

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

В.Ю. Гольцев Е.Н. Пирогов

МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ  
И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2008

**УДК 658.56(076.5)+620.1(076.5)**

**ББК65.2-80я7**

**Г63**

*Гольцев В.Ю., Пирогов Е.Н.* Методы механических испытаний и механические свойства материалов. Лабораторный практикум. – М.: МИФИ, 2008. – 160 с.

Лабораторный практикум включает в себя описания 12 лабораторных работ, охватывающих все основные методы определения механических свойств материалов при различных условиях нагружения, включая однократное статическое, длительное статическое, циклическое и ударное нагружения. Первая лабораторная работа знакомит студентов с основным испытательным оборудованием, методами его поверки и оценки пригодности для механических испытаний. Этому вопросу уделяется должное внимание и в других лабораторных работах в связи с рассмотрением методики проведения испытаний. Описания всех лабораторных работ построены по единому принципу. Методика испытания соответствуют ГОСТам. Перечень рекомендуемой литературы дан к каждой работе.

Практикум предназначен для студентов специальности «Физика металлов» и может быть полезен инженерным и техническим работникам, проводящим механические испытания.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент канд. техн. наук *В.С. Ерасов*

ISBN 978-5-7262-0933-3

© *Московский инженерно-физический институт*  
(*государственный университет*), 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
Работа 1. Машины для статических испытаний металлов и их поверка .....	5
ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ .....	24
Задачи испытаний на растяжение .....	24
Обозначения и определения .....	24
Образцы и испытательная машина.....	26
Работа 2. Определение стандартных характеристик прочности и пластичности.....	28
Работа 3. Определение предела пропорциональности, предела текучести, модуля упругости и коэффициента Пуассона .....	33
Приложение 3.1.....	43
Приложение 3.2.....	45
Приложение 3.3.....	47
Работа 4. Построение диаграмм истинных напряжений и определение механических характеристик при растяжении .....	51
Работа 5. Испытание на сжатие .....	60
Работа 6. Испытание на кручение .....	67
Работа 7. Методы определения твердости и твердомеры.....	77
Работа 8. Испытание на ползучесть в изотермических и неизотермических условиях.....	95
Работа 9. Построение кривой усталости.....	111
Приложение 9.1.....	120
Работа 10. Испытание на термическую усталость.....	121
Работа 11. Маятниковые копры и методы ударных испытаний.....	131
Приложение 11.1.....	144
Приложение 11.2.....	145
Работа 12. Определение критической температуры хрупкости материала.....	146

## Предисловие

Расчет конструкций на прочность, жесткость и устойчивость осуществляется с учетом механических свойств материала, определенных в лабораторных условиях, приближенных по возможности к реальным условиям эксплуатации материала в конструкции. Эти условия характеризуются как различными видами напряженного состояния, так и различным характером внешнего механического воздействия в реальных условиях кратковременного и длительного нагружения конструкции.

Все многообразие внешних механических воздействий на конструкцию может быть сведено к четырем основным:

– однократному статическому нагружению, характеризующему медленным возрастанием нагрузки и/или деформации, приводящему к разрушению конструкции за относительно короткий промежуток времени;

– длительному статическому нагружению, на результат которого существенное влияние оказывают температура и время;

– нагружению при циклически изменяющихся напряжениях, приводящему к усталостному разрушению материала;

– ударному нагружению.

Ниже даны описания лабораторных работ, в которых представлена техника и методика проведения испытаний образцов при различных условиях нагружения и определения механических свойств материала.

## Работа 1

# МАШИНЫ ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МЕТАЛЛОВ И ИХ ПОВЕРКА

*Цель: ознакомление с устройством, принципом действия универсальных и разрывных испытательных машин механического и гидравлического действия, с машиной для испытания на кручение, ознакомление с методами их поверки, поверка метрологических характеристик одной испытательной машины, определение жесткости разрывной испытательной машины.*

## Введение

Статические испытания металлов предполагают деформирование образцов с заданной постоянной скоростью перемещения активного, подвижного захвата. Эта скорость для разрывных машин, как правило, не превышает 500 мм/мин.

В соответствии с действующими стандартами статические испытания образцов производят на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, твердость. Для этих целей используют универсальные и разрывные испытательные машины, машины для испытания на кручение крутящим моментом, твердомеры.

## Описание машин для статических испытаний металлов

*Универсальные испытательные машины* предназначены для статических механических испытаний материалов и позволяют проводить почти все виды нагружения образца: растяжение, сжатие, изгиб. Они состоят из следующих основных частей:

- силовозбуждающего механизма – двигателя (обычно электродвигатель) и устройства для передачи усилия на образец. Передачи применяют либо механические, либо гидравлические. Механические передачи используются преимущественно в испытательных машинах с предельной нагрузкой до 0,15 МН, для машин с большими предельными нагрузками применяются гидравлические передачи;

- приспособления для установки образца: захваты (для растяжения), опорных плит (для сжатия), траверсы – поперечины, на которой устанавливают подвижный захват образца или опорную плиту, реверсора – прибора, изменяющего направление нагружения образца;

- силоизмерителя – устройства для измерения усилий, возникающих в образце. Силоизмерители бывают разных систем: динамометрические, рычажно-маятниковые, гидравликомаятниковые, рычажные, манометрические и др.;

- прибора для автоматической записи диаграммы деформирования образца в координатах «усилие-деформация»;

- станины, на которой монтируются все части машины. Усилия, передаваемые на образец, уравниваются в пределах станины, так что на фундамент передается только собственный вес машины и упругая отдача при разрушении образца.

Для большинства испытательных машин со статическим приложением нагрузок характерно вертикальное расположение оси образца в захватах машины. К достоинствам таких машин относятся более удобное центрирование образца по оси приложения нагрузки и, как правило, исключение влияния веса захвата, компактность конструкции.

Широкими возможностями для испытания образцов обладает универсальная испытательная машина 1231У-10 (предельная нагрузка 100 кН) с механическим приводом и электрическим силоизмерителем, являющаяся аналогом известной испытательной машины фирмы «Инстрон». На этой машине можно проводить статические испытания на растяжение-сжатие, изгиб с записью диаграмм деформирования. Конструкция машины, ее повышенная жесткость предусматривают возможность записи петель гистерезиса, проведения испытаний при повышенных и пониженных температурах. Машина позволяет также проводить испытания на малоцикловую усталость с частотой нагружения от 2 до 10 циклов в минуту. Машина обладает погрешностью измерения нагрузки  $\pm 0.5\%$ , обеспечиваемой набором сменных датчиков усилия с широким диапазоном измерения.

Скорость деформирования образца может варьироваться в интервале от 0,05 до 500 мм/мин. Активный захват (траверса маши-

ны) перемещается с помощью двух синхронно работающих винтов, скорость вращения которых регулируется с погрешностью  $\pm 0,1\%$ .

Примером универсальной испытательной машины с гидравлическим приводом является машина RH-30 Шимадзу. Нагружение образца на этих машинах осуществляется гидравлическим способом за счет применения давления масла. Машина RH-30 (предельное усилие 0,3 МН) имеет 5 шкал измерения нагрузки: 0–0,015; 0–0,03; 0–0,06; 0–0,15; 0–0,3 МН). Гидравлический привод обеспечивает бесступенчатое изменение скорости перемещения активного захвата. В машине RH-30 подвижным элементом является стол машины, который жестко связан с поршнем и с верхней траверсой. Неподвижным элементом является промежуточная траверса, которая от отдельного электродвигателя может перемещаться вверх и вниз по направляющим и устанавливаться в заданном положении.

В силу того, что рабочее движение активного захвата (стола и верхней траверсы) осуществляется в одном направлении, для испытания на растяжение и сжатие используются разные узлы машины: при испытании образца на сжатие он располагается на столе машины, при испытании на растяжение – в верхней части машины между неподвижной и подвижной траверсами.

На рис. 1.1 представлена схема силоизмерителя универсальной машины типа RH-30. В качестве силоизмерительного устройства в машине использован маятниковый силоизмеритель с манометрическим датчиком. Схема силоизмерителя включает в себя силоизмерительный ци-

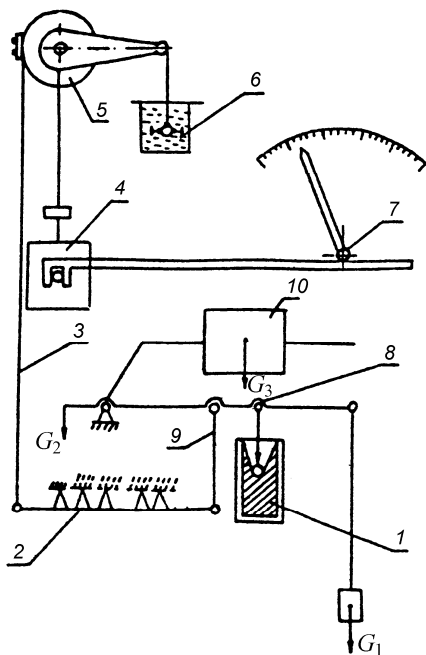


Рис. 1.1. Схема силоизмерителя универсальной испытательной машины типа RH-30

линдр 1, призмный рычаг 2, тягу 3, маятник с постоянным грузом 4, ролик 5, демпфер 6, шкалу 7, промежуточный рычаг 8, толкатель 9, груз 10. Переключение диапазонов нагрузок осуществляется изменением соотношения плеч на рычаге 2. Установка на нуль осуществляется перемещением груза 10 вдоль рычага.

*Разрывные испытательные машины* (например, Р-5, ЦНИИТ-МАШ ИМ-12А) отличаются от универсальных тем, что в рабочем положении подвижный захват перемещается в одном направлении. Использование реверсирующих приспособлений позволяет применять их для испытания образцов на сжатие. Разрывная испытательная машина Р-5 предназначена для испытания образцов на растяжение с предельным усилием 50 кН. Она представляет собой рамную конструкцию. Подвижный захват закрепляется на траверсе, которая перемещается за счет синхронного вращения двух боковых винтов. Скорость перемещения траверсы бесступенчато регулируется в широком диапазоне. Машина имеет маятниковый силоизмеритель и три пояса измерения нагрузки 0–10, 0–25, 0–50 кН. Переход с одного пояса измерения на другой осуществляется изменением грузов на маятнике. Диаграммный аппарат позволяет регистрировать диаграмму деформирования образцов с масштабами по шкале деформации 10:1, 50:1 и 100:1.

*Машина для испытания образцов на кручение КМ-50-1* относится к типу испытательных машин с механическим нагружением вертикально расположенного образца и маятниковым моментоизмерителем. Машина состоит из станины, привода, механизма силовозбуждения, моментоизмерителя, устройства записи, ручного привода, захватов. Электродвигатель через клиноременную передачу, червячную пару, коробку скоростей и вторую червячную пару вращает ходовой винт с установленным на нем нижним захватом. Момент, приложенный к нижнему захвату, передается через образец, верхний захват, механизм силовозбуждения (систему рычагов) на маятник. На шкале моментоизмерителя стрелка показывает в килограмм-сила на метр ( $\text{кгс} \cdot \text{м}$ ) или Ньютон на метр ( $\text{Нм}$ ) величину крутящего момента, приложенного к образцу. При этом перо записывающего аппарата перемещается пропорционально углу поворота стрелки. Барабан лентопротяжного механизма получает вращение от привода через редуктор масштабов.



Предельная нагрузка испытательной машины составляет 500 Нм. Имеются три шкалы моментоизмерителя с пределами измерения: 0–100, 0–200 и 0–500 Нм. Переход с одной шкалы измерения на другую осуществляется изменением массы груза на маятнике.

При наибольшем моменте, соответствующем верхнему пределу данной шкалы, маятник отклоняется на  $33^\circ$ , верхний захват при этом поворачивается на  $6^\circ$ . Механизм нагружения отрегулирован так, что допускает переход стрелки на 2–6 делений сверх максимума шкалы, после чего электродвигатель автоматически отключается микропереключателем.

Максимальный момент при ручном приводе ограничивается в механизме силовозбуждения упором.

Для закрепления образцов различной длины нижний активный захват маховиком устанавливаются на различной высоте. Угол закручивания отсчитывается по шкале, установленной на ходовом винте. Цена деления  $-1^\circ$ . Показания по шкале углов закручивания соответствуют относительному повороту захватов машины, так как поправка на поворот верхнего захвата вносится автоматически корректирующим приспособлением.

Верхнюю направляющую корректирующего устройства перед испытанием образцов подводят рукой до соприкосновения с верхним захватом. Нижняя направляющая корректирующего устройства должна все время быть в зацеплении с кольцом лимба углов закручивания.

При записи диаграммы фиксируются только углы поворота активного захвата. Поэтому при расшифровке диаграммы нужно пользоваться прилагаемым к машине шаблоном для введения поправок на поворот пассивного захвата.

Описание твердомеров и методов их поверки даны в описании лабораторной работы 7.

## **Поверка испытательных машин**

Сравнение механических характеристик материала, определенных по результатам испытания образцов на различном оборудовании в разных лабораториях, возможно лишь при использовании должным образом поверенного оборудования и стандартных методов испытания. Поверка испытательного оборудования произво-

дится регулярно в соответствии с требованиями ГОСТ и Методическими указаниями Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование).

При проверке испытательных машин выполняются следующие операции:

- внешний осмотр машины и отдельных ее частей;
- проверка взаимодействия отдельных узлов и механизмов;
- проверка правильности показаний шкалы (пояса) силоизмерительного механизма;
- определение чувствительности силоизмерителя;
- проверка шкалы деформации;
- проверка диаграммного аппарата;
- проверка соответствия основных параметров и размеров требованиям действующих стандартов на машины для испытания материалов.

*Внешний осмотр машины.* При внешнем осмотре необходимо убедиться в том, что машина удовлетворяет следующим требованиям:

- установлена в чистом и сухом помещении с постоянной температурой;
- укреплена на фундаменте или на полу, предохраненных от вибрации;
- подводка тока изолирована и предохранена от возможности механического повреждения;
- все трущиеся и вращающиеся части машин смазаны маслом. Резервуары машин с гидравлическим приводом должны быть заполнены рабочей жидкостью в количестве, необходимом для работы.

*Проверка взаимодействия отдельных узлов и механизмов машины* производится опробованием на холостом и рабочем режимах работы. При этом устанавливают, что машина обеспечивает:

- плавность статического нагружения (равномерно и без рывков);
- возможность приостановки нагружения на требуемом уровне нагрузки и сохранения показания нагрузки в течение 30 с;
- возвращение указательной стрелки силоизмерителя на нуль после снятия нагрузки;
- отсутствие течи масла через уплотнения в вентилях;

- отключение нагружающего устройства машины конечными выключателями при нагрузке на 2–5 % выше предела измерения по шкале;

- возвращение на нуль указателя силоизмерителя (стрелки) при выводе вручную силоизмерителя из состояния равновесия;

- плавный возврат стрелки на нуль после разрушения образца.

*Проверка правильности показаний шкалы силоизмерительного механизма машины* заключается в сравнении показаний силоизмерителя машины с действительными значениями нагрузки.

Метод проверки непосредственным нагружением (прямой метод) заключается в подвешивании образцовых гирь 4–5 разрядов по ГОСТ 8.021–2005 к захвату машины, соединенному с силоизмерительным механизмом. На практике этот метод применяется, главным образом, при проверке машин с предельными нагрузками до 10 кН (1000 кгс).

Для проверки силоизмерителя испытательных машин с большими предельными нагрузками применяют образцовые переносные динамометры 3-го разряда (косвенный метод), погрешность которых не должна превышать  $\pm 0,5\%$  от измеряемой нагрузки. Для контроля образцовых динамометров 3-го разряда, в свою очередь, используют стационарные образцовые динамометры 2-го разряда, допустимая погрешность которых составляет не более  $\pm 0,2\%$  от измеряемой нагрузки. Принцип действия динамометра основан на измерении упругой деформации рабочего тела, являющегося основной частью динамометра.

Рабочее тело динамометра имеет форму круглого или эллиптического кольца, колонки, трубы, тонкостенного сосуда, симметрично-замкнутой петли, скобы и т.п. Тип рабочего тела зависит от пределов измеряемой нагрузки, а также от вида испытания – на растяжение или сжатие. Например, динамометр типа ДОС состоит из упругой эллиптической скобы и предназначен для проверки показаний испытательных машин и приборов при сжимающих усилиях. Образцовые динамометры сжатия ДОС-0,2, ДОС-1, ДОС-3 и ДОС-5 предназначены для измерения усилий, соответственно, в пределах: 20–200; 100–1000; 300–3000; 500–5000 кгс.

По каждому пределу измерения (шкале или поясу) проверке подлежат не менее пяти точек; рекомендуется выбирать для проверки

точки, соответствующие 20, 50, 80 и 100 % предельного значения шкалы.

Нагрузка устанавливается по свидетельству динамометра. Проверка каждой нагрузки производится не менее трех раз как при нагружении от нуля до предельного значения шкалы (прямой ход), так и при разгрузке от предельного значения шкалы до нуля (обратный ход). Проверка правильности показаний шкалы силоизмерителя осуществляется только с подключенной контрольной стрелкой. Из трех показаний вычисляется среднее арифметическое. Результаты измерений заносятся в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Действительная нагрузка $P, Н$	Показания поверяемой машины $P, Н$							
	Показание силоизмерителя				Погрешность		Вариация	
	1	II	III	среднее	абсолютная	относительная	абсолютная	относительная

По результатам измерений подсчитываются: абсолютная погрешность показаний силоизмерителя испытательной машины, относительная погрешность, вариация показаний и относительная вариация.

Абсолютная погрешность показаний силоизмерителя есть отклонение показаний от действительного значения измеряемой силы. Она вычисляется как разность между средним арифметическим значением нагрузки  $P_1$  из трех отсчетов по шкале силоизмерителя и действительной нагрузкой  $P$  с соблюдением знака, т.е.

$$\Delta = P_1 - P. \quad (1.1)$$

Относительной погрешностью показаний машины называется погрешность, выраженная в долях или процентах действительного значения измеряемой силы. Относительная погрешность вычисляется по формуле:

$$\psi = \frac{\Delta}{P} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

Допустимой погрешностью испытательной машины называется наибольшая по абсолютной величине погрешность показания, до-

пускаемая действующими нормами. Требования к испытательным машинам и действующие инструкции устанавливают величину допустимой средней относительной погрешности при поверках машин для испытания на растяжение, сжатие и кручение в  $\pm 1\%$  от действительной нагрузки для каждой поверяемой точки, начиная с 0,2 предельного значения шкалы, но не ниже 0,04 от наибольшего усилия, развиваемого машиной.

Вариацией (размахом) показаний называется разность между наибольшим и наименьшим значениями силы при трех отсчетах, соответствующих одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях.

Согласно ГОСТ 28840–90 вариации показаний универсальных испытательных машин не должны превышать 1% от измеряемой нагрузки у машин с допускаемой погрешностью измерения  $\pm 1\%$  и 0,5% от измеряемой нагрузки – у машин с допускаемой погрешностью измерения  $\pm 0,5\%$  отдельно при прямом и обратном ходах.

Разность показаний между прямым и обратным ходами в каждой поверяемой точке шкалы машины не должна превышать 2% от величины измеряемой нагрузки в машинах с допускаемой погрешностью измерения  $\pm 1\%$  и 1% – в машинах с допускаемой погрешностью измерения  $\pm 0,5\%$ .

У машин с гидравлическим приводом поверка погрешности измерения вариации показаний должна производиться при двух положениях поршня, близких к крайним положениям.

*Определение чувствительности силоизмерителя* для каждой шкалы машины производится при нагрузках, соответствующих 0,1 от предельного значения шкалы и предельному значению, когда при поверке машины применяется метод непосредственного нагружения грузами, и при нагрузках, соответствующих 0,1 и 0,5 предельного значения шкалы, когда поверка машины производится образцовыми динамометрами.

Для определения чувствительности к вышеуказанным нагрузкам необходимо добавлять и снимать дополнительную нагрузку, вызывающую перемещение стрелки в обе стороны от первоначальной отметки. При этом чувствительность при нагрузке в 0,1 от предела измерения шкалы должна быть такой, чтобы стрелка под действием дополнительной нагрузки, соответствующей 0,5 цены деления

шкалы, перемещалась на расстояние не менее, чем 0,5 деления шкалы.

При нагрузках 0,5 от предела шкалы и предельной нагрузке чувствительность должна соответствовать цене деления шкалы.

Пределы измерения динамометров, применяемых при определении чувствительности, должны быть не более 0,5 предела измерения шкалы поверяемой машины.

*Проверка шкалы деформации.* Для проверки шкалы деформации используется образец из пластичного материала, который устанавливается в захватах поверяемой машины. Образец деформируется (проскальзывание образца в захватах не допускается). При этом измеряют с помощью штангенциркуля или индикатора часового типа изменение расстояния между захватами и сравнивают полученные результаты с показаниями шкалы. Отклонения в показаниях шкалы допускаются в пределах  $\pm 1$  мм.

*Проверка диаграммного аппарата* сводится к определению погрешности записи деформации и нагрузок. Для определения погрешности записи деформации необходимо медленно на холостом ходу перемещать захват. В процессе перемещения захвата через каждые 5 мм на миллиметровой бумаге наносят отметки. Расстояние между отметками должны быть одинаковыми и соответствовать перемещению захвата с учетом масштаба. Допускаемые погрешности записи по диаграмме перемещения активного захвата должны быть не более  $\pm 2$  %.

Для определения погрешности записи нагрузок необходимо закрепить в захватах машины жесткий образец, который нагружается до наибольшего значения усилия, характеризующего одну из шкал силоизмерителя. В процессе нарастания нагрузки нулевое, каждое десятое и конечное значения шкалы отмечаются линиями на диаграммной бумаге барабана. Расстояние между линиями должно быть одинаковым с отклонениями, не превышающими  $\pm 0,5$  мм, а расстояние между крайними линиями должно находиться в пределах  $\pm 1$  % от номинального значения высоты ординаты диаграммы, соответствующей предельному значению шкалы.

*Жесткость испытательной машины.* В процессе нагружения образца на любой испытательной машине деформация образца сопровождается упругой деформацией частей машины (зажимов, станины, силоизмерительного устройства и т.п.).

Жесткостью машины принято называть отношение величины нагрузки  $P$  к абсолютной суммарной упругой деформации нагруженных частей машины  $\Delta l_M$ :

$$K_M = P / \Delta l_M, \text{ МН/м,}$$

т.е. жесткость характеризует изменение упругой деформации с изменением нагрузки. Величину, обратную жесткости, называют податливостью. Чем больше жесткость, тем меньше упругая деформация частей машины при данной нагрузке. Графически (рис. 1.2) жесткость двух различных машин можно представить в координатах «нагрузка – деформация» двумя прямыми, наклон которых к оси абсцисс различен. Чем больше угол наклона прямой к оси абсцисс, тем жестче машина, т.е. в процессе нагружения при достижении нагрузки  $P$  машина малой жесткости  $K_2$  (податливая машина) имеет упругую деформацию  $\Delta l_{M2}$  большую, чем машина большей жесткости с (жесткая машина). При этом упругая энергия,

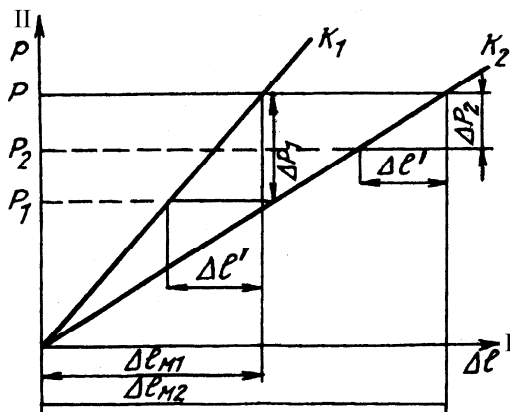


Рис. 1.2. Схема, иллюстрирующая жесткость испытательных машин: I – предельно податливая машина; II – предельно жесткая машина;  $K_1$  – диаграмма для жесткой машины;  $K_2$  – диаграмма для податливой машины

накопленная в нагруженных частях податливой машины  $A_{\text{упр}} = P \Delta l_{M2} / 2$ , больше, чем в жесткой  $A_{\text{упр}} = P \Delta l_{M1} / 2$ . В процессе разгрузки при одинаковом уменьшении упругой деформации на величину  $\Delta l$  нагрузка в жесткой машине уменьшается в большей степени (на  $\Delta P_1$ ), чем в податливой (снижение на  $\Delta P_2$ ), при этом в податливой машине сохраняется и больший запас упругой энергии.

В процессе нагружения растягиваемый образец и машину можно рассматривать как две последовательно соединенные пружины различной жесткости, при этом от начала нагружения до разрушения образца части машины деформируются упруго, а в образце при переходе за предел упругости наряду с упругой протекает также пластическая деформация. Характер процесса пластической деформации определяется свойствами исследуемого материала. Для пластичных материалов характерен спад нагрузки за максимумом, например при растяжении, когда появляется шейка на образце. Силоизмерительное устройство машины должно зафиксировать этот процесс. Для того чтобы зафиксировать действительные процессы изменения нагрузки в связи с деформацией материала, машина должна быть достаточно жесткой, а силоизмерительное устройство малоинерционным, при этом необходимо учитывать соотношение величин жесткости машины и образца.

Жесткость испытательной машины практически не оказывает влияния на характеристики, определяемые в упругой области при измерении силы тарированным динамометром. Процесс упругой деформации успевает полностью произойти в момент приложения нагрузки как в частях машины, так и в образце. При этом в любой момент нагружения система машина–образец находится в равновесии. Жесткость машины также практически не влияет на характеристики, определяемые в области равномерной пластической деформации. Существенное влияние жесткости проявляется в пластической области за максимальной нагрузкой. На рис. 1.3 схематически показан характер диаграмм деформации за максимумом нагрузки для материалов различной пластичности.

Обычно принято считать точку  $P_k$  для каждого из приведенных материалов моментом разрушения образца, а нагрузку, соответствующую этому моменту, конечной. В действительности же, когда происходит разрыв образца, нагрузка имеет нулевое значение, а силоизмерительное устройство должно зафиксировать спад нагрузки до нуля, что практически возможно при испытании на предельно жесткой машине с малоинерционным силоизмерительным устройством. Несоответствие между действительным сопротивлением образца и нагрузкой, регистрируемой машиной, можно объяснить соотношением жесткости образца и машины, а также величиной запаса упругой энергии, накопленной в системе образец-машина.



Рассмотрим два случая (см. диаграмму 1 рис. 1.3):

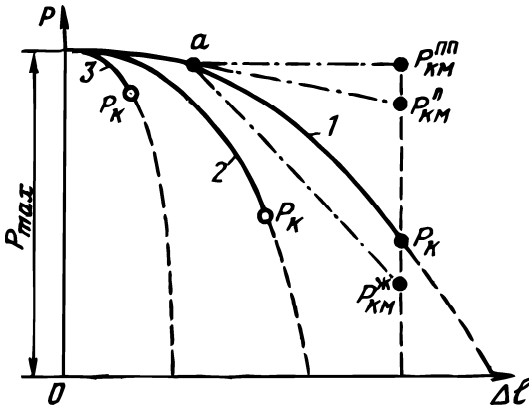


Рис. 1.3. Схема влияния жесткости испытательной машины на характер диаграмм деформирования за максимум нагрузки: 1, 2, 3 – диаграммы, типичные для пластичного, среднепластичного и малопластичного материалов соответственно

1) жесткость образца больше жесткости машины. В этом случае при деформации от точки  $a$  нагрузка на образце уменьшится интенсивнее (участок  $a - P_K$ ), чем в частях испытательной машины (участок  $a - P_{KM}^n$ ), при этом разрушение образца происходит при нагрузке, соответствующей точке  $P_K$  за счет упругой энергии, накопленной в системе, а силоизмеритель зафиксирует нагрузку в точке  $P_{KM}^n$ , соответствующую спаду нагрузки в машине к моменту разрушения образца. При очень малой жесткости, когда  $K_M = 0$ , снижение нагрузки вообще может быть не зафиксировано (точка  $P_{KM}^{nn}$ );

2) жесткость образца меньше жесткости машины:  $K_{обр} < K_M$ . В этом случае спад нагрузки в частях машины происходит интенсивнее ( $a - P_{KM}^ж$ ), чем на образце ( $a - P_K$ ), и дальнейшая деформация образца возможна только при непрерывном подводе энергии от привода машины, или, если в самом образце накоплен достаточный запас упругой энергии, происходит разрушение образца.

Следовательно, величина конечной нагрузки на диаграмме  $P_K$  зависит от жесткости испытательной машины: чем меньше жест-

кость, тем больше  $P_k$ , т.е. при подсчете истинных напряжений величина может быть завышена.

## **Порядок выполнения работы**

### **Проверка универсальной или разрывной испытательной машины**

1. Ознакомиться с испытательной машиной, предложенной преподавателем. Провести внешний осмотр машины и отдельных ее частей. При наличии нарушений требований к машине и к ее установке устранить недостатки.

2. Провести включение машины и опробовать ее на холостом и рабочем (с образцом) режимах работы. Установить, обеспечивается ли выполнение требований, предъявляемых к машине при внешнем осмотре ее и проверке взаимодействия отдельных узлов и механизмов.

3. Провести проверку правильности показаний шкалы силоизмерительного механизма. При проверке испытательной машины на растяжение в захваты машины устанавливается динамометр типа ДОР. Типоразмер динамометра зависит от поверяемого пояса силоизмерителя испытательной машины. Номинальное значение нагрузки динамометра должно соответствовать предельному значению шкалы поверяемой машины. При проверке испытательных машин на сжатие динамометр ДОС устанавливается своими опорными подушками центрально между опорными плитами.

После закрепления динамометра в захватах испытательной машины установить на нуль большую указательную стрелку индикатора динамометра. Для проверки правильности установки стрелки на начальное нулевое положение медленно и плавно отводят ручную свободный конец измерительного стержня индикатора, затем таким же образом подводят его до упора. Возможное при этом смещение большой указательной стрелки не должно превышать  $\pm 0,5$  деления шкалы индикатора.

Поверяемую машину и закрепленный в ней в качестве образца динамометр подвергнуть предварительному нагружению с выдержкой в течение 5 мин нагрузкой, равной предельному значению шкалы машины. После разгрузки отсчетное приспособление дина-

мометра и силоизмеритель машины при наличии смещения вновь установить на нуль и произвести дальнейшую поверку.

При поверке следует указатель отсчетного приспособления динамометра плавно подводить к делению шкалы, соответствующему нагрузке на данной ступени, не допуская возвратных движений стрелки, и одновременно производить отсчет по шкале поверяемой машины.

Результаты трехкратных измерений при прямом и обратном ходах занести в табл. 1.1. Расчет абсолютной и относительной погрешностей силоизмерительного механизма произвести соответственно по формулам (1.1) и (1.2).

4. Определить чувствительность силоизмерительного механизма испытательной машины. Для этого использовать динамометр с пределом измерения, соответствующим 0,5 предела измерения шкалы поверяемой машины. Необходимо предварительно установить цену деления шкалы индикатора динамометра по его свидетельству.

5. Провести поверку шкалы деформации и диаграммного аппарата машины. В частности, определение погрешности записи нагрузки можно совместить с определением жесткости испытательной машины.

## **Поверка испытательной машины на кручение**

1. При поверке машины для испытания на кручение верхний ее захват должен быть снят и на ось верхнего захвата установлен градуировочный рычаг. На правую колонку машины устанавливается кронштейн с роликом. При этом нужно проследить, чтобы пружинная лента плотно без перекосов прилегала к радиусной части тарировочного рычага, а тросик с подвеской для грузов лежал на ролике, укрепленном на кронштейне.

Кронштейн на колонке выставить так, чтобы тросик, проходя по ролику, находился в горизонтальном положении и при повороте рычага под действием положенных на подвеску грузов ролик не задевал за тросик.

2. Нагрузить машину, помещая последовательно гири 4-го разряда на подвеску (табл. 1.2).

Правильность показаний силоизмерителя поверить в пределах рабочей части каждой шкалы при трех прямых и трех обратных ходах с подключенной контрольной стрелкой.

Поверка машины производится по шкале, начиная с 0,2 предельного значения шкалы, но не ниже 0,04 от наибольшего усилия, развиваемого машиной.

Абсолютная и относительная погрешности показаний силоизмерителя определяются по формулам (1.1) и (1.2) соответственно. Результаты измерений и вычисленные значения погрешностей и вариаций показаний заносятся в табл. 1.3.

Таблица 1.2

Для шкалы А						
Значение поверяемой точки, Нм	0	100	200	300	400	500
Вес образцовых гирь на приспособлении, Н	0	200	400	600	800	1000
Для шкалы Б						
Значение поверяемой точки, Нм	0	40	80	120	160	200
Вес образцовых гирь на приспособлении, Н	0	80	160	240	320	400
Для шкалы В						
Значение поверяемой точки, Нм	0	20	40	60	80	100
Вес образцовых гирь на приспособлении, Н	0	40	80	120	160	200

Таблица 1.3

Действительная нагрузка М, Нм	Показания поверяемой машины М, Нм								
	Показание силоизмерителя				Погрешность		Вариация		
	I	II	III	среднее	абсолютная	относительная	абсолютная	относительная	

3. Для определения погрешности записи по крутящему моменту жесткий образец закрепляется в захватах машины и нагружается до наибольшего значения момента, характеризующего один из диапазонов шкалы. Расстояние между конечными точками измерить штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм и нониусом 0,05 мм. Погрешность записи по крутящему моменту не должна превышать  $\pm 2,5$  мм на всей длине хода пера.

4. Для проверки правильности показаний шкалы углов закручивания нужно убедиться в отсутствии проскальзывания шкалы на валу нижнего захвата, для чего на шкалу против малого указателя поставить риску шириной не более 0,5 мм и механическим приводом сообщить валу нижнего захвата 10–15 оборотов. Смещение риски относительно указателя допускается не более 0,5 мм.

