ МПа и есть время релаксации. Откладывая на рис. 4.6 по оси σ напряжение, равное 15,5 МПа и проводя соответствующую горизонтальную линию до пересечения с $\sigma(\tau)$, получим $\tau_r \approx 1,8$ ч.

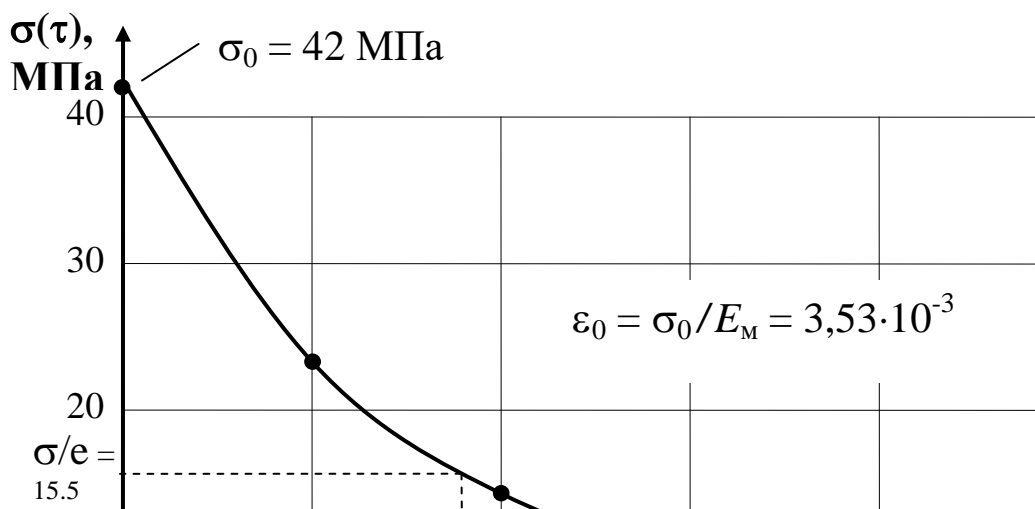


Рис.4.6. Кривая релаксации материала $\sigma(\tau)$ при $\epsilon_0 = 3,53 \cdot 10^{-3}$

Проверим это значение численно, разрешив зависимость $\sigma(\tau)$ относительно τ :

$$\tau = - \ln[(\sigma/\sigma_0 - E_d/E_m)/(1 - E_d/E_m)] \cdot E_d/\mu E_m,$$

откуда для τ_r получим

$$\tau = - \ln[(1/e - E_d/E_m)/(1 - E_d/E_m)] \cdot E_d/\mu E_m.$$

В нашем случае

$$\begin{aligned} \tau_r &= - \ln[(1/2,718 - 0,17)/(1 - 0,17)] \cdot 0,17/0,13 = - 1,31 \cdot \ln[(0,368 - 0,17)/0,83] = \\ &= - 1,31 \ln 0,239 = - 1,31 \cdot (-1,43) = 1,87 \text{ ч,} \end{aligned}$$

что (с точностью до погрешности построения) соответствует значению, найденному графически $\tau_r \approx 1,8$ ч.

3. *Вычисление времени разрушения τ_* полимерного материала типа полиэтилена низкого давления при заданных σ и T .*

Экспоненциальная зависимость $\tau_*(\sigma, T)$ (формула Журкова) имеет вид

$$\tau_* = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma \sigma) / RT]$$

В данном случае

$$\tau_* = 0,8 \cdot 10^{-13} \cdot \exp [(125 \cdot 10^3 - 0,0732 \cdot 10^3 \cdot 100) / 8,3145 \cdot 343] =$$

$$= 0,8 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(118 \cdot 10^3 / 2,85 \cdot 10^3) = 0,8 \cdot 10^{-13} \cdot \exp 41,3 =$$

$$= 0,8 \cdot 10^{-13} \cdot 8,32 \cdot 10^{17} = 6,65 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 18,5 \text{ ч},$$

где учтено, что $T = t + 273 = 70 + 273 = 343^\circ\text{К}$.

Проверим полученный результат, подставив $\tau_* = 66500 \text{ с}$ в формулу Журкова, разрешенную относительно σ .

$$\sigma = [U_0 - RT \cdot \ln(\tau_* / \tau_0)] / \gamma =$$

$$= [125 \cdot 10^3 - 8,3145 \cdot 343 \cdot \ln(6,65 \cdot 10^4 / 0,8 \cdot 10^{-13})] / 0,0732 \cdot 10^3 =$$

$$= [125 - 2,85 \cdot \ln(8,32 \cdot 10^{17})] / 0,0732 = (125 - 117) / 0,0732 = 100 \text{ МПа}.$$

Полученный результат соответствует заданному пределу длительной прочности $\sigma_{\tau_*}^t = \sigma_{18,5}^{70} = 100 \text{ МПа}$, следовательно время разрушения материала $\tau_* = 66500 \text{ с} \approx 18,5 \text{ ч}$ определено верно.