5. Для определения погрешности записи по углу закручивания нужно вращать активный захват, вести отсчет по шкале углов закручивания, а на диаграммной бумаге наносить отметки. Расстояния между отметками должны быть одинаковыми и соответствовать перемещению активного захвата с учетом масштаба. Измерение производить штангенциркулем. Погрешность записи по углу закручивания не должна превышать  $\pm 0,5$  мм на длине хода пера до 25 мм и  $\pm 2$  % от действительного угла закручивания на длине хода пера свыше 25 мм.

6. Для проверки угловой скорости нижнего захвата нужно установить переключатель скорости в положение 0,3 или 1 об/мин, включить двигатель и отсчитать по шкале углов закручивания угол поворота за одну минуту. Допускается относительная погрешность угловой скорости  $\pm 10$  %.

7. На основании проведенных измерений сделать вывод о пригодности испытательной машины (или пояса измерения) для механических испытаний.

### **Определение жесткости испытательной машины с механическим приводом**

На опоры испытательной машины устанавливают жесткий, практически недеформируемый образец. Нагружая образец возрастающей нагрузкой, записывают диаграмму  $P - \Delta l$  (см. рис. 1.3) Для

трех-четырёх уровней нагрузки подсчитывают жесткость испытательной машины по формуле:

$$K_m = \frac{P}{\Delta l}, \text{ МН/м.}$$

### **Определение жесткости испытательной машины с гидравлическим приводом**

На опоры испытательной машины вместо образца устанавливаются грузовой цилиндр, запитываемый от автономного гидропривода. Предварительно под поршнем в цилиндре машины устанавливается масляный столб соответствующей высоты. Машина загружается грузовым цилиндром. При этом нагрузка отсчитывается по шкале машины, а деформация ее измеряется по изменению расстояния между опорами при заданных уровнях нагрузки.

### **Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

- характеристику поверяемой испытательной машины;
- принципиальную схему силоизмерения и описание основных частей поверяемой испытательной машины;
- таблицы результатов поверки испытательной машины;
- выводы о пригодности машины к эксплуатации;
- машинную диаграмму, используемую для определения жесткости испытательной машины с механическим приводом и значение жесткости испытательной машины.

### **Контрольные вопросы**

Из каких основных частей состоят универсальные и разрывные испытательные машины?

Принцип действия универсальной (разрывной) испытательной машины.

Типы силоизмерительных механизмов испытательной машины и допустимые погрешности силоизмерения.

Какие операции выполняются при поверке испытательных машин?

Как определяется погрешность силоизмерителя испытательной машины?

Что называется жесткостью испытательной машины, как она оценивается и на какие механические свойства оказывает влияние в процессе механических испытаний образцов.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. ГОСТ 28840–90. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов.

2. РД 50-482–84. Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и пластмасс. Методика поверки.

3. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т.2. Методы исследования механических свойств металлов /Под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1974.

4. Шагинян А.С., Асан-Джалалов А.Г., Богущкий В.В., Жулев Ю.К. Методика определения приведенной жесткости испытательной машины /Приборы и средства автоматизации. Вып. 13, 1967.

5. Машина для испытания образцов из металла на кручение крутящим моментом до 50 кгсм КМ-50-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

## ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

(общие положения для лабораторных работ 2, 3, 4)

### Задачи испытаний на растяжение

Механические испытания металлов и сплавов при кратковременном нагружении применяются для оценки прочности деталей и конструкций, подвергающихся воздействию быстро нарастающих нагрузок, и для определения механических свойств пластически деформируемых металлов и сплавов. Изучают механические свойства материалов при различных температурах (пониженной, нормальной, повышенной) и при разных видах нагружения. Наиболее распространенным является испытание на растяжение. При достаточно простой процедуре испытания одноосное растяжение легко поддается анализу и дает возможность определить большое число механических параметров, характеризующих прочность металла, его пластичность, упругость и работоспособность. Обычно при испытаниях на растяжение автоматически регистрируется диаграмма «нагрузка – абсолютная деформация», которая может быть использована для получения характеристик прочности и пластичности испытываемого материала. Наиболее распространены испытания при нормальной температуре, которые в соответствии с ГОСТ 1497–84 должны осуществляться в диапазоне 10–35°С.

### Обозначения и определения

Характеристики механических свойств, получаемые при испытании на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84, имеют следующие обозначения и определения:

- предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой «нагрузка – удлинение» в точке  $P_{\text{пц}}$  с осью нагрузок, увеличивается на 50 % от своего значения на линейном участке (допускается определять предел пропорциональности с допусками 10 и 25 %);



- модуль упругости  $E$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – отношение приращения напряжения к соответствующему приращению удлинения в пределах упругой деформации. Одновременно с модулем упругости может быть определен коэффициент Пуассона  $\mu$  (безразмерная величина), равный по абсолютной величине отношению поперечной упругой деформации  $\varepsilon_y$  к продольной упругой деформации образца  $\varepsilon_x$ ;

- предел текучести физический (нижний предел)  $\sigma_T$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающего усилия;

- верхний предел текучести  $\sigma_{ТВ}$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – напряжение, соответствующее первому пику усилия, зарегистрированному до начала текучести рабочей части образца;

- предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации при нагружении  $\sigma_{0,2}$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – напряжение, при котором пластическая деформация образца достигает 0,2 % рабочей длины образца  $l$  или начальной расчетной длины по тензомеру  $l_0$ ;

- предел текучести условный с допуском на величину полной деформации  $\sigma_p$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – напряжение, при котором полная деформация образца достигает заданной величины, выраженной в процентах от рабочей длины образца  $l$  или начальной расчетной длины по тензомеру  $l_0$ . Величину допуска (от 0,05 до 1 %) указывают в обозначении (например,  $\sigma_{п0,5}$ );

- предел текучести условный с допуском на величину остаточной деформации при разгрузке  $\sigma_p$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – напряжение, при котором после разгрузки образец сохраняет заданную остаточную деформацию, выраженную в процентах от рабочей длины образца  $l$  или начальной расчетной длины по тензомеру  $l_0$ . Величину допуска (от 0,005 до 1 %) указывают в обозначении (например,  $\sigma_{p0,05}$ );

- временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – напряжение, соответствующее наибольшему усилию  $P_{\max}$ , предшествующему разрыву образца;

- относительное равномерное удлинение  $\delta_p$ , % – отношение приращения длины участка в рабочей части образца после разрыва, на котором определяется относительное равномерное удлинение, к его длине до испытания:

- относительное удлинение после разрыва  $\delta$ , % – отношение приращения расчетной длины образца ( $l_K - l_0$ ) после разрушения к начальной расчетной длине  $l_0$ ;

- относительное сужение после разрыва  $\psi$ , % – отношение разности начальной и конечной площади поперечного сечения образца ( $F_0 - F_K$ ) после разрыва к начальной площади поперечного сечения  $F_0$ .

При допусках от 0,005 до 0,05 % от величины пластической деформации при нагружении, полной деформации при нагружении, остаточной деформации при разгрузке вместо термина «предел текучести» условно допускается применять термин «предел упругости» с индексацией, установленной для соответствующего предела текучести условного.

## Образцы и испытательная машина

В настоящих лабораторных работах испытывают цилиндрические образцы с начальным диаметром рабочей части  $d_0 = 6$  мм или  $d_0 = 10$  мм и начальной расчетной длиной  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$  или  $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$  и плоские образцы толщиной 4 мм и шириной 30 мм. Рабочая длина цилиндрических образцов должна находиться в пределах от  $l_0 + 0,5 d_0$  до  $l_0 + 2 d_0$ .

Разрывные и универсальные испытательные машины должны соответствовать требованиям ГОСТ. В работе используются испытательные машины Р-5 и ИМ-12А.

При проведении испытаний должны соблюдаться следующие основные требования: центрирование образца в захватах испытательной машины, плавность нагружения и плавность разгрузки.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Металлы. ГОСТ 1497–84. Методы испытаний на растяжение. М: Госстандарт, 1984.
2. Золотаревский В.С, Механические испытания металлов. М.: Металлургия, 1974.
3. Артюхина Л.Л., Гольцев В Ю. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Статические испытания металлов»: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1988.

## Работа 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАНДАРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

*Цель: ознакомление с методом испытания образцов на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84 и определением характеристик  $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$  и  $\psi$ .*

#### Образец и испытательное оборудование

В настоящей работе испытывается на растяжение при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497–84 цилиндрический образец с начальным диаметром рабочей части  $d_0 = 6$  мм и начальной расчетной длиной  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ .

Испытания проводятся на машине Р-5, описание и порядок работы на которой приведен в работе 1.

#### Порядок выполнения работы

1. Обмерить диаметр образца  $d_0$  с погрешностью до 0,01 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях в средней части и на границах рабочей длины образца. Начальную площадь поперечного сечения образца  $F_0$  подсчитать, используя наименьшее из полученных значений диаметра.

2. На цилиндрической поверхности образца царапающим предметом нанести риски, ограничивающие его расчетную длину  $l_0$  с погрешностью не превышающей 1 %.

3. Установить образец в захватах испытательной машины и подготовить машину к испытанию.

4. Включить электродвигатель и осуществлять растяжение образца до его разрушения с регистрацией диаграммы «нагрузка – удлинение образца».

5. После разрушения образца зафиксировать разрушающую нагрузку  $P_k$ , извлечь обе части образца из машины, сложить их по

месту разрыва, зажав в струбине, измерить конечную длину образца  $l_k$  и диаметр в месте разрыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях, приняв за  $d_k$  среднее значение замеров.

6. Извлечь и обработать диаграмму растяжения « $P-\Delta l$ », рассчитав  $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$  и  $\psi$ .

### Определение физического предела текучести $\sigma_T$ , верхнего предела текучести $\sigma_{TB}$ и нижнего предела текучести $\sigma_{TH}$

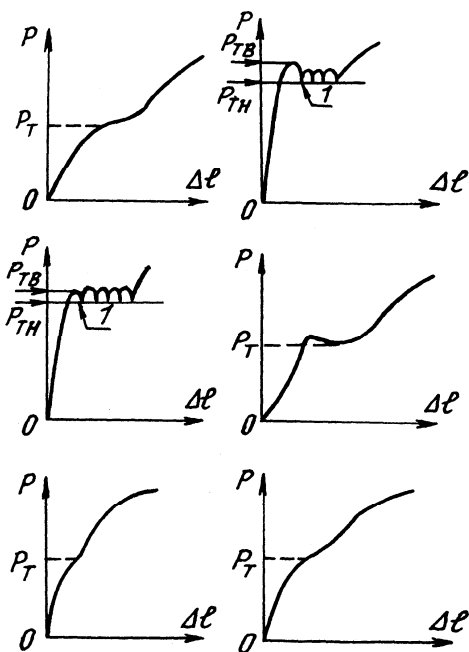


Рис. 2.1. Примеры определения нагрузки  $P_T$ ,  $P_{TH}$ ,  $P_{TB}$  в зависимости от вида диаграммы растяжения

1. Определить нагрузки  $P_T$ ,  $P_{TB}$  и  $P_{TH}$  по диаграмме растяжения. Примеры определения нагрузок для наиболее характерных видов диаграмм приведены на рис. 2.1.

2. Пределы  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{TH}$ ,  $\sigma_{TB}$  в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) вычислить по формуле:

$$\sigma_{T, TH, TB} = P_{T, TH, TB} / F_0. \quad (2.1)$$

Для корректного определения пределов текучести необходимо, чтобы 1 мм диаграммы по оси нагрузок в пересчете на действующие напряжения соответствовал не более 10 МПа.

3. Вычислить абсолютную погрешность определения предела текучести  $\Delta \sigma_{T, TH, TB}$  по формуле:

$$\Delta\sigma_{T, TB, TH} = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\Delta P_{T, TB, TH}}{d_0^2}\right)^2 + \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{P_{T, TB, TH}}{d_0^3} \cdot \Delta d_0\right)^2}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta P_{T, TB, TH}$  и  $\Delta d_0$  – абсолютные погрешности определения усилия  $P_{T, TB, TH}$  и диаметра  $d_0$ .

Если диаграмма растяжения « $P-\Delta l$ » не имеет площадки текучести, то в этом случае определяется условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  в соответствии с ГОСТ 1497–84.

### Определение предела текучести условного $\sigma_{0,2}$

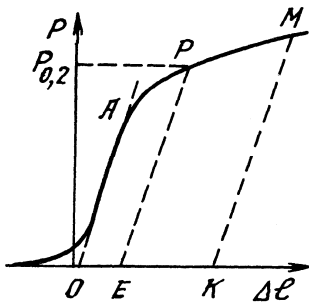


Рис. 2.2. Определение  $P_{0,2}$  по диаграмме растяжения

1. Начальную криволинейную часть диаграммы исключить. На оси абсцисс вправо от точки  $O$  отложить отрезок  $OE$  (соблюдая масштаб диаграммы), равный 0,2% от рабочей длины образца (рис. 2.2).

2. Из точки  $E$  провести прямую  $EP$  параллельно прямой  $OA$ . Точка пересечения  $P$  с диаграммой растяжения определит ординату, т.е. нагрузку  $P_{0,2}$ , соответствующую условному пределу текучести при заданном допуске на величину остаточного удли-

нения. Масштаб диаграммы по оси удлинения должен быть не менее 50 : 1.

При определении предела текучести условного  $\sigma_{0,2}$  скорость нагружения должна быть от 1,0 до 30,0 МПа  $\cdot$  с $^{-1}$  [(0,1 – 3,0) (кгс/мм $^2$ ) с $^{-1}$ ].

3. Предел текучести условный  $\sigma_{0,2}$  в МПа (кгс/мм $^2$ ) вычислить по формуле:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0. \quad (2.3)$$

4. Вычислить абсолютную погрешность определения предела текучести условного  $\Delta\sigma_{0,2}$  по формуле:

$$\Delta\sigma_{0,2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{0,2}}{F_0}\right)^2 + \left(\frac{P_{0,2}}{F_0} \cdot \frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta P_{0,2}$  и  $\Delta d_{0,2}$  – абсолютные погрешности определения усилия  $P_{0,2}$  и диаметра  $d_0$  соответственно.

### **Определение временного сопротивления $\sigma_B$ , относительного удлинения после разрыва $\delta$ и относительного сужения после разрыва $\psi$**

1. Временное сопротивление в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычислить по формуле:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}. \quad (2.5)$$

2. Вычислить абсолютную погрешность определения временного сопротивления по формуле (2.4), в которую вместо  $P_{0,2}$  и  $\Delta P_{0,2}$  подставляются  $P_{\max}$  и  $\Delta P_{\max}$  – максимальное усилие и абсолютная погрешность при его определении соответственно.

3. Относительное удлинение образца после разрыва в процентах вычислить по формуле:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

4. Вычислить абсолютную погрешность определения относительного удлинения образца после разрыва  $\Delta\delta$  по формуле:

$$\Delta\delta = \sqrt{\left[\frac{\Delta(l_k - l_0)}{l_0}\right]^2 + \left[\frac{(l_k - l_0)}{l_0^2} \cdot \Delta(l_0)\right]^2} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

где  $\Delta(l_k - l_0)$  и  $\Delta(l_0)$  – абсолютные погрешности определения удлинения образца и расчетной длины образца соответственно.

5. Относительное сужение образца после разрыва в процентах вычислить по формуле:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \% . \quad (2.8)$$

6. Вычислить абсолютную погрешность определения относительного сужения образца  $\Delta\psi$  по формуле:

$$\Delta\psi = 2 \sqrt{\left(\frac{d_k^2}{d_0^3} \Delta d_0\right)^2 + \left(\frac{d_k}{d_0^2} \Delta d_k\right)^2} \cdot 100 \% , \quad (2.9)$$

где  $\Delta d_0$  и  $\Delta d_k$  – погрешности замера диаметра образца до и после разрушения.

### Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- чертеж образца с размерами;
- диаграмму « $P - \Delta l$ », перестроенную в удобном для отчета масштабе;
- таблицы с результатами опыта и расчета;
- выводы по работе;
- обоснование выбора испытательной машины и пояса измерения нагрузки.

### Контрольные вопросы

Что называется пределом текучести материала и как он определяется по результатам испытания образцов?

Как оценивается погрешность определения механических характеристик материала?

Как определяется временное сопротивление материала и в чем принципиальное отличие этой характеристики от предела текучести?

Какие механические свойства материала отражают его деформационную способность и как они определяются?



## Работа 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ, ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ, МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

*Цель: ознакомление с методами определения предела пропорциональности, предела текучести, модуля упругости и коэффициента Пуассона с использованием тензометров.*

#### Введение

В случае отсутствия на испытательных машинах диаграммного аппарата, регистрирующего с необходимой точностью зависимость «усилие – деформация», ряд механических характеристик может быть определен с помощью специальных приборов – тензометров, предназначенных для замера малых деформаций. Тензометры бывают разных конструкций и типов: механические, оптические, электрические и т.д.

В настоящей работе при определении предела пропорциональности, модуля упругости и условного предела текучести применяют оптико-механический тензометр Мартенса, который устанавливается на специальный образец диаметром  $d = 10$  мм на базе 100 мм.

#### Описание оптико-механического тензометра Мартенса

Прибор состоит из набора шин со струбциной, двух зеркальце-держателей со съемными зеркальцами, двух зрительных труб с двумя шкалами, общей подставкой, одним патронодержателем и штатива для установки.

Схема прибора дана на рис. 3.1. К исследуемому образцу с помощью пружинной струбцины прикрепляются две пластинки-шины  $Ш$ , опирающиеся на него с одного конца неподвижными ножами  $Н$ , а с другого конца – подвижными призмами  $А$  с поперечным сечением в виде ромба. На одной оси с призмой неподвижно закреплено зеркальце  $З$ . Участок между опорами шины длиной  $l$

является базой прибора и расчетной длиной образца. В тензомере Мартенса шины имеют длину 50, 100, 150 и 200 мм.

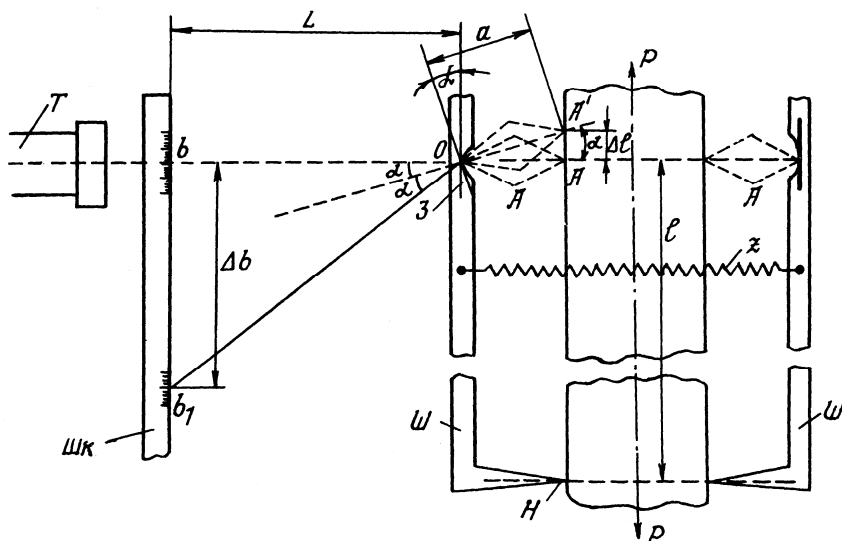


Рис. 3.1. Оптическая схема работы оптико-механического тензомера Мартенса при растяжении образца

На некотором расстоянии  $L$  от зеркала устанавливается зрительная труба  $T$  с миллиметровой шкалой  $Шк$ . Зеркальце и труба устанавливаются так, чтобы через трубу можно было бы наблюдать в зеркальце отражение шкалы и делать отсчет на шкале по горизонтальной риске в трубе.

При удлинении образца на  $\Delta l$  диагональ призмы повернется вокруг точки  $O$  вместе с зеркалом на некоторый малый угол  $\alpha$ ; острие призмы, упирающееся в образец, переместится из точки  $A$  в точку  $A'$ , а луч, соединяющий центр зеркала и соответствующее деление на шкале, повернется по законам оптики на угол  $2\alpha$  и переместится из точки  $b$  в точку  $b_1$ . Разность двух отсчетов  $\Delta b = (b_1 - b)$  характеризует деформацию образца  $\Delta l$ .

Из рис. 3.1 видно, что  $\Delta l = \alpha \sin \alpha$  и  $\Delta b = L \operatorname{tg} 2\alpha$ . Ввиду малости угла  $\alpha$  можно принять  $\sin \alpha \approx (\operatorname{tg} 2\alpha) / 2$  и, следовательно,

$$\frac{\Delta l}{\Delta b} = \frac{a}{2L}, \text{ или } \Delta l = \Delta b \frac{a}{2L}.$$

Чтобы исключить влияние эксцентриситета, устанавливают два зеркала с призмами и ведут наблюдение через две зрительные трубы (левую и правую).

Погрешность определения разности двух отсчетов составляет  $\pm 1$  мм. Погрешность установки зрительной трубы равна  $\pm 5$  мм. Диагональ призмы  $a$  равна  $(5 \pm 0,02)$  мм.

Порядок установки частей тензометра Мартенса и его настройки подробно описан в приложении 3.3.

Показания, отсчитываемые по левой и правой шкалам тензометра Мартенса при нагружении образца и разности отсчетов в делениях шкал тензометра, записывают в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Нагрузка $P$ , кН(кгс)	Отсчет по левой шкале тензометра $b_{\text{лев}}$ , мм	Отсчет по правой шкале тензометра $b_{\text{пр}}$ , мм	Разности отсчетов	
			по левой шкале тензометра $\Delta b_{\text{лев}}$ , мм	по правой шкале тензо- метра $\Delta b_{\text{пр}}$ , мм
1	2	3	4	5

Затем подсчитывают приращение удлинения образца в миллиметрах на ступень нагружения по показаниям отдельно левой

$$\Delta l_{\text{лев}} = \Delta b_{\text{лев}} \cdot \frac{a}{2L}$$

и правой шкал тензометра

$$\Delta l_{\text{пр}} = \Delta b_{\text{пр}} \cdot \frac{a}{2L}.$$

За приращение удлинения образца в миллиметрах принимают среднее арифметическое из этих двух значений:

$$\Delta l = \frac{(\Delta l_{\text{лев}} + \Delta l_{\text{пр}})}{2} \cdot \frac{a}{2L}. \quad (3.1)$$

Погрешность измерения деформации в данной работе равна:

$$\Delta(\Delta l) = \sqrt{\left(\frac{a}{2L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{2L} \cdot 0,02\right)^2 + \left(\frac{\Delta b \cdot a}{2L^2} \cdot 5\right)^2}. \quad (3.2)$$

Для определения коэффициента Пуассона необходимо на каждой ступени нагружения образца в упругой области регистрировать одновременно значения продольной и поперечной деформаций. Для этой цели используют плоский стальной образец, на который в продольном и поперечном направлениях приклеены тензодатчики сопротивления.

### **Описание способа измерения деформаций с помощью тензодатчиков сопротивления**

Рабочей частью резисторных тензодатчиков сопротивления является тонкая проволока или фольга из материала с высоким коэффициентом тензочувствительности  $\kappa$ , который равен отношению изменения электросопротивления  $\Delta R/R$  проволоки тензодатчика к упругому относительному удлинению  $\varepsilon$  образца

$$\kappa \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R}.$$

Следовательно, измеряя изменение электросопротивления  $\Delta R$  проволоки тензодатчика, можно определить относительную линейную деформацию  $\varepsilon$  образца в направлении базы тензодатчика.

Тензодатчик плотно приклеивается к поверхности образца в нужном направлении. При растяжении в образце возникают напряжения и соответствующие им упругие деформации, в результате чего пропорционально меняется электросопротивление тензодатчика. Для регистрации изменения сопротивления тензодатчик включают в схему измерительного моста. На рис. 3.2 показан уравновешенный мост, где  $R_1$  – резисторный датчик 2ПКП-10-100В,  $R_2$  – компенсационный датчик с тем же сопротивлением, что у рабочего  $R_1$  до начала испытания. Сопротивления  $R_3 = R_4 \gg \gg R_1 = R_2$ . На одну из диагоналей моста подают ток от источника питания Б5-8, а в другую включают измеритель деформации ИДЦ-1 с электронным усилителем. Когда мост сбалансирован, индикатор

усилителя показывает нуль. При растяжении образца  $R_1$  изменяется, и в цепи индикатора появляется ток, пропорциональный  $\Delta R/R$ , величина которого  $J$  фиксируется на цифровом табло измерителя деформации ИДЦ-1.

### Порядок выполнения работы Обмер и установка образца

1. Измерение диаметра образца  $d_0$  до испытания произвести микрометром не менее, чем в трех местах – середине и на границах рабочей части – в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Площадь поперечного сечения образца  $F_0$  подсчитать, используя наименьшее из полученных значений  $d_0$ .

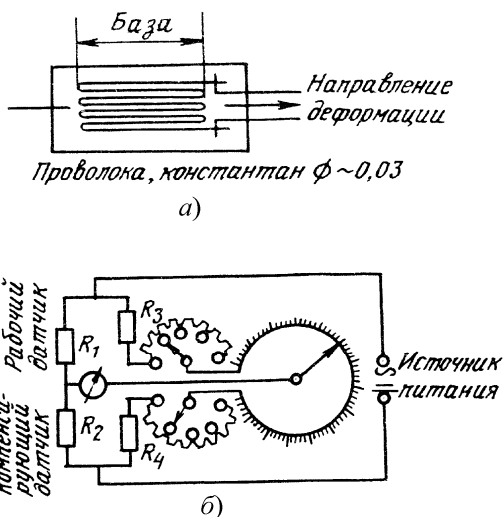


Рис. 3.2. Уравновешенный мост:

а – резисторный тензодатчик; б – схема измерения деформации с помощью тензодатчиков сопротивления

2. Отметить на рабочей длине образца кернами, рисками или иными метками зону установки тензометра Мартенса.

3. Закрепить образец в захватах испытательной машины и приложить к нему начальную нагрузку  $P_0$ , соответствующую напря-

жению, равному 5–0 % от предполагаемого предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ .

4. Установить тензометр Мартенса на образец (см. приложение 3.3).

### **Определение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ (расчетный способ)**

1. Произвести нагружение образца равными ступенями до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70–80 % от предполагаемого предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ . Число ступеней нагрузки должно быть не менее 4. Время выдержки на каждой ступени до 5–7 с.

2. Дальнейшее нагружение произвести более мелкими ступенями. Когда приращение удлинения для малой ступени нагружения превысит среднее значение приращения удлинения (при той же ступени нагрузки) более чем в 1,5 раза, дальнейшее нагружение прекратить. Определить среднюю величину приращения удлинения на малую ступень нагружения. Найденную величину увеличить в соответствии с принятым допуском, и из ряда значений найти нагрузку  $P_{\text{пц}}$ , при которой достигается подсчитанное значение приращения. Для уточнения значения  $P_{\text{пц}}$  допускается применение метода линейной интерполяции.

3. Предел пропорциональности в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычислить по формуле:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}. \quad (3.3)$$

Погрешность определения предела пропорциональности  $\Delta \sigma_{\text{пц}}$  вычислить по формуле:

$$\Delta \sigma_{\text{пц}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\text{пц}}}{F_0}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{пц}}}{F_0} \cdot \frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta P_{\text{пц}}$  и  $\Delta d_0$  – погрешности  $P_{\text{пц}}$  и  $d_0$  соответственно.

Пример определения предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$  расчетным способом приведен в справочном приложении 3.1.

## **Определение предела текучести условного с допуском на величину остаточной деформации при разгрузке $\sigma_{P_{0,05}}$ (расчетный способ)**

1. После установки тензометра при  $P_0$  образец нагрузить нагрузкой  $P_1 = 2P_0$ , выдержать в течение 5–7 с и разгрузить до начального значения нагрузки  $P_0$ , чтобы удостовериться в отсутствии остаточного удлинения. Затем образец нагрузить до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70–80 % от предполагаемого значения предела упругости  $\sigma_{P_{0,05}}$ . Дальнейшее нагружение произвести ступенями с выдержкой 5–7 с на каждой ступени. Затем разгрузить образец до  $P_0$  и измерить остаточное удлинение после каждой разгрузки.

Испытание прекратить, если остаточное удлинение после разгрузки превысит заданный допуск. По результатам испытания определить нагрузку  $P_{0,05}$ , соответствующую заданному допуску на остаточное удлинение. Для уточнения численного значения  $P_{0,05}$  допускается использовать линейную интерполяцию.

2. Предел текучести условный  $\sigma_{P_{0,05}}$  в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычислить по формуле:

$$\sigma_{P_{0,05}} = \frac{P_{0,05}}{F_0}. \quad (3.5)$$

Погрешность расчета определяется по формуле (3.4), в которую вместо  $P_{\text{пц}}$  и  $\Delta P_{\text{пц}}$  подставляются  $P_{0,05}$  и  $\Delta P_{0,05}$  – погрешность определения нагрузки  $P_{0,05}$ .

Пример приведен в справочном приложении 3.2.

## **Определение предела текучести условного с допуском на величину полной деформации $\sigma_{\text{п}}$**

1. Для определения предела текучести условного с допуском на величину полной деформации (упругой + остаточной) установить на образец тензометр и записать диаграмму растяжения образца при медленном его нагружении.

2. На диаграмме растяжения провести прямую, параллельную оси ординат (оси усилий) и отстоящую от нее на расстоянии, равном допуску на величину полной деформации с учетом масштаба диаграммы. Точка пересечения этой прямой с диаграммой растяжения соответствует усилию при пределе текучести условном  $\sigma_{п}$ .

3. Предел текучести условный с допуском на величину полной деформации  $\sigma_{п}$  в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) вычислить по формуле (3.5), указав рядом с индексом «п» величину допуска.

Погрешность расчета  $\sigma_{п}$  определяется по формуле (3.4).

### **Определение модуля упругости $E$ с помощью тензометра (расчетный способ)**

1. Установить образец в захваты испытательной машины и подгрузить его начальной нагрузкой, соответствующей напряжению, равному 5–10 % от предполагаемого предела пропорциональности материала. Установить на образец тензометр.

2. Произвести нагружение образца равными ступенями  $\Delta P$  (не менее 5) до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70–80 % от предполагаемого предела пропорциональности  $\sigma_{пц}$ .

3. По результатам испытаний определить среднюю величину приращения удлинения образца  $\Delta l_{cp}$ , мм на ступень нагружения  $\Delta P$ , Н (кгс).

4. Модуль упругости  $E$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) вычислить по формуле:

$$E = \frac{\Delta P l_0}{\Delta l_{cp} F_0}. \quad (3.6)$$

Погрешность расчета  $\Delta E$  определяется выражением:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{l_0 \Delta P}{\Delta l_{cp} F_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P \cdot \Delta(l_0)}{\Delta l_{cp} F_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P l_0 \cdot \Delta(\Delta l_{cp})}{F_0 (\Delta l_{cp})^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P l_0 \cdot \Delta d_0}{\Delta l_{cp} F_0 d_0}\right)^2}, \quad (3.7)$$

где  $\Delta P$ ,  $\Delta(\Delta l_{cp})$ ,  $\Delta(l_0)$ ,  $\Delta d_0$  – погрешности определения усилий, приращения удлинения на ступень нагружения, рабочей длины и диаметра образца соответственно.



## Определение коэффициента Пуассона $\mu$

1. Установить плоский образец в захватах испытательной машины, подключить тензодатчики к соответствующим приборам и включить для прогрева измеритель деформаций ИДЦ-1.

2. Медленно увеличивать растягивающую нагрузку на образце одинаковыми ступенями в зоне упругого деформирования образца. Одинаковым приращениям (ступеням) нагрузки  $\Delta P$  должны соответствовать одинаковые приращения деформаций образца в продольном  $\Delta l$  и поперечном  $\Delta b$  направлениях. Время выдержки под нагрузкой для снятия показаний на каждой ступени нагружения должно составлять 5–7 с.

3. По результатам испытаний определить среднее значение удлинения  $\Delta l_{\text{ср}}$  и среднее значение деформации образца в поперечном направлении  $\Delta b_{\text{ср}}$  на ту же ступень нагружения  $\Delta P$ . Коэффициент Пуассона равен:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{l_0 \Delta b_{\text{ср}}}{b_0 \Delta l_{\text{ср}}} \right|. \quad (3.8)$$

4. Относительная деформация образца пропорциональна изменению его электросопротивления, которое в данной работе фиксируют в делениях шкалы прибора  $I$ . После каждой ступени нагружения образца записать показания измерителя деформации ИДЦ-1 одновременно с продольного  $I_{\text{прод}}$  и поперечного  $I_{\text{поп}}$  тензодатчиков (в делениях шкалы прибора). Подсчитать среднее приращение показаний прибора на ступень нагружения  $\Delta P$  продольного и поперечного тензодатчиков:

$$\Delta I_{\text{прод}} = \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_n}{n}, \quad \Delta I_{\text{прод}} = A \varepsilon_x,$$
$$\Delta I_{\text{поп}} = \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_n}{n}, \quad \Delta I_{\text{поп}} = A \varepsilon_y.$$

Обозначения:  $I$  – показание прибора в делениях шкалы прибора;  $n$  – число ступеней нагружения;  $A$  – константа.

5. Определить коэффициент Пуассона по формуле:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\Delta I_{\text{поп}}}{\Delta I_{\text{прод}}} \right|. \quad (3.9)$$

### Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- чертеж образца и его размеры;
- схему измерения деформаций с помощью тензометра Мартенса;
- таблицы с результатами опыта и расчета;
- графики;
- выводы по работе;
- обоснование выбора испытательной машины и пояса измерения нагрузки.

### Контрольные вопросы

Что называется пределом пропорциональности материала?

Какие приспособления необходимы при испытании образцов для определения предела пропорциональности материала?

Какие типы тензометров используются при определении предела пропорциональности материала?

Принципиальная схема работы тензометра Мартенса.

Последовательность испытания при определении предела пропорциональности и модуля нормальной упругости материала.

Каков принцип измерения деформации образца с помощью тензодатчиков сопротивления?

Что называется коэффициентом Пуассона и какие измерения необходимы для его определения?

### Пример определения предела пропорциональности

Допуск на увеличение тангенса угла, образованного касательной к кривой деформации с осью нагрузок, – 50 % от его значения на линейном участке.

Испытываемый материал – конструкционная сталь.

Размеры образцов: начальный диаметр  $d_0 = 10$  мм, начальная площадь поперечного сечения  $F_0 = 78,5$  мм<sup>2</sup>, начальная расчетная длина (база тензометра)  $l_0 = 100$  мм. Цена деления шкалы тензометра 0,002 мм.

Ожидаемый предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}} = 690$  МПа (70 кгс/мм<sup>2</sup>). Начальную нагрузку принимаем  $P_0 = 3900$  Н (400 кгс). Нагрузка, отвечающая 75 % нагрузки ожидаемого предела пропорциональности, составляет  $P = 39600$  Н (4040 кгс). После округления принимаем  $P = 39000$  Н (4000 кгс). Для получения не менее четырех отсчетов в указанном интервале нагрузок, крупную степень нагружения  $\Delta P_1$  вычисляем по формуле:

$$\Delta P_1 = (P - P_0) / 4 = 8800 \text{ Н (900 кгс)}.$$

Дальнейшее нагружение производим мелкими ступенями  $\Delta P = 1500$  Н (150 кгс), что соответствует приращению напряжения  $\Delta \sigma = 19,5$  МПа (2 кгс/мм<sup>2</sup>) до заметного отклонения от закона пропорциональности. Результаты испытания записываем в табл. П 3.1.

Среднее приращение удлинения  $\Delta l_n$  на малую ступень  $\Delta P = 1500$  Н (150 кгс) составляет:

$$\Delta l_n = \frac{(149,5 - 109,0) \cdot 150}{5350 - 400} = 4,5 \text{ деления шкалы}.$$

Найденное приращение удлинения согласно установленному допуску увеличиваем на 50 %. Искомое удлинение на ступень нагрузки  $\Delta P = 1500$  Н (150 кгс) составит  $4,5 \cdot 1,5 = 6,8$  делений шкалы. За нагрузку, отвечающую пределу пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , принимаем  $P = 54000$  Н (5500 кгс).

Таблица П 3.1

Нагрузка $P$ , Н (кгс)	Отсчеты по шкале тензометра	Разность отсчетов по тензо- метру	Нагрузка $P$ , Н (кгс)	Отсчеты по шкале тензо- метра	Разность отсчетов по тензо- метру
	в делениях шкалы тензометра			в делениях шкалы тензометра	
3900(400)	0,0	0,0	45100(4600)	127,5	5,0
12700(1300)	27,0	27,0	46600 (4750)	131,5	4,0
21600(2200)	54,5	27,5	48100(4900)	136,5	4,5
30400(3100)	82,0	27,5	49500(5050)	141,0	5,0
39200(4000)	109,0	27,0	51000(5200)	145,0	4,0
40700(4150)	113,5	4,5	52500 (5350)	149,5	4,5
42200(4300)	118,0	4,5	54000 (5500)	156,0	6,5
43700(4450)	122,5	4,5	55400(5650)	164,0	8,0

Найденная нагрузка уточняется методом линейной интерполяции. После уточнения

$$P_{\text{пц}} = 54300 \text{ Н (5535 кгс)}.$$

Предел пропорциональности, отвечающий вычисленной нагрузке:

$$\sigma_{\text{пц}} = 54300/78,5 = 690 \text{ МПа (70,5 кгс/мм}^2\text{)}.$$

Погрешность определения предела пропорциональности:

$$\sigma_{\text{пц}} = \sqrt{\left(\frac{543}{78,5}\right)^2 + \left(\frac{54300}{78,5} \cdot \frac{0,01}{10}\right)^2} = 6,93 \approx 7 \text{ МПа,}$$

откуда следует, что  $\sigma_{\text{пц}} = (690 \pm 7) \text{ МПа}$ .

**Пример определения предела текучести условного  
с допуском на величину остаточной деформации  
при разгрузке  $\sigma_{P_{0,05}}$  (расчетный способ)**

Испытываемый материал: конструкционная сталь, ожидаемый предел текучести  $\sigma_{P_{0,05}}$  равен 735 МПа (75 кгс/мм<sup>2</sup>).

Размеры образца те же, что и в приложении 3.1. Начальное напряжение  $\sigma_0 = 5$  кгс/мм<sup>2</sup>, что соответствует нагрузке  $P_0 = 392,5$  кгс. Округленно начальную нагрузку принимаем равной 400 кгс.

Допуск на величину остаточного удлинения составляет 0,05 % от начальной расчетной длины образца (база тензометра).

Определяем остаточное удлинение, выраженное в делениях шкалы тензометра:

$$\Delta l = \frac{0,05 \cdot 100}{100 \cdot 0,002} = 25,0 \text{ делений шкалы.}$$

Первую ступень нагрузки  $P_1$ , составляющую 70–80 % нагрузки ожидаемого предела текучести  $\sigma_{P_{0,05}}$ , принимаем равной 44130 Н (4500 кгс).

В дальнейшем нагружение производим ступенями по  $P = 1470$  Н (150 кгс), что соответствует приращению напряжения  $\Delta\sigma = 20$  МПа (2 кгс/мм<sup>2</sup>) до тех пор, пока остаточное удлинение при  $P_0 = 3920$  Н (400 кгс) достигнет или несколько превысит 25 делений шкалы тензометра. Результаты испытания записывают в табл. ПЗ.2.

По результатам испытаний находим нагрузку, предшествующую вычисленному необходимому значению остаточного удлинения (25 делений по шкале тензометра):

$$P_{0,05} = 57360 \text{ Н (5850 кгс).}$$

Найденная нагрузка  $P_{0,05}$  уточняется интерполяцией. Она равна 57610 Н (5875 кгс).

Таблица П 3.2

Нагрузка $P$ , Н (кгс)	Отсчеты по шкале тензометра после разгрузки	Остаточное удлинение
	в делениях шкалы тензометра	
3920 (400)	0,0	0.0
44130(4500)	0.5	0,5
45600(4650)	1,0	1,0
47070(4800)	1.5	1.5
48540 (4950)	3,0	3.0
50010(5100)	5,0	5,0
51480(5250)	7.5	7,5
52950(5400)	10,5	10,5
54420(5550)	13,5	13,5
55890 (5700)	17,5	17,5
57360 (5850)	23.5	23,5
58830 (6000)	32,5	32.5

Уточненный предел текучести условный с допуском на величину остаточной деформации при разгрузке равен:

$$\sigma_{P_{0,05}} = 735 \text{ МПа (75 кгс/мм}^2\text{)}.$$

Погрешность определения  $\sigma_{P_{0,05}}$  равна:

$$\Delta\sigma_{P_{0,05}} = \sqrt{\left(\frac{576,1}{78,5}\right)^2 + \left(\frac{57610 \cdot 0,01}{78,5 \cdot 10}\right)^2} = 7,39 \approx 7,5 \text{ МПа,}$$

откуда  $\sigma_{P_{0,05}} = (735 \pm 7,5) \text{ МПа.}$

### Установка тензометра Мартенса

Установка прибора перед испытанием производится следующим образом.

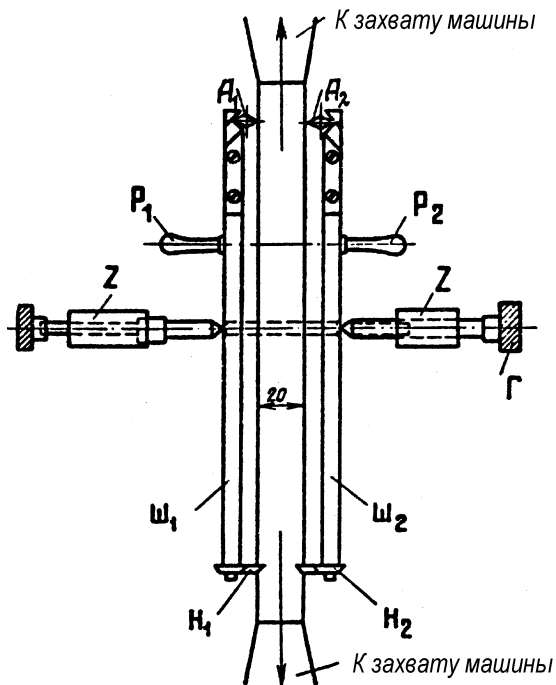


Рис. П 3.1. Положение шин с зеркальцедержателем на образце

1. *Установка шин (рис. П 3.1).* К исследуемому образцу прижимают обеими руками с двух противоположных сторон выбранные для работы шины Ш<sub>1</sub> и Ш<sub>2</sub> заостренными концами (ножами) Н<sub>1</sub> и Н<sub>2</sub> вниз.

Придерживая шины пальцами левой руки, правой прижимают их посредством пружинного зажима-струбцины Z. Во избежание притупления призм натяжение пружины струбцины Z не должно быть сильным. Шины, прижатые к образцу, должны быть расположены строго друг против друга, параллельно оси образца, без перекоса.

2. *Установка зеркальцедержателей.* Ручкой  $P_1$  несколько оттягивают от образца одну из шин (см. рис. П 3.1) одной рукой, а другой вставляют в образовавшееся пространство между шиной  $Ш_1$  и образцом призму  $A_1$  зеркальцедержателя, держа его за головку пальцами правой руки. Общий вид зеркальцедержателя, на оси которого  $Q$  укреплены призма  $A$ , стрелка  $S$  и зеркало  $З$ , показан на рис. П 3.2. Ромбовидная часть зеркальцедержателя  $A$  должна одним ребром опираться на поверхность образца, а другим войти в выемку шины  $Ш_1$ , расположившись нормально к образцу, как это схематично изображено на рис. П 3.1.

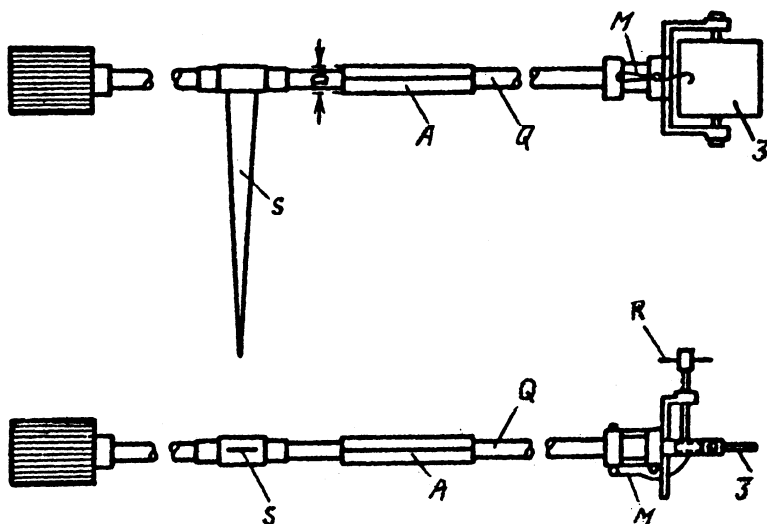


Рис. П 3.2. Общий вид зеркальцедержателя

Таким же способом устанавливают второй зеркальцедержатель в пространстве между оттянутой шиной  $Ш_2$  и образцом так, чтобы зеркала обеих шин располагались по разные стороны образца. При правильном положении ножей зеркальцедержателей стрелки  $S$ , укрепленные на их осях, должны быть строго параллельны как оси образца, так и малым диагоналям призм  $A_1$  и  $A_2$ .

Установка второго зеркальцедержателя требует большей осторожности, чем первого. У начинающих исследователей при уста-



новке второго зеркальцедержателя часто вся система разваливается и зеркала разбиваются.

Большим и указательным пальцами правой руки (лучше легким постукиванием карандаша или спички) зеркала поворачивают вокруг горизонтальной оси зеркальцедержателя, пока поверхность зеркала 3 не займет вертикальное положение. Поворот зеркала 3 вокруг вертикальной оси осуществляют с помощью винта  $R$  (см. рис. П 3.2).

3. *Установка штатива с трубами и измерительными шкалами* производится следующим образом:

- штатив первоначально устанавливают на расстоянии около 1,3 м от захватов испытательной машины;
- установочными винтами трубу с подвижной крестовиной устанавливают в вертикальное положение;
- устанавливают измерительные шкалы на расстоянии 1250 мм от зеркал. При этом ту шкалу, которая будет отражаться передним (ближним к штативу) зеркальцем, расположить полностью вниз (нуль вверху), а другую шкалу, деления которой отражаются задним зеркальцем, расположить всю вверх (нуль внизу).

4. *Установка шкал* производится следующим образом:

- передвигая штатив с прибором и смотря над зрительной трубой, стараются направить трубу так, чтобы в зеркальце увидеть изображение соответствующей шкалы;
- слегка отвинтить затяжные винты патрубке шкалодержателя, чтобы, не двигая с места штатива, перемещать шкалодержатель в патрубке и, таким образом, удалять или приближать шкалу к зеркальцу;
- держа установочную линейку по возможности в горизонтальном положении, упирают один ее конец в поверхность шкалы, а другой направляют к зеркальцу;
- передвигая шкалу прибора, приближают установочную линейку к зеркальцу настолько, чтобы погрешность расстояния между шкалой и зеркалом (1250 мм) не превышала  $\pm 0,05$  мм;
- закрепляют в этом положении шкалу винтом у патрубке штатива и осторожно отводят установочную линейку в сторону.

5. *Установка зрительных труб* производится таким образом, чтобы луч, идущий от шкалы и отражаясь от зеркальца, попал в поле зрения зрительной трубы. Эту установку удобнее производить

вдвоем: один становится у зрительных труб и следит за перемещением изображения шкалы в трубе, а другой, по указанию первого, производит необходимый поворот или наклон зеркальца. Быстрота установки зависит от согласованности действий работающих. Порядок установки следующий:

- один из работающих, глядя над зрительной трубой, смотрит в соответствующее зеркальце, в то время как второй концом спички или винтом осторожно вращает зеркальце (см. рис. П 3.2) до тех пор, пока первый не увидит изображение шкалы в зеркальце. При этом следует убедиться в том, что видимое изображение действительно соответствует шкале данной трубы, для чего проводят перед шкалой рукой, чтобы увидеть это движение в зеркальце;

- наблюдающий винтом наводит зрительную трубу так, чтобы было ясно видно само зеркальце с оправкой;

- вращением винта окуляра добиваются отчетливого изображения шкалы в трубе;

- устанавливают визирную риску в трубе на деление, близкое к нулю.

6. *Снятие прибора с образца* производится следующим образом:

- шины, зеркальцедержатели и струбцинку снимают с образца в порядке, обратном установке;

- немедленно после снятия прибора части его укладывают в соответствующие гнезда специального футляра.

## Работа 4

### ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ИСТИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

*Цель: ознакомление с методикой перестроения диаграммы растяжения в диаграмму «истинное напряжение - истинная деформация» и использования их для определения предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$  предела текучести  $\sigma_{\text{T}}$  ( $\sigma_{0,2}$ ), истинного временного сопротивления  $S_{\text{в}}$ , истинного сопротивления разрыву  $S_{\text{к}}$ , относительного равномерного удлинения образца  $\delta_{\text{р}}$ , относительного удлинения после разрыва  $\delta$ .*

#### Введение

При растяжении образца размеры его поперечного сечения, а следовательно и площадь поперечного сечения уменьшаются. Истинное нормальное напряжение  $S$  при растяжении определяется соотношением:

$$S = \frac{P}{F}, \quad (4.1)$$

где  $P$  – растягивающая сила, а  $F$  – площадь поперечного сечения образца под нагрузкой  $P$ .

При изучении закономерностей пластического деформирования материала большое значение имеет диаграмма, представляющая зависимость истинной пластической деформации  $e$  от истинного напряжения  $S$ .

При расчете истинной пластической деформации часто исходят из условия неизменности объема материала при пластическом деформировании. В этом случае истинная пластическая деформация определяется выражением:

$$e = \ln \frac{F_0}{F}, \quad (4.2)$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца до растяжения.

Текущая площадь поперечного сечения  $F$  связана с площадью  $F_0$  соотношением:

$$F = \frac{F_0}{1 + (\Delta l / l_0)}, \quad (4.3)$$

где  $\Delta l$  – удлинение расчетной длины  $l_0$ , соответствующее нагрузке  $P$ .

Из машинной диаграммы « $P - \Delta l$ » пересчетом по формулам (4.1– 4.3) легко получить диаграмму истинных напряжений « $S - e$ » до момента достижения максимальной нагрузки  $P_{\max}$ . До этого момента пластическая деформация распределяется равномерно по длине образца, что позволяет использовать приведенные выше формулы. После достижения  $P_{\max}$  происходит локализация пластической деформации. Для определения истинного напряжения и истинной пластической деформации, необходимо измерять наименьший диаметр в зоне локализации пластической деформации.

Для диаграмм « $S - e$ » характерен непрерывный рост напряжений  $S$  с ростом деформаций  $e$ . Это явление называется деформационным упрочнением материала. Изучение диаграммы « $S - e$ » позволяет идентифицировать механизмы, ответственные за пластическое деформирование.

Так у поликристаллов после участка упругой деформации деформационное упрочнение определяется выражением:

$$S = S_{0,2} + Ae^n, \quad (4.4)$$

где  $S_{0,2}$  – истинный предел текучести ( $P_{0,2} / F$ ),  $A$  – константа,  $n$  – коэффициент деформационного упрочнения.

Величина коэффициента деформационного упрочнения позволяет сделать предположение о том или ином преимущественном механизме пластического деформирования.

### Методика построения диаграммы истинных напряжений

Диаграмму истинных напряжений строят в координатах « $S - e$ » (рис. 4.1). Истинное нормальное напряжение  $S$  подсчитывают по формуле (4.1). Истинную относительную остаточную деформацию  $e$  подсчитывают по формуле (4.2). Для определения текущей пло-

щади поперечного сечения  $F$  необходимо в процессе испытания образца на участке снижения нагрузки несколько раз останавливать машину, разгружать образец и измерять наименьший диаметр  $d$  поперечного сечения образца. При построении начального участка (до максимальной нагрузки включительно) диаграммы истинных напряжений, где происходит равномерная деформация образца, можно воспользоваться условием неизменяемости объема и подсчитать текущую площадь поперечного сечения по формуле (4.3).

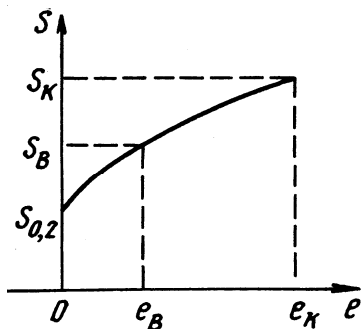


Рис. 4.1. Диаграмма истинных напряжений

### Образец и испытательное оборудование

Испытание при комнатной температуре проводится в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытывается цилиндрический образец с начальным диаметром рабочей части 6 или 10 мм. В качестве испытательного оборудования применяют разрывные и универсальные испытательные машины всех систем при условии соответствия их требованиям ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 28840-90.

В настоящей работе используются разрывные испытательные машины ИМ-12 или Р-5.

При проведении испытаний на растяжение должны соблюдаться следующие условия: центрирование образца в захватах испытательной машины и равномерность нагружения.

### Порядок выполнения работы

1. Обмерить образец микрометром и подсчитать начальные размеры поперечного сечения ( $d_0$  и  $F_0$ ). За величину начального диаметра принять среднее арифметическое из шести обмеров диаметра образца, произведенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях в начале, середине и конце участка расчетной длины образца.

2. На стандартном образце любым царапающим предметом нанести риски, ограничивающие его расчетную длину  $l_0$  с погрешностью до 1 %.

3. Для определения  $\delta_p$  по всей рабочей части образца рекомендуется наносить риски, керны или иные метки через каждые 5 или 10 мм.

4. Установить образец в захватах испытательной машины, подготовить машину к испытанию.

5. Включить электродвигатель и без остановок растягивать образец до момента достижения максимальной нагрузки  $P_{\max}$ , фиксируя при этом диаграмму растяжения  $P-\Delta l$ .

6. При достижении  $P_{\max}$  (точнее, при первом незначительном ее уменьшении) остановить машину, быстро разгрузить образец и микрометром с коническими насадками измерить наименьший диаметр образца. Снова нагрузить образец и на участке снижения нагрузки после образования шейки еще 3–4 раза разгрузить, измеряя каждый раз наименьший диаметр. Значения нагрузок  $P$  и соответствующих им наименьших диаметров  $d$  занести в табл. 4.1

Таблица 4.1

Нагрузка на участке сосредоточенной деформации $P$ , Н(кгс)	Наименьший диаметр образца после разгрузки $d$ , мм	Наименьшая площадь поперечного сечения образца $F$ , мм <sup>2</sup>	Истинное напряжение $S$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Истинная остаточная деформация образца $e$ , %

7. После разрушения образца зафиксировать разрушающую нагрузку  $P_k$  и вынуть образец из захватов испытательной машины. Измерить диаметр образца в месте разрыва ( $d_k$ ) и конечную длину образца ( $l_k$ ).

8. Записать диаграмму жесткости испытательной машины на том же поясе измерения нагрузки и с тем же масштабом записи деформации.

9. Вычесьть диаграмму жесткости испытательной машины из диаграммы растяжения образца.

### Определение предела пропорциональности $\sigma_{пц}$ графическим способом по ГОСТ 1497–84

1. Провести прямую  $OM$ , совпадающую с начальным линейным участком диаграммы растяжения, приведенной на рис. 4.2.

Через точку  $O$  провести ось ординат  $OP$ , затем провести прямую  $AB$ , параллельную оси абсцисс на произвольном уровне, и на этой прямой отложить отрезок  $kn$ , равный половине отрезка  $mk$ . Через точку  $n$  и начало координат провести прямую  $On$ , и параллельно ей провести касательную  $CD$  к диаграмме растяжения. Ордината точки касания касательной к кривой растяжения определит нагрузку  $P_{пц}$ .

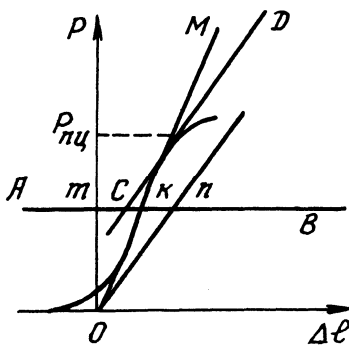


Рис. 4.2. Определение  $\sigma_{пц}$  по диаграмме растяжения

Предел пропорциональности в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычислить по формуле:

$$\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0. \quad (4.5)$$

Погрешность расчета  $\Delta\sigma_{пц}$  определяется выражением (3.4).

### Определение предела текучести $\sigma_T$ ( $\sigma_{0,2}$ )

1. Определение предела текучести  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ) производят по начальному участку диаграммы растяжения. При наличии площадки текучести за нагрузку  $P_T$  принимают ординату площадки текучести. При отсутствии площадки текучести предел текучести определяют по допуску на остаточную деформацию.

2. Для определения нагрузки  $P_{0,2}$  отложить на оси абсцисс (см. рис. 2.2) в масштабе отрезок  $OE$  от начала координат, равный

$0,002l_0$ . Из точки  $E$  провести прямую  $EP$ , параллельную прямой  $OA$ . Точка пересечения  $P$  с диаграммой растяжения определит искомую нагрузку  $P_{0,2}$ .

Предел текучести в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) вычислить по формуле:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0. \quad (4.6)$$

Погрешность вычисления определяется по формуле (3.4).

### **Определение истинного временного сопротивления $S_B$ , истинного сопротивления разрыву $S_k$ , относительного равномерного удлинения $\delta_p$ и относительного удлинения после разрыва $\delta$**

1. Истинное временное сопротивление в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) вычислить по формуле:

$$S_B = \frac{P_{\max}}{F_0} \left( 1 + \frac{\Delta l_p}{l_0} \right), \quad (4.7)$$

где  $P_{\max}$  – наибольшая нагрузка при растяжении;  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца;  $l_0$  – начальная расчетная длина образца;  $\Delta l_p$  – абсолютное остаточное удлинение образца в момент достижения  $P_{\max}$  (определяется по машинной диаграмме  $P - \Delta l$ ).

2. Истинное сопротивление разрыву в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) вычислить по формуле:

$$S_k = \frac{P_k}{F_k}, \quad (4.8)$$

где  $P_k$  – нагрузка в момент разрыва образца;  $F_k$  – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Абсолютная погрешность вычисления  $\Delta S_k$  определяется по формуле:

$$\Delta S_k = \sqrt{\left( \frac{\Delta P_k}{F_k} \right)^2 + \left( \frac{P_k}{F_k} \cdot \frac{\Delta d_k}{d_k} \right)^2}, \quad (4.9)$$



где  $\Delta P_k$  и  $\Delta d_k$  – абсолютные погрешности определения усилия  $P_k$  и замера  $d_k$  соответственно.

3. Для определения относительного равномерного удлинения выбрать большую из частей образца после разрыва. Отступив от места разрыва не менее чем на  $3 d_0$ , отметить начальную метку рабочей части образца, на которой определяют относительное равномерное удлинение  $\delta_p$ . От начальной метки отсчитать количество меток, соответствующее удвоенному начальному диаметру, и замерить длину этого участка после разрыва  $l_{кр}$ .

Относительное равномерное удлинение  $\delta_p$  (%) вычислить по формуле:

$$\delta_p = \frac{l_{кр} - l_{нр}}{l_{нр}} \cdot 100 \% , \quad (4.10)$$

где  $l_{нр}$  – начальная длина участка, на котором определяется  $\delta_p$ .

4. Относительное удлинение образца в % после разрыва  $\delta$  и погрешность его расчета определяются формулами (2.6) и (2.7).

### Построение диаграммы истинных напряжений

Построение диаграммы истинных напряжений  $S$ – $e$  (см. рис. 4.1) произвести следующим образом:

1. На оси ординат отложить величину истинного предела текучести  $S_{0,2} = \sigma_{0,2}$ , определяемого достижением нагрузки  $P_{0,2}$ .

2. На участке равномерной деформации до  $P_{max}$  включительно произвести перестроение машинной диаграммы, используя условие неизменяемости объема; отметить ~10 точек и по формулам (4.1), (4.2) и (4.3) подсчитать их координаты  $S$  и  $e$ ; данные занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Нагрузка на участке равномерной деформации образца $P$ , Н(кгс)	Абсолютная остаточная деформация $\Delta l$ , мм	Текущая площадь поперечного сечения $F$ , мм <sup>2</sup>	Истинное напряжение $S$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Истинная остаточная деформация образца $e$ , %
1	2	3	4	5

3. На участке сосредоточенной деформации (за  $P_{\max}$ ) для построения диаграммы истинных напряжений использовать данные табл. 4.1, полученные при 4–5 разгрузках образца. Подсчитать координаты точек  $S$  и  $e$  по формулам (4.1) и (4.2).

Последняя точка диаграммы истинных напряжений имеет ординату  $S_k$ , абсцисса точки  $e_k$  подсчитывается по формуле (4.2).

4. По данным табл. 4.1 и 4.2 построить диаграмму истинных напряжений  $S - e$ .

### Определение коэффициента деформационного упрочнения $n$

1. На участке равномерной деформации кривые  $S - e$  хорошо аппроксимируются зависимостью:

$$(S - S_{0,2}) = Ae^n.$$

В двойных логарифмических координатах эта зависимость представляется прямой линией.

2. По данным табл. 4.2 рассчитать данные для построения этой прямой и занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Истинное напряжение на участке равномерной деформации $S$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Истинная остаточная деформация $e$	$\lg(S - S_{0,2})$	$\lg e$	$n \lg e$

3. Определить коэффициент деформационного упрочнения как тангенс угла наклона прямой  $\lg(S - S_{0,2}) = \lg A + n \lg e$  к оси абсцисс.

### Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- чертеж образца и его размеры;
- таблицы с результатами опыта и расчета;
- диаграммы;
- выводы по работе.

## Контрольные вопросы

Что называется истинными напряжением и деформацией и их отличие от условных величин?

Как определить предел пропорциональности по диаграмме растяжения образца?

Каков принцип перестроения диаграммы растяжения в диаграмму истинных напряжений и деформаций на участке равномерного деформирования образца?

## Список рекомендуемой литературы

1. Металлы. ГОСТ 1497–84. Методы испытаний на растяжение. М.: Госстандарт, 1984.
2. Золотаревский В.С. Механические испытания металлов. М.: Металлургия, 1974.
3. Артюхина Л.Л., Гольцкв В.Ю. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Статические испытания металлов»: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1988.

## Работа 5

### ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ

*Цель: практическое ознакомление с методом испытания на сжатие цилиндрического образца; определение условного предела текучести малоуглеродистой стали в соответствии с ГОСТ 25.503–80; построение диаграммы истинных напряжений для малоуглеродистой стали; определение предела прочности ряда малопластичных материалов.*

### Введение

Механические свойства материала при приложении сжимающих нагрузок определяют по ГОСТ 25.503–80. Этим ГОСТом предусматривается по результатам испытаний образцов на сжатие определение следующих механических характеристик: модуля упругости, предела пропорциональности, предела упругости, физического предела текучести, условного предела текучести, предела прочности. Стандарт также устанавливает методику испытания образцов на сжатие для построения кривой упрочнения и оценки ее параметров.

Испытание на сжатие имеет характерные особенности, существенно отличающие его от испытания на растяжение. На характеристики прочности и пластичности при испытании на сжатие существенное влияние оказывает трение в опорных торцах образца. Чем меньше отношение длины образца к его диаметру, тем заметнее влияние условий трения, которое внешне проявляется в появлении бочкообразной формы образца из пластичных материалов. При этом сменяется одноосное сжатие на трехосное, когда уменьшается величина касательных напряжений. Именно по этой причине пластичные металлы при испытании на сжатие могут значительно деформироваться (образец сплющивается) не разрушаясь. Увеличение же отношения длины образца к его диаметру может привести к потере устойчивости образца на ранних стадиях нагружения.

Для испытания материалов на сжатие используют цилиндрические образцы четырех типов: с гладкими торцами I–III типов (рис. 5.1) и торцевыми выточками IV типа (рис. 5.2). Тип и размеры образца выбирают по табл. 5.1.

Таблица 5.1

Тип образца	Начальный диаметр образца $d_0$ , мм	Рабочая (начальная расчетная) высота образца $h$ ( $h_0$ ), мм	Определяемые характеристики	Примечание
I	20	160	Модуль упругости	Рис. 5.1
II	10 15 20 25 30	30 45 60 75 90	Предел пропорциональности, предел упругости	
III	10 15 20 25 30	$h_0$ определяют по формуле $h_0 = 2,24d_0 \frac{\sqrt{n}}{\nu},$ где $n$ – показатель деформационного упрочнения; $\nu$ – коэффициент приведенной высоты ( $\nu = 0,5$ для образцов III типа, $\nu = 0,76$ для образцов IV типа)	Физический предел текучести, условный предел текучести. Построение кривой упрочнения до значений логарифмических деформаций $\epsilon_i \leq \frac{2}{3} \ln(h_0 / d_0)$	
IV	10 15 20 25 30		Построение кривой упрочнения	

При испытании образцов на сжатие большое внимание следует уделять обеспечению соосности его нагружения, поэтому, как правило, нагружение образца производится в специальных приспособлениях, имеющих строго параллельные опоры. При испытании об-

разцов I, II типов торцы образцов обезжиривают. Смазывание торцов образцов смазочным материалом недопустимо. При испытании образцов III типа допускается применение смазочного материала (машинного масла с графитом), а при испытании образцов IV типа применение смазки (стеарина, парафина или воска) является обязательным.

Иногда применяют и другие смазывающие материалы, обеспечивающие уменьшение трения между образцом и деформирующей плитой.

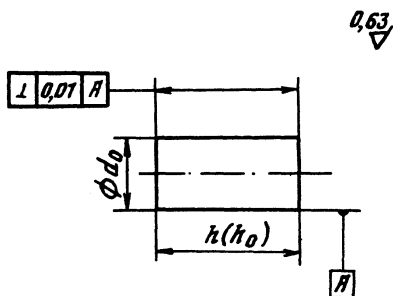


Рис. 5.1. Образец I, II и III типа для испытания на сжатие

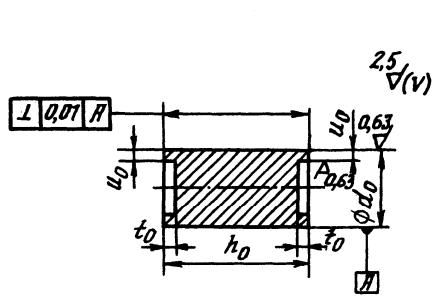


Рис. 5.2. Образец IV типа для испытания на сжатие

## Испытательная машина

Испытание на сжатие проводят на универсальных испытательных машинах или прессах, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 28840–90 и ГОСТ 8905–73. При проведении испытаний на сжатие испытательная машина должна быть оснащена:

- преобразователем силы и тензOMETром или преобразователями силы и перемещений с самопишущим прибором – при определении механических характеристик  $E^c$ ,  $\sigma_{\text{пл}}^c$ ,  $\sigma_{0,05}^c$ . При этом установка тензOMETра производится на образце, а самопишущий прибор предназначен для записи диаграммы  $P^c = f(\Delta h)$ ;
- преобразователями силы и перемещений с самопишущим прибором – при определении механических характеристик  $\sigma_T^c$ ,  $\sigma_{0,2}^c$ ,  $\sigma_B$  и построении кривой упрочения на образцах III типа. При этом

преобразователь перемещений устанавливают на активном захвате испытательной машины. Допускается измерять абсолютную деформацию образца ( $\Delta h$ ) измерительными приборами и инструментом;

- преобразователем силы и измерительными приборами и инструментом – при построении кривой упрочнения на образцах IV типа.