4. Вычисление времени разрушения τ_* полимерного материала типа резины при заданных σ и T .

Степенная зависимость $\tau_*(\sigma, T)$ для резины имеет вид

$$\tau_* = C_0 \cdot \exp(U_0 / RT) \cdot \sigma^{-\alpha}.$$

В данном случае

$$\tau_* = 1,14 \cdot 10^{-4} \exp(73 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 343) \cdot 11^{-2,8} = 1,14 \cdot 10^{-4} \exp(25,6) 1,21 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1,14 \cdot 10^{-4} \cdot 1,31 \cdot 10^{11} \cdot 1,21 \cdot 10^{-3} = 181 \cdot 10^4 \text{ с} = 5,02 \text{ ч}.$$

Проверим полученный результат, подставив $\tau_* = 18100 \text{ с}$ в степенную зависимость $\tau_*(\sigma)$, разрешенную относительно σ .

$$\sigma = [\tau_* / C_0 \cdot \exp(U_0 / RT)]^{-1/\alpha} = [18100 / 1,14 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(73 \cdot 10^3 / 8,3145 \cdot 343)]^{-1/2,8} =$$

$$= [18100 / 1,14 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(25,6)]^{-0,357} = (18100 / 1,14 \cdot 10^{-4} \cdot 1,31 \cdot 10^{11})^{-0,357} =$$

$$= (1,21 \cdot 10^{-3})^{-0,357} \approx 11 \text{ МПа}.$$

Полученный результат соответствует заданному пределу длительной прочности $\sigma_{\tau_*}^t = \sigma_5^{70} = 11 \text{ МПа}$, следовательно, время разрушения материала $\tau_* = 18100 \text{ с} \approx 5,02 \text{ ч}$ определено верно.

Ответ:

$$\varepsilon(\tau) = 3,53 \cdot 10^{-3} - 2,93 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-0,13\tau);$$

$$\sigma(\tau) = 34,9 \exp(-0,765 \tau) + 7,14; \quad \tau_r = 1,87 \text{ ч}, (\tau_r \approx 1,8 \text{ ч из графика})$$

$$\tau_* = 66500 \text{ с} \approx 18,5 \text{ ч (полиэтилен)};$$

$$\tau_* = 18100 \text{ с} \approx 5,02 \text{ ч (резина)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самостоятельное качественное выполнение расчетно-графической работы, представленной в данном учебном пособии, играет важную роль в освоении курса материаловедения и технологии материалов. Изучение курса, состоящего из двух разделов (раздел I. Материаловедение; раздел II. Технология материалов), заканчивается дифференцированным зачетом.

Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине "Материаловедение и технология материалов"

1. Назовите типы химической связи и объясните их природу.
2. Как влияет повышение давления в системе на температуру перехода из жидкого в твердое состояние?
3. В чем принципиальное различие аморфного и кристаллического состояния вещества?
4. Назовите основные типы кристаллических решеток в металлах.
5. Что такое макроструктурный анализ и каковы его возможности?
6. Что такое микроструктурный анализ и каковы его возможности?
7. Какие элементы строения металла относятся к понятию "тонкая структура"?
8. Назовите факторы, влияющие на конструкционную прочность (долговечность и надежность) изделий и деталей машин.
9. Назовите типичный порядок этапов работ по созданию и внедрению новых материалов для производства деталей.
10. Перечислите основные параметры механических свойств материалов, определяемые при испытаниях на растяжение.
11. Что такое "ударная вязкость"? Каковы обозначения, размерности и назначение этого параметра?
12. Что такое "предел выносливости"? Приведите примеры изделий, для которых этот параметр является определяющим.
13. Укажите основной принцип испытаний твердости материалов и назовите основные методы.
14. Объясните принцип испытаний материалов "на износ".
15. Что такое "жаропрочность" и какими параметрами она характеризуется?
16. Объясните основной принцип коррозионных испытаний и укажите параметры оценки коррозионной стойкости.
17. Перечислите температурные характеристики материалов и укажите

области их применения.