Погрешность измерения преобразователем силы сжимающей нагрузки  $P^c$  не должна превышать  $\pm 1$  % значения измеряемой величины, начиная с 0,2 наибольшего значения каждого диапазона измерения.

При испытании образцов на сжатие до предела текучести скорость относительной деформации выбирают от 0,00025 до 0,0025  $\text{с}^{-1}$ , за пределом текучести – не более 0,001  $\text{с}^{-1}$ . Скорость относительной деформации рекомендуется определять с учетом упругой податливости «испытательная машина-образец».

## **Порядок выполнения работы**

### **Определение условного предела текучести пластичной стали**

1. Условный предел текучести при сжатии  $\sigma_{0,2}^c$  определить на образцах III типа.

2. Измерить диаметр  $d_0$  и высоту образца  $h_0$  микрометром с погрешностью 0,01 мм.

3. Образец поместить в нагружающее приспособление. При использовании машины с записью диаграммы деформирования образец нагрузить непрерывно до напряжения, превышающего ожидаемое значение условного предела текучести и записать диаграмму на самопишущем приборе. Полученную диаграмму перестроить с учетом жесткости испытательной машины. По перестроенной диаграмме определить нагрузку, соответствующую условному пределу текучести при сжатии ( $P_{0,2}^c$ ). Предел текучести при сжатии вычислить по формуле:

$$\sigma_{0,2}^c = \frac{P_{0,2}^c}{F_0}.$$

4. Порядок испытаний образца с использованием для измерения абсолютной остаточной деформации  $\Delta h$  приборов и инструмента следующий. Образец последовательно нагрузить и разгрузить, увеличивая каждый раз предельную сжимающую нагрузку на величину, равную 0,–0,15 величины нагрузки  $(P_{0,2}^c)$ , соответствующей ожидаемому пределу текучести материала  $(\sigma_{0,2}^c)^{ож}$ . После каждого цикла нагружения с разгрузкой производить измерение высоты образца для определения величины остаточной деформации. Начиная с уровня  $0,8(P_{0,2}^c)^{ож}$ , на последующих ступенях нагружения предельную нагрузку каждый раз увеличивать на величину  $0,02(P_{0,2}^c)^{ож}$ , пока не будет зафиксирована остаточная деформация  $\Delta h$  не менее, чем в два раза превышающая  $0,002h$  – допуск на остаточную деформацию на пределе текучести материала. По результатам испытаний построить диаграмму  $P^c = f(\Delta h)$  и определить нагрузку, соответствующую условному пределу текучести при сжатии  $P_{0,2}^c$ , который вычисляют по приведенной выше формуле. Для уточнения нагрузки  $P_{0,2}^c$  допускается использование линейного интерполирования.

### **Построение диаграммы истинных напряжений для пластичной стали**

1. Для построения диаграммы истинных напряжений провести испытание образца при непрерывном нагружении или ступенчато с записью диаграммы деформирования на самопишущем приборе, с разгрузкой и обмером его высоты микрометром с погрешностью, не превышающей 0,05 мм, после каждой ступени нагружения. Возможно определение условного предела текучести и построение диаграммы истинных напряжений при испытании одного образца. При испытании образца с разгрузкой нагружение его после достижения предела текучести произвести большими ступенями до деформации:



$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \ln h_0 / d_0 .$$

2. Истинное напряжение при сжатии определить из условия постоянства объема и равномерности сжатия по высоте образца по формуле:

$$S = \frac{P}{F} = \frac{P(1 - \varepsilon^c)}{F_0} = \sigma(1 - \varepsilon^c) ,$$

где  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – текущие значения, соответственно, условного напряжения и относительной деформации сжатия.

Как видно из формулы, истинное напряжение при сжатии оказывается меньше условного в отличие от истинного напряжения при растяжении.

### **Определение предела прочности при сжатии ряда малопластичных материалов**

Предел прочности при сжатии  $\sigma_B^c$  определить на образцах III типа. Образец нагружают непрерывно до разрушения. Наибольшую нагрузку, предшествующую разрушению образца, принимают за нагрузку, соответствующую пределу прочности при сжатии, который вычисляют по формуле:

$$\sigma_B^c = \frac{P_{\max}^c}{F_0} .$$

*Примечание.* До разрушения при сжатии можно довести лишь такие малопластичные материалы, как чугун, органическое стекло, горные породы, керамика и другие. Характер разрушения зависит от контактных сил трения и свойств материала. Если силы трения велики, то у таких материалов, как чугун, органическое стекло, обычно наблюдается разрушение типа среза. При сжатии древесины вдоль волокон наблюдается растрескивание по площадкам наименьшего сопротивления разрушению путем отрыва по направлению волокна.

### **Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

– протокол испытания образца для определения  $\sigma_{0,2}$  и построения диаграммы истинных напряжений;

– чертежи испытываемых образцов с указанием типа и размеров;

– машинную диаграмму  $P^c - \Delta h$  испытания стального образца и перестроенную машинную диаграмму с учетом жесткости испытательной машины;

– диаграмму истинных напряжений малоуглеродистой стали и прочностные характеристики, определенные при испытании малопластичных материалов.

### **Контрольные вопросы**

Принципиальные особенности испытания на сжатие, отличающие его от испытаний образцов на растяжение.

Какие механические свойства материала определяются при испытании на сжатие?

Какие ограничения накладываются на деформацию образца при испытании на сжатие?

Какие существуют ограничения на соотношения размеров образцов для определения таких характеристик материала при сжатии, как модуль нормальной упругости, пределы пропорциональности и текучести?

Возможные процедуры испытания образцов для определения предела текучести при сжатии.

Образцы каких материалов можно довести до разрушения при их испытании на сжатие?

### **Список рекомендуемой литературы**

1. ГОСТ 25.503–80. Расчеты и испытания на прочность. Метод механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.

2. Метод испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т.2. Методы исследования механических свойств металлов. /Под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1974.

3. Фридман Я.Б. Механические свойства материалов. М.: Машиностроение. 1974. Т. I и II.

## Работа 6

### ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ

*Цель: практическое ознакомление с методом испытания на кручение образца круглого поперечного сечения: определение модуля сдвига и основных механических свойств малоуглеродистой стали и чугуна в соответствии с ГОСТ 3565–80; построение диаграммы истинных напряжений.*

#### Введение

Деформация прямолинейного бруса, вызываемая парами сил, плоскости действия которых перпендикулярны к оси бруса, называется кручением. Деформация, возникающая при кручении круглого бруса, имеет следующие особенности: поперечные сечения остаются плоскими и не изменяют своих размеров, расстояния между поперечными сечениями остаются неизменными, радиусы поперечных сечений остаются прямыми. Таким образом, поперечные сечения поворачиваются относительно друг друга как жесткие диски. Элемент, выделенный поперечными, цилиндрическими и осевыми сечениями, испытывает угловую деформацию, которая оценивается относительным сдвигом (углом сдвига). Деформация сдвига вызывается касательными напряжениями, действующими по граням элемента. Согласно закону Гука, эти напряжения в упругой области деформирования при сдвиге равны:

$$\tau = G \cdot \gamma = G \frac{r\varphi}{l}, \quad (6.1)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\tau = \frac{r\varphi}{l}$  – относительный сдвиг;  $\varphi$  – угол поворота одного поперечного сечения бруса относительно другого;  $l$  – расстояние между этими сечениями;  $r$  – расстояние от центра тяжести поперечного сечения до точки, в которой определяются напряжения.

В точках поперечного сечения бруса, таким образом, действуют касательные напряжения  $\tau_{xt}$ , которые прямо пропорциональны расстоянию  $r$  и направлены перпендикулярно к радиусу.

Величину  $\tau_{xt}$  можно подсчитать по формуле:

$$\tau_{xt} = \frac{M_x}{J_p} r, \quad (6.2)$$

где  $M_x$  – крутящий момент в сечении;  $J_p$  – полярный момент инерции площади поперечного сечения.

По закону парности касательных напряжений в осевых сечениях скручиваемого бруса будут действовать напряжения  $|\tau_{xt}| = |\tau_{tx}|$ . Напряженное состояние, возникающее при кручении бруса, называется чистым сдвигом. В площадках, наклоненных под углом  $45^\circ$  к площадкам, в которых действуют  $\tau_{xt}$ , будут действовать главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  ( $\sigma_2 = 0$ ), причем  $\sigma_1 = -\sigma_3 = |\tau_{xt}|$ .

Наибольшего значения напряжения достигают в периферийных точках сечения и обращаются в нуль в центре. Для точек, находящихся на контуре сечения,

$$|\tau_{xt}|_{\max} = \frac{|M_x|}{W_p}, \quad (6.3)$$

где  $W_p = J_p / r_{\max}$  – полярный момент сопротивления сечения при кручении.

Угол закручивания одного сечения относительно другого в упругой области определяется по формуле  $\varphi = M_x l / (GJ_p)$ .

Сопротивление материала деформированию при кручении характеризуется диаграммой деформирования  $M_x - \varphi$ . Типичная диаграмма  $M_x - \varphi$  для малоуглеродистой стали представлена на рис. 6.1.

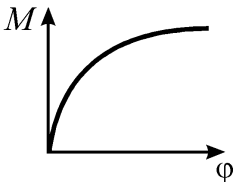


Рис. 6.1. Диаграмма деформирования цилиндрического образца при кручении

Обработка диаграммы  $M - \varphi$  позволяет определить следующие характеристики сопротивления металла деформированию и разрушению при кручении:

- предел пропорциональности при кручении  $\tau_{\text{пц}}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – касательное напряжение в периферийных точках поперечного сечения, вычисленное по формуле для упругого кручения,

при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой (моментом) и углом закручивания достигает такой величины, что тангенс угла, образованного касательной к кривой деформации и осью нагрузок, увеличивается на 50 % своего значения на линейном участке;

- предел текучести при кручении  $\tau_{0,3}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – касательное напряжение, вычисленное по формуле для упругого кручения, при котором образец получает остаточный сдвиг, равный 0,3 %;

- условный предел прочности при кручении  $\tau_{пч}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – касательное напряжение, равное отношению наибольшего момента при кручении, предшествующего разрушению образца, к полярному моменту сопротивления образца;

- истинный предел прочности при кручении  $t_k$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – наибольшее истинное касательное напряжение при разрушении образца, вычисленное с учетом перераспределения напряжений при пластической деформации.

Способность материала деформироваться при кручении на различных стадиях нагружения оценивается величинами относительного угла закручивания  $\Theta = \varphi/l$  и относительного сдвига  $\gamma = \varphi d/(2l)$  (для малых углов закручивания, когда  $\gamma \leq 0,1$ ) или  $\gamma = \text{arctg}(\varphi d/(2l))$  (когда  $\gamma > 0,1$ ). Отметим, что как при упругом, так и при пластическом кручении деформация, измеряемая относительным сдвигом  $\gamma$ , прямо пропорциональна расстоянию от оси образца.

Обычно пластическое разрушение при кручении происходит путем среза от действия наибольших касательных напряжений по плоскости, перпендикулярной к оси бруса (например, разрушение мягкой стали). При хрупком разрушении (чаще всего наблюдается разрушение путем отрыва) плоскость разрушения проходит по винтовой поверхности, по площадкам, в которых действуют наибольшие растягивающие напряжения  $\sigma_1$ . След винтовой поверхности на наружной поверхности образца образует винтовую линию, касательная к которой направлена под углом 45° к оси образца (например, разрушение чугуна).

## Испытательная машина и приборы

Испытания проводятся на вертикальной испытательной машине типа МК-50-1.

Для измерения малых углов закручивания при определении предела пропорциональности и предела текучести используется угломер. Одна из конструкций угломера представлена на рис. 6.2. Угломер состоит из частей *A* и *B*, каждая из которых с помощью фиксирующих винтов *1* и *6* закрепляется на образце *2*. Расстояние

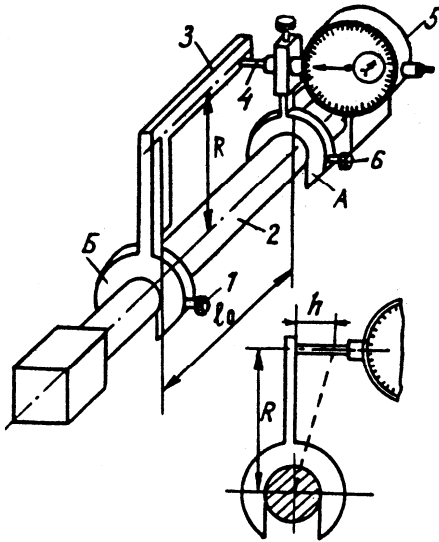


Рис. 6.2. Установка индикаторного угломера на образце

$l_0$  между плоскостями, перпендикулярными к оси образца и проходящими через оси фиксирующих винтов, называется базой угломера. При закручивании образца часть *B* угломера поворачивается относительно части *A*. При этом измерительный наконечник *4* индикатора *5*, укрепленный на неподвижной части *A* угломера, опирающийся на планку *3* подвижной части *B* угломера, замеряет перемещение  $h$ , возникающее в результате взаимного поворота сечений.

Малые углы закручивания вычисляются по формуле:

$$\varphi = h / R, \text{ рад}, \quad (6.4)$$

где  $R$  – расстояние от оси образца до измерительного наконечника индикатора ( $R = 40$  мм).

### Порядок выполнения работы

1. Перед испытанием измерить диаметр  $d$  и длину  $L$  цилиндрической части образца. Подсчитать полярный момент инерции по формуле:

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

и полярный момент сопротивления по формуле:

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}.$$

2. Проверить нулевое показание указательной стрелки диаграммного аппарата испытательной машины

3. Закрепить головки стального образца в захватах машины: укрепить на образце пояски прибора – индикаторного угломера – на расстоянии 50 мм друг от друга, фиксируя это расстояние с помощью шаблона.

4. Закрепить диаграммную бумагу (работа может быть выполнена и без записи машинной диаграммы). Отметить нулевое положение оси абсцисс – оси угла закручивания. Установить лимб угла закручивания в нулевое положение.

5. Нагрузить образец крутящим моментом, соответствующим начальному касательному напряжению  $\tau_0$ , составляющему ~10 % ожидаемого предела пропорциональности исследуемого материала (для образца диаметром  $d=10$ мм – крутящим моментом ~3-5 Нм). Установить стрелку индикатора на нуль

6. Догрузить образец вначале большими (не менее трех), а затем малыми ступенями, отмечая после каждой ступени нагружения угловую деформацию. Нагружение большими ступенями осуществляют до 80 % ожидаемого предела пропорциональности. Ступени малых нагружений выбирают так, чтобы до достижения предела пропорциональности было проведено не менее пяти ступеней малых нагружений. Значение малой ступени нагружения должно соответствовать увеличению касательного напряжения не более чем на 10 МПа (1,02 кгс/мм<sup>2</sup>). Результаты показаний занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$M$ , Нм (кгс)	Отсчет по шкале индикатора $h$ , мм	$\Delta h = h_n - h_{n-1}$	$\Delta \varphi = \Delta h/R$

Такое нагружение продолжают до тех пор, пока прирост угловой деформации от нагружения малой ступенью не превысит в  $\sim 2$  раза среднее значение приращения угловой деформации, полученное на предыдущих малых ступенях нагружения на линейном участке.

Отметим, что уже на начальной стадии пластического деформирования имеет место релаксация напряжений и крутящего момента, что проявляется в некотором снижении крутящего момента при прекращении нагружения образца.

7. Модуль сдвига  $G$  в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) найти по формуле:

$$G = \frac{\Delta M l_0}{\Delta \varphi J_p}, \quad (6.5)$$

где  $\Delta M$  – большая ступень нагружения – крутящий момент на упругом участке нагружения (до предела пропорциональности) в Нм ( $\text{кгс}\cdot\text{м}$ );  $\Delta \varphi$  – средний прирост угла закручивания в радианах на расчетной длине  $l_0$ , приходящийся на одну ступень нагружения  $\Delta M$  на упругом участке нагружения (см. табл. 6.1);  $J_p$  – полярный момент инерции в  $\text{мм}^4$ .

8. Предел пропорциональности найти следующим образом: на участке, на котором еще не наблюдается отклонение от закона Гука (см. табл. 6.1), определить наибольший момент и средний угол закручивания на малую ступень нагружения. Найденную величину среднего угла закручивания увеличить на 50 % в соответствии с принятым допуском. В ряду значений моментов находят такой ближайший к максимальному на линейном участке деформирования, при котором отмечается полуторократный прирост деформации на одну малую ступень нагружения. Этот момент принимается за  $M_{\text{пц}}$ . При необходимости уточнения значения  $M_{\text{пц}}$  допускается применение линейной интерполяции.

Нагрузка  $M_{\text{пц}}$  может быть определена по диаграмме деформации в координатах  $M$ – $\varphi$ , если масштаб записи диаграммы обеспечивает не более 0,05 % относительного сдвига на 1 мм оси абсцисс и не более 5 МПа ( $0.51 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ ) касательного напряжения на 1 мм оси ординат. Для построения диаграммы  $M$ – $\varphi$  могут быть использованы данные табл. 6.1.



Предел пропорциональности при кручении  $\tau_{\text{пц}}$  в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) подсчитывают по формуле:

$$\tau_{\text{пц}} = M_{\text{пц}} / W_p.$$

9. Определение предела текучести при кручении. Для определения предела текучести необходимо предварительно определить относительный сдвиг  $\gamma_{\text{пц}}$  и показания индикатора угломера, соответствующие пределу пропорциональности. Деформацию до предела пропорциональности считают упругой, а за пределом пропорциональности – упругопластической. Относительный сдвиг  $\gamma_{\text{пц}}$  в % вычислить по формуле:

$$\gamma_{\text{пц}} = \frac{\varphi_{\text{пц}} d}{2l_0}, \quad (6.6)$$

где  $\varphi_{\text{пц}}$  – угол закручивания на расчетной длине  $l_0$ , определяемый как суммарный угол закручивания, соответствующий  $M_{\text{пц}}$ .

К вычисленному для предела пропорциональности относительному сдвигу  $\gamma_{\text{пц}}$  прибавляют 0,003 (допуск 0,3 % на остаточный сдвиг). Это означает, что угол закручивания  $\varphi_{\text{пц}}$  на базе  $l_0$  должен быть увеличен на  $\Delta\varphi = 2 \cdot 0,003 \cdot l_0/d = 2 \cdot 0,003 \cdot 5/1 = 0,03$  рад, а в пересчете на перемещение ножки угломеры  $\Delta h = \Delta\varphi R = 0,03 \cdot 40 = 1,20$  мм, т.е. на 120 делений шкалы индикатора при цене деления 0,01 мм.

Таким образом, для определения предела текучести табл. 6.1 нужно дополнить или рядом значений момента на участке деформации образца до достижения предела текучести и за ним, задавая деформацию по индикатору угломера (5–6 измерений момента при прохождении стрелкой угломера 120 делений), или, определив предварительно показание индикатора угломера, соответствующее пределу пропорциональности, прибавить к нему 120 делений, и в процессе непрерывного монотонного нагружения образца зафиксировать показание стрелки диаграммного аппарата машины  $M_{0,3}$ .

Предел текучести при кручении  $\tau_{0,3}$  в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычисляют по формуле:  $\tau_{0,3} = M_{0,3} / W_p$ .

Предел текучести может быть найден графически. Для этого по полученным в табл. 6.1 значениям моментов и углов закручивания вычисляют величины касательного напряжения ( $\tau = M/W_p$ ) и относительного сдвига  $\gamma$  и строят диаграмму зависимости  $\tau$  от  $\gamma$ . По оси абсцисс откладывают значение установленного для предела текучести относительного сдвига, равное 0,3 %, и от этой точки проводят прямую, параллельную начальному прямолинейному участку, до пересечения с кривой диаграммы. Ордината точки пересечения этой кривой укажет искомый предел текучести  $\tau_{0,3}$ .

10. Снять индикаторный угломер и продолжить деформирование образца до его разрушения. При отсутствии машинной диаграммы  $M - \varphi$  фиксировать крутящий момент через каждые пол оборота деформации образца, максимальный момент  $M_k$ , предшествующий разрушению образца, и максимальный угол закручивания  $\varphi_{\max}$ .

11. Условный предел прочности при кручении  $\tau_{пч}$  в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычислить по формуле:  $\tau_{пч} = M_k / W_p$ .

12. Истинный предел прочности при кручении  $\tau_k$  в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) вычислить по одной из формул:

$$\tau_k = \frac{4}{\pi d^3} \left[ 3M_k + \theta \left( \frac{dM}{d\theta} \right)_k \right] \quad (6.7)$$

Или

$$\tau_k = \frac{4}{\pi d^3} \left[ 3M_k + \varphi \left( \frac{dM}{d\varphi} \right)_k \right]. \quad (6.8)$$

Величину  $(dM/d\varphi)_k$  определить графически на участке кривой зависимости  $M$  от  $\varphi$ , предшествующем разрушению образца, как тангенс угла между касательной и кривой в данной точке и осью абсцисс (в соответствующем масштабе). При значительной пластической деформации  $dM/d\varphi$  (или  $dM/d\theta$ ) стремится к нулю, и тогда

$$\tau_k = \frac{12M_k}{\pi d^3},$$

что соответствует условию возникновения пластического шарнира.

13. Максимальный остаточный сдвиг при кручении найти как разность общего сдвига  $\gamma_k$  и упругого сдвига  $\gamma_y$ . Общий сдвиг вычислить по формуле:

$$\gamma_k = \varphi_{\max} \frac{d}{2L}, \quad (6.9)$$

если величина сдвига не превышает 0,1 рад. При большей деформации общий сдвиг определяют по формуле:

$$\gamma_k = \operatorname{arctg} \left( \frac{\varphi_{\max} d}{2L} \right), \quad (6.10)$$

где  $\varphi_{\max}$  – максимальный угол закручивания на всей длине цилиндрической части образца, рад.

Для пластичных металлов, у которых величина упругой деформации относительно мала, можно принять общий сдвиг за остаточный. Для малопластичных металлов, у которых упругая деформация относительно велика, следует вычесть из общего сдвига  $\gamma_k$  упругий сдвиг  $\gamma_y = \tau_{\text{пч}} / G$ :

$$\gamma_{\max} = \gamma_k - \gamma_y. \quad (6.11)$$

14. Перестроение машинной диаграммы  $M - \varphi$  в диаграмму истинных напряжений в координатах  $t_{\max} - g_{\max}$  (истинный сдвиг) произвести подсчетом  $t_{\max}$  и  $g_{\max}$  по формулам:

$$t_{\max} = \frac{4}{\pi d^3} \left[ 3M + \varphi \frac{dM}{d\varphi} \right], \quad (6.12)$$

$$g_{\max} = \ln \left[ 1 + \frac{\gamma^2}{2} + \gamma \sqrt{1 + \gamma^2 / 4} \right] \quad (6.13)$$

для ряда точек диаграммы  $M - \varphi$ .

15. При испытании чугунного образца определить максимальный закручивающий момент, предшествующий разрушению, соответствующий ему угол закручивания и характер излома. По полученному значению  $M_k$  вычислить  $\tau_{\text{пч}}$ , и  $\tau_{\max}$ .

16. Провести анализ изломов стального и чугунного образцов и сделать вывод о характере их разрушения.

## Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- чертеж образца и его размеры;
- схему регистрации малых углов закручивания;
- протокол испытаний с использованием индикаторного угломера;
- диаграмму деформирования до разрушения в координатах  $M - \varphi$ ;
- диаграммы деформирования в координатах  $\tau - \gamma$  и  $t_{\max} - g_{\max}$ ;
- основные механические характеристики испытанных материалов;
- выводы о характере изломов стального и чугунного образцов.

## Контрольные вопросы

Что называется кручением?

Справедлива ли гипотеза плоских сечений на стадии упругопластического кручения цилиндрических образцов?

Что такое чистый сдвиг?

Что называется пределом пропорциональности при кручении и какие приспособления необходимы для его определения?

Как определяется предел текучести  $\tau_{0,3}$  при кручении и что значит допуск 0,3 на остаточную деформацию?

Что называется пределом прочности при кручении?

Характерный вид диаграммы деформирования при кручении и ее перестроение в диаграмму истинных напряжений.

В чем принципиальное отличие диаграмм  $\tau_{\max} - \gamma_{\max}$  от  $t_{\max} - g_{\max}$ ?

## Список рекомендуемой литературы

1. ГОСТ 3565–80. Металлы. Метод испытания на кручение.
2. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. /Под ред. А.Т.Туманова. Том II. Методы исследования механических свойств металлов. М.: Машиностроение, 1974.

## Работа 7

### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ И ТВЕРДОМЕРЫ

*Цель: ознакомление с твердомерами и методами определения твердости металлов; изучение закономерности пластического вдавливания шарика.*

#### Введение

Под твердостью понимают свойство поверхностного слоя материала оказывать сопротивление упругой и пластической деформации или разрушению при внедрении более твердого тела – индентора.

Существующие методы измерения твердости значительно отличаются друг от друга по форме применяемого индентора, условиям приложения нагрузки и способу расчета чисел твердости. Наиболее распространены методы, в которых используется статическое вдавливание индентора нормально поверхности образца.

Результаты испытаний на твердость зависят от продолжительности приложения нагрузки к вдавливаемому индентору и продолжительности выдержки под нагрузкой. При постоянной нагрузке линейный размер отпечатка равен

$$d = b \tau_n,$$

где  $\tau$  – время выдержки индентора под нагрузкой  $P$ ;  $b$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала и величины  $P$ .

Различают кратковременную и длительную твердость. В стандартных методах определяют кратковременную твердость при комнатной температуре. Здесь обычно  $\tau = 10 - 30$  с.

При измерении твердости в поверхностном слое образца под индентором возникает сложное напряженное состояние, близкое к объемному сжатию, которое характеризуется отсутствием нормальных растягивающих напряжений при наличии значительных касательных напряжений. Это способствует возникновению пластического состояния и оценке твердости практически любых, в том числе и очень хрупких материалов. Распространенность испытаний на твердость объясняется простотой и быстротой их проведения, отсутствием необходимости разрушения исследуемых объ-

ектов, возможностью испытания материалов различной пластичности и небольших объемов, иногда возможностью сопоставления характеристик твердости с данными других испытаний. При испытаниях на твердость могут быть косвенно оценены такие характеристики, как условный предел текучести и временное сопротивление (предел прочности).

## Стандартные методы испытания на твердость

Наибольшее практическое значение имеют статические испытания вдавливанием шарика (по Бринеллю – шкала *B*, по Роквеллу – шкалы *B*, *F*, *G*, *E*, *H*, *K*), конуса (по Роквеллу – шкалы *A*, *C* и *D*), пирамиды (по Виккерсу), пирамиды и бицилиндрического наконечника (по методу микротвердости). Измерение твердости перечисленными методами производится в соответствии с ГОСТами.

Общим обозначением численного результата определения твердости служит латинская буква *H*. Дополнительной буквой отмечается способ определения твердости: *HB* – твердость по Бринеллю; *HR* – твердость по Роквеллу; *HV* – твердость по Виккерсу;  $H_{\square}$ ,  $H_{\diamond}$ ,  $H_{\Delta}$ ,  $H_0$  – микротвердость (в зависимости от формы алмазного наконечника).

### Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012–59)

ГОСТ 9012–59 устанавливает метод измерения твердости по Бринеллю металлов и сплавов с твердостью не более 450 единиц при использовании в качестве индентора стального шарика и 650 единиц при использовании в качестве индентора твердосплавного шарика. Сущность метода заключается во вдавливании шарика в образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной перпендикулярно к поверхности образца, в течение определенного времени и измерении диаметра отпечатка после снятия нагрузки.

Твердость по Бринеллю *HB* (*HBW* – при использовании в качестве индентора твердосплавного шарика) выражается отношением приложенной нагрузки *P* к площади поверхности сферического отпечатка *F*:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $P$  – нагрузка в кгс;  $D$  – диаметр шарика в мм;  $d$  – диаметр отпечатка в мм.

При определении твердости по Бринеллю применяются шарики диаметром 10; 5; 2,5; 2; 1 мм с твердостью не менее 850 HV 10 для стального и 1500 HV 10 для твердосплавного.

Форма отпечатка при различной глубине и соответствующих ей нагрузках не сохраняет геометрического подобия, и поэтому значение твердости зависит от величины приложенной нагрузки и от времени ее приложения, особенно для пластичных материалов. Поэтому в ГОСТе 9012–59 оговорены уровни применяемых нагрузок, зависящих от соотношения  $K$  и  $D$ , приведенных в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Диаметр шарика $D$ , мм	Нагрузка $P$ в кгс для $K = P/D^2$				
	30	10	5	2,5	1
1,0	30	10	5,0	2,5	1,0
2,0	120	40	20	10	4,0
2,5	187,5	62,5 250	31,2 125	15,5	6,2
5,0	750	1000	500	62,5	25
10,0	3000			250	100

Диаметр шарика и соответствующую нагрузку следует выбирать так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от 0,25 до 0,6  $D$ . Для выбора  $K$  – соотношения между нагрузкой и квадратом диаметра шарика – рекомендуется пользоваться данными табл. 7.2.

Таблица 7.2

Материал	$HB$ ( $HBW$ )	$K$
Сталь, чугун, высокопрочные сплавы (на основе никеля, кобальта и др.).	до 140	10
	$\geq 140$	30
Титан и сплавы на его основе	от 50	15
Медь и сплавы на ее основе, легкие металлы и их сплавы.	$< 35$	5
	$\geq 35$	10
Подшипниковые сплавы.	от 8 до 50	2,5
Свинец, олово и др. мягкие сплавы	до 20	

Продолжительность выдержки под нагрузкой должна быть для черных металлов от 10 до 15 с, для цветных металлов и сплавов – от 10 до 180 с в зависимости от материала и его твердости. Число твердости имеет размерность кгс/мм<sup>2</sup>, которая в соответствии со стандартом не пишется. Твердость, равная 185 ед. по Бринеллю при условии, что  $D = 10$  мм,  $P = 3000$  кгс и продолжительность выдержки под нагрузкой от 10 до 15 с, обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами *HB*, например *185HB*, если использован стальной шарик.

При других условиях испытания после букв *HB (HBW)* указываются условия испытания в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки под нагрузкой.

Для получения правильных результатов необходимо соблюдать следующие условия:

- поверхность, подготовленная для испытания на твердость, должна быть плоской, параллельной опорной стороне, гладкой, сухой и свободной от посторонних веществ;
- наклеп и нагрев поверхности образца недопустимы;
- толщина испытуемого образца должна быть не меньше восьмикратной глубины отпечатка;
- твердость по Бринеллю определяется как среднее не менее чем из двух отпечатков на одном и том же материале; диаметр  $d$  каждого отпечатка измеряется в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берется его среднее значение.

### **Закономерности при определении твердости вдавливанием шарика**

Так как в случае измерения твердости по Бринеллю форма отпечатка не сохраняет геометрического подобия при различных условиях вдавливания шарика, то значение *HB* зависит от величины приложенной нагрузки  $P$ . Общее свойство всех кривых зависимости *HB* от  $P$  (рис. 7.1) состоит в том, что в довольно широком между  $P_1$  и  $P_2$  интервале значение твердости получается практически постоянным и наибольшим ( $HB_{\max}$ ). Силу  $P$  для определения твердости *HB* выбирают на участке затяжного максимума. Вид этой кривой и существование на ней максимума всецело связаны только со способом вычисления твердости *HB*.



При вдавливании шарика в металл последний получает постепенно увеличивающуюся остаточную деформацию и, следовательно, все возрастающее упрочнение. В результате этого металлы, испытываемые при различных усилиях вдавливания  $P$ , получают оценку твердости в различных стадиях своего упрочнения в процессе пластического вдавливания шарика. Поэтому сравнение твердости различных материалов по значению  $HВ$  является условным. С этой точки зрения заслуживает внимания общая для всех металлов закономерность пластического вдавливания твердого шарика, установленная экспериментально Мейером. Она имеет следующее выражение:

$$P = ad^n,$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;  $d$  – диаметр отпечатка в мм;  $a, n$  – константы материала.

Из формулы следует, что  $a = P/d^n$ , т.е. константа  $a$  численно равна силе вдавливания шарика  $P$ , когда диаметр отпечатка  $d$  равен 1 мм. Значение  $a$  зависит от материала и диаметра шарика. Величина  $n$  определяется в основном степенью деформационного упрочнения. Поскольку во многих случаях  $n = 2$ , то размерность  $a$  представляет  $\text{кгс/мм}^n \approx \text{кгс/мм}^2$ .

Константы  $a$  и  $n$  определяем с помощью прямой  $\lg P = \lg a + n \lg d$ , построенной по экспериментальным точкам  $A, B, C$  (рис. 7.2). Отрезок  $OD$  представляет собой величину  $\lg a$ , а постоянная  $n = \text{tg } \alpha$ , где  $\alpha$  – угол наклона прямой к оси абсцисс.

В приборах для измерения твердости по Бринеллю процесс приложения

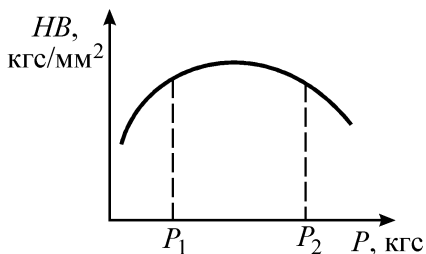


Рис. 7.1. Зависимость  $HВ$  от  $P$

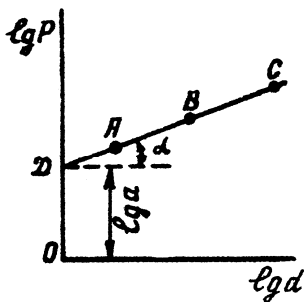


Рис. 7.2. Зависимость  $P = ad^n$  в логарифмических координатах

нагрузки, выдержки и снятия нагрузки производится автоматически.

Наиболее распространенным прибором для определения твердости по методу Бринелля является прибор типа ТШ.

На рис. 7.3 показана схема одного из них – ТШ-2М, широко используемого в лабораторной практике.