18. Что такое "хладноломкость" и какими параметрами она характеризуется?
19. В чем различие между ферромагнитными, парамагнитными и диамагнитными материалами?
20. Приведите примеры технологических свойств материалов.
21. Назовите основные методы неразрушающего контроля материалов и объясните их назначение.
22. Дайте определение понятию "металлический сплав", приведите примеры.
23. Назовите основные признаки химических соединений в структуре металлических сплавов.
24. Назовите основные признаки твердых растворов в металлических сплавах.
25. Как изменяются свойства сплавов в случае образования механических смесей чистых компонентов (эвтектик), твердых растворов и химических соединений?
26. По какому признаку на диаграммах состояния можно определить принципиальную возможность упрочняющей термической обработки отдельных сплавов?
27. Назовите условия образования и типы неравновесных структур с повышенной прочностью в сталях.
28. Перечислите основные фазы по диаграмме "железо-углерод" и дайте их определения.
29. Укажите принцип выбора режимов и назначение рекристаллизационного отжига.
30. Назовите назначение и режимы отжига углеродистых сталей.
31. Назовите назначение и режимы нормализации углеродистых сталей.
32. Назовите режимы и назначение закалки углеродистых сталей.
33. Назовите назначение и режимы различных видов отпуска сталей.
34. Перечислите виды химико-термической обработки сталей и укажите их основное назначение.
35. Укажите принцип выполнения поверхностной закалки стали и назначение данной операции термической обработки.
36. Перечислите химические элементы, обязательно входящие в состав углеродистых сталей и объясните их влияние на свойства сталей.
37. Приведите марки и назначение углеродистых сталей обыкновенного качества.
38. Приведите примеры марок качественной конструкционной углеродистой стали и их назначение.
39. Приведите примеры марок инструментальных углеродистых сталей и укажите их назначение.

40. Укажите принципы маркировки, структуру, получение и назначение серого чугуна.
41. Укажите принципы маркировки, структуру, получение и назначение высокопрочного чугуна.
42. Укажите принципы маркировки, структуру, получение и назначение ковкого чугуна.
43. Укажите преимущества и недостатки серых чугунов в сравнении со сталями.
44. Перечислите основные цели легирования сталей.
45. Расшифруйте химические составы сталей марок 40Х, 20Х2Н4А, 9ХС.
46. Укажите особенности химического состава и назначение строительных, цементуемых и улучшаемых конструкционных сталей.
47. Укажите особенности химического состава и назначение углеродистых, легированных и быстрорежущих инструментальных сталей для режущих инструментов.
48. Укажите основные свойства, состав, маркировку и назначение твердых сплавов.
49. Укажите, примеры марок и основные свойства штамповых сталей для холодного и горячего деформирования металлов.
50. Укажите типы и температурные области применения жаропрочных сталей и сплавов.
51. Укажите типы и области применения жаростойких сталей и сплавов.
52. Укажите достоинства и недостатки медных сплавов.
53. Укажите достоинства и недостатки алюминиевых сплавов.
54. Укажите достоинства титановых сплавов и их применение в технике.
55. Укажите достоинства магниевых сплавов и основные области их применения в технике.
56. Объясните принцип получения чугуна в доменных печах.
57. Объясните принцип получения и особенности производства стали в кислородных конвертерах.
58. Объясните принципы работы и особенности производства стали в мартеновских печах.
59. Объясните принципы работы электродуговых печей и особенности производства в них сталей.
60. Укажите способы разливки стали, их особенности, преимущества и недостатки.
61. Что означают понятия "холодная" и "горячая" пластическая деформация? Как влияют эти виды деформации на свойства металла?
62. Перечислите методы обработки металлов давлением и укажите их назначение.
63. Перечислите основные методы получения металлических отливок и

укажите их назначение.

64. Укажите принципиальные отличия следующих способов получения неразъемных соединений сварки плавлением, сварки давлением, пайки.
65. Перечислите основные операции (виды) обработки резанием и их назначение.
66. Укажите принципы строения и основные свойства пластмасс.
67. В чем сходство и различие термопластов и реактопластов?
68. Назовите основные физические свойства пластмасс (в сравнении со сталью).
69. Охарактеризуйте механические свойства термопластов (в сравнении со сталью).
70. Объясните методы производства деталей из пластмасс.
71. Укажите достоинства и недостатки пластмасс в сравнении со сталью.
72. Поясните состав, строение, метода получения и основные свойства резин.
73. Назовите компоненты и поясните строение неорганических стекол.
74. Каковы основные свойства технических стекол и технология получения изделий из них?
75. Объясните строение, принципы получения и характерные свойства технической керамики.
76. Особенности строения композитов, роль армирующих компонентов и матрицы?
77. Укажите принципы выбора материалов для армирующих элементов и матриц композитов. Приведите примеры.

Освоение курса материаловедения и технологии материалов является необходимым условием успешного изучения специальных инженерных дисциплин и получения квалификации инженера пожарной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Материаловедение и технология металлов. Под ред. *Фетисова Г.П.* – М.: Высшая школа, 2000. – 640 с.
2. Материаловедение / Под общ. ред. *Арзамасова Б.Н., Мухина Г.Г.* – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 648 с.
3. Лабораторный практикум по курсу «Материаловедение и технология материалов». Учебное пособие / *Ильин В.Н., Ушаков Б.К.* – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 76 с.