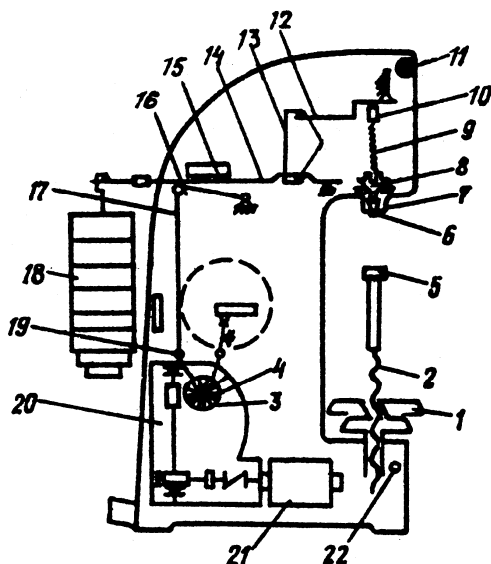


Рис. 7.3. Схема прибора ТШ-2М:

1 – маховик, 2 – подъемный винт, 3 – шкала для задания времени выдержки под нагрузкой; 4 – чашка; 5 – опорный столик; 6 – оправка с индентором; 7 – ограничитель; 8 – шпindelная втулка; 9 – пружина; 10 – шпindel; 11 – сигнальная лампа; 12, 14 – рычаги; 13 – серьга; 15 – микропереключатель; 16 – вилка; 17 – шатун; 18 – грузы; 19 – кривошип; 20 – редуктор; 21 – электродвигатель; 22 – пусковая кнопка

### **Твердость по Роквеллу (ГОСТ 9013–59) и по Роквеллу при малых нагрузках (Супер-Роквеллу – ГОСТ 22975–78)**

Стандарты устанавливают методы измерения твердости по Роквеллу (шкалы *A, B, C, D, E, F, G, H, K*) и по Супер-Роквеллу (шкалы *N* и *T*) при температуре 20 °С. Сущность методов заключается во внедрении в поверхность образца (или изделия) алмазного конус-

ного (шкалы *A, C, D, N*) или стального сферического наконечника (шкалы *B, E, F, G, H, K, T*) под действием последовательно прикладываемых усилий предварительного  $P_0$  и основного  $P_1$  и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия  $P_1$ . Твердость по Роквеллу выражается в условных отвлеченных единицах. Наконечник алмазный конусный типа *HK* по ГОСТ 9377–81 имеет угол при вершине  $120^\circ$  и радиус сферической части 0,2 мм. Наконечники шариковые стальные по ГОСТ 3722–81 диаметром 1,588 мм (1/16") – шкалы *B, F, G, T*, и диаметром 3,175 мм – шкалы *E, H, K*. Выбор индентора и нагрузки связан в основном с твердостью и толщиной испытываемого материала. Схема определения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (Супер-Роквелл) приведена на рис. 7.4.

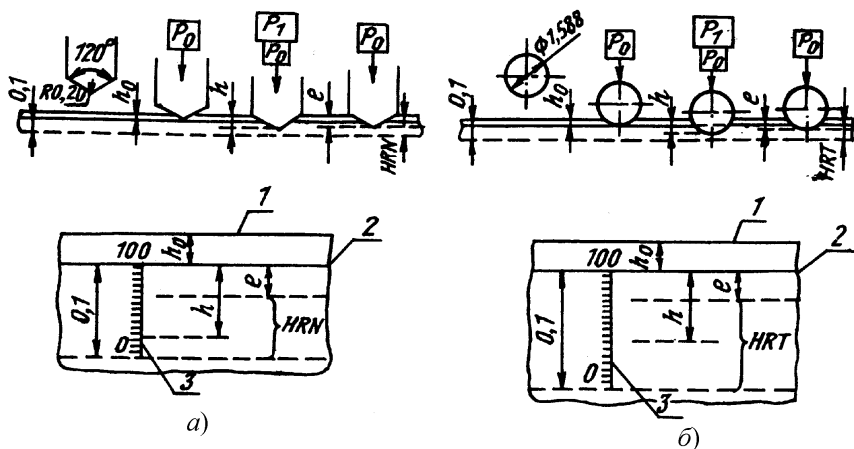


Рис. 7.4. Измерение твердости по Роквеллу при малых нагрузках (ГОСТ 22975–78):

1 – поверхность испытуемого образца; 2 – исходная поверхность при измерении; 3 – шкала твердости;  $h_0$  – глубина внедрения наконечника или шарика под действием предварительной нагрузки  $P_0$ , мм;  $h$  – глубина внедрения наконечника под действием основной нагрузки  $P_1$ , мм;  $e$  – остаточное увеличение глубины внедрения наконечника, измеренное после снятия основной нагрузки при сохранении предварительной нагрузки  $P_0$ , выражается в условных единицах шкалы индикатора с ценой деления 0,001 мм

При измерении твердости по Роквеллу (ГОСТ 9013–59) предварительная нагрузка  $P_0$  равна 10 кгс, а полная изменяется от 60 до 150 кгс. При измерении твердости при малых нагрузках (ГОСТ 22975–78) предварительная нагрузка равна 3 кгс, а полная изменяется от 15 до 45 кгс. Время выдержки под нагрузкой составляет  $2 \div 8$  с.

Число твердости по шкалам  $A, C, D, N, T$  выражается формулой:

$$HR(A, C, D, N, T) = 100 - e,$$

а по всем другим шкалам по формуле:

$$HR(B, E, F, G, H, K) = 130 - e,$$

где

$$e = \frac{h - h_0}{0,002} \text{ (ГОСТ 9013–59); } e = \frac{h - h_0}{0,001} \text{ (ГОСТ 22975–78),}$$

и представляет собой остаточное увеличение глубины внедрения наконечника (после снятия основной  $P_1$ , при сохранении предварительной нагрузки  $P_0$ ), которое выражается в условных единицах шкалы индикатора с ценой деления 0,002 мм (по шкалам  $A, B, C, D, E, F, G, H, K$ ) и 0,001 мм (по шкалам  $N$  и  $T$ ).

Твердость по Роквеллу по ГОСТ 9013–59 обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HR с указанием шкалы твердости. Например, 60 HRC (твердость 60, шкала  $C$ ) или 25 HRB (твердость 25, шкала  $B$ ). В соответствии с ГОСТ 22975–78 при обозначении твердости указывается использованная нагрузка: например, 75 HRN 15 (твердость 75, шкала  $N$ , нагрузка 15 кгс).

Существует несколько типов приборов для измерения твердости по Роквеллу: ТК, ТК-2 и Супер-Роквеллу ТКС-14-250 (рис. 7.5–7.6). Последний от обычных твердомеров типа ТК отличается меньшим значением прилагаемой нагрузки и более точным индикатором с ценой деления 0,001 мм.

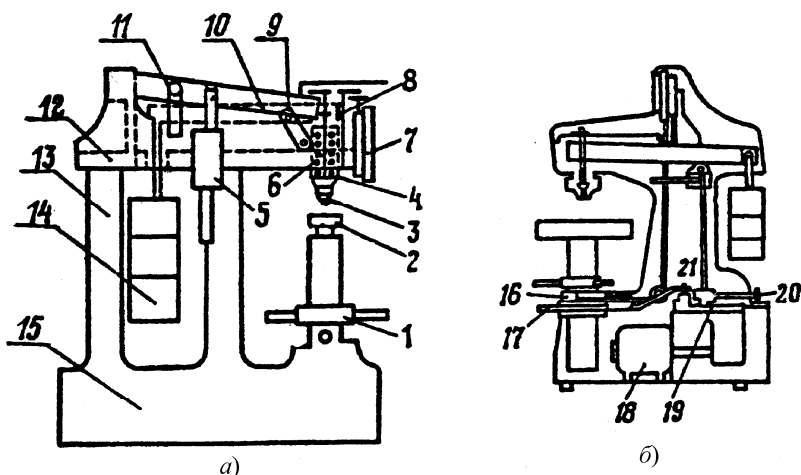


Рис. 7.5. Схемы приборов ТК (а) и ТК-2 (б):

1 – маховик; 2 – опорный столик, 3 – оправка с индентором; 4 – пружина; 5 – масляной амортизатор; 6 – шпиндель; 7 – индикатор; 8 – рычажок; 9 – рукоятка; 10 – рычаг; 11 – подвеска; 12 – поперечина; 13 – стойка; 14 – грузы; 15 – станина; 16 – кольцо для перемещения шкалы индикатора; 17 – пусковая педаль; 18 – электромотор; 19 – редуктор; 20 – рукоятка для переключения кулачков, задающих продолжительность испытания; 21 – шток, управляющий работой механизма нагружения

Предварительная нагрузка  $P_0$  осуществляется вручную поджатием испытываемого изделия к индентору, а основная нагрузка  $P_1$  прикладывается через рычажную систему с отношением плеч 1:20 (см. рис. 7.5). Глубина отпечатка под действием основной нагрузки фиксируется индикатором. Угловое перемещение стрелки индикатора на одно деление отвечает 0,001 мм изменения глубины вдавливания индентора. Цифры на шкале расположены в направлении, обратном движению стрелки при вдавливании; следовательно, чем глубже отпечаток, тем меньшее число твердости показывает стрелка.

Для каждого изделия рекомендуется произвести не менее четырех испытаний. Первое испытание во внимание не принимается. Для обеспечения достоверных результатов чистота испытываемой поверхности должна быть не ниже  $R_a = 1,25$  мкм. Поверхность ис-

пытываемого изделия должна быть сухой и чистой и не иметь трещин, выбоин и грубых следов обработки. Минимальная толщина испытываемого изделия должна быть не менее восьмикратной глубины внедрения алмазного конуса или шарика. Не разрешается производить испытания неоднородных по структуре сплавов хрупких изделий, а также изделий, которые могут пружинить или деформироваться под действием нагрузки. При проведении испытаний необходимо, чтобы расстояние центра отпечатка от края изделия или центра другого отпечатка было не менее 2 мм.

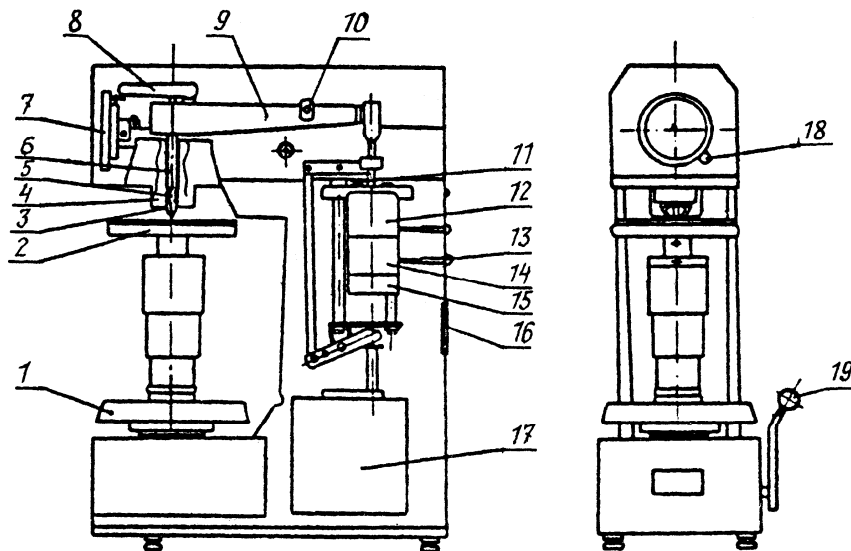


Рис.7.6. Схема прибора ТКС-14-250:

1 – маховик; 2 – предметный столик; 3 – наконечник; 4 – пружина; 5 – ограничитель; 6 – шпindel; 7 – индикатор; 8 – рычаг; 9 – грузовой рычаг; 10 – груз; 11 – шток; 12 – груз; 13 – ручка; 14 – груз; 15 – груз; 16 – таблица; 17 – привод; 18 – ручка; 19 – рукоятка

## Твердость по Виккерсу (ГОСТ 2999–75)

Определение твердости по Виккерсу производится вдавливанием в испытываемый объект алмазного наконечника, имеющего форму квадратной пирамиды, с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Число твердости по Виккерсу ( $HV$ ) определяется де-

лением нагрузки в кгс на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка в мм<sup>2</sup>. Применяются нагрузки 5, 10, 20, 30, 50 и 100 кгс. Нагрузка выбирается в зависимости от толщины и твердости испытуемого материала. Для этого метода, отличающегося высокой точностью измерения диагонали отпечатка, очень важна чистота поверхности образца (0,16) и отсутствие нагревов и наклепа при его изготовлении. Важную роль играет также время выдержки под нагрузкой. При обозначении числа твердости по Виккерсу обязательно указывается время выдержки, например 540 HV20/30 обозначает число твердости 540, полученное под нагрузкой 20 кгс, действующей в течение 30 с.

Определение твердости по Виккерсу является более совершенным, чем определение ее методами Бринелля и Роквелла. К числу основных преимуществ указанного метода следует отнести: полное геометрическое подобие отпечатков независимо от значения прилагаемой нагрузки; возможность определения твердости на азотированных, цементированных поверхностях, а также на тонких листовых материалах; хорошее совпадение значений твердости по Виккерсу и Бринеллю в пределах 100–450 ед.

Обычно размеры отпечатка при определении твердости по Виккерсу очень малы. При грубой структуре образца это может вызвать большой разброс значений. Для получения достоверных средних значений приходится делать на каждом образце не менее 5–10 замеров. Приборы для определения твердости по Виккерсу используются для испытаний очень твердых металлов, упроченных тонких поверхностных слоев, тонких образцов и т.п.

Серийный прибор ТП (рис. 7.7) позволяет измерять твердость при нагрузках в 5, 10, 20, 30, 50, 100 и 120 кгс. Значение твердости по Виккерсу определяют по величине диагонали отпечатка с помощью таблиц, которые даны в приложении к ГОСТ 2999–75.

Переносной прибор типа ТПП-2 (рис. 7.8) крепится к столу с помощью съемного кронштейна 1. Основной частью этого прибора является испытательная головка 7, которая смонтирована в алюминиевом корпусе 2.

Испытательная головка состоит из двух систем:

- нагружения – для создания испытательных нагрузок, под действием которых алмазный наконечник вдавливается в испытываемую деталь;

• проекционно-измерительной – для проецирования полученного отпечатка на экран измерительной головки и для измерения длины диагонали отпечатка с погрешностью до 0,001 мм. Перемещение испытательной головки осуществляется вручную поворотной рукояткой 11.

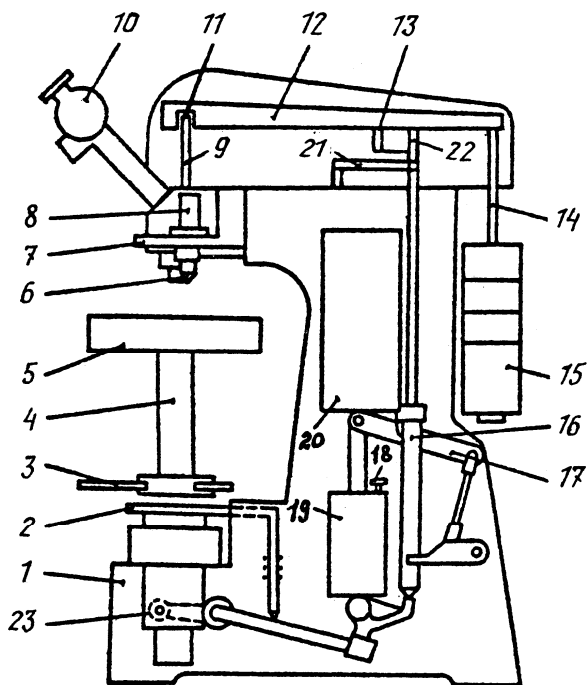


Рис. 7.7. Схема прибора ТП:

1 – станина; 2 – педаль; 3 – маховичок; 4 – подъемный винт; 5 – опорный столик; 6 – индентор; 7 – рукоятка; 8 – шпиндель с индентором; 9 – промежуточный шпиндель; 10 – измерительный микроскоп; 11 – призмы; 12 – рычаг; 13 – штырь; 14 – подвеска; 15 – сменные грузы; 16 – пустотелый шпиндель; 17 – ломаный рычаг; 18 – винт; 19 – масляный амортизатор; 20 – груз; 21, 22 – рычаги; 23 – рукоятка

Система нагружения состоит из алмазного наконечника, который крепится в конусе 5; из сменных стаканов на 5 и 10 кгс; валика эксцентрикового, поворот которого осуществляется рукояткой 8; подвижного стакана, в нижней части которого на полуосях



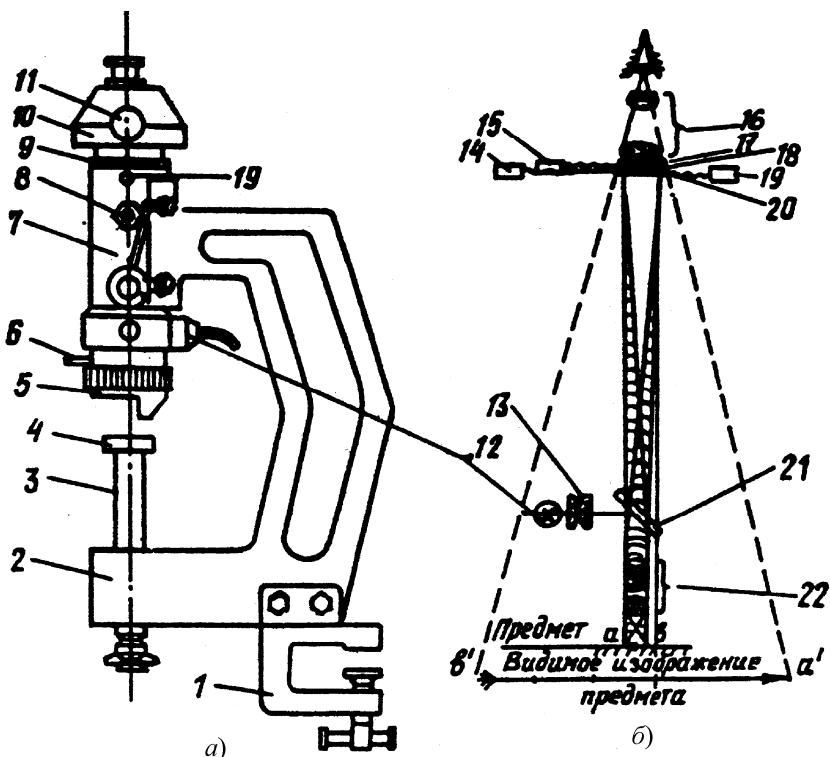


Рис. 7.8. Схема переносного прибора модели ТПП-2:

1 – съемный кронштейн; 2 – корпус (струбцина); 3 – подъемный винт; 4 – предметный столик; 5 – конус; 6 – ручка; 7 – испытательная головка; 8 – рукоятка; 9 – переходник; 10 – измерительная головка; 11 – поворотная ручка; 12 – осветитель; 13 – конденсор; 14, 15 – винты микрометрические; 16 – окуляр; 17 – сетка с пунктирной риской; 18 – шкала; 19 – отсчетный барабан; 20 – сетка со сплошной риской; 21 – рамка с плоскопараллельной пластинкой; 22 – объектив

смонтирована поворотная рамка 21. В зависимости от положения поворотной рамки, которое регулируется ручкой 6, алмазный наконечник может находиться либо в рабочем, либо в нерабочем положении.

При повороте рамки на угол 17–18° от вертикали вводится в действие проекционно-измерительная система.

Проекционно-измерительная система состоит из измерительной головки 10 (измерительная головка от микроскопа МПВ-1), переходника 9, рамки с плоскопараллельной пластинкой 21, объектива 22 и осветителя 12. В верхней части головки имеется окуляр 16 с увеличением 12,5. Объектив ОМ-2 с увеличением 10 предназначен для проецирования отпечатка на экран измерительной головки. Регулировка освещенности отпечатка производится движением или выдвиганием электропатрона с лампочкой.

## Порядок выполнения работы

### Измерение твердости на приборе ТШ-2М

Для измерения твердости на приборе ТШ-2М (см. рис. 7.3) необходимо:

- 1) проверить твердомер на правильность показаний по образцовым мерам твердости;
- 2) выбрать нагрузку и соответствующий диаметр шарика по табл. 7.1, 7.2;
- 3) установить на подвеску набор грузов 18, учитывая, что рычажная система с подвеской создает нагрузку 187,5 кгс;
- 4) закрепить во втулке шпинделя 8 винтом выбранную оправку с шариком 6;
- 5) установить на предметный столик 5 испытуемый образец;
- 6) поджимать образец маховиком 1 к шарикам до тех пор, пока не почувствуется, что пружина 9 предварительной нагрузки сжата до соприкосновения шпинделя со втулкой;
- 7) установить необходимую выдержку под нагрузкой;
- 8) нажать на кнопку 22, включить электродвигатель;
- 9) после остановки электродвигателя стол с образцом спустить вниз вращением маховика 1;
- 10) с помощью лупы или инструментального микроскопа измерить диаметр отпечатка в двух взаимно перпендикулярных направлениях;
- 11) по среднему арифметическому двух измерений подсчитать твердость по формуле или определить по таблицам;
- 12) для каждой нагрузки твердость определить как среднее арифметическое результатов 2–3-х измерений.

## Изучение закономерности при определении твердости вдавливанием шарика

В качестве основного индентора используется шарик диаметром 10 мм. Это целесообразно по тем соображениям, что при силе вдавливания  $P = 3000$  кгс стальной шарик этого диаметра не получает под нагрузкой деформаций, которые изменяли бы правильную форму шарового сегмента.

Измерить твердость на приборе ТШ при всех возможных нагрузках. Построить графики  $HB-P$  (см. рис. 7.1) и  $\lg P = \lg a + n \lg d$  (см. рис. 7.2). Определить нагрузки  $P_1$  и  $P_2$  и константы  $a$  и  $n$ .

### Измерение твердости на приборе ТКС-14-250

При работе на приборе ТКС-14-250 (см. рис. 7.5) необходимо:  
– в зависимости от твердости изделия выбрать шкалу твердости, а следовательно, и соответствующую ей нагрузку и вид наконечника (табл. 7.3). При использовании в качестве индентора алмазного конуса твердость по Роквеллу определяют по шкале  $N$ , а при использовании стального шарика – по шкале  $T$ ;

– установить выбранный наконечник 3 (см. рис. 7.6) в шпиндель прибора;

Таблица 7.3

Обозначение шкалы	Общая нагрузка, кгс	Вид наконечника	Обозначение чисел твердости	Пределы измерения, единицы твердости
$N$	15	Алмазный конус	$HR15N$	От 70 до 94
$N$	30	Алмазный конус	$HR30N$	От 42
$N$	45	Алмазный конус	$HR45N$	От 20 до 78
$T$	15	Стальной шарик	$HRI5T$	От 62 до 93.
$T$	30	Стальной шарик	$HR30T$	От 15 до 82
$T$	45	Стальной шарик	$HR45T$	От 10 до 72

- включить прибор в сеть переменного однофазного тока напряжением 220 В;
- проверить твердомер на правильность показаний по образцовым мерам твердости;
- установить на стол испытываемое изделие и с помощью маховика *1* поджимать его к наконечнику до тех пор, пока большая стрелка индикатора *7* не встанет на нуль, а малая – на красную точку. Допускается смещение большой стрелки относительно вертикально расположенного нулевого штриха шкалы индикатора на  $\pm 5$  делений. Точная установка нуля шкалы против конца большой стрелки производится вращением ручки *18*;
- приложить основную испытательную нагрузку, переместив рукоятку *19* в нижнее положение до упора. Об окончании внедрения судят по замедлению движения большой стрелки индикатора (при испытании «мягких» изделий) или полной остановке большой стрелки (при испытании «твердых» изделий);
- снять основную нагрузку возвратом рукоятки *19* в исходное верхнее положение;
- произвести отсчет по шкале индикатора;
- отвести испытываемое изделие от наконечника вращением маховика *1* против часовой стрелки и снять изделие со стола.

### **Измерение твердости на приборе ТПП-2**

При работе на приборе ТПП-2 (см. рис. 7.8) необходимо:

- 1) проверить твердомер на правильность показаний по образцовым мерам твердости;
- 2) поместить образец на предметный столик *4*;
- 3) вращая подъемный винт *3* и ручку *11*, подвести конус *5* с индентором вплотную к испытываемому образцу;
- 4) приложить испытательную нагрузку, плавно поворачивая ручку *8* на себя до упора;
- 5) по истечении времени выдержки снять нагрузку, вернув ручку *8* в исходное положение;
- 6) ручкой *6* перевести рамку с алмазным наконечником в нерабочее положение;
- 7) переключить освещение;

8) вращая окуляр измерительной головки 10, получить резкое изображение шкалы;

9) произвести измерение диагоналей отпечатка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Микрометрическим винтом 14 измерительной головки 10 подвести к левому краю отпечатка нулевой штрих шкалы, а отсчетным барабаном 19 подвести к правому краю отпечатка сплошную риску.

Число целых делений, заключенных между нулевым штрихом шкалы и сплошной риской, дает число десятых долей миллиметра. Число делений барабана 19 дает число сотых и тысячных долей миллиметра.

В целях повышения точности измерения диагоналей отпечатка необходимо соблюдать следующие правила.

1. Одна из диагоналей отпечатка должна быть параллельна шкале микроскопе, а другая – перпендикулярна, что проверяется с помощью пунктирной или сплошной рисок, которые при проверке должны проходить точно через вершины углов отпечатка. Общее увеличение прибора равно 125.

2. По средней арифметической величине двух диагоналей определить по таблицам число твердости по Виккерсу. Таблицы чисел твердости по Виккерсу приведены в приложении к ГОСТ 2999–75.

## Отчет о работе

Отчет должен содержать:

– схему и описание принципа действия одного из твердомеров (по указанию преподавателя);

– таблицу чисел твердости, определенных разными методами (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу) на нескольких образцах, предложенных преподавателем. Числа твердости должны быть записаны точно по ГОСТ;

– таблицу чисел твердости по Бринеллю ( $HB$ ) одного из образцов при всех имеющихся нагрузках;

– графики зависимости  $HB-P$  и  $\lg P - \lg d$ ;

– выводы по проделанной работе.

## Контрольные вопросы

Стандартные методы испытания твердости материала и их принципиальное отличие друг от друга.

Принцип измерения твердости по Бринеллю.

Принцип измерения твердости по Роквеллу.

Принцип измерения твердости по Виккерсу.

В чем отличие твердости по Роквеллу от Супер-Роквелла?

## Список рекомендуемой литературы

1. Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. М.: Металлургия. 1974.

2. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов /Под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1974. Том 2.

3. ГОСТ 9012–59. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю, 1959.

4. ГОСТ 9013–59. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

5. ГОСТ 22975–78. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).

6. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

## Работа 8

### ИСПЫТАНИЕ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ И НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Цель: ознакомление с методом испытания на ползучесть по ГОСТ 3248–81 и принципом работы установки МИФИ для проведения испытаний на ползучесть в нестационарных режимах нагружения; проведение испытаний и определение скорости ползучести на заданной временной базе; определение параметров уравнений, описывающих зависимость скорости ползучести от напряжения и температуры; экспериментальная проверка теорий ползучести.*

#### Введение

Ползучестью называется процесс нарастания остаточной деформации во времени при длительном статическом нагружении. В этих условиях рост пластической деформации связан с тем, что деформационное упрочнение сопровождается разупрочнением, часто называемым возвратом. Фактически все существующие материалы в той или иной мере обладают свойствами ползучести. Различают три вида ползучести: низкотемпературную, высокотемпературную и диффузионную. При низких температурах возврат механических свойств исключен, и скорость ползучести быстро затухает. С повышением температуры процесс возврата оказывает существенное влияние на скорость ползучести и она может длительное время оставаться постоянной. Диффузионная ползучесть возникает при очень высоких температурах вследствие ориентированной диффузии молекул и атомов.

Для техники наибольшее значение имеет ползучесть с возвратом (высокотемпературная ползучесть) в интервале температур  $(0,4 \div 0,7) T_{пл}$ , когда скорость ползучести относительно мала и находится примерно в пределах  $10^{-4}$ – $10$ , %/ч. Результаты соответствующих испытаний при неизменных напряжении и температуре отражаются в виде кривой ползучести в координатах «полная деформация  $\varepsilon(t)$  (или остаточная деформация  $\varepsilon_c(t)$ )–время  $t$ »

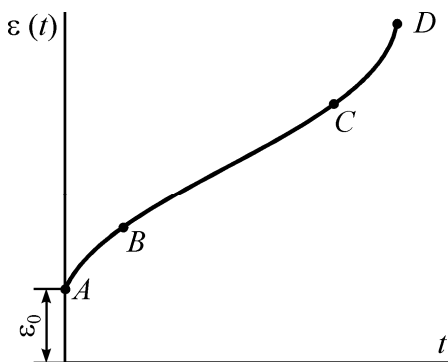


Рис. 8.1. Кривая ползучести

(рис. 8.1). В момент нагружения образец приобретает мгновенную деформацию  $\epsilon_0(\sigma)$ , которая в зависимости от уровня напряжения  $\sigma$  является упругой или упругопластической. С течением времени  $t$  деформация образца  $\epsilon(t)$  возрастает. Разность  $\epsilon_c(t) = \epsilon(t) - \epsilon_0$  между полной и мгновенной деформациями в любой момент времени называется

деформацией ползучести. Кривая ползучести  $\epsilon(t)$  в общем случае имеет три участка:  $AB$  – участок с постоянно уменьшающейся скоростью ползучести (первая стадия – стадия неустановившейся ползучести),  $BC$  – участок с постоянной (минимальной) скоростью ползучести  $\dot{\epsilon}_{c\text{ мин}}$  (вторая стадия – стадия установившейся ползучести),  $CD$  – участок ускоряющейся ползучести, предшествующий разрушению (третья стадия). Вид кривых ползучести зависит от напряжения и температуры, при которых испытывался образец. С увеличением напряжения и температуры скорость пластической деформации возрастает, а продолжительность второй стадии уменьшается. При предельных условиях испытаний кривая ползучести может иметь только некоторые из трех участков.

Испытания на ползучесть на стандартных машинах проводят либо при постоянной нагрузке, когда при удлинении образца уменьшается его сечение и возрастает истинное напряжение, либо при постоянном истинном напряжении, что может быть осуществлено, если использовать условие постоянства объема при пластическом деформировании. Например, можно использовать фигурный рычаг с плечом, изменяющимся в зависимости от удлинения образца.

Наиболее важной характеристикой сопротивления материала ползучести является минимальная скорость пластической деформации  $\dot{\epsilon}_c$  на второй стадии, зависящая от уровня напряжений (при



фиксированной температуре) и уровня температуры (при заданном напряжении).

В общем случае ползучесть протекает в нестационарных условиях нагружения, при изменении напряжений и температуры. Результаты испытаний на ползучесть при ступенчатом изменении напряжения и постоянной температуре служат базой для обоснования различных технических теорий ползучести, широко используемых в расчетах на прочность.

Сущность технических теорий ползучести состоит в выборе основных переменных, определяющих процесс ползучести, и установлении функциональных зависимостей между ними. В соответствии с этим различают три технические теории ползучести: старения, течения и упрочнения.

Согласно теории *старения* при определенной температуре существует зависимость между деформацией, напряжением и временем:

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma, t).$$

Теория *течения* устанавливает связь между скоростью пластической деформации, напряжением и временем:

$$\dot{\varepsilon}_c = f_2(\sigma, t).$$

По теории *упрочнения* (в простейшей форме) в качестве основных переменных принимаются пластическая деформация, скорость пластической деформации и напряжение:

$$\dot{\varepsilon}_c = f_3(\sigma, \varepsilon_c).$$

На основе этих теорий можно построить теоретические кривые ползучести при ступенчатом изменении напряжений, используя кривые ползучести, полученные при постоянных напряжениях, и сопоставить их с экспериментальными в обоснование выбора технической теории, наилучшим образом описывающей результаты эксперимента.

## Метод испытания на ползучесть по ГОСТ 3248–81

ГОСТ 3248–81 устанавливает метод испытания на ползучесть черных, цветных металлов и сплавов при температуре до 1200°C.

Сущность метода – образец подвергается воздействию постоянной растягивающей нагрузки или напряжений при заданной температуре. В процессе нагружения образца фиксируется его деформация и ее изменение во времени (кривая ползучести).

В качестве основных образцов устанавливаются: цилиндрические – диаметром 10 мм и расчетной длиной 100, 150 и 200 мм; плоский – шириной 15 мм и расчетной длиной 100 мм. При наличии технических обоснований допускается применять пропорциональные образцы других размеров и форм. Формы и размеры головок образцов зависят от конструкции захватов испытательной машины и способа крепления измерителя деформации на образце, способа нагрева образца.

Технические требования к машинам для испытания металлов на ползучесть должны соответствовать ГОСТ 15593–80.

Правильность установки образца в захватах машины (отсутствие эксцентриситета) проверяется измерением при нормальной температуре упругих удлинений на двух диаметрально противоположных его сторонах.

Образец, установленный в захватах испытательной машины и помещенный в печь, нагревают до заданной температуры и выдерживают при этой температуре не менее 1 ч. Нагревательное устройство может применяться с защитной или иной атмосферой, если этого требуют условия испытания.

Для измерения температуры на расчетной длине образца должны быть установлены две-три термодпары. Отклонение от заданной температуры не должно превышать 3–6°C в зависимости от уровня температуры.

После нагрева образец плавно нагружается предварительной нагрузкой, равной 10 % от заданного уровня общей нагрузки. Затем, если температура образца и показания измерителя удлинений остаются в течение 5 мин постоянными, проводят плавное нагружение образца до заданной нагрузки. Начиная с предварительной нагрузки и на каждой ступени нагружения, если последнее осуществляется ступенями, удлинение образца регистрируют или непрерывно или с такими интервалами, чтобы можно было полностью установить характер изменения деформации образца. При длительных испытаниях допускаются перерывы без разгрузки образца.

Обычно для оценки сопротивления материала ползучести получают серию кривых ползучести по результатам испытания образцов при различных постоянных уровнях напряжения. Обработывая эту серию кривых ползучести, можно определить константы и параметры аналитических зависимостей соответствующих технических теорий ползучести и определить пределы ползучести. Пределом ползучести называется напряжение, при котором остаточная деформация достигает определенной величины за заданный промежуток времени, или при котором скорость установившейся ползучести равна заданной величине.

Предел ползучести рекомендуется определять при допусках на удлинение от 0,1 до 1 % при длительности испытания от 50 до 10000 ч. Если предел ползучести определяется по скорости ползучести, то общая продолжительность испытания должна составлять не менее 2000–3000 ч, при условии продолжительности прямолинейного участка кривой ползучести – не менее 500 ч.

Скорость ползучести определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t} (\text{ч}^{-1}) \quad \text{или} \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t} 100 \% (\text{ч}^{-1}),$$

где  $\Delta l$  – абсолютное приращение длины образца за время  $\Delta t$ ;  $l_0$  – расчетная длина.

Порядок определения условного предела ползучести (напряжения, получаемого делением нагрузки на начальную площадь поперечного сечения образца) следующий: испытывают серию образцов (не менее четырех) при данной температуре и трех-четырёх уровнях напряжений. Количество образцов в серии должно обеспечивать задаваемую точность определения предела ползучести. Результатом испытаний являются первичные кривые ползучести в координатах «относительное удлинение  $\varepsilon_c$  – время  $t$ » (рис. 8.2, а). В случае нахождения предела ползучести по заданной деформации при обработке первичных кривых ползучести определяются величины относительных деформаций, соответствующих заданной длительности (например, 10000 ч). Затем по найденным величинам деформации строится график зависимости логарифма напряжения  $\lg \sigma$  от деформации  $\varepsilon_c$  (рис. 8.2, б), из которого по заданному

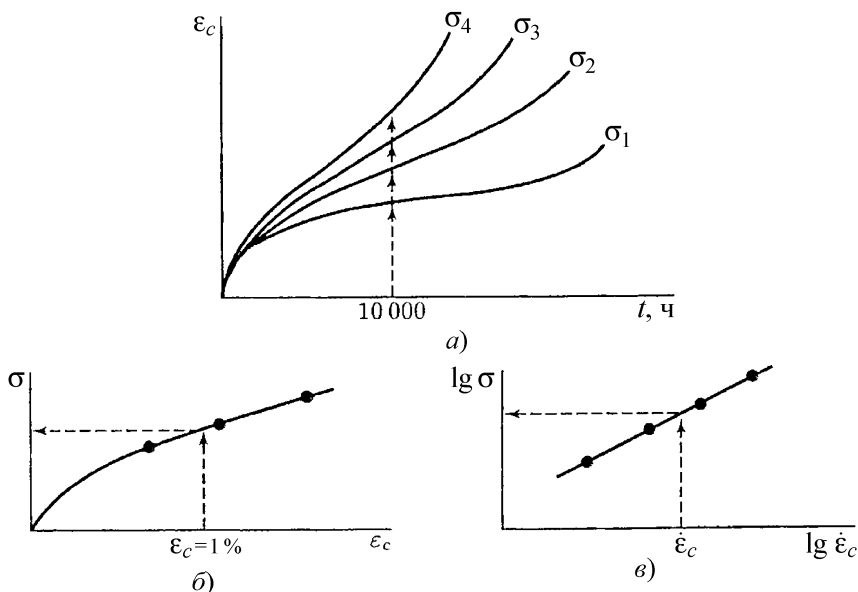


Рис. 8.2. Схема определения предела ползучести:  
 а – серия кривых ползучести; б – зависимость  $\lg \sigma$  от  $\epsilon_c$  для заданного времени эксплуатации; в – зависимость  $\lg \sigma$  от  $\lg \dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$

допуску (например, 1 % деформации) находится значение искомого напряжения.

В случае определения предела ползучести по заданной скорости ползучести на основании обработки первичных кривых находят средние скорости ползучести на прямолинейном участке кривой для каждого уровня напряжений. Затем строят график зависимости логарифма напряжения ( $\lg \sigma$ ) от логарифма скорости ползучести ( $\lg \dot{\epsilon}_c$ ) (рис. 8.2, в). Эта зависимость в логарифмической системе координат изображается прямой, что позволяет легко определить напряжение, соответствующее заданной скорости ползучести  $\dot{\epsilon}$ . Эти способы позволяют находить искомое напряжение с погрешностью, не превышающей 5 МПа.

По результатам испытаний как минимум при трех разных температурах можно построить диаграмму зависимости предела ползучести от температуры.

При определении предела ползучести по деформации ползучести в обозначении этой величины указывается допуск на деформацию, время и температура испытания. Например,  $\sigma_{0,2/100}^{700}$  – предел ползучести при допуске на деформацию 0,2 % за 100 ч испытания при температуре 700 °С. Пример обозначения предела ползучести при скорости ползучести  $1 \cdot 10^{-5}$  % (ч<sup>-1</sup>) и температуре 600 °С:  $\sigma_{1 \cdot 10^{-5}}^{600}$ .

### Установка МИФИ для испытания на ползучесть

В данной работе используется установка, созданная в МИФИ, для исследования закономерностей ползучести при стационарном и нестационарном нагружениях. Последнее достигается определенными способами нагрева и нагружения образца.

Узел нагружения установки (рис. 8.3) состоит из следующих элементов. Верхний фланец 4 соединен с нижним опорным фланцем 12 с помощью трех колонок 22. Верхняя тяга 5 закреплена во фланце 4. Образец 8 установлен в шарнирных захватах верхней и нижней тяг 5 и 10. Нагружение образца осуществляется через рычажную систему 15, шарнирно соединенную с нижней тягой. Соотношение плеч рычага 1:9,5. Шарниры 6, 11, 13 обеспечивают осевое растяжение образца без перекосов.

Специальное приспособление дает возможность производить нагружение, догрузку или разгрузку образца. В опорную плиту 21 этого приспособления вмонтирован вертикальный винт, получающий вращение от электродвигателя 14. Вращение винта вызывает вертикальное перемещение гайки 19 со скоростью 0,3 мм/с. Гайка опускает или снимает гири 18 с чашки нижней тяги 17 рычага 15. Перемещение гайки 19 ограничивается положением контактов 20 и 16 электрической системы управления работы электродвигателя 14. Постоянное значение истинных напряжений поддерживается снятием грузов через каждые 0,5 % деформации образца.

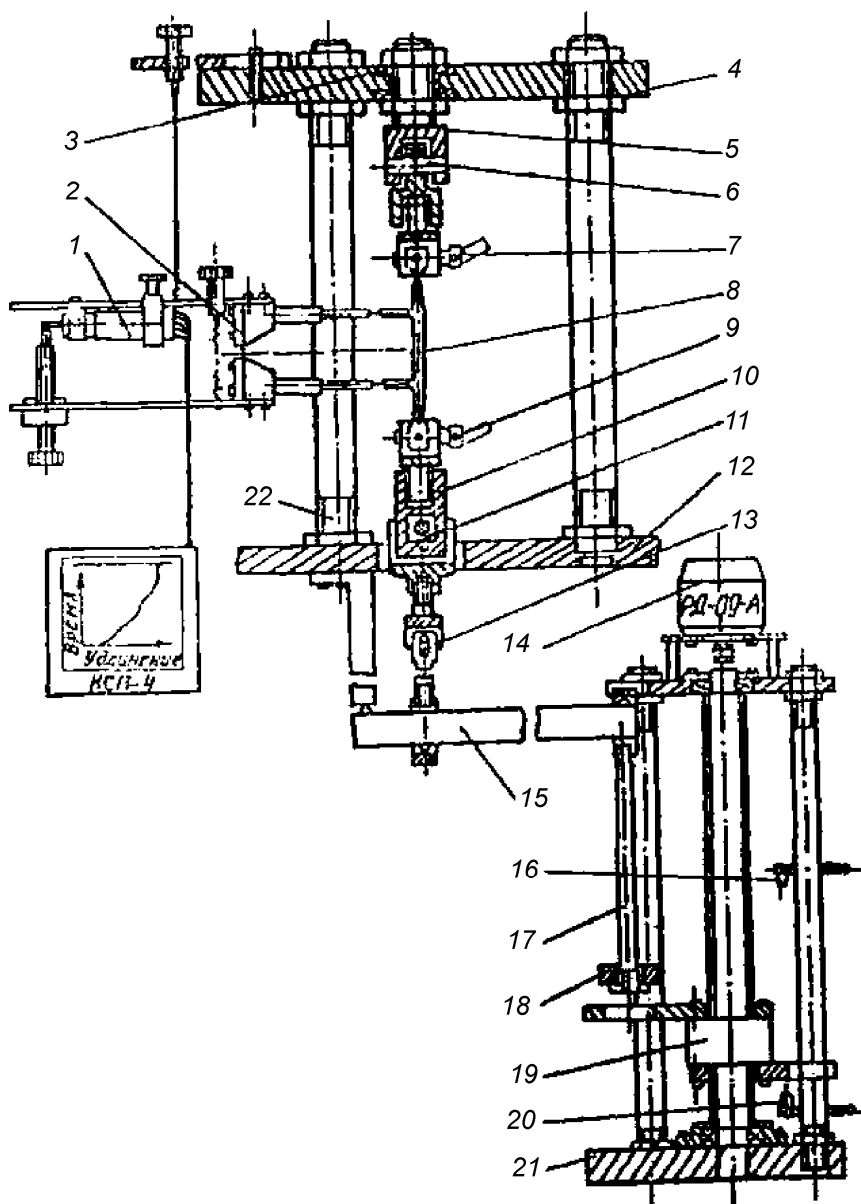


Рис. 8.3. Узел нагружения установки МИФИ для испытания образцов на ползучесть

Образец нагревают, пропуская через него электрический ток, который идет от трансформатора по токопроводам 7 и 9 к головкам образца. Для того чтобы ток проходил только по образцу, верхняя тяга 5 электрически изолирована от фланца 4 текстолитовыми втулками 3. Используемый метод нагрева позволяет быстро менять температурный режим.

Температура автоматически поддерживается высокочастотным регулятором температуры ВРТ-3 (рис. 8.4) с погрешностью  $\pm 2$  °С. Ток в выходной цепи ВРТ-3 усиливается трансформатором Тр и нагревает образец. Термопара А служит для сравнения температуры образца с задаваемым уровнем ВРТ-3. Автоматический потенциометр КСП-4 записывает температурный режим, регистрируя сигнал термопары Б.

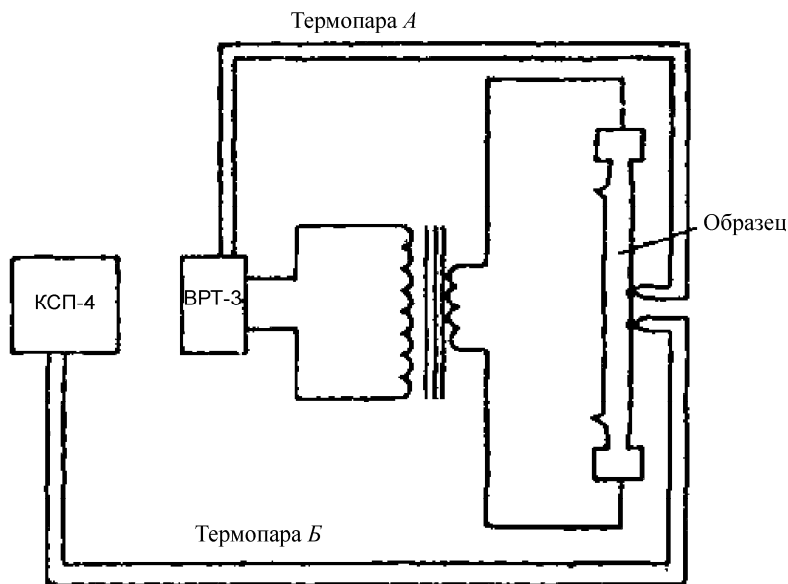


Рис. 8.4. Электрическая схема нагрева образца

Деформация образца фиксируется с помощью продольного экстензометра 2 (см. рис. 8.3), включающего механотрон 1. Ножи экстензометра, соединенные между собой гибкой пластиной, играющей роль шарнира, упираются концами в выступы образца 8. При деформации образца происходит перемещение ножек экстен-

зометра, вызывающее соответствующее перемещение ножки механотрона, и сигнал с механотрона поступает на регистрирующий автоматический потенциометр КСП-4, записывающий кривую ползучести при скоростях движения диаграммной ленты 20–54000 мм/ч. Экстензометр подвешен к верхнему фланцу 4. Погрешность измерения деформации составляет  $\pm 1$  мкм.

Для обеспечения равномерного распределения температуры по рабочей длине образца (между выступами), а следовательно, и равномерной его деформации используется специальный профилированный образец (рис. 8.5), имеющий сужение у головок. Поперечное сечение образца имеет размеры  $5,3 \times 0,8$  мм при рабочей длине 50 мм. За счет подогрева в сужениях (при наличии интенсивного теплопровода через захваты образца) температура практически равномерно распределена на расчетной длине образца, ограниченной небольшими выступами, в которые упираются ножки экстензометра.

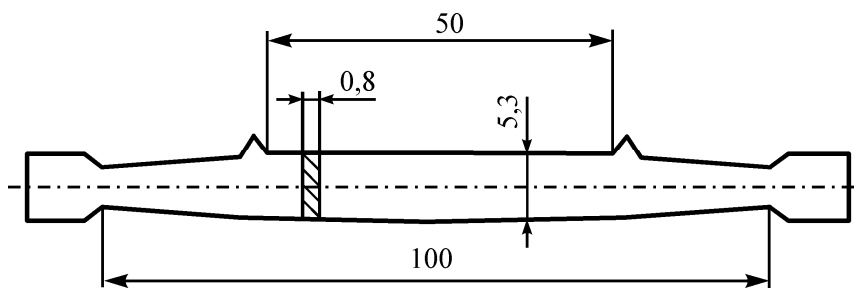


Рис. 8.5. Плоский образец для испытания на ползучесть

### Определение параметров уравнений, описывающих зависимости скорости ползучести от напряжений и температуры

Как отмечалось, на второй стадии процесс ползучести протекает с минимальной постоянной скоростью  $\dot{\epsilon}_{с\text{мин}}$ , которая зависит от напряжений и температуры. Располагая серией кривых ползучести, представляется возможным определить  $\dot{\epsilon}_{с\text{мин}}$  при разных уровнях напряжений и температур и установить соответствующие зависимости.



Минимальная скорость ползучести  $\dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  определяется в масштабе как тангенс угла наклона прямолинейного участка кривой ползучести на второй стадии. Имея ряд значений  $\dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  при определенной температуре, но разных напряжениях устанавливается зависимость  $\dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  от напряжений. Аналогично, зная ряд значений  $\dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  при определенном напряжении, но разных температурах, можно установить зависимость  $\dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  от температуры.

Экспериментально было проверено, что наилучшим образом связь между напряжением и минимальной скоростью пластической деформации выражается степенной зависимостью:

$$\dot{\epsilon}_{c\text{мин}} = k\sigma^n,$$

где величины  $k$  и  $n$  для каждого материала зависят от температуры.

Эта зависимость, кроме того, удобна для использования в расчетах, и значения постоянных  $k$  и  $n$  были получены для довольно широкого круга материалов.

Из приведенного выражения следует линейная зависимости между логарифмами минимальной скорости пластической деформации и напряжения. Это обстоятельство используется при определении коэффициента  $k$  и показателя степени  $n$ .

Для этого проводятся испытания при постоянной температуре при нескольких уровнях напряжений. Результаты испытаний в виде экспериментальных точек группируются со случайным отклонением в системе координат « $\lg \dot{\epsilon}_{c\text{мин}} - \lg \sigma$ » около прямой (линии регрессии). Параметры линейной зависимости между  $\lg \dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  и  $\lg \sigma$  определяются обработкой ряда парных экспериментальных значений ( $\lg \dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  и  $\lg \sigma$ ) по методу наименьших квадратов. Полученные значения  $\lg k$  и  $n$  используются для построения линии регрессии (зависимости между  $\lg \dot{\epsilon}_{c\text{мин}}$  и  $\lg \sigma$ ) в соответствующих координатах. Следует отметить, что линия регрессии проходит через точку с координатами  $\overline{\lg \dot{\epsilon}_{c\text{мин}}}$  и  $\overline{\lg \sigma}$  (среднее значение логарифма скорости установившейся ползучести и средний логарифм напряжений соответственно).

Конечно, чем большая серия кривых ползучести при различных постоянных уровнях напряжений и неизменной температуре будет использована, тем выше будет достоверность при определении параметров  $k$  и  $n$ , характеризующих ползучесть материала.

Зависимость между  $\dot{\epsilon}_{c \text{ мин}}$  и абсолютной температурой  $T$  хорошо описывается показательным законом:

$$\dot{\epsilon}_{c \text{ мин}} = C e^{-\gamma/T},$$

где  $C$  и  $\gamma$  – постоянные, которые могут быть определены по методике, аналогичной описанной выше для нахождения параметров зависимости  $\dot{\epsilon}_{c \text{ мин}}$  от  $\sigma$ .

Эти испытания проводятся при постоянном напряжении и нескольких уровнях температуры  $T$ . Результаты испытаний отражаются в виде точек в координатах « $\ln \dot{\epsilon}_{c \text{ мин}} - 1/T$ ». В этом случае статистической обработке подвергается ряд парных значений  $\ln \dot{\epsilon}_{c \text{ мин}}$  и  $1/T$ . В результате обработки определяют значение  $\ln C$  и  $\gamma$ .

В данной работе параметры  $C$  и  $\gamma$  определяются по 3–4 кривым ползучести. Чем больше кривых ползучести при неизменном напряжении и различных уровнях температуры  $T$  будет использовано для получения аппроксимирующей прямой в системе координат « $\ln \dot{\epsilon}_{c \text{ мин}} - 1/T$ », тем выше достоверность полученных параметров  $C$  и  $\gamma$ .

### **Экспериментальная проверка теорий ползучести при ступенчатом нагружении**

Экспериментальная проверка теорий ползучести осуществляется путем сравнения результатов испытания образца при ступенчатом его нагружении с уровня  $\sigma_1$  до уровня  $\sigma_2$  (рис. 8.6) с результатами теоретических построений, выполненных в соответствии с рассматриваемыми теориями ползучести, с использованием кривых ползучести при напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

Теоретические построения осуществим в соответствии с тремя техническими теориями ползучести: старения, течения и упрочнения.

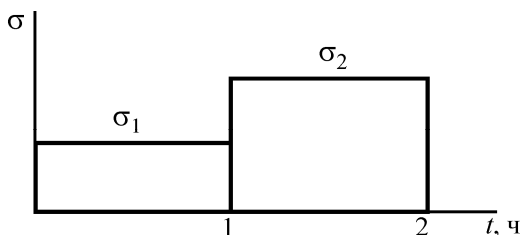


Рис. 8.6. Ступенчатое нагружение образца для проверки технических теорий ползучести

Согласно теории старения, деформация ползучести при  $\sigma = \sigma_2$  и  $t > t_1$  равна  $f_1(\sigma_2, t)$ . Она не зависит от того, действовало ли напряжение  $\sigma = \sigma_2$  все время  $t > 0$ , или оно было приложено в момент времени  $t = t_1$  (см. рис. 8.6). Поэтому использование теории старения при описании ползучести в случае переменных режимов может привести к существенным противоречиям с экспериментальными данными. В частности, ступенчатое изменение напряжения во времени согласно теории старения приводит к скачкообразному изменению деформации ползучести. В рассматриваемом случае теоретическая кривая ползучести после догрузки совпадает с соответствующим участком кривой ползучести образца, находящегося при  $\sigma = \sigma_2$  с самого начала, т.е. с участком  $CD$ .

Согласно теории течения, скорость ползучести  $\dot{\epsilon}_c$  в любой момент времени зависит от значения времени  $t$  и действующего в этот момент напряжения  $\sigma$  и не зависит от накопленной деформации ползучести  $\epsilon_c$ . Это значит, что при произвольном  $t$  из участка  $t_1 < t < t_2$  скорости ползучести образца при  $\sigma_2$  и образца после догрузки до  $\sigma_2$  совпадают и равны  $\dot{\epsilon}_c = f_2(\sigma_2, t)$ . Для того чтобы удовлетворить этому условию и сохранить непрерывность деформации ползучести догружаемого образца при  $t = t_1$ , следует кривую  $CD$  опустить до совмещения точек  $C$  и  $A$ . Таким образом, получена кривая ползучести образца после догрузки, соответствующая теории течения. На рис. 8.7 – это кривая  $AE$ , показанная пунктиром.

Рассмотрим, к чему приводит использование теории упрочнения при ступенчатом изменении напряжения. Проведем на рис. 8.7 че-

рез  $A$  горизонтальную прямую  $AM$  до пересечения с кривой  $OCD$ . После догрузки при  $t = t_1$  действующее напряжение равно  $\sigma_2$ , скорость ползучести согласно теории упрочнения зависит только от напряжения  $\sigma$  и деформации ползучести  $\varepsilon_c$  и не зависит от времени  $t$ . Поэтому скорость ползучести в точке  $A$  после догрузки совпадает со скоростью ползучести в точке  $M$ . Весь участок кривой ползучести догружаемого образца при  $t > t_1$  можно получить при  $\sigma_2$  с помощью переноса кривой ползучести образца  $MCD$  вдоль оси времени и совмещения точки  $M$  с точкой  $A$ . Полученная таким образом кривая  $AH$  обозначена на рис. 8.7 штрихпунктиром.

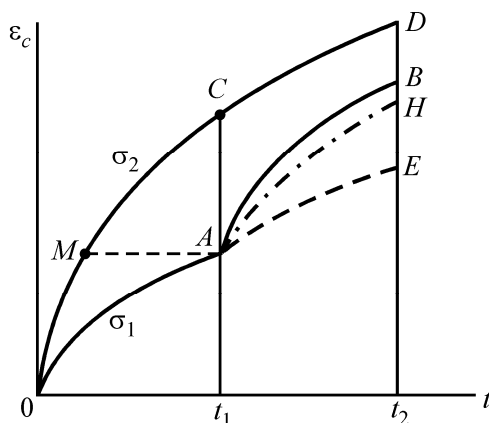


Рис. 8.7. Экспериментальная и теоретические кривые ползучести при ступенчатом нагружении образца

Итак, использование теорий старения, течения и упрочнения при описании испытаний на ползучесть при ступенчатом изменении напряжения приводит, соответственно, к кривым  $OACD$ ,  $OAE$  и  $OAH$ . В отличие от теории старения, приводящей в этом случае к разрывной кривой ползучести, теории течения и упрочнения приводят к непрерывным кривым  $\varepsilon_c(t)$  со скачком производной  $\dot{\varepsilon}_c$  в момент догрузки. Сравнивая ординаты аналитических кривых  $CD$ ,  $AE$  и  $AH$  с ординатами экспериментальной кривой ползучести  $AB$ , можно сделать заключение о том, какая из рассмотренных теорий

при различных значениях  $t$  лучше описывает полученные опытные данные.

При выполнении данного раздела работы следует сначала изобразить кривые ползучести при напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , а также экспериментальную кривую ползучести при нестационарном нагружении. Затем построить кривые ползучести, соответствующие ступенчатому изменению напряжений от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$  в заданный момент времени  $t_1$  по теориям старения, течения и упрочнения. Дать заключение о правомерности использования той или иной теории при нестационарном нагружении материала в условиях ползучести.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с работой установки МИФИ для испытания на ползучесть.
2. Провести эксперимент на заданной временной базе с регистрацией кривых ползучести.
3. Обработать результаты экспериментов по изложенным выше методикам.

### **Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- принципиальную схему установки с кратким описанием принципа ее работы;
- изложение и обработку результатов испытаний на ползучесть на заданной временной базе;
- обработку результатов испытаний с указанием характеристик материала  $k$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $\gamma$ , режимов испытаний, процедуры анализа этих результатов;
- выводы о применимости технических теорий ползучести для описания условий нестационарного нагружения.

## Контрольные вопросы

Что называется ползучестью?

Что называется пределом ползучести и как его определяют?

Как определяются параметры уравнений, описывающих зависимость скорости ползучести от напряжения и температуры?

Как экспериментально проверяют технические теории ползучести?

## Список рекомендуемой литературы

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.

2. Соболев Н.Д. Деформация и разрушение конструкционных материалов. М.: МИФИ, 1983.

3. Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. М.: Metallургия, 1983.

4. ГОСТ 3248–81. Металлы. Метод испытания на ползучесть.

5. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Длительные статические и циклические испытания металлов». /Под ред. Егорова В.И. М.: МИФИ, 1990.

## Работа 9

### ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ

*Цель: моделирование на ЭВМ испытаний образцов на усталость, удовлетворяющих требованиям ГОСТ; построение уравнения левой ветви кривой усталости, соответствующей 50-процентной вероятности разрушения; определение предела выносливости на заданной базе числа циклов.*

#### Введение

Для металлических изделий, испытывающих циклически изменяющиеся во времени нагрузки, характерно явление, известное под названием усталостного разрушения. В условиях меняющихся напряжений в материале образуются зародышевые трещины, постепенно объединяющиеся в макротрещину. Поперечное сечение детали уменьшается и достигает размера, при котором происходит хрупкое разрушение.

Различают многоцикловую усталость (или просто усталость) и малоцикловую усталость. В процессе многоцикловой усталости повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании, т.е. при напряжениях значительно ниже предела прочности и ниже предела текучести. В процессе малоцикловой усталости – при упругопластическом деформировании. В данной работе моделируется процесс многоцикловой усталости.

Исследование явления усталости конкретных материалов проводится испытанием ряда одинаковых образцов при различных уровнях нагрузки. Испытание одного образца позволяет получить одну точку в системе координат «напряжение – число циклов до разрушения». Получив несколько десятков точек и проведя статистическую обработку результатов, можно построить кривую усталости. Кривая усталости характеризует способность материала сопротивляться усталостному нагружению и позволяет прогнозировать долговечность элементов конструкций и деталей машин, находящихся под воздействием переменных во времени нагрузок. Поэтому исследование этого явления имеет большое практическое значение.

При циклическом изменении нагрузки напряжения в пределах периода нагружения достигают максимального  $\sigma_{\text{макс}}$  и минимального  $\sigma_{\text{мин}}$  значений. Их соотношение называется коэффициентом асимметрии цикла напряжений:

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{мин}}}{\sigma_{\text{макс}}}.$$

В данной работе кривая усталости строится для симметричного цикла изменения напряжений ( $R_{\sigma} = -1; \sigma_{\text{макс}} = -\sigma_{\text{мин}}$ ). Ниже по тексту опускаем для удобства индекс «макс», подразумевая под  $\sigma$  максимальное напряжение.

Кривая усталости для конкретного материала получается обработкой результатов испытания, осуществленных при различных напряжениях, но при  $R_{\sigma} = \text{const}$ . Существенной особенностью сопротивления усталости является увеличение числа циклов  $N$  до разрушения (циклической долговечности) по мере уменьшения уровня  $\sigma$ . Испытания показывают, что для многих материалов экспериментальные результаты группируются в координатах « $\lg N - \lg \sigma$ » около двух пересекающихся прямолинейных отрезков (рис. 9.1).

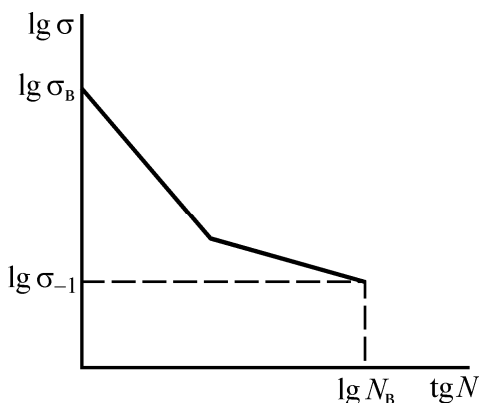


Рис. 9.1. Типичная кривая усталости в двойных логарифмических координатах

Левая ветвь кривой усталости ограничена сверху пределом прочности  $\sigma_B$ . Правая часть кривой некоторых материалов имеет горизонтальный участок, предел выносливости этих материалов определяется как максимальное напряжение, при котором образец не разрушается при сколь угодно большом числе циклов нагружения. Большинство материалов имеет кривую усталости с наклонной



правой ветвью. Предел выносливости таких материалов, называемый «пределом ограниченной выносливости», следует находить для предварительно заданного числа циклов (базы испытаний), которое обычно лежит в пределах  $10^7$ – $10^8$ .

Определяемые в эксперименте уравнение левой ветви кривой усталости и предел выносливости необходимы при расчете на прочность деталей конструкций, подвергающихся воздействию циклических нагрузок.

Испытания металлов на усталость проводятся в соответствии с ГОСТ 25.502–79.

### **Машины для испытания на усталость**

Испытания на усталость проводятся на гладких цилиндрических образцах при изгибе с вращением, плоских образцах при изгибе в одной плоскости. Реже такие испытания выполняются при растяжении-сжатии на цилиндрических или плоских образцах.

В зависимости от способа возбуждения динамической нагрузки различают несколько типов машин, применяемых для испытаний на усталость.

1. Механические: с возбуждением постоянной силой (вращающийся образец), с кривошипно-шатунным возбуждением.

2. Электромеханические: с электромагнитным резонансным возбуждением.

3. Гидравлические: с дроссельным электрогидравлическим возбуждением, с возбуждением роторным пульсатором, с возбуждением плунжерным пульсатором.

В данной работе проведение испытаний на усталость моделируется на ЭВМ. При этом используются характеристики трех реальных машин. Машина УКТ-3000 позволяет провести испытания вращающегося круглого образца по схеме консольного изгиба. В испытательной машине МУИ-6000 также применяются вращающиеся круглые образцы, но их нагружение осуществляется по схеме чистого изгиба. Гидропульсатор ГРМ-1 дает возможность выполнить испытания образцов с круглым или прямоугольным поперечным сечением при растяжении-сжатии. Некоторые характеристики перечисленных машин приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Номер испытательной машины	Тип испытательной машины	Максимальная нагрузка, кН	Частота, Гц	Схема нагружения	Номер образца	Размеры образца, мм
1	УКТ-2000	0,5	50	Консольный изгиб $M_{\max} = Pl$	1	$l = 100$ $d = 8$
					2	$l = 100$ $d = 10$
2	МУИ-6000	1	100	Чистый изгиб $M = Pl$	1	$l = 60$ $d = 9,5$
					2	$l = 60$ $d = 7,5$
3	ГРМ-1	250	10	Растяжение-сжатие	1	$d = 15$
					2	Сечение $6 \times 50$ мм

### Линейный регрессионный анализ результатов

Для испытаний на усталость характерен большой разброс экспериментальных результатов. Поэтому для их обработки используются статистические методы. В силу отмеченной выше особенности группировки экспериментальных результатов в нашем случае возможно использование метода линейного регрессионного анализа для установления зависимости между логарифмом максимального напряжения цикла и логарифмом долговечности.

Максимальное напряжение является независимой величиной, и его значение задается при планировании испытаний. Долговечность является случайной величиной, подчиняющейся логарифмически нормальному закону распределения. Задача регрессионного анализа в данном случае заключается в определении параметров  $a$  и  $b$  уравнения:

$$\hat{y} = a + b(x - \bar{x}),$$

где  $\hat{y}$  – оценка условного математического ожидания величины  $y = \lg N$  для заданного значения  $x = \lg \sigma$ ;  $\bar{x}$  – среднее значение логарифмов напряжений.

Если принять, что дисперсия случайной величины не зависит от уровня  $x$ , то оценка параметров линии регрессии осуществляется по следующим формулам [6]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i x_i}{\sum_{i=1}^m n_i}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^m n_i (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^m n_i (x_i - \bar{x})^2}, \quad a = \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^m n_i},$$

где  $i$  – номер уровня  $x_i$  ( $i$  меняется от 1 до  $m$ );  $n_i$  – число испытаний при заданном уровне  $x_i$ ;  $\bar{y}_i$  – выборочное условное среднее значение случайной величины  $y$ .

Значение  $\bar{y}_i$  можно вычислить по формуле:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{n_i},$$

где  $j$  – номер результата  $y_{ij}$ , полученного на уровне  $x_i$ ;  $n_i$  – число испытаний на уровне  $x_i$ .

Если на уровне  $x_i$  испытывался один ( $j = 1$ ) образец, то  $\bar{y}_i = y_i$  и для ответа на вопрос о вероятности разрушения, нужно строить доверительные интервалы.

Для нахождения коэффициентов уравнения левой ветви кривой усталости следует использовать те точки, которые предположительно относятся к этой части кривой.

Окончательно уравнение регрессии запишем в виде

$$\hat{y} = A + bx,$$

где  $A = a - b\bar{x}$ . Величина разброса экспериментальных результатов по отношению к эмпирической линии регрессии характеризуется дисперсией

$$S_y^2 = \frac{1}{m-2} \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i).$$

## **Моделирование испытаний на усталость**

Проведение реальных испытаний материалов на усталость требует слишком больших затрат времени; весьма трудоемки и вычисления при обработке результатов этих испытаний.

В связи с этим в рамках учебного процесса реальные испытания образцов на усталость заменены так называемой деловой игрой, в которой вычислительная программа моделирует работу экспериментального оборудования, свойства материала, экспериментальный разброс и даже образцы, имеющие дефекты изготовления или материала. Это позволяет во время лабораторной работы проследить всю процедуру реальных длительных испытаний. Усталостные испытания моделируются программой FLORA, написанной на языке DELPHI и выполняемой в режиме диалога на персональном компьютере, работающем под управлением ОС Windows 95.