Дополнительная

4. *Жадан В.Т., Полухин П.И., Нестеров А.Ф.* и др. Материаловедение и технология материалов. – М.: Металлургия, 1994. – 622 с.
5. *Солнцев Ю.П., Веселов В.А.* и др. Металловедение и технология металлов. – М.: Металлургия, 1988. – 512 с.
6. *Арзамасов Б.Н., Крашенинников А.И.* и др. Научные основы материаловедения. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. – 366 с.
7. *Пикунов М.В., Десипри А.И.* Металловедение. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Плотность ρ некоторых твердых материалов, жидкостей и газов (при 20°C)

Вещество	ρ, кг/м³	Вещество	ρ, кг/м³
<i>Металлы и сплавы</i>		<i>Пластмассы и пластики</i>	
Алюминий	2700	Асботекстолит	1500-1700
Бронза	8700-8900	Винипласт	1400
Вольфрам	19340	Гетинакс	1300-1400
Дуралюмин	2790	Плексиглас	1200
Железо	7880	Стеклотекстолит	1600-1900
Латунь	8400-8700	Текстолит	1300-1400
Медь	8900	Фторопласты	2100-2400
Олово	7290	<i>Дерево (воздушно-сухое)</i>	
Свинец	11350	Бамбук	400
Серебро	10500	Береза	700
Сталь	7700-7900	Дуб, бук	700-900
Титан	4500	Сосна, ель	400-500
Уран	1910	Ясень	600-800
Хром	7150	<i>Другие материалы</i>	
Цинк	7150	Бумага конденсаторная	800-1350
Чугун	7000	Резина обыкновенная	1200
<i>Минералы</i>		Ситаллы	2400-2950
Алмаз	3510	Стекло	2210-2590
Асбест	2350-2600	Фарфор	2200-2400
Графит	2210-2250	Эбонит	1200
Кальцит	2600-2800	Асбестовая бумага	850-900
Кварц	2650	Вата х/б (сухая)	80
Слюда	2600-3200	Гравий (сухой)	1840
<i>Горные породы</i>		Известь (порошок)	500
Базальт	2800-3200	Пенобетон	300-1200
Граниты	2500-3000	Песок	1200-1600
Каменный уголь	1200—1500	Цемент (порошок)	1400
Мел (воздушно-сухой)	2000	Шлак котельный	900-1300
Мрамор	2500-2800	Шлакобетон	1500
<i>Газы (при 760 мм рт.)</i>		<i>Жидкости</i>	
Азот	1,251	Вода	997,2
Ацетилен	1,173	Бензин	680-720
Аргон	1,783	Масло машинное	900
Воздух (сухой)	1,204	Нефть	760-850
Кислород	1,429	Спирт	790
		Ртуть	13550

Таблица 2

**Коэффициент линейного теплового расширения α
для некоторых твердых материалов**

Материал	Интервал температур, °С	$\alpha \cdot 10^5, 1/°С$	Материал	Интервал температур, °С	$\alpha \cdot 10^5, 1/°С$
<i>Стали:</i>			<i>Минералы:</i>		
углеродистые	20-600	1,1-1,5	апатит	20-100	1,7
легированные	20-600	1,1-1,9	галит	20-100	4,0
жаропрочные	20-600	1,0-1,2	гематит	20-100	0,8
нержавеющие	20-600	1,4-1,9	доломит	20-100	0,9
<i>Чугуны</i>	20-100	1,0-1,72	кальцит	20-100	1,3
<i>Алюминий и его сплавы</i>	20-100	1,3-2,4	кварц	20-100	1,3
<i>Медь</i>	20-100	1,7	корунд	20-100	0,6
<i>Бронза</i>	20-100	1,8	магнетит	20-100	1,6
<i>Латунь</i>	20-100	1,9	пирит	20-100	3,2
<i>Олово</i>	20-100	2,7	халцедон	20-100	1,4
<i>Никель</i>	20-100	1,3	<i>Горные породы:</i>		
<i>Цинк</i>	20-100	2,6	граниты	20-100	0,6-0,9
<i>Алмаз</i>	20-50	0,1	диабаз	20-100	0,54
<i>Графит</i>	20-50	0,8	известняки	20-100	0,5-0,9
<i>Стекло</i>	20-100	0,7	кварцит	20-100	1,1
<i>Стекло кварцевое</i>	20-100	0,02-0,05	мрамор	20—100	0,3-1,5
<i>Фарфор</i>	20-600	0,3-0,4	песчаники	20-100	0,5-1,2
<i>Керамика</i>	20-600	0,4-1,3	сланцы	20-100	0,4-0,9

Модуль Юнга некоторых материалов

Материал	Модуль Юнга, Е, ГПа
<i>Сталь</i>	195-206
<i>Серый чугун</i>	108-116
<i>Вольфрам</i>	390
<i>Медь</i>	82-123
<i>Бронза</i>	113
<i>Латунь</i>	89-98
<i>Алюминий</i>	63-71
<i>Дуралюмин</i>	73
<i>Свинец</i>	16
<i>Серебро</i>	79-83
<i>Каучук</i>	$7,9 \cdot 10^3$
<i>Резина вулканизированная мягкая</i>	$(1,5-3,0) \cdot 10^{-3}$
<i>Полистирол</i>	3,2
<i>Плексиглас</i>	3,2
<i>Стекло</i>	4,9-7,8
<i>Керамика</i>	21,4-48
<i>Ситаллы</i>	84-141
<i>Текстолит</i>	3,9-6,4
<i>Асботекстолит</i>	14-20
<i>Гранит</i>	35-50
<i>Известняк плотный</i>	35
<i>Мрамор</i>	35-50

Таблица 4

Ударная вязкость некоторых материалов

Материал	Ударная вязкость, кДж/м ²
<i>Стекло</i>	1,5-2,5
<i>Ситаллы</i>	4,5-10,5
<i>Композиционные материалы с полимерной матрицей:</i>	
• карбоволокниты	44-84
• бороволокниты	78-110
• органоволокниты с эластичным волокном	500-600
<i>Газонаполненные пластмассы (кроме поролон)</i>	0,04-1,9
<i>Текстолит</i>	30
<i>Гетинакс</i>	12—25
<i>Асботекстолит</i>	20-25
<i>Стеклотекстолит</i>	50-200
<i>Органическое стекло</i>	8-18
<i>Фторопласт</i>	20-160
<i>Сплавы титана</i>	300-500
<i>Стали легированные</i>	400-1000
<i>Стали легированные после термообработки</i>	До 1300

**Сравнительные значения твердости для
некоторых материалов**

а) Металлические сплавы

Материал	Твердость по Бринеллю <i>НВ</i> , МПа
<i>Стали конструкционные, термически не обработанные</i>	1300-3000
<i>Чугуны:</i>	
• серые	1400-2900
• высокопрочные	1400-3700
• жаропрочные	2000-5500
<i>Сплавы цветных металлов:</i>	
• бронзы	800-1800
• латуни	300-1600

б) Горные породы

Материал	Твердость (контактная прочность) по Барону P_k , МПа
<i>Апатит — минерал</i>	1300-1400
<i>Габбро</i>	2800-3000
<i>Граниты</i>	2000-2500
<i>Диорит-порфириты</i>	2400-2600
<i>Известняки</i>	1200-1400
<i>Железистые кварциты КМА</i>	6000-6800
<i>Мрамор</i>	700-1400
<i>Песчаники кварцевые</i>	1600-2000
<i>Скарны</i>	4500-5000

Таблица 6

**Сравнительные значения удельного электрического сопротивления
различных материалов**

Материал	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Материал	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Проводники твердые			
<i>Металлы (ρ, 10^{-8})</i>		<i>Сплавы (ρ, 10^{-6})</i>	
Цинк	5,9	X27Ю5Т	1,37-1,47
Вольфрам	5,5	X23Ю5Т	1,34-1,45
Молибден	5,4	X23Ю5	1,30-1,40
Алюминий:		XН70ЮН	1,25-1,35
• мягкий	2,95	X15Ю5	1,24-1,34
• твердый	2,95	X15Н60-Н	1,07-1,18
• провод	2,7	X2ОН80-Н	1,07-1,18
Медь:		XН20ЮС	0,99-1,07
• мягкая	1,72	Константан, МНМц-40-1,5	0,48
• твердая	1,79-1,82	Никелин, МНМц-31-1	0,42
• провод	1,78	Манганин, МНМц-3-П	0,43
Серебро	1,6	Латунь	0,26
Свинец	21	Сталь	0,15-0,07
Олово	12	Чугун серый	1,0
Полупроводники			
Германий	$(0,1-50) \cdot 10^{-2}$	Кремний	$(10-6000) \cdot 10^{-2}$
Диэлектрики твердые			
Мрамор	10^8	Резина твердая	$10^{13}-10^{15}$
Дерево сухое	10^9-10^{13}	Слюда	10^{14}
Стекло	10^9-10^{12}	Фарфор	10^{14}
Полиэтилен	$10^{10}-10^{13}$	Бумага	10^{15}
Плексиглас	10^{13}	Эбонит	10^{16}
Полихлорвинил	10^{13}	Янтарь	10^{18}
Диэлектрики жидкие			
Керосин	$10^{10}-10^{12}$	Вода дистиллированная	10^4

Таблица 7

Относительная ϵ и абсолютная ϵ_a диэлектрические проницаемости некоторых материалов при 20°C