В программе FLORA зафиксированы реальные кривые усталости нескольких материалов, данные об испытательных машинах и образцах. По заданному напряжению находится число циклов до разрушения на истинной кривой. Затем полученная точка преобразуется в «экспериментальную» с помощью датчика случайных чисел, имитирующего реальный разброс по долговечности.

Завершенные испытания программа иллюстрирует графиком в двойных логарифмических координатах.

Для выполнения лабораторной работы не требуется каких-либо специальных знаний об алгоритмических языках и операционной системе. Программа выводит на экран дисплея достаточно понятные запросы и требует определенных ответов.

### **Порядок выполнения работы**

#### **Запуск программы и ввод данных**

Включить компьютер и двойным щелчком левой клавиши мыши на значке FLORA (находящемся на рабочем столе компьютера)

запустить программу. На экране появится окно программы с вспомогательным текстом.

Экспериментатор вводит в программу задаваемые ему следующие данные:

- номер испытательной машины и схему нагружения (см. табл. 9.1);
- номер образца (см. табл. 9.1);
- номер материала;
- базу испытания ( $10^7 \div 10^8$  циклов).

В ответ на заданный номер материала программа сообщает его марку и механические свойства (предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и предел прочности  $\sigma_B$ ).

### **Испытания на усталость**

Прежде чем перейти ко второму этапу работы, необходимо правильно ответить на вопрос: какое максимальное напряжение в выбранном образце будет вызвано нагрузкой в 1 кН? Это значение вводится в программу с погрешностью, не превышающей 1 %. В случае неправильного ввода программа предлагает повторить расчет напряжения. После многократных ошибок (~10) программа предложит экспериментатору проработать разделы курса, связанные с расчетом напряжений при изгибе и растяжении-сжатии, после чего прекратит свою работу.

Экспериментатор вводит последовательно значение выбранных нагрузок и получает в ответ значения соответствующих долговечностей в выбранном режиме нагружения.

Испытание каждого образца проводится до разрушения или до достижения заданного базового (максимального) числа циклов. При выборе уровней напряжений (нагрузок) следует учитывать, что сверху кривая усталости ограничена пределом прочности, а предел выносливости лежит ниже предела текучести. Достаточное число точек должно лежать не только в области расположения левой ветви кривой усталости, что нужно для проведения регрессионного анализа, но и в области предела выносливости, что необходимо для определения этой величины. Общее количество образцов, использованных в эксперименте, должно быть в пределах от 30 до 50 штук.

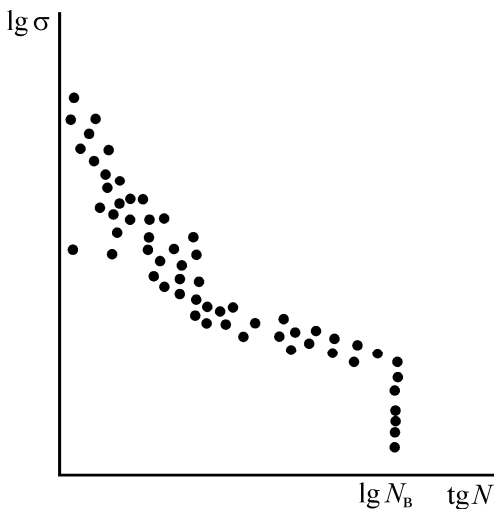


Рис. 9.2. Типичный график результатов испытаний на усталость

В любой момент экспериментатор может получить графическое изображение полученных результатов в двойных логарифмических координатах (рис. 9.2).

В процессе испытаний на экране высвечивается таблица, в которой выдаются приложенные нагрузки, соответствующие им максимальные напряжения, логарифмы напряжений и долговечностей.

### Обработка результатов испытаний

Обработка результатов испытаний образцов на усталость проводится экспериментатором по формулам линейного регрессионного анализа, приведенного выше. При этом предварительно следует выделить точки, относящиеся к левой части кривой усталости (число точек не должно быть менее 25). Предел выносливости определяется как максимальное напряжение, при котором на заданной базе испытаний не происходит разрушения.

### Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- протокол выполнения работы (см. приложение 9.1);
- выводы по работе.

## Контрольные вопросы

Что называется пределом выносливости и какие необходимо провести испытания для определения этой характеристики материала?

Какие типы испытательных машин используют для испытаний на усталость?

Какие типы образцов используют для испытаний на усталость?

## Список рекомендуемой литературы

1. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т. II. М.: Машиностроение, 1974.

2. Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972.

3. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

4. ГОСТ 23207–78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.

5. ГОСТ 24217–80. Машины для испытания металлов на усталость. Типы. Основные параметры.

6. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Длительные статические и циклические испытания металлов». /Под ред. Егорова В.И. М.: МИФИ, 1990.

### Протокол испытаний на усталость

Номер материала \_\_\_\_\_, марка \_\_\_\_\_

Механические свойства: предел текучести  $\sigma_{0,2}$  \_\_\_\_\_ МПа

предел прочности  $\sigma_B$  \_\_\_\_\_ МПа

Номер и тип испытательной машины \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_

Максимальная нагрузка \_\_\_\_\_ кН

Номер типа образца \_\_\_\_\_

Схема нагружения \_\_\_\_\_

Размеры \_\_\_\_\_

Напряжение, соответствующее нагрузке в 1 кН \_\_\_\_\_ МПа

Базовое число циклов испытаний \_\_\_\_\_

Таблица результатов испытаний

Номер образца	Нагрузка, кН	$\sigma$ , МПа	$N$	$\lg \sigma$	$\lg N$

Уравнение линии регрессии:  $\hat{y} = A + bx$ .

Оценка дисперсии около линии регрессии:

$$S_y^2 = \frac{1}{m-2} \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i).$$

Предел выносливости \_\_\_\_\_ МПа

График уравнения регрессии и экспериментальные точки в координатах « $\lg \sigma - \lg N$ ».



## Работа 10

### ИСПЫТАНИЕ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ

*Цель: ознакомление с установкой и методикой проведения испытаний на термическую усталость; построение диаграммы циклического упругопластического деформирования; расчетная оценка долговечности с использованием уравнения Мэнсона–Коффина.*

#### Введение

Разрушение материалов под действием циклических термических напряжений называют термической усталостью.

В результате изменения температурного поля возникают термические деформации и напряжения, которые появляются в силу статической неопределимости системы в следующих случаях: при неравномерном нагреве или охлаждении тела, не связанного с другими телами; при равномерном нагреве или охлаждении тела, на которое наложены внешние механические связи; при неравномерном нагреве или охлаждении тела с внешними механическими связями.

Таким образом, причина возникновения термических напряжений заключается в несвободном термическом расширении-сжатии тела или отдельных его зон.

В условиях, когда преобладает установившийся режим работы, эти напряжения, достигнув определенной величины, могут сниматься пластическим течением металла и практически не являются опасными. Однако под действием переменного температурного поля могут развиваться циклические термические напряжения, превышающие предел текучести, когда при определенном числе температурных циклов произойдет усталостное разрушение металла. Возможное число температурных воздействий определяется условиями эксплуатации изделий. Обычно термоусталостное разрушение реализуется за счет реверсивного упругопластического деформирования при числе циклов  $10^3$ – $10^5$  и, следовательно, является разновидностью неизотермической малоцикловой усталости.

Особенности проведения испытаний на термическую усталость:

– испытания проводятся в условиях, когда заданными являются деформации, определяемые перепадом температур;

– деформация происходит при непрерывно меняющейся температуре (возможно влияние на структурные процессы и механические свойства).

Оценку сопротивления материалов термической усталости проводят чаще всего с помощью деформационных критериев. Наибольшее распространение получило критериальное уравнение Мэнсона–Коффина:

$$\Delta \varepsilon_p N_f^{0,5} = C, \quad (10.1)$$

где  $\Delta \varepsilon_p$  – размах пластической деформации за цикл;  $N_f$  – число циклов до разрушения;  $C$  – постоянная материала. Величину  $C$  можно определить при относительно умеренных температурах по результатам испытаний на однократное статическое растяжение:

$$C = \frac{1}{2} \varepsilon_f = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \psi_k}, \quad (10.2)$$

где  $\varepsilon_f$  – истинная деформация при статическом разрыве,  $\psi_k$  – относительное поперечное сужение при разрыве. В этом случае уравнение Мэнсона–Коффина распространяется на условия статического растяжения:  $N_f = 1/4$  и  $\Delta \varepsilon_p = \varepsilon_f$ . Таким образом, важнейшей характеристикой термоусталостного нагружения является размах пластической деформации  $\Delta \varepsilon_p$  за цикл.

Анализ многочисленных экспериментальных данных показывает, что сопротивление материалов термической усталости в значительной степени зависит от условий проведения испытаний: температурного режима, жесткости нагружения, формы и длительности термического цикла.

Для выполнения испытаний на термическую усталость необходимо обеспечить:

- циклическое изменение температуры по заданному закону;
- регистрацию циклических диаграмм деформирования материала;
- регистрацию числа циклов до разрушения.

Испытания на термоусталость проводятся в соответствии с ГОСТ 25.505–85.

## Установка для проведения испытаний на термическую усталость

Испытания на термическую усталость проводятся на специальной установке. На рис. 10.1 представлена схема механической части установки, состоящей из двух массивных плит 11 и 13, соединенных между собой тремя колоннами 12. Образец 4 закрепляется

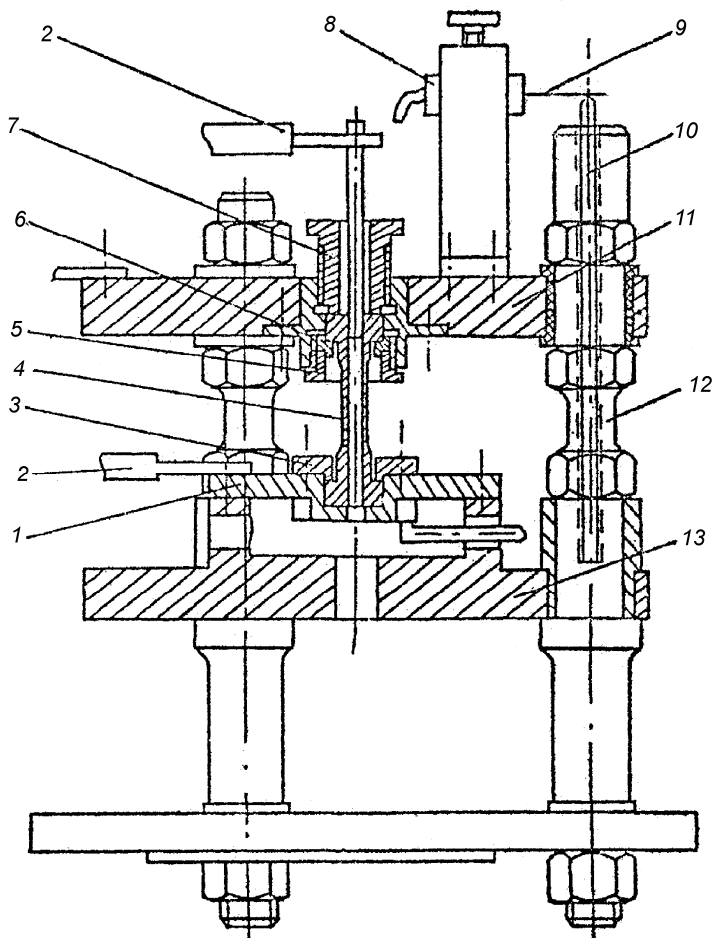


Рис. 10.1. Схема механической части установки для проведения термоусталостных испытаний

с помощью накидных фланцев 3 в установочном гнезде мембраны 1, соединенной с нижней плитой 13, а с верхней плитой 11 – верхней 7 и нижней 5 центральными гайками с использованием разрезных вкладышей 6. Трубчатый образец 4 нагревается непосредственным пропусканием тока. В верхнюю головку образца ввинчивается латунный токоввод, к которому присоединяется гибкая водоохлаждаемая шина 2, идущая от силового трансформатора. Вторая шина подключается к мембране 1.

Циклические термические напряжения в закрепленном образце возникают за счет периодических нагревов и охлаждений в силу запрещения деформаций в осевом направлении. При нагревании образца 4, когда он не закреплен в верхней плите 11, напряжения в образце не возникают. Если закрепить верхнюю головку образца гайками, то перемещение последней будет ограничено, и, таким образом, в образце появятся сжимающие напряжения.

Если стесненная деформация во время нагрева не выходит за пределы упругой, то, охлаждаясь, образец возвращается к исходным размерам, и напряжения полностью снимаются. Если же деформация в процессе нагрева выходит за пределы упругой, в образце возникает остаточная деформация сжатия. При последующем охлаждении в образце появятся остаточные напряжения растяжения, так как в результате остаточного сжатия охлажденный образец в свободном состоянии стал бы короче. Когда головки образца закреплены жестко, будет возникать растяжение. При этом снова может быть достигнут предел текучести материала, что вызовет повторную пластическую деформацию растяжения.

Усилие, возникающее при нагружении, передается через плиту 11 на колонны 12. В этом случае во время нагревания образца в колоннах возникает деформация растяжения, а во время охлаждения – деформация сжатия. Регистрация нагрузки в процессе испытаний осуществляется путем измерения упругой деформации колонн, имеющих кольцевое поперечное сечение. Измерение этой деформации производится с помощью механотронного датчика 8, установленного на верхней плите около одной из колонн, внутри которой помещается стержень 10, опирающийся снизу на основание, а сверху касающийся штыря 9 механотрона 8. Перемещение штыря механотрона соответствует перемещению стержня 10 в ко-

лонне  $I_2$  при сжатии и растяжении последней. Погрешность измерения усилий не превышает  $\pm 3\%$  от измеряемой величины.

На рис. 10.2 представлена принципиальная схема системы регулирования температуры. Закон изменения температуры задается автоматическим задающим устройством РУ5-02М, реохорд которого включен в мостовую схему с дополнительным реохордом прибора КСП-2, осуществляющего непрерывную регистрацию и запись изменения температуры во времени с использованием хромель-алюмелевой термопары. Разбаланс моста подается на регулятор типа Р-111, сигнал которого усиливается тиристорным усилителем У-252. Выходное напряжение усилителя через трансформатор ОСУ 20/05 подается на образец. Погрешность задания температуры при такой схеме ее регулирования не превышает  $\pm 4$  К.

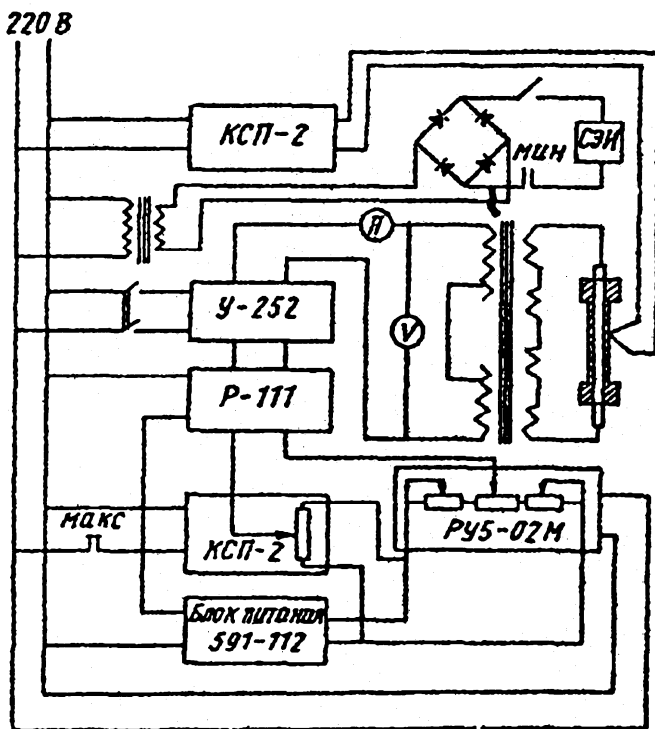


Рис. 10.2. Принципиальная схема регулирования температуры

Измерение деформации образца в его нагретой части производится диаметральной экстензометром, использующим механотронный датчик перемещения, с погрешностью, не превышающей  $\pm 2\%$  от измеряемой величины. Схема экстензометра показана на рис. 10.3.

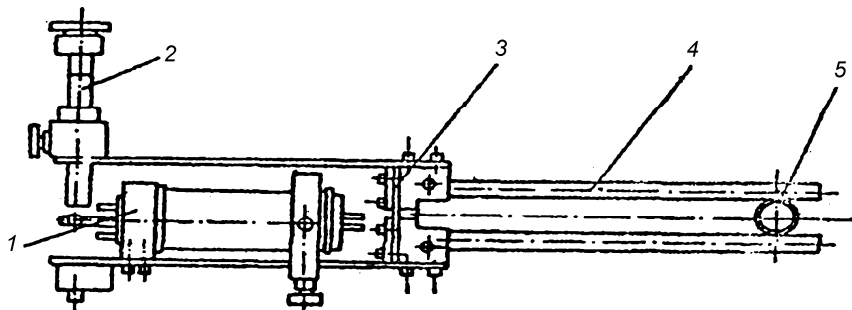


Рис. 10.3. Схема диаметрального экстензометра

Подвешенный в центре тяжести на нитях экстензометр фиксируется кварцевыми трубками 4 на образце 5 в нужном сечении благодаря силам упругого шарнира 3. Электронно-механический датчик малых перемещений и усилий – механотрон 1 используется для измерения относительного смещения задних плеч рычагов. Винт 2 служит для установки электрического нуля мостовой схемы измерения деформации.

Применение экстензометра позволяет записывать на потенциометре изменение диаметра образца в процессе испытания. Для получения механической деформации необходимо вычитать из общей деформации термическую (см. выражение (10.3)).

### Проведение испытаний на термическую усталость

Так как испытания на термическую усталость довольно длительны, непосредственное участие студента в эксперименте ограничивается регистрацией с помощью двухкоординатного самописца циклических диаграмм деформирования в координатах «усилие  $P$  – изменение диаметра образца  $\Delta d$ » в течение цикла и «усилие  $P$  – изменение температуры образца  $T$ » в течение цикла в

наиболее нагретом месте, необходимых для получения циклической диаграммы деформирования в координатах «напряжение  $\sigma$  – продольная деформация  $\epsilon$ ».

Полную продольную механическую деформацию  $\epsilon$  можно выразить через компоненты поперечной деформации в каждый момент деформирования. На основании допущения о несжимаемости материала при пластическом деформировании:

$$\epsilon = -2\left(\frac{\Delta d}{d} - \alpha(T)\Delta T\right) + \frac{P}{E(T)F}(1 - 2\mu(T)), \quad (10.3)$$

где  $d$  – диаметр образца;  $F$  – площадь его поперечного сечения;  $P$  – усилие на образце;  $\alpha(T)$ ,  $E(T)$  и  $\mu(T)$  – коэффициент линейного расширения, модуль упругости и коэффициент Пуассона в функции температуры  $T$  соответственно;  $\Delta T$  – интервал температур.

Построив по 15–20 точкам диаграмму деформирования « $\sigma$ – $\epsilon$ », определяют размах пластической деформации за цикл  $\Delta\epsilon_p$ , который равен ширине петли гистерезиса. Далее, используя зависимость (10.1), определяют долговечность образца  $N_f$ .

Для обработки результатов испытаний приводятся характеристики материала, режим нагружения образца, конкретные данные об изменении деформации образца во время нагружения и подсчет количества циклов до разрушения образца.

### Порядок выполнения работы

1. Перед проведением испытания измерить внешний и внутренний диаметры образца. Подсчитать площадь поперечного сечения  $F$ .

2. Образец установить и закрепить сначала в гнезде мембраны 1 с помощью накидных фланцев 3 (см. рис.10.1). После этого к образцу приварить термопару.

3. Ножки экстензометра зафиксировать на середине образца.

4. Включить воду для охлаждения плит 11 и 13.

5. Нагреть образец.

6. При средней температуре цикла закрепить верхнюю головку образца с помощью гаек 5 и 7.

7. Записать на двухкоординатном самописце диаграммы деформирования в координатах « $P-\Delta d$ » и « $P-T$ ». На этих диаграммах фиксируют 15–20 точек (рис. 10.4).

8. Для каждой точки определить напряжение  $\sigma = P/F$ , температурную деформацию  $\alpha\Delta T$ , изменение диаметра  $\Delta d$ , продольную механическую деформацию  $\varepsilon$ .

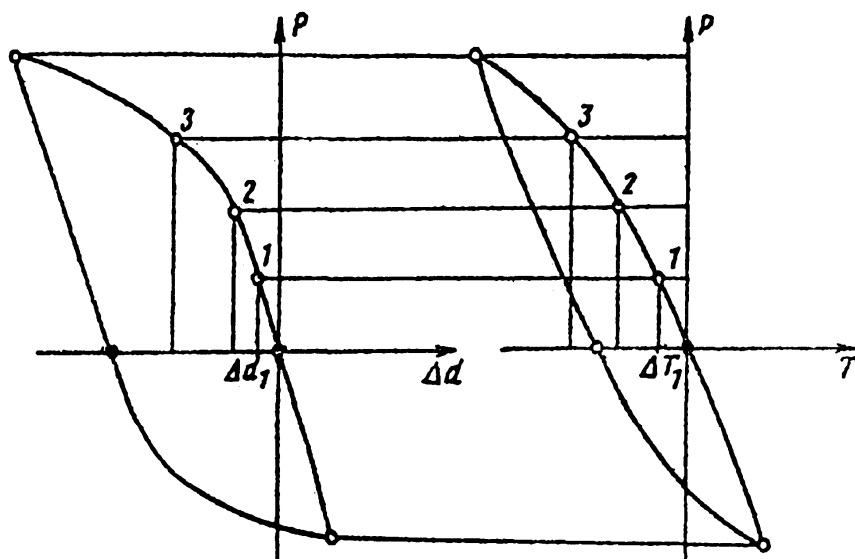


Рис. 10.4. Схема определения соотношения между приращениями диаметра и температуры

9. Данные расчетов занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Номер точки	Нагрузка $P$ , кН	Напряжение $\sigma$ , МПа	Изменение диаметра $\Delta d$ , мм	Общая поперечная деформация $\Delta d/d$	Интервал температур $\Delta T$ , °С	Температурная деформация $\alpha\Delta T$	Полная продольная механическая деформация $\varepsilon$



10. По точкам построить диаграмму деформирования в координатах « $\sigma$ – $\epsilon$ » и определить размах пластической деформации за цикл  $\Delta\epsilon_p$ .

11. Используя соотношение (10.2), определить постоянную материала  $C$ .

12. С помощью выражения (10.1) вычислить долговечность образца  $N_f$ .

### Отчет по работе

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- краткое описание установки и методики проведения испытаний на термическую усталость;
- циклические диаграммы деформирования в неизотермических условиях в координатах « $P$ – $\Delta d$ », « $P$ – $T$ »;
- перестроенную диаграмму циклического деформирования в координатах « $\sigma$ – $\epsilon$ »;
- таблицу результатов вычислений;
- выводы по работе.

### Контрольные вопросы

В чем различие между многоцикловой и малоцикловой усталостью?

Записать критериальное уравнение Менсона–Коффина.

Что называется термоусталостью и чем она принципиально отличается от механической усталости?

Что собой представляет кривая циклического деформирования и зачем она нужна?

Какой вид нагружения (мягкий, жесткий) реализуется в условиях испытания на термоусталость?

Принцип действия установки МИФИ для термоусталостных испытаний.

## Список рекомендуемой литературы

1. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение, 1980.
2. Гусенков А.П., Котов П.И. Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. М.: Машиностроение, 1983.
3. ГОСТ 25.505–85. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении.
4. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Длительные статические и циклические испытания металлов». /Под ред. Егорова В.И. М.: МИФИ, 1990.

## Работа 11

### МАЯТНИКОВЫЕ КОПРЫ И МЕТОДЫ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

*Цель: ознакомление с маятниковыми копрами МК-30, 2130 КМ-0,3, МК-1 методом поверки копров и методами ударных испытаний металлов.*

#### Введение

Важными механическими характеристиками материала, оценивающими его сопротивление разрушению при ударном нагружении, являются работа удара или ударная вязкость. Эти характеристики играют большую роль при оценке качества металлов и сплавов главным образом сталей и используются для выявления склонности стали к хрупкому разрушению и определения температурного интервала хрупкости. Определяются они при ударном изгибе надрезанного образца на маятниковых копрах.

Маятниковый копер предназначен для разрушения образца, свободно лежащего на его опорах, тяжелым маятником, падающим из взведенного состояния. Маятниковые копры изготавливаются по ГОСТ 10708–76, и основные их параметры должны соответствовать требованиям ГОСТа. По конструкции они разделяются на копры с переменным запасом энергии с одним молотом и копры с определенным запасом энергии со сменными молотами.

#### Описание маятникового копра МК-30 с переменным запасом энергии

Копер состоит из станины, двух полок, тяжелого маятника, закрепленного на растяжках и свободно качающегося на оси, подъемной рамы, которую можно устанавливать на различной высоте. В верхней части рамы имеется защелка для удержания маятника во взведенном положении. Подъемная рама, опирающаяся на храповики, позволяет менять запас энергии в пределах от 1 до 30 кгс · м. Опоры для образца вынесены на угол  $\gamma = 17^\circ$  от вертикальной оси.

Массивный маятник копра в поднятом (взведенном) положении обладает определенным запасом потенциальной энергии. При

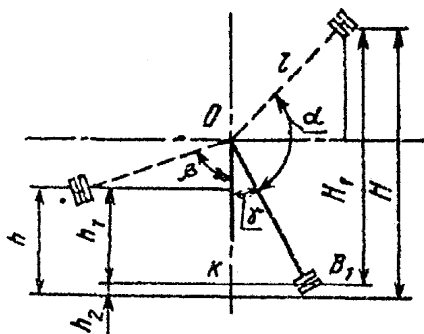


Рис. 11.1. Схема регистрации работы удара на копре МК-30

падении маятника часть энергии затрачивается на деформацию и разрушение образца, а часть расходуется на подъем маятника после удара. Зная запас энергии маятника до удара и измерив оставшуюся часть ее (по высоте подъема маятника после удара), можно подсчитать работу, затраченную на деформацию и разрушение образца. Схема регистрации работы удара на копре приведена на рис. 11.1.

Запас энергии маятника для копров этого типа равен  $E = PH_1$ .

Из схемы также следует, что  $H_1 = H - h_2$ , где  $H = l(1 - \cos \alpha)$ ,  $h_2 = l(1 - \cos \gamma)$ . Тогда  $H_1 = l(\cos \gamma - \cos \alpha)$  и  $E = Pl(\cos \gamma - \cos \alpha)$ . Остаток энергии маятника после разрушения образца  $E_1 = Pl(\cos \gamma - \cos \beta)$ , а работа удара  $K = E - E_1 = Pl(\cos \beta - \cos \alpha)$ , где  $P$  – вес маятника, кгс ( $H$ );  $l$  – расстояние от оси качания до центра тяжести, м;  $H$  – высота подъема центра тяжести маятника, м;  $\alpha$  – угол подъема маятника в исходное положение;  $\beta$  – угол подъема маятника после разрушения образца.

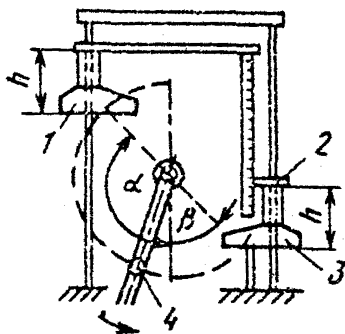


Рис. 11.2. Измерительное приспособление для регистрации работы удара

Энергия, затраченная на разрушение образца, отсчитывается при помощи специального измерительного приспособления (рис. 11.2) по шкале, градуированной в кгс · м (Дж).

Это измерительное приспособление состоит из двух горизон-

тальных планок: планки 1, соединенной с вертикальной шкалой, и планки 3, соединенной с указателем 2, которые перемещаются по тонкому вертикальному стержню с трением, достаточным для преодоления его веса. На оси маятника на специальном поводке установлен ролик 4. При установке маятника в начальное положение этот ролик поднимает ближайшую к нему планку 1, а вместе с ней и шкалу на величину, пропорциональную энергии, оставшейся неизрасходованной. Указатель остается в этом положении вследствие наличия сил трения и указывает на шкале некоторую величину, пропорциональную разности высот центра тяжести маятника до и после удара, т.е. пропорциональную работе, затраченной на разрушение образца.

### **Описание маятникового копра 2130 КМ-0,3**

Маятниковый копер 2130 КМ-0,3 предназначен для испытания образцов из металлов и сплавов на двухопорный ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 9454–78. Он снабжен маятником с номинальным значением потенциальной энергии 150 Дж (14,7 кгс · м) и дополнительными накладками, позволяющими увеличить номинальное значение потенциальной энергии маятника до 300 Дж (29,4 кгс · м).

Копер как испытательный комплекс состоит из следующих основных частей: собственно копра, пульта, цифрпечатающей машины и микрокалькулятора. Этот комплекс позволяет автоматически регистрировать результаты испытания образцов. Сам копер состоит из массивной чугунной опоры с закрепленными на ней стойками, маятника, подъемного устройства – пневмоцилиндра и стрелы, служащей для подъема маятника, тормоза для остановки движения маятника после разрушения образца, рычага подачи образцов, блока измерения, электрооборудования и пневмооборудования, переднего и заднего ограждений.

Опора для образца расположена таким образом, что маятник производит удар по образцу, находясь в вертикальном положении. Энергия, затраченная на разрушение образца, высвечивается в цифровой форме на табло блока измерения в джоулях. Ударную вязкость образца определяют согласно ГОСТ 9454–78.

Порядок работы на копре 2130 КМ-0,3 следующий.

1. Оцените ориентировочную работу разрушения испытываемого образца и настройте копер на соответствующий запас энергии маятника 150 или 300 Дж. Для этого откройте переднее ограждение и снимите или закрепите на маятнике четыре накладки. Сцепите маятник со стрелой и закройте переднее и заднее ограждения.

2. Перед включением копра все переключатели и тумблеры установите в исходное положение: на панели копра тумблер СТРЕЛА – в положение ВВЕРХ, на стойке копра автомат СЕТЬ – в положение ВКЛ, запорный вентиль – в положение ОТКРЫТО, давление воздуха на манометре – нуль. Стрела и маятник в нижнем положении.

3. Откройте запорный вентиль на корпусе копра. Регулятором давления установите по манометру на копре давление 0,35 МПа, если подвешен маятник на 300 Дж, или 0,25 МПа, если подвешен маятник на 150 Дж, при этом стрела с маятником должна подняться до исходного положения, определяемого регулируемым упором на стреле.

4. Включите автомат СЕТЬ – на панели копра должна загореться сигнальная лампочка.

5. Рычагом подачи образцов установите образец на опоры копра.

6. Включите тумблер на отсчетном устройстве копра – на табло должны высветиться цифры «000.0».

7. Нажмите на кнопку УДАР. При этом срабатывают электромагниты, удерживающие маятник. Маятник падает, разрушает образец, поднимается на высоту, соответствующую запасу его оставшейся энергии, идет назад и проскакивает мимо стрелы, включая микропереключатель, который подает сигнал на отключение электромагнитов. Стрела подхватывает маятник и поднимает его в исходное положение – маятник подготовлен к следующему испытанию, а на табло высвечивается значение работы разрушения.

При испытании следующего образца к зафиксированной ранее работе разрушения добавляется работа разрушения очередного образца.

### **Проверка маятниковых копров**

При проверке копра должны быть выполнены следующие операции:

- внешний осмотр;
- опробование;
- определение размеров ножа маятника и опор копра;
- определение отклонения от горизонтальности положения опор в направлении оси образца;
- определение неперпендикулярности боковых поверхностей молота относительно вертикальной и горизонтальной поверхностей опоры;
- определение расстояния между опорами;
- определение разности расстояния от оси качания маятника до середины образца и от оси качания до середины кромки ножа;
- определение непараллельности боковых поверхностей молота маятника относительно плоскости его качания;
- определение осевого люфта оси маятника;
- определение скорости движения маятника в момент удара;
- определение разности между расстоянием от оси качания маятника до середины образца и расстоянием от оси качания до центра удара;
- определение периода полного колебания маятника и количества полных колебаний;
- определение относительной погрешности показаний копра по шкале.

При проведении внешнего осмотра должно быть установлено: соответствие копров требованиям ГОСТ 10708–76 в части внешнего вида, комплектности, маркировки, покрытий; отсутствие на поверхности копров механических и коррозионных повреждений; плотное прилегание подвижных опор к опорным плоскостям и надежное крепление их на корпусе зажимными болтами; наличие на копре шкалы с четко нанесенными цифрами и надписями.

Опробование копра проводят при холостом режиме, при этом копры должны удовлетворять следующим требованиям:

- молот должен быть надежно без люфтов закреплен к подвеске или к штанге, маятник должен подниматься на заданную высоту плавно;
- предохранительное устройство должно надежно запирать спусковое устройство при поднятом маятнике, маятник должен легко освобождаться под действием спускового приспособления;

– у копров с запасом энергии больше 5 кгс·м (50 Дж) после взлета (обратного хода маятника) должно автоматически включаться тормозное приспособление, и маятник должен останавливаться;

– указатель стрелки, а также шкала (копров типа МК-15 или МК-30) должны легко передвигаться и фиксироваться в поднятом положении.

### **Определение метрологических параметров маятникового копра**

Размеры ножа маятника и опор копра проверяют штангенциркулем, угломером с нониусом и радиусным шаблоном.

Горизонтальность установки опор копра в направлении оси образца определяют рамным уровнем, установленным на опоры. Отклонение от горизонтальности не должно превышать 0,15 мм на длине 100 мм.

Отклонение от перпендикулярности боковых поверхностей молота относительно вертикальной и горизонтальной поверхностей опоры определяют поверочной линейкой, поверочным угольником. Оно не должно быть более 0,3 мм на длине 100 мм.

Расстояние между опорами при различных установках опор должно соответствовать расстояниям, указанным на установочных горизонтальных шкалах, и должно регулироваться в пределах от 40 до 120 мм для копров с запасом потенциальной энергии до 150 кгс·м. Проверку проводят штангенциркулем.