Вещество	ϵ	ϵ_a , пФ/м	Вещество	ϵ	ϵ_a , пФ/м
<i>Газы</i>			Воск пчелиный	2,8-2,9	25-26
Азот	1,00060	8,85531	Гетинакс	3,5-6,5	31-57
Водород	1,00027	8,85238	Дерево	2,2-3,7	19-33
Воздух	1,00058	8,85491	Канифоль	3-3,5	27-32
Кислород	1,00055	8,85487	Капрон	3,6-5,0	32-44
Углекислый газ	1,00096	8,85850	Кварц	4,3	38
<i>Жидкости</i>			Мрамор	8-10	71-98
Бензин	1,9-2,0	17-18	Парафин	1,9-2,2	17-19
Вода	81	717	Пластик (поливинильный)	2,8-4,8	25-42,5
Глицерин	39,1	346	Плексиглас	3-3,6	27-32
Керосин	2,1	18,6	Полихлорвинил	3-5	27-44
Масло:			Полиэтилен	2,2-2,4	19-21
• касторовое	4,5-4,8	40-42	Резина	2,6-3	23-27
• трансформаторное	2,1-2,4	18-21	Слюда	4-8	35-71
Скипидар	2,2	19	Стекло	5-10	44-88
Спирт этиловый	25,0	221	Текстолит	7	62
Эфир этиловый	4,4	39	Титанат бария	1200	10600
<i>Твердые тела</i>			Фарфор	4,4-4,5	39-60
Бумага сухая	2-2,5	18-22	Эбонит	4-4,5	35-40

Таблица 8

Механические свойства и примерное назначение углеродистой стали обыкновенного качества

Марки стали всех степеней раскисления	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Предел текучести для толщин 5—100 мм σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Примерное назначение
Ст 0	310	—	23—20	Неответственные и малонагруженные детали и элементы конструкций
Ст 1	310—430	—	35—31	Детали высокой вязкости, не подвергающиеся действию больших напряжений
Ст 2	330—450	190—230	33—25	Малоответственные элементы конструкций и детали машин, не подвергаемые термообработке
Ст 3	380—500	220—250	27—23	
Ст 4	410—540	230—260	25—21	
Ст 5	460—600	260—280	20—17	Умеренно нагруженные детали машин и элементы конструкций
Ст 6	600	300—340	15—12	Детали машин повышенной твердости, подвергаемые термообработке

Таблица 9

Механические свойства и примерное назначение углеродистой конструкционной стали

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСV, кгс·м/см ²	Примерное назначение
08	196	324	33	60	—	Умеренно статически нагруженные детали, не подвергаемые термообработке
10	206	321	31	55	—	
15	225	373	27	55	—	Малонагруженные динамическими нагрузками детали
20	245	422	25	55	—	Износоустойчивые детали, работающие при наличии ударных нагрузок
25	274	451	23	50	9	
30	294	490	21	50	8	Умеренно нагруженные детали, подлежащие термообработке
35	314	529	20	45	7	
40	321	568	19	45	6	
45	353	598	16	40	5	Умеренно нагруженные детали высокой прочности и твердости
50	373	627	14	40	4	
55	382	647	13	35	—	
60	409	676	12	35	—	Детали, получаемые холодной штамповкой

Таблица 10

Механические свойства и примерное назначение чугунов

Чугун	Марка	Предел прочности		Твердость, НВ	Примерное назначение
		при растяжении, МПа	при изгибе, МПа		
Серый ГОСТ 1412—07	СЧ00	—	—	—	Неответственное литье без оговоренных требуемых механических свойств
	СЧ 12-28	120	280	143-229	Умеренно нагруженные детали, к которым предъявляется требование легкости, а не прочности
	СЧ 15-32	150	320	163-229	Умеренно нагруженные детали, работающие при давлении между трущимися поверхностями 5 кгс/см ²
	СЧ 21-40	210	400	170-241	Высоконагруженные детали, работающие на износ, в узлах высокой герметичности
	СЧ 32-52	320	520	187-255	Ответственные отливки с толщиной стенок до 100 мм, работающие при больших нагрузках
Ковкий ГОСТ 1215-59	КЧ 30-6	300	600-1100	163	Детали, работающие при низких статических и динамических нагрузках
	КЧ 33-8	330	600-1100	163	Детали, работающие при умеренных статических и динамических нагрузках
	КЧ 37-12	370	600-1100	163	Детали, работающие при высоких динамических и статических нагрузках
Высокопрочный с шаровидным графитом ГОСТ 7293—70	ВЧ 50-2	500	900	180-260	Ответственные детали, испытывающие вибрационные нагрузки
	ВЧ 45-5	450	330	160-220	Детали, работающие на износ и испытывающие вибрационные нагрузки

Таблица 11

Механические свойства некоторых легированных конструкционных сталей

Марка стали	Предел прочности σ_B, МПа	Предел текучести σ_T, МПа	Марка стали	Предел прочности σ_B, МПа	Предел текучести σ_T, МПа
20Г	460	280	30ХМ	950	750
30Г	550	320	40ХН	1000	800
50Г	660	400	12ХН3А	950	700
15Х	700	500	30ХГС	1100	850
40Х	1000	800	30ХГСА	1650	1300
50Х	1100	900	15ХФ	750	550
18ХГТ	1000	900	38ХГН	800	700
30ХГТ	1500	1300	38ХЮ	900	750

Примерное назначение некоторых жаростойких сталей

Материал	Назначение	Рекомендуемая максимальная температура применения, °С (в течение длительного времени-до10000 ч)	Температура начала интенсивного окалина- образования, °С
40Х9С2	Теплообменники	—	850
15Х6СЮ	Детали котельных установок, трубы	—	800
12Х13	Детали турбин, трубы, детали котлов	—	700
09Х14Н16Б	Трубы пароперегревателей и трубопроводы установок сверхвысокого давления	650	850
12Х18Н12Т	Трубы	800	850
ХН28ВМАБ	Листовые детали турбин	(до 1000 ч) 800-1000	1100

Примерное назначение некоторых жаропрочных сталей

Материал	Назначение	Рекомендуемая максимальная температура применения, °С (в течение длительного времени- до10000 ч)	Температура начала интенсивного окалино- образования, °С
40X9C2	Крепежные детали	650	850
11X11H2B2MФ	Диски компрессора, лопатки и другие нагруженные детали	600	750
20X13	Лопатки паровых турбин	550	700
15X12BHMФ	Роторы, диски, лопатки, болты	780	950
37X12H8Г8MФБ	Диски турбин	630	750
ХН35ВТ	Лопатки газовых турбин, диски, роторы, крепежные детали	750	900
ХН77ТЮРУ	Диски, лопатки турбин	750	1050

Таблица 14

Магнитные свойства некоторых материалов

Материал	Плотность, $\rho, 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	Примеси к Fe, %	Начальная проницае- мость μ_n	Максималь- ная прони- цаемость μ_{max}	Коэрцитив- ная сила, $10^3/4\pi$	Индукция насыщения, 10^{-4} Тл	Потери на гистерезис, 10^{-1} Дж/м^3	Точка Кюри, $^{\circ}\text{C}$
<i>Сталь мягкая</i>	7,8	0,2 С	120	2000	1,8	21200	—	770
<i>Железо техническое</i>	7,88	0,2 (примеси)	150	5000	1,0	21500	5000	770
<i>Железо чистое</i>	7,88	0,05 (примеси)	10000	200000	0,05	21500	300	770
<i>Кремнистое железо</i>	7,65	4 Si	500	7000	0,5	19700	3500	690
<i>45-пермаллой</i>	8,17	45 Ni	2500	25000	0,3	16000	1200	—
<i>68-пермаллой</i>	8,45	68 Ni	1200	250000	0,03	13000	120	600
<i>Супермаллой</i>	8,77	5 Мо, 79 Ni	100000	1000000	0,002	7900	8	400
<i>Муметалл</i>	8,58	5 Cu, 2 Cr, 77 Ni	20000	100000	0,05	6500	—	—
<i>Пермендюр</i>	8,3	50 Co	800	5000	2,0	24500	12000	980
<i>Гиперко</i>	8,0	0,5 Cr, 35 Co	650	10000	1,0	24200	3300	970
<i>Сендаст</i>	8,8	5 Al, 10 Si	30000	120000	0,05	10000	100	500

Таблица 15

**Десятибалльная шкала оценки скорости коррозии, характеристики устойчивости металлов
и коррозионной активности (агрессивности) среды**

Балл	Коррозионное проникновение, мм/год	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)				Характеристика устойчивости металла	Коррозионная активность среды (условия коррозии)
		Железо и железные сплавы	Медь и медные сплавы	Свинец и свинцовые сплавы	Алюминий и алюминиевые сплавы		
1	< 0,001	< 0,0009	< 0,001	< 0,0013	< 0,0003	Полностью устойчивый	Неактивная
2	0,001-0,005	0,0009-0,0045	0,001-0,005	0,0013-0,0065	0,0003-0,0015	Повышенная устойчивость	Низкая
3	0,005-0,01	0,0045-0,009	0,005-0,01	0,0065-0,013	0,0015-0,003	То же	То же
4	0,01-0,05	0,009-0,045	0,01-0,05	0,013-0,065	0,003-0,015	Устойчивый	Средняя
5	0,05-0,1	0,045-0,09	0,05-0,1	0,065-0,13	0,015-0,03	То же	То же
6	0,1-0,5	0,09-0,45	0,1-0,5	0,13-0,65	0,03-0,15	Пониженная устойчивость	Повышенная
7	0,5-1	0,45-0,9	0,5-1	0,65-0,3	0,15-0,3	То же	Низкая
8	1-5	0,9-4,5	1,0-5	1,3-6,5	0,3-1,5	Слабоустойчивый	Высокая
9	5-10	4,5-9	5,0-10	6,5-13	1,5-3	То же	То же
10	>10	>9	>10	>13	>3	Неустойчивый	Очень высокая

Таблица 16

Свойства термопластов и реактопластов

Материал	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Предел прочности		Ударная вязкость, кгс·см/см ₂ (или кДж/м ²)	Модуль упругости <i>E</i> , ГПа	Твердость <i>НВ</i> , кгс/мм ²
			при изгибе, МПа	при сжатии, МПа			
Полиэтилен низкой плотности	9,5-14	100-600	12-17	—	не бьется	0,15-0,20	2,0
Полиэтилен высокой плотности	11-25	200-800	20-38	50	не бьется	0,65-0,86	5,3
Полипропилен	25-40	200-800	50-80	70	30	0,67-1,19	4-7
Полистирол ударопрочный	20-25	12-30	35-45	50	30-50	2,0-2,5	10-13
Винипласт листовой	50-55	20	80-100	85	50-100	4,0	11
Полиамид	50-60	100-150	45	80	100	1,5-1,7	10-15
Полиамиды стеклонаполненные	110	8	160-175	2,5	—	—	—
Фенопласт	30-45	—	70	140	6	7,0	30-40
Материал прессовочный АГ-4	80	—	150	130	50	—	30-50
Аминопласт	—	—	35-75	100	6-7	—	35-55
Стеклотекстолит	110-230	—	140	40	50-200	—	24-35
Гетинакс	70-160	—	75-150		8-25	—	25

Области применения термопластов

Материал	Свойства	Методы изготовления	Области применения
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	Кристаллическая структура, низкое водопоглощение, стабильность во влажной среде, невысокая прочность, стойкость к растрескиванию	Литье под давлением, экструзия, раздув, напыление	Детали общетехнического назначения, малонагруженные детали, пленочные изделия, трубы, защитные антикоррозионные покрытия
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	Кристаллическая структура, более высокая прочность и теплостойкость, чем у ПЭНП	То же	Детали общетехнического назначения, несилловые детали машин, трубы, емкости, детали насосов
Полипропилен	Кристаллическая структура, более высокая жесткость по сравнению с ПЭВП, неморозостойкий	То же	Трубы, фиттинги, детали вентиляторов, пленки, ролики, подшипники скольжения
Полистирол	Аморфная структура, высокая жесткость, хорошие диэлектрические свойства, хрупкость, низкая теплостойкость	Литье под давлением	Корпусные детали приборов, радиоэлектронной аппаратуры, изоляторов
Полиамид	Кристаллическая структура, высокие механические и антифрикционные свойства, нестабильность линейных размеров во влажной среде	То же	Ответственные антифрикционные и конструкционные детали
Полиамид стеклонаполненный	Кристаллическая структура, более высокие физико-механические характеристики, чем у полиамида, низкий коэффициент трения	То же	Корпуса топливных насосов, крыльчатки вентиляторов, крышки карбюраторов, статоры и роторы турбобура
Полиуретан	Аморфная структура Тепло- и морозостойкость, стойкость к агрессивным средам	Литье под давлением, прессование	Конструкционные детали, работающие при температуре от -60 до +100°C

Области применения реактопластов

Материал	Свойства	Методы изготовления	Области применения
Фенопласты общего назначения (композиция на основе фенолальдегидной смолы и порошкообразного наполнителя)	Высокие тепло- и электроизоляционные свойства, стойкость к старению	Прессование, литье под давлением	Нагруженные детали общетехнического назначения
Фенопласты ударопрочные (композиция на основе фенолальдегидной смолы и волокнистого наполнителя)	Повышенная ударная вязкость, стойкость к старению	Прессование	Направляющие втулки, рукоятки, шкивы, болты, гайки
Материал прессовочный АГ-4 (однонаправленная лента из стеклянных нитей, пропитанная фенолформальдегидной смолой)	Высокая прочность, стойкость к старению	Прессование	Корпуса, детали насосов, кулачки
Текстолит конструкционный (композиция на основе хлопчатобумажной ткани и фенолальдегидной смолы)	Высокая прочность и антифрикционные показатели	Механическая обработка	Подшипники скольжения, зубчатые колеса, шкивы, клапаны, направляющие станков, кулачки
Стекловолокнистый анизотропный материал СВМ-ЭР	Высокие механические и электроизоляционные показатели, стабильность размеров, стойкость к старению	Прессование	Зубчатые колеса, детали вентиляторов, насосов, шкивы

Виктор Николаевич Ильин
Сергей Павлович Грабарев
Владимир Дмитриевич Полянин
Андрей Евгеньевич Ефимов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие для слушателей и курсантов высших
пожарно-технических образовательных учреждений МЧС России

Редактор Г.А.Науменко
Корректор Н.В.Федькова
Компьютерный набор
Компьютерная верстка

Подписано в печать	Формат
Бумага офсетная	Печ.л. Уч.-изд.л.
Тираж	экз. Заказ

Академия ГПС МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

Академия Государственной Противопожарной Службы

В.Н. Ильин, С.П. Грабарев, В.Д. Полянин, А.Е. Ефимов

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие для слушателей и курсантов высших
пожарно-технических образовательных учреждений МЧС России

Москва 2008