Разность между расстоянием от оси качания маятника и отметкой на середине ножа маятника и расстоянием от оси качания маятника до середины контрольного образца не должна превышать 1 мм (измеряется штангенциркулем или штангенрейсмасом).

Непараллельность боковой поверхности молота маятника относительно плоскости его качания не должна превышать 0,3 мм на длине 300 мм (измеряется индикатором часового типа ИЧ10, класса 0).

Осовой люфт оси качания маятника не должен быть более 0,25 мм. Он измеряется индикатором часового типа, закрепленным на станине копра магнитной стойкой так, чтобы измерительный стержень упирался в торец оси маятника. Осовой люфт определя-



ют, перемещая ось маятника перпендикулярно к плоскости качания.

Скорость движения маятника в момент удара вычисляют по формуле  $v = \sqrt{2gL(\cos\gamma - \cos\alpha)}$ , где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $L$  – расстояние от оси качания маятника до середины образца,  $\text{м}$ ;  $\gamma$  – угол выноса опор от вертикали, град.;  $\alpha$  – угол подъема маятника, град.

Расстояние  $L$  измеряют рулеткой и штангенциркулем. Угол определяют угломером с нониусом. Скорость движения маятника в момент удара у копров с наибольшим значением запаса потенциальной энергии от 5,0 до 250  $\text{кгс} \cdot \text{м}$  (от 50 до 2500 Дж) должна составлять 5,0–5,5  $\text{м/с}$ .

Разность между расстоянием  $L$  от оси качания маятника до середины ножа и расстоянием  $l$  от оси качания маятника до центра удара (приведенная длина маятника) не должна превышать  $\pm 1\%$  от расстояния  $L$ . Длину математического маятника  $l$ , изохронного с данным физическим, подсчитывают по формуле:

$$l = \frac{g}{4\pi^2} T^2,$$

где  $T$  – период полного колебания маятника;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  для Москвы. Для определения периода полного колебания необходимо отклонить маятник приблизительно на  $10^\circ$  от вертикали, отпустить и, пустив секундомер, определить время, необходимое для 80–100 полных колебаний.

Следует также иметь в виду, что число полных колебаний маятника до полной остановки, отклоненного на  $10^\circ$  от вертикали и отпущенного для свободного качания, должно быть не менее 125. Это характеризует усилие затяжки подшипников и трение в подшипниках.

Относительную погрешность показаний копра по шкале, %, подсчитывают по формуле:

$$\psi = \frac{E_{\Gamma} - E}{E} \cdot 100\%,$$

где  $E_{\Gamma}$  – действительный запас энергии маятника в горизонтальном положении;  $E$  – паспортное значение, на основании которого проведена градуировка шкалы.

Для определения величины  $E_{\Gamma}$  необходимо отклонить маятник в горизонтальное положение и непосредственно взвесить его, оперев серединой ударного ножа на призму, установленную на чашку весов, или использовать специальное приспособление для взвешивания, которое прилагается к копру.

Приспособление состоит из планки, стального тросика, одним концом закрепленного на планке и имеющего крючок на другом. При помощи этого приспособления необходимо маятник копра привести в горизонтальное положение. Планка помещается под растяжками, на которых закреплен маятник, а тросик перекидывается через ролик, укрепленный в раме, поддерживающей маятник в поднятом состоянии. С помощью грузов, подвешиваемых на конце тросика, маятник вывешивается в горизонтальное положение. Тросик от планки к ролику должен иметь вертикальное положение. Найденный таким образом вес груза  $G_1$ , умноженный на расстояние от оси качания маятника до точки подвеса тросика  $l_1$ , дает произведение  $G_1 l_1$ . Повторное взвешивание производят, изменяя положение планки (пропуская тросик через ролик с противоположной стороны). Взвешивание производится с погрешностью до  $\pm 10$  г. Расстояния  $l_1$  и  $l_2$  измеряют линейкой с погрешностью до 0,5 мм.

Среднее арифметическое результатов двух измерений принимается за действительный запас энергии маятника  $E_{\Gamma}$  :

$$E_{\Gamma} = \frac{G_1 l_1 + G_2 l_2}{2} .$$

Найденная величина  $E_{\Gamma}$  не должна отличаться от действительного запаса энергии маятника (паспортного, указываемого на копре) более чем на  $\pm 1$  %. Отличие найденной величины  $E_{\Gamma}$  от паспортной характеризует погрешность показаний шкалы копра.

## Методы ударных испытаний металлов

Ударные испытания металлов проводят по ГОСТ 9454–78. Метод основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятника копра. Концы образца располагают на

опорах. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе (работу удара)  $K$  или ударную вязкость  $KС$ . Под ударной вязкостью следует понимать работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

ГОСТ предусматривает возможность использования 20 типов образцов, различающихся размерами, глубиной и формой надреза (рис. 11.3–11.5, табл. 11.1). Наибольшее распространение получило испытание образца 11 типа, который принят в качестве основного (образец Шарпи- $V$ ) во многих странах мира. Допускается испытывать образцы и без надреза. Риски на поверхности концентраторов видов  $U$  и  $V$ , видимые без применения увеличительных средств, не допускаются. Концентратор вида  $T$  (трещина) получают в вершине начального надреза при циклическом изгибе образца в одной плоскости. Число циклов, необходимое для получения трещин заданного размера, должно быть не менее 3000. Остаточный прогиб на всей длине образца, образовавшийся при нанесении трещины на образцах с концентратором  $T$ , не должен превышать 0,25 мм для образцов длиной 55 мм. Пе-

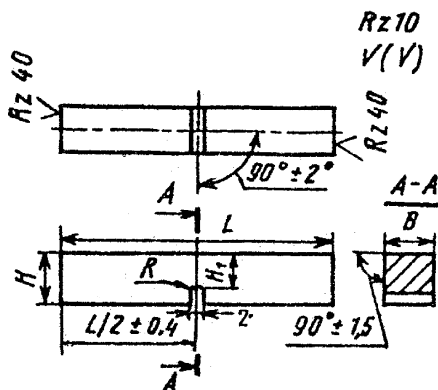


Рис. 11.3. Образец с концентратором вида  $U$

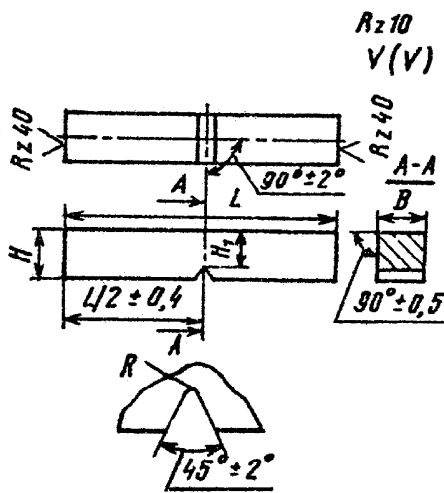


Рис. 11.4. Образец с концентратором вида  $V$

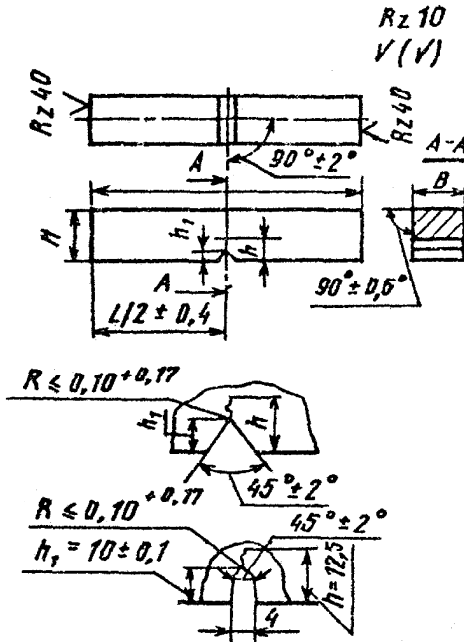


Рис. 11.5. Образец с концентратором вида Т (с усталостной трещиной)

ред началом испытаний необходимо проверить положение указателя работы при свободном падении маятника. Указатель работы должен показывать «нуль» с отклонением до 0,5 % от максимальной энергии удара маятника, но не более 1 Дж (0,1 кгс · м). Максимальная энергия удара маятника должна быть такой, чтобы значение работы удара составляло не менее 10 % и не более 80 % от максимальной энергии удара применяемого маятника.

При проведении испытаний образец должен свободно лежать на опорах копра. Установка об-

разца производится с помощью шаблона, обеспечивающего симметричное расположение концентратора относительно опор с погрешностью не более 0,5 мм.

Испытание должно проводиться при ударе маятника со стороны, противоположной концентратору, в плоскости его симметрии. Работу удара  $K$  определяют по шкале маятникового копра. За окончательный результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов  $U$  и  $V$  и ударную вязкость для образцов с концентратором вида  $T$ . Работу удара обозначают двумя буквами ( $KU$ ,  $KV$  или  $KT$ ) и цифрами. Первая буква  $K$  – символ работы удара, вторая буква  $U$ ,  $V$  или  $T$  – вида концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Цифры не указывают при определении работы удара на копре с максимальной энергией удара маятника 300 Дж (30 кгс · м) при

глубине концентратора 2 мм для концентраторов видов *U* и *V* и 3 мм для концентратора вида *T* и ширине образца 10 мм (образцы 1, 11, 15 типов).

Ударную вязкость обозначают сочетанием букв и цифр. Первые две буквы *KC* обозначают символ ударной вязкости, третья буква – вид концентратора; первая цифра – максимальную энергию удара маятника, вторая – глубину концентратора и третья – ширину образца. Цифры не указываются для образцов типа 1, 11, 15.

Например:  $KCT^{+100} 150/3/7,5$  – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида *T* при температуре  $+100^\circ\text{C}$ . Максимальная энергия удара маятника 150 Дж ( $15 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ), глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Ударную вязкость *KC*,  $\text{Дж}/\text{м}^2$  ( $\text{кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ ), вычисляют по формуле:

$$KC = \frac{K}{F_0},$$

где *K* – работа удара, Дж ( $\text{кгс} \cdot \text{м}$ );  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора,  $\text{м}^2$  ( $\text{см}^2$ ), вычисляемая по формуле  $F_0 = H_1 \cdot B$ . Здесь  $H_1$  – начальная высота рабочей части образца, м ( $\text{см}$ ), *B* – начальная ширина образца, м ( $\text{см}$ ),  $F_0$  округляют при ширине образца более 5 мм до второй значащей цифры.

Для образцов с концентратором вида *T* значение  $H_1$  определяют как разность между полной высотой *H*, измеренной до испытания с погрешностью не более 0,005 см, и расчетной глубиной концентратора  $h_p$ , измеренной с помощью оптических средств с увеличением не менее 7\* на поверхности излома образца после его испытания по схеме, приведенной на рис. 11.6 с погрешностью не более 0,005 см.

Значение *KC* записывают в протокол с округлением до 1  $\text{Дж}/\text{м}^2$  ( $0,1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ ) при значении *KC* более 10  $\text{Дж}/\text{м}^2$  ( $1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ ) и до 0,1  $\text{Дж}/\text{м}^2$  ( $0,01 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ ) при значении *KC* менее 10  $\text{Дж}/\text{м}^2$  ( $1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ ) (приложение 11.1).

Исходные данные и результаты испытания образцов записывают в протоколе испытания, форма которого приведена в приложении 11.2.

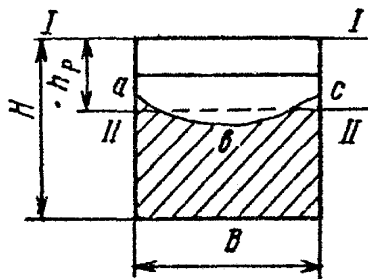


Рис. 11.6. Схема измерения площади излома:

*abc* – фронт усталостной трещины;  
 I–I – положение визирной линейки окуляра микроскопа в начальный момент измерения (совпадает с гранью образца); II–II – положение визирной линейки микроскопа при окончании измерения (положение II–II выбирается так, чтобы заштрихованная

площадь выше линии была бы равна незаштрихованной площади ниже визирной линии)

## Порядок выполнения работы

### Определение метрологических характеристик маятникового копра

1. Провести внешний осмотр маятниковых копров КМ-30 и 2130 КМ-0,3 и познакомиться с порядком проведения испытаний образцов на этих копрах.

2. Провести опробование копров на холостых режимах (без образца).

3. Определить метрологические параметры одного маятникового копра, используя соответствующие инструменты и приспособления. Результаты измерений внести в протокол поверки маятникового копра (приложение 11.1). Сделать вывод о возможности использования поверяемого копра для механических испытаний ударных образцов.

4. Обмерить образец для ударных испытаний и установить его тип.

5. Испытать образец и определить его ударную вязкость. Результаты испытаний внести в протокол испытания на ударный изгиб (приложение 11.2).

## Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- результаты поверки маятникового копра МК-30;
- выводы о пригодности его для механических испытаний;

- форму, размеры и типы испытанных образцов;
- результаты их испытания.

### **Контрольные вопросы**

Какие механические характеристики материала определяют при ударных испытаниях образцов?

Какие требования предъявляют к маятниковым копрам, чтобы они были пригодны для механических испытаний?

Как оценивается погрешность измерения работы разрушения при проверке маятникового копра?

Какие типы образцов используются для определения ударной вязкости материала?

### **Список рекомендуемой литературы**

1. ГОСТ 10708–76. Копры маятниковые. Технические условия.
2. ГОСТ 8.264–77. Копры маятниковые. Методы и средства проверки.
3. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.
4. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Т.1. М.: Машиностроение, 1974.
5. Астахов М.М., Гольцев В.Ю., Логинов А.В., Лошманов Л.П. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Динамические испытания металлов». М.: МИФИ, 1989.

## Протокол поверки маятникового копра

№ \_\_\_\_\_ тип \_\_\_\_\_

изготовленного \_\_\_\_\_

принадлежащего \_\_\_\_\_

поверен \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

### Результаты поверки

1. Соответствие копра техническим требованиям, проведенным внешним осмотром \_\_\_\_\_

2. Результаты поверки размеров элементов копра

3. Потери энергии при свободном качании маятников

4. Относительная погрешность показаний копра по шкале

5. Наибольшее значение потенциальной энергии маятника копра \_\_\_\_\_

6. Потенциальная энергия маятника копра в горизонтальном его положении \_\_\_\_\_

7. Расстояние от оси качания маятника до середины образца

8. Расстояние от оси качания маятника до центра удара

9. Разность расстояний от оси качания маятника до середины образца и от оси качания до центра удара \_\_\_\_\_

Заключение о результатах поверки.

Выдано свидетельство № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Поверку проводил \_\_\_\_\_

(подпись)

(фамилия, имя, отчество)



**Протокол испытания на ударный изгиб**

Марка копра \_\_\_\_\_

Максимальная энергия удара маятника при испытании \_\_\_\_\_

Скорость маятника в момент удара \_\_\_\_\_

Испытуемый материал \_\_\_\_\_

Маркировка образца	Тип образца	Температура испытания, °С	Ширина образца $B$ , м (см)	Высота образца $H$ , м (см)	Глубина центра, м (см)	Высота рабочего сечения $H_1$ , м (см)	Площадь поперечного сечения $M^2$ (см <sup>2</sup> )	Работа удара $K$ , Дж (кгс·м)	Ударная вязкость $KC$ , Дж/м <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )	Приращение

Испытатель \_\_\_\_\_

## Работа 12

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ МАТЕРИАЛА

*Цель: знакомство с понятием критической температуры хрупкости  $T_k$ , экспериментальными методами ее определения, определение  $T_k$  для предложенного материала.*

#### Введение

Под критической температурной хрупкости  $T_k$  понимается температура, при которой происходит изменение характера разрушения материала от хрупкого к вязкому. Она определяется по энергии, затрачиваемой на разрушение, в качестве показателя которой принимается ударная вязкость, и по виду излома образцов, в качестве показателя которого принимается доля вязкой составляющей в изломе или значение поперечного расширения образца в зоне излома. В качестве пограничных величин принимается определенный уровень ударной вязкости материала, зависящий от предела текучести материала, и наличие не менее 50 % вязкой фазы в изломе по площади, при температуре  $T_k + 30$  °С.

Характеристика  $T_k$  – критическая температура хрупкости. Совместно с критическим коэффициентом интенсивности напряжений (вязкость разрушения)  $K_{IC}$  и пределом текучести  $R_{p0,2}^T$  (здесь и далее обозначения даны в соответствии с Нормами расчета на прочность) она используется для расчета на сопротивление хрупкому разрушению элементов оборудования и трубопроводов АЭУ на стадии проектирования для всех режимов эксплуатации, включая нормальные условия эксплуатации (НУЭ), нарушение нормальных условий эксплуатации (ННУЭ), аварийные ситуации (АС), гидравлические (пневматические) испытания.

Изменение свойств материала в процессе эксплуатации учитывают введением в расчет сдвигов критической температуры хрупкости вследствие различных воздействий в процессе эксплуатации.

Сопротивление хрупкому разрушению считается обеспеченным, если для выбранного расчетного дефекта в виде трещины в рассматриваемом режиме эксплуатации выполняется условие:

$$K_1 \leq [K_1]_i,$$

где  $[K_1]$  – допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений. Индекс  $i$  указывает, что допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений выбирают различным в зависимости от расчетного случая:  $i=1$  – для НУЭ,  $i=2$  – для ННУЭ и условия гидравлического (пневматического) испытания,  $i=3$  для АС.

При определении  $[K_1]_i$  значения флюенса нейтронов  $F$  и температуры  $T$  принимают равными их значениям в точке, соответствующей наибольшей глубине выбранной расчетной трещины.

Расчет на сопротивление хрупкому разрушению можно не производить в следующих случаях:

- элементы конструкций не подвергаются нейтронному облучению (или подвергаются облучению при температурах  $250 \div 350$  °С до флюенса не более  $10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup> при  $E \geq 0,5$  МэВ);

- элементы конструкции изготовлены из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса или цветных сплавов;

- материалы элементов конструкций, включая сварные соединения, имеют предел текучести при температуре 20 °С менее 300 МПа (30 кгс/мм<sup>2</sup>), а толщина стенки элемента конструкции составляет не более 25 мм;

- материалы элементов конструкций (включая сварные соединения) имеют предел текучести при температуре 20 °С менее 600 Мпа (60 кгс/мм<sup>2</sup>), а толщина стенки элемента конструкции составляет не более 16 мм;

- толщина стенки рассматриваемого элемента конструкции  $S$  удовлетворяет условию:

$$S \leq 8 \cdot 10^3 \left( \frac{[K_1]_1}{R_{p0,2}^T} \right)^2, \text{ мм},$$

при  $[K_1]$  в МПа · м<sup>1/2</sup> и  $R_{p0,2}^T$  в МПа (обе характеристики принимают при наименьшей температуре эксплуатации и критической

температуре хрупкости  $T_k$ , соответствующей концу эксплуатации).

Допускаемые значения коэффициента интенсивности напряжений зависят от приведенной температуры ( $T - T_k$ ) и расчетного случая. Зависимости  $[K_{1i}]$  от  $[T - T_k]$  получают как огибающую двух кривых, определяемых по исходной температурной зависимости  $K_{1C}$ . Одну из этих кривых получают делением ординат исходной кривой на коэффициент запаса прочности  $n_k$ , другую – смещением исходной кривой вдоль оси абсцисс на величину температурного запаса  $\Delta T$ . Принимают:

- для НУЭ ( $i=1$ )  $n_k = 2$ ,  $\Delta T = 30$  °С;
- для ННУЭ и гидравлических (пневматических) испытаний ( $i=2$ )  $n_k = 1,5$ ,  $\Delta T = 30$  °С;
- для АС ( $i=3$ )  $n_k = 1$ ,  $\Delta T = 0$  °С.

Исходные температурные зависимости  $K_{1C}$  принимают по данным, приведенным в соответствующих аттестационных отчетах по материалам (основной металл, сварные соединения).

Критическую температуру хрупкости материала определяют по формуле:

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F,$$

где  $T_{k0}$  – критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии;  $\Delta T_T$  – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения;  $\Delta T_N$  – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие циклической повреждаемости;  $\Delta T_F$  – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения.

Значения  $T_{k0}$ ,  $\Delta T_T$ ,  $\Delta T_N$ ,  $\Delta T_F$  или коэффициента радиационно-охрупчивания  $A_F$  принимают по данным соответствующих аттестационных отчетов по материалам (основной металл и сварные соединения), данным ТУ на материалы или на основе технических решений, согласованных с Госатомэнергонадзором.

Допускается определять значение  $\Delta T_N$  по формуле:

$$\Delta T_N = 20 \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{[N_i]},$$

где  $N_i$  – число циклов нагружения при  $i$ -м режиме эксплуатации;  
 $[N_i]$  – допускаемое число циклов для  $i$ -го режима эксплуатации;  
 $m$  – число режимов.

Допускается определять значение  $\Delta T_F$  по формуле:

$$\Delta T_F = A_F \left( \frac{F}{F_0} \right)^{1/3},$$

где  $F$  – флюенс нейтронов с  $E \geq 0,5$  МэВ нейтр./м<sup>2</sup>;  $F_0$  –  $10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

Формула справедлива при

$$10^{22} \leq F \leq 3 \cdot 10^{24} \text{ нейтр./м}^2.$$

## Образцы и оборудование для испытания

### Образцы

Для определения критической температуры хрупкости  $T_K$  ( $T_{K0}$  – для материала в исходном состоянии) проводят испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454–78 образцов 11 типа с V-образным надрезом в выбранном интервале температур. При каждой температуре должно испытываться не менее трех образцов. Аппаратура для проведения испытаний и правила проведения испытаний должны соответствовать ГОСТ 9454–78.

### Маятниковые копры

Маятниковые копры с переменной или постоянной максимальной энергией удара должны соответствовать ГОСТ 10708–76. Максимальная энергия удара маятника должна быть такой, чтобы значение «работа разрушения образца при ударе» составляло не менее 10 % и не более 80 % от максимальной энергии удара применяемого маятника.

## Проведение испытаний при пониженных температурах

Охлаждение образцов осуществляется с помощью жидкого азота (температура кипения  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) или смесью жидкого азота или сухого льда с незамерзающей при температуре испытания и нетоксичной жидкостью, например этиловым спиртом, ацетоном (температура замерзания  $-100$  и  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно). В температурном интервале от  $-90^{\circ}$  до  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  охлаждение образцов осуществляется парами жидкого азота. Температура образца устанавливается с помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце и помещаемой в криостат с партией образцов, предназначенных для испытания. Градуировка термопары контрольного образца осуществляется с помощью термометра с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Образцы для испытаний при пониженных температурах следует несколько переохладить и убедиться в стабилизации температуры. В табл. 12.1 приведены значения температуры переохладения образца в зависимости от температуры испытания. После извлечения из криостата в течение 3–5 с образец должен быть помещен на опоры копра и испытан.

Таблица 12.1

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	
	переохлаждения	перегрева
От $-60$ и ниже	4–6	–
$-60$ до $-40$	3–4	–
$-40$ до $+10$	2–3	–
$+30$ до $+200$	–	3–5
$+200$ до $+400$	–	5–10
$+400$ до $+500$	–	10–15

## Проведение испытания при повышенных температурах

Партия образцов с контрольным образцом, в котором зачеканена термопара, помещается в печь и нагревается до заданного уровня температуры с перегревом по отношению к температуре испы-

тания. Необходимо убедиться в стабилизации температуры. Температуру образца устанавливают с помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце. В табл. 12.1 указаны температуры перегрева образца в зависимости от температуры его испытания. Образец после извлечения из печи в течение 3–5 с должен быть помещен на опоры копра и испытан.

## **Порядок выполнения работы**

### **Выбор температурного интервала испытаний**

Температурный интервал испытаний должен быть таким, чтобы в него входили точки  $(T_k \pm 10)$ ,  $(T_k \pm 20)$ ,  $(T_k \pm 30)$  °С. Если ориентировочное значение критической температуры хрупкости  $T_{к1}$  заранее известно, допускается проводить испытания в интервале температур  $T_{к1} - 10 < T < (T_{к1} + 40)$  °С. В случае если ориентировочное значение  $T_{к1}$  заранее неизвестно, рекомендуется определить значение ударной вязкости при 20 °С (комнатной температуре) и в зависимости от полученного при этой температуре результата определить интервал дальнейших температурных испытаний. При полностью вязком изломе и высоких значениях ударной вязкости предварительного образца дальнейшие испытания следует проводить при пониженных температурах; при полностью хрупком изломе и низких значениях ударной вязкости – при повышенных температурах; при вязкохрупком изломе – расширить температурную область испытаний как в области отрицательных, так и положительных температур.

### **Обработка результатов испытаний**

Для каждого из испытанных образцов определить ударную вязкость, вязкую составляющую в изломе и поперечное расширение образца.

Ударную вязкость  $KCV$  определить как отношение работы разрушения образца к площади нетто-сечения в зоне надреза:

$$KCV = \frac{K}{S_0},$$

где  $K$  – работа удара;  $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения в месте концентратора,  $\text{м}^2$  ( $\text{см}^2$ ).

Значения вязкой составляющей в изломе  $B$  определить согласно ГОСТ 4543–71 планиметрированием площади хрупкой фазы в изломе:

$$B = \frac{S_0 - S_x}{S_0} \cdot 100 \%,$$

где  $S_x$  – площадь хрупкой фазы в изломе,  $\text{м}^2$  ( $\text{см}^2$ ).

Поперечное расширение  $\Delta b$  ударного образца представляет собой остаточную (пластическую) деформацию на грани, противоположной надрезу и измеренную в направлении надреза, как показано на рис. 12.1. Поперечное расширение  $\Delta b$  определяют по формуле:

$$\Delta b = b_1 - b_0 = \Delta_1 - \Delta_2.$$

Поперечное расширение определяют на половинках образцов, разрушившихся после испытания на ударный изгиб. Измерение поперечного расширения произвести с помощью микрометра с погрешностью  $\pm 0,01$  мм.

Построить графики температурных зависимостей ударной вязкости, вязкой составляющей в изломе и поперечного расширения образца, предварительно нанеся все экспериментальные результаты на график. Полученные графики (кривые) являются исходной информацией для определения критической температуры хрупкости материала.

В качестве критической температуры хрупкости  $T_k$  принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

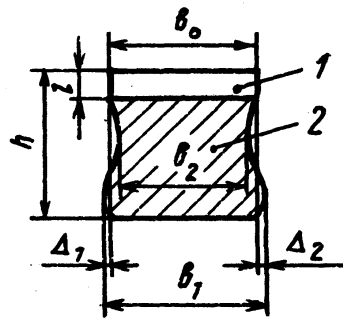


Рис. 12.1. Схема излома образца:

1 – зона надреза; 2 – зона излома;  $b_0$  – ширина образца;  $l$  – глубина надреза;  $h$  – высота образца



1) при температуре  $T_k$  среднее арифметическое значение ударной вязкости (по результатам испытания трех образцов при каждой температуре) должно быть не ниже значений, указанных в табл. 12.2, а минимальные значения ударной вязкости – не ниже 70 % значений, указанных в табл. 12.2;

2) при температуре  $(T_k + 30)$  °С среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже значений, указанных в табл. 12.3, минимальные значения ударной вязкости – не ниже 70 %, указанных в табл. 12.3, минимальное значение вязкой составляющей в изломе – не ниже 50 %.

Таблица 12.2.

Предел текучести материала при 20 °С, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Ударная вязкость $KCV$ , Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
До 304 (31) включительно	29 (3,0)
Свыше 304 (31) до 402 (41) включительно	39 (4,0)
Свыше 402 (41) до 549 (56) включительно	49 (5,0)
Свыше 549 (56) до 687 (70) включительно	59 (6,0)

Таблица 12.3.

Предел текучести материала при 20 °С, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Ударная вязкость $KCV$ , Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
До 304 (31) включительно	44 (4,5)
Свыше 304 (31) до 402 (41) включительно	59 (6,0)
Свыше 402 (41) до 549 (56) включительно	74 (7,5)
Свыше 549 (56) до 687 (70) включительно	89 (9,0)

Если на одном из испытанных образцов не будет удовлетворяться какое-либо из условий, указанных в пп. 1 и 2, допускается проведение испытаний еще трех образцов. При этом при определении соответствия полученных результатов требованиям пп. 1 и 2 используют показания пяти образцов за исключением образца, для которого при первом испытании были получены неудовлетворительные результаты.

Если при дополнительных испытаниях хотя бы на одном образце будут получены неудовлетворительные показатели, то за критическую температуру  $T_k$  принимают ближайшую более высокую температуру, при которой результаты испытания удовлетворяют требованиям пп. 1 и 2.

При обнаружении дефектов в виде раковин, расслоений и т.п. в изломе образца допускается результаты его испытаний исключить из рассмотрения и испытать новый образец.

### **Порядок определения критической температуры хрупкости материала**

1. По известному значению предела текучести материала при температуре 20 °С выбрать по табл. 12.2 и 12.3 соответствующие критериальные значения ударной вязкости  $(KCV)_1$  и  $(KCV)_2$ .

При определении  $(KCV)_1$  и  $(KCV)_2$  для зоны сплавления или околошовной зоны сварного соединения использовать предел текучести основного металла. В качестве значения предела текучести исследуемого материала принимается среднее значение, если для его определения использовалось не менее трех образцов, и максимальное значение, если для его определения использовалось два образца.

2. На графике «ударная вязкость – температура» на оси ординат (ось  $KCV$ ) отложить значение  $(KCV)_1$ . Через полученную точку провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принять за температуру  $T_1^1$ .

3. На графике «ударная вязкость – температура» на оси ординат отложить значение  $(KCV)_2$ . Через полученную точку провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принять за температуру  $T_2^1$ .

4. На графике «вязкая составляющая в изломе – температура» на оси ординат отложить значение  $B = 50 \%$ . Через полученную точку провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой «вязкая составляющая в изломе – температура», построенной по минимальным значениям вязкой составляющей. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принять за температуру  $T_2^{\text{II}}$ .

5. Большую из двух температур  $T_2^{\text{I}}$  и  $T_2^{\text{II}}$  обозначить  $T_2$ .

6. Если разность между температурами  $T_2$  и  $T_1$  оказывается менее  $30^\circ\text{C}$ , то температуру  $T_1$  принять в качестве ориентировочного значения критической температуры хрупкости  $T_{\text{к}}^{\text{I}}$ .

7. Если условие п. 6 не выполняется, то определить  $T_{\text{к}}^{\text{I}}$  по формуле:

$$T_{\text{к}}^{\text{I}} = T_2 - 30^\circ\text{C}.$$

8. Провести дополнительные испытания ударных образцов при температурах  $T_{\text{к}}^{\text{I}} \pm 10$ ,  $T_{\text{к}}^{\text{I}} \pm 20$ ,  $T_{\text{к}}^{\text{I}} \pm 30$ ,  $T_{\text{к}}^{\text{I}} \pm 40^\circ\text{C}$ , уточнить кривые ударной вязкости, вязкой составляющей в изломе и в соответствии с указаниями пп. 2–7 окончательно установить значение критической температуры хрупкости (если ранее уже были определены значения  $KCV$  и  $B$  при температурах, указанных в данном пункте, проведение дополнительных испытаний при этих температурах не требуется).

9. Если при выполнении требований пп. 2–4 линии, проведенные параллельно оси абсцисс, пересекают соответствующие кривые в двух и более точках, то температуры  $T_1$ ,  $T_2^{\text{I}}$  и  $T_2^{\text{II}}$  следует определять по правым крайним точкам пересечения.

### **Подтверждение критической температуры хрупкости**

В тех случаях, когда гарантированное значение  $T_{\text{к}}$  указано в нормативно-технической документации на материал, возможно проведение испытаний по подтверждению критической температуры хрупкости. При подтверждении критической температуры

хрупкости испытания проводятся с соблюдением требований настоящей методики в такой последовательности:

- провести испытание при гарантированной температуре  $T_k$  и температуре  $(T_k + 30)$ ;

- проверить выполнение условий п. 1 из раздела «Обработка результатов испытаний» при температуре  $T_k$  и п. 2 из раздела «Обработка результатов испытаний» при температуре  $(T_k + 30)$  °С. Если условие пп. 1 и 2 выполняются, то критическая температура хрупкости считается подтвержденной. Если требования пп. 1 и 2 одновременно выполняются при температуре  $T_k$ , то испытание при температуре  $(T_k + 30)$  допускается не проводить.

Если требования пп. 1 и 2 из раздела «Обработка результатов испытаний» при температурах  $T_k$  и  $(T_k + 30)$  °С не удовлетворяются, то критическая температура хрупкости считается неподтвержденной.

### **Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- марку испытываемого материала и его механические свойства;
- характеристику испытываемого образца;
- протокол испытаний;
- графики « $KCV-T$ », « $B-T$ », « $\Delta b-T$ »;
- значение критической температуры хрупкости материала и его обоснование.

### **Контрольные вопросы**

Что называется критическое температурой хрупкости?

По каким критериям определяется критическая температура?

От каких факторов зависит критическая температура?

## Список рекомендуемой литературы

1. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.
2. ПиНАЭГ-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
3. Астахов М.М., Гольцев В.Ю., Логинов А.В., Лошманов Л.П. Лабораторный практикум «Методы механических испытаний. Динамические испытания металлов». М.: МИФИ, 1989.

Гольцев Владимир Юрьевич

Пирогов Евгений Николаевич

**Методы механических испытаний  
и механические свойства материалов**

Лабораторный практикум

Редактор *Н.В. Шумакова*

Оригинал-макет изготовлен *С.В. Тялиной*

Подписано в печать Формат 60×84 1/16

Печ. л. 10,0 Уч.-изд. л. 10,0 Тираж экз.

Изд. №3/68 Заказ №

---

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет) 115409, Москва, Каширское ш., 31  
Типография «Тривант», г. Троицк, Московской обл.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК