

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

Кафедра материаловедения и физики металлов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Лабораторный практикум по дисциплине
«Физические основы процессов обработки металлов давлением»**



Уфа 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра материаловедения и физики металлов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Лабораторный практикум по дисциплине
«Физические основы процессов обработки металлов давлением»

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ

Уфа 2021

Авторы-составители: В. З. Бикбулатова, Э. Ф. Хайретдинов, Ф. Ф. Сафин

Физические основы пластической деформации : лабораторный практикум по дисциплине «Физические основы процессов обработки металлов давлением» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т ; [авт.-сост. : В. З. Бикбулатова, Э. Ф. Хайретдинов, Ф. Ф. Сафин]. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-171.pdf

Цель лабораторного практикума – получение практических навыков и закрепление теоретических знаний законов пластической деформации при обработке металлов давлением.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение, профиль «Машины и технология обработки металлов давлением».

Рецензент доцент кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий А. Ю. Медведев

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы-составители: *Бикбулатова Винера Закуановна,
Хайретдинов Эрнст Фасхейевич,
Сафин Фидус Файзханович*

Редактирование и верстка: *Л. А. Вяземская*
Программирование и компьютерный дизайн: *О. М. Толкачёва*

Подписано к использованию: 20.08.2021
Объем: 2,23 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.
Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: rik@ugatu.su

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

Введение

Механика пластической деформации рассматривает условия, при которых обеспечивается наибольшее формоизменение металла, вопросы распределения напряжения, анализируются условия перехода тела в пластическое состояние.

Для установления режимов обработки необходимо знать механические свойства металла. Испытания на растяжение, при которых определяются наиболее важные свойства материала, являются основными среди других видов испытаний. Определяемые при этом характеристики используются как минимум в трех случаях. Во-первых, для выполнения расчетов на прочность при проектировании изделий; во-вторых, для оценки качества конструкционных материалов и степени их соответствия нормативно-технической документации; в-третьих, результаты испытаний на растяжение используют и в исследовательской практике, например при разработке технологий получения сплава и различного рода обработок полуфабрикатов, при изучении влияния строения и структуры сплава на его механические свойства и др.

Методы испытаний на растяжение и сжатие стандартизованы. ГОСТ1497–84 распространяется на проведение испытаний на растяжение при комнатной температуре, ГОСТ 9651–84 – при повышенной. ГОСТ25.503-97 распространяется на проведение испытаний на сжатие при комнатной температуре. В стандартах даны определения механических характеристик, приведены типы образцов, изложены требования к испытательному оборудованию, описана методика проведения испытаний и обработки результатов эксперимента.

Истинные напряжения при деформировании растяжением и сжатием представляют собой напряжения течения и определяют сопротивление металла деформированию.

Конструкционная прочность металлов – комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации, зависит от целого ряда факторов (рис. 1.1).

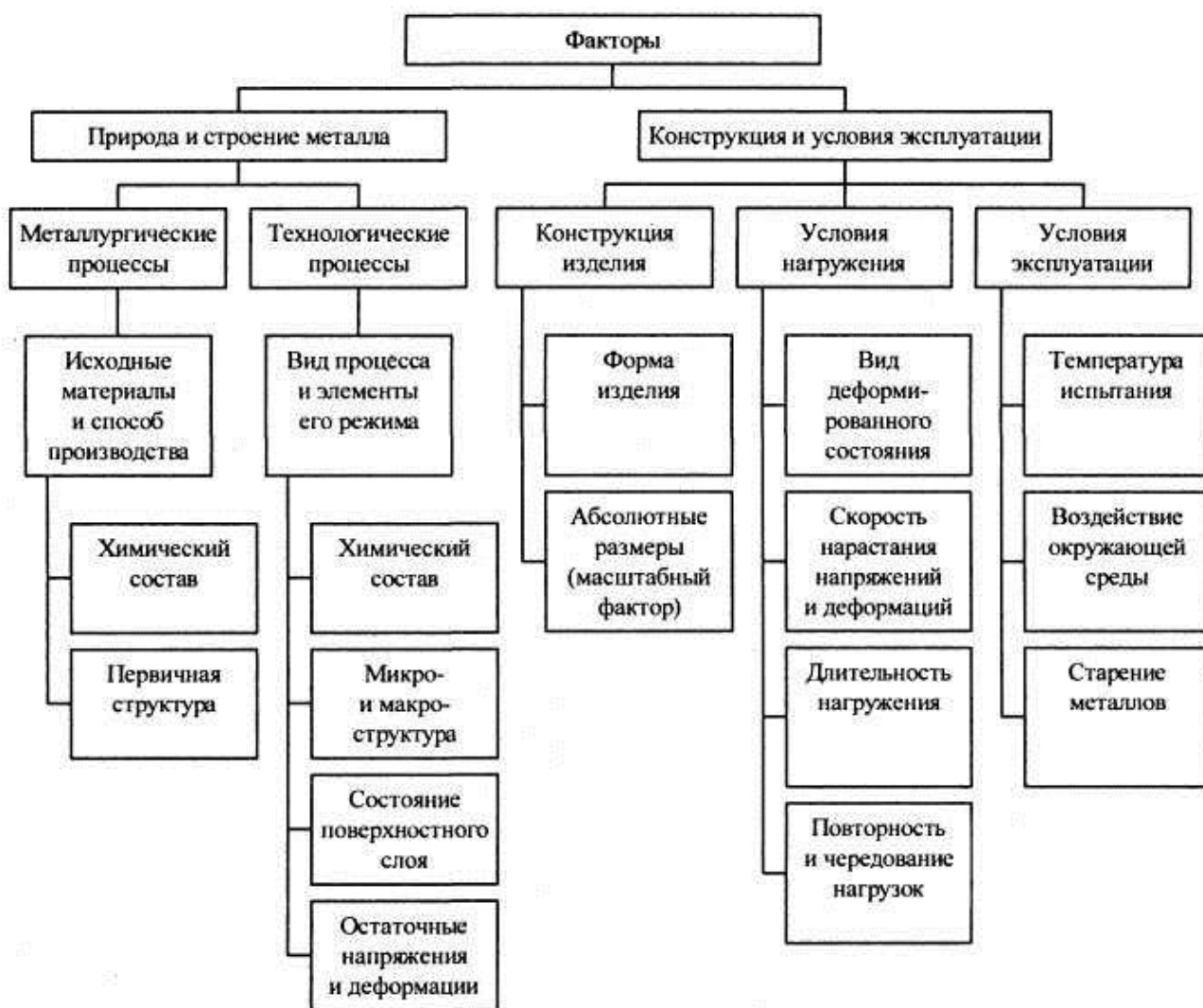


Рис. 1.1. Факторы, влияющие на конструкционную прочность материала

Так как при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность оценивают по пределу текучести. Свойства конструкционных сталей зависят от химического состава, термической и других видов обработки. Знание отдельных механизмов упрочнения позволяет провести количественную оценку предела текучести и изменения температуры вязкохрупкого перехода и сопоставить расчетные данные с экспериментальными. Этот расчет не является строгим и основан на ряде допущений и упрощений. Он позволяет оценить роль и вклад каждого механизма упрочнения в определении важнейшей характеристики конструкционной прочности этих сталей – предела текучести σ_T .

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

Перед началом выполнения каждой лабораторной работы:

- внимательно прослушайте вводный инструктаж преподавателя о порядке и особенностях выполнения лабораторных работ;
- внимательно изучите методические указания к работе, которую выполняете, и строго ими руководствуйтесь;
- подготовьте рабочее место для безопасной работы: уберите его, если на нем находятся посторонние предметы;
- проверьте и подготовьте к работе, согласно методическим указаниям, необходимые инструменты и принадлежности;
- о начале выполнения работы непосредственно на лабораторном оборудовании предупредите преподавателя или учебного мастера.

Во время работы:

- выполняйте только ту работу, которая разрешена вам преподавателем;
- за разъяснениями по всем вопросам выполнения лабораторных работ обращайтесь только к преподавателю или учебному мастеру;
- будьте внимательны и аккуратны;
- не отвлекайтесь сами и не отвлекайте других;
- не вмешивайтесь в работу других студентов;
- содержите в чистоте и порядке свое рабочее место;
- категорически запрещается касаться движущихся и токоведущих частей установки, изолированных электропроводов;
- категорически запрещается переналаживать и исправлять установку, если это не поручено преподавателем;
- внимательно следите за работой установки и регистрирующих приборов; в случае замеченных неисправностей отключите напряжение и сообщите преподавателю или учебному мастеру.

По окончании работы:

- наведите полный порядок на своем рабочем месте и сдайте его преподавателю или учебному мастеру;
- сдайте преподавателю или учебному мастеру учебную литературу и инструмент.

При выполнении работы строго запрещается:

- работать на всех видах установок, станках, стендах, не относящихся к выполняемой работе, и находиться вблизи них;
- бесцельно ходить по лаборатории;
- отвлекать других от работы разговорами;
- покидать помещение лаборатории во время занятия без разрешения преподавателя.

Лабораторная работа № 1

Построение диаграммы деформирования по диаграмме растяжения

1.1. Цели работы:

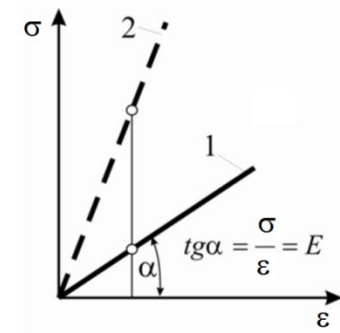
1. Приобретение практических навыков проведения испытаний металлов на растяжение;
2. Построение диаграммы деформирования;
3. Закрепление на практике изучаемого теоретического материала;
4. Анализ связи механических свойств, определенных по результатам различных испытаний, с составом и структурой металлических материалов.

1.2. Задачи:

1. Изучение методики испытания;
2. Подготовка образцов для испытания;
3. Проведение испытаний;
4. Выполнение обработки результатов эксперимента.

1.3. Теоретическая часть

1.3.1. Диаграмма растяжения. Вид диаграммы растяжения малоуглеродистой стали представлен на рис. 1.2. На диаграмме можно выделить несколько характерных участков, высота и длина которых зависят от свойств материала и размеров образца: OA – участок кривой, которому соответствует линейная зависимость между силой P и удлинением Δl . На этом участке справедлив закон Гука – $\sigma = \varepsilon E$ (пропорциональная зависимость между напряжением σ и относительной деформацией ε). Этот участок используют для определения упругой постоянной материала E [МПа] – модуля нормальной упругости (рис. 1.2) по формуле 1.1.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E. \quad (1.1)$$

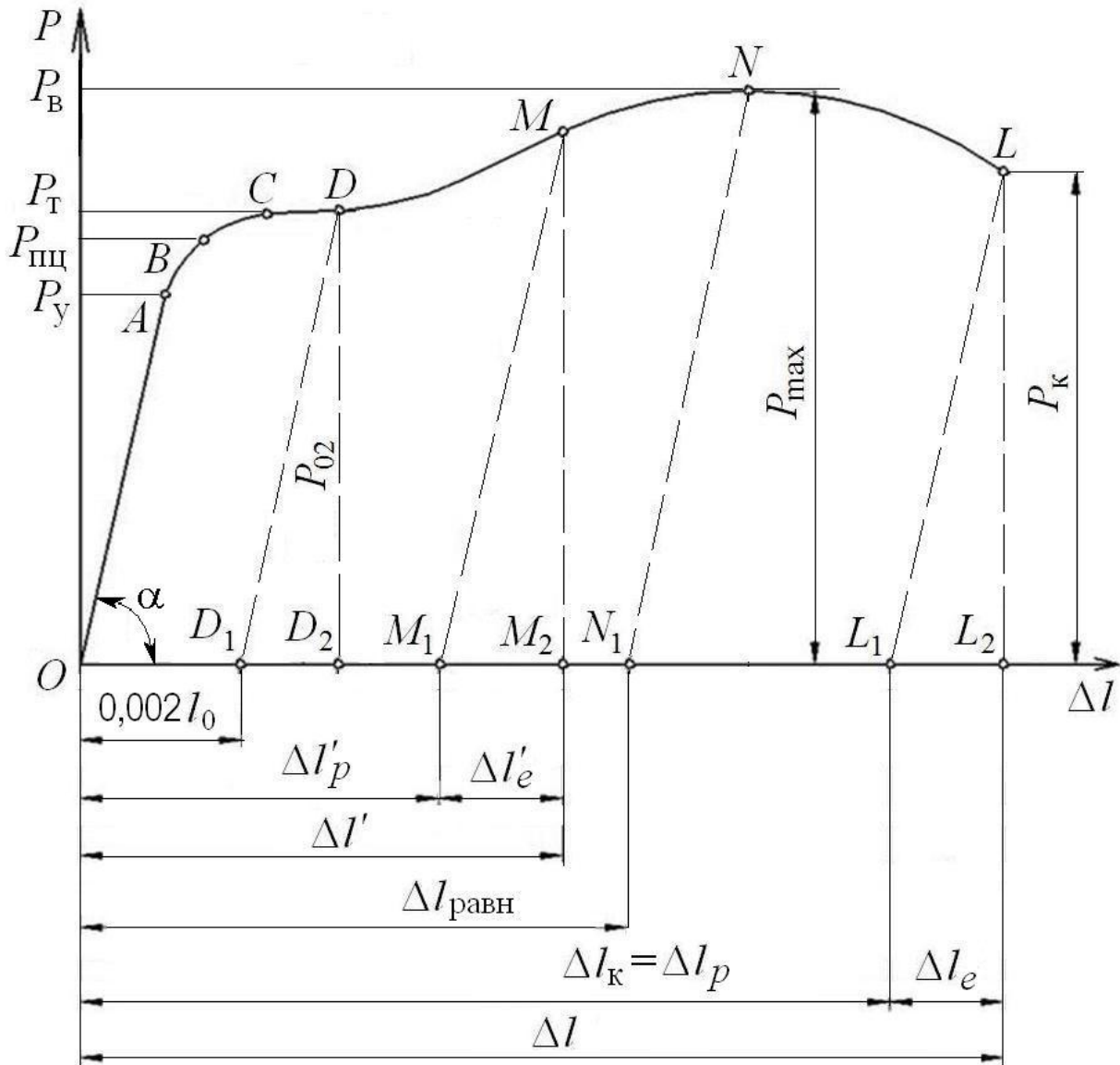


Рис. 1.2. Диаграмма растяжения

P_y – наибольшее значение силы, при котором образец при нагрузке не дает остаточной деформации. Этому значению на диаграмме соответствует точка A . Наибольшее напряжение,

до которого остаточная деформация при разгрузке не обнаруживается, называется пределом упругости и определяется по формуле

$$\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}. \quad (1.2)$$

После точки A при дальнейшем растяжении образца кривая растяжения становится криволинейной и плавно поднимается до точки C , где происходит переход к участку CD , называемому площадкой текучести. На этой стадии растяжения удлинение образца растет при постоянном значении растягивающей силы, обозначаемой P_T . Физический предел текучести вычисляется по формуле

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}. \quad (1.3)$$

Длина площадки текучести составляет $\varepsilon = 0,2 \div 2,5 \%$. Наличие площадки текучести характерно лишь для малоуглеродистых сталей, а также встречается у некоторых марок титановых сплавов и латуней. Иногда площадка начинается с «зуба текучести», тогда вводятся понятия о верхнем σ_T^B и нижнем σ_T^H пределах текучести.

Величина σ_T определяет область упругой деформации. Чем выше σ_T , тем выше сопротивление металла начальной пластической деформации. Поэтому конструкторы стремятся к получению материалов с максимальным значением предела текучести. Чем ниже σ_T , тем раньше начинается пластическая деформация. Оптимальная величина σ_T зависит от конкретных условий деформации, формы тела, характера нагружения и т. п.

Для сталей высокоуглеродистых, легированных, термически или механически обработанных, цветных металлов и сплавов площадка текучести не наблюдается (рис. 1.2, длина участка CD равна нулю, участок вырождается в точку). Участок упругих деформаций OA при испытании упомянутых материалов плавно переходит в участок упрочнения DN . Отсутствие площадки текучести затрудняет выявление предела текучести – характеристики чрезвычайно важной, поскольку она ограничивает несущую способность. Тогда на практике обращаются к такой важной характеристике, как условный предел текучести.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – условное напряжение, соответствующее остаточной (пластической) деформации $0,2 \%$ (рис. 1.2).

Начало пластической деформации соответствует наступлению некоторого критического состояния металла, которое может быть обнаружено не только по остаточным деформациям, но и по ряду других признаков. При пластической деформации повышается температура образца; у стали изменяется электропроводность и магнитные свойства; на полированной поверхности образцов, особенно плоских, заметно потускнение, являющееся результатом появления густой сетки линий, носящих название линий Чернова – Людерса. Они наклонены к оси образца приблизительно под углом 45° и представляют собой микроскопические неровности, возникающие вследствие сдвигов в тех плоскостях кристаллов, где действуют наибольшие касательные напряжения. В результате сдвигов по наклонным плоскостям образец получает остаточные деформации.

После стадии текучести материал вновь приобретает способность увеличивать сопротивление деформации и воспринимает возрастающую до некоторого предела силу. Этому отвечает восходящий участок DN (рис. 1.2) кривой растяжения, называемый *участком упрочнения*¹. При дальнейшем нагружении пластическая деформация, а вместе с ней и наклеп все более увеличиваются, равномерно распределяясь по всему объему образца.

На участке BN протекают два конкурирующих процесса: физическое упрочнение и геометрическое разупрочнение. Первое обусловлено изменениями, происходящими в тонкой структуре металла вследствие роста нагрузки; второе – вследствие уменьшения поперечного сечения по всей длине образца и снижения его несущей способности. В точке N наступает равновесие этих процессов. Точка N соответствует наибольшей силе $P_{\max} = P_B$, которую может воспринять образец.

После достижения максимального значения нагрузки P_{\max} в наиболее слабом месте появляется *местное утонение* образца – шейка², в которой в основном и протекает дальнейшее пластическое деформирование, а за ее пределами размеры поперечного сечения перестают изменяться (рис. 1.3, б). В это время между деформированными зернами, а иногда и внутри самих зерен могут зарождаться трещины. В связи с развитием шейки (участок NL), несмотря на продолжающееся упрочнение металла, нагрузка уменьшается от

¹ Упрочнение металла при деформировании называется наклепом.

² Габриэль Ламе (1795–1870) заметил (1826) образование шейки при испытании образца на растяжение и его нагрев при деформировании за пределом пропорциональности.

P_{\max} до P_k , и при нагрузке P_k происходит разрушение образца. При этом упругая деформация образца (Δl_e) исчезает, а пластическая (Δl_p) остается (рис. 1.2).

В точке L наступает разрыв образца.

Для металлов, не имеющих площадки текучести, предел текучести определяют условно как напряжение, при котором остаточная деформация составляет величину, установленную ГОСТом или техническими условиями. По ГОСТ 1497–84 величина остаточной деформации составляет 0,2 % от измеряемой длины образца.

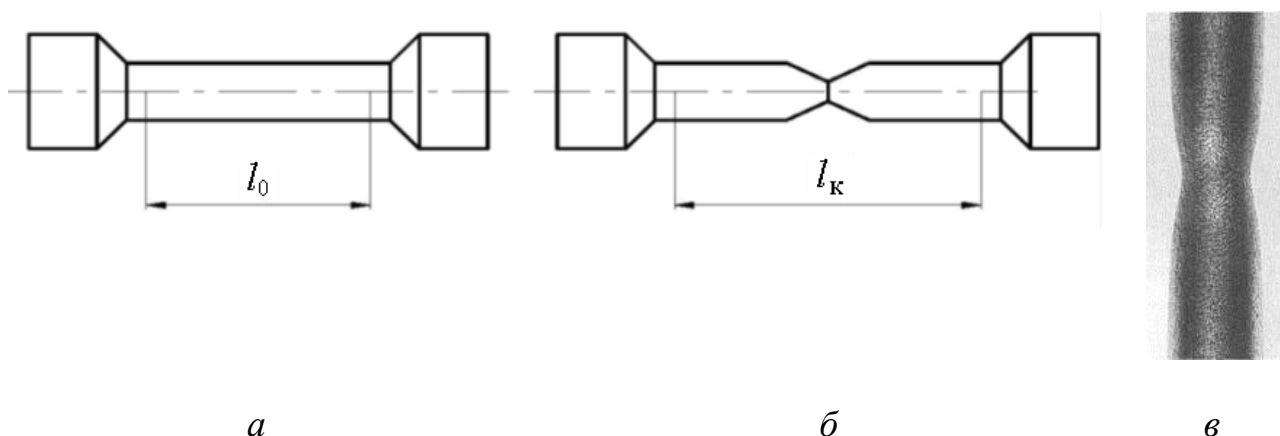


Рис. 1.3. Образцы стали:

a – до растяжения; $б$ – после разрыва;
 $в$ – образование «шейки» при растяжении цилиндрического образца
 (l_0 – начальная длина образца; l_k – конечная длина образца)

Деформация полная – сумма упругой и пластической составляющих

$$\Delta l = \Delta l_e + \Delta l_p; \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p. \quad (1.4)$$

Пример полной деформации – отрезок OM_2 на рис. 1.2.

Деформация упругая – деформация, исчезающая после снятия нагрузки. Пример упругой деформации – отрезок M_1M_2 на рис. 1.2. В обозначении присутствует подстрочный индекс e от слова *elastic* (англ.) – упругий.

Деформация пластическая (остаточная) – деформация, сохраняющаяся после снятия нагрузки. Обозначается с подстрочным индексом p от слова *plastic* (англ.) – пластический. Пример пластической деформации – отрезок OM_1 на рис. 1.2.

1.3.2. Механические характеристики. Механические характеристики, оценивающие прочность материала, называются характеристиками прочности; оценивающие пластические свойства – характеристиками пластичности.

Напряжения в технической системе вычисляются в кгс/мм²; в системе СИ – Н/м² = Па¹. Применяется кратная единица – мегапаскаль, 1 МПа = 10⁶ Па, 1 кгс/мм² = 9,807 МПа.

Характеристики прочности. К характеристикам прочности относятся:

- предел текучести физический $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$ [МПа] (1.3);
- предел текучести условный $\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$ [МПа];
- временное сопротивление $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}$ [МПа];
- предел упругости $\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}$ [МПа] (1.2).

1. Предел текучести физический σ_T – напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки. Вычисляется физический предел текучести по формуле (1.4) (см. рис. 1.2).

2. Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % расчетной длины образца.

3. Временное сопротивление² σ_B – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{max} , предшествующей разрыву образца.

Характеристики пластичности. К ним относятся:

- относительное удлинение после разрыва;
- относительное равномерное удлинение;
- относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

1. Относительное удлинение после разрыва δ – отношение приращения расчетной длины образца ($l_k - l_0$) после разрушения l_k к начальной расчетной длине l_0 , выраженное в процентах, вычисляют по формуле

¹1 кгс/мм² = 9,807 МПа.

²Введено в практику (1773) Семеном Кирилловичем Котельниковым (1723–1806) – академиком Петербургской академии наук, математиком, механиком.

$$\delta_k = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 \% \quad (1.5)$$

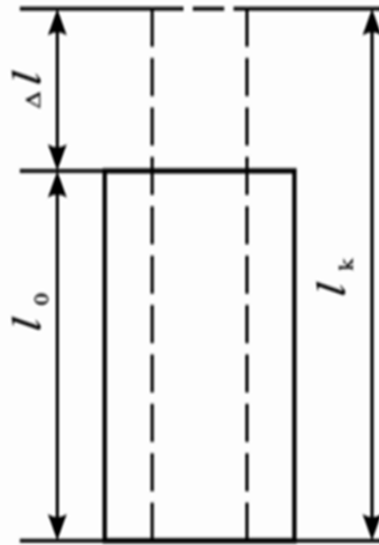


Рис. 1.4. Схема для определения абсолютного удлинения (Δl)

В табл. 1.1 должно быть указано, на какой расчетной длине определено относительное удлинение после разрыва δ . Например, при испытании цилиндрических образцов с пятикратной расчетной длиной относительное удлинение после разрыва обозначают δ_5 , а с десятикратной – δ_{10} .

2. Относительное равномерное удлинение δ – отношение приращения длины участка в рабочей части образца после разрыва, на котором определяется относительное равномерное удлинение, к длине до испытания, выраженное в процентах. В ГОСТе изложена методика определения этой характеристики.

3. Относительное сужение после разрыва ψ – отношение разности F_0 и минимальной F_k площади поперечного сечения после разрушения к начальной площади поперечного сечения образца F_0 , выраженное в процентах, вычисляют по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \% \quad (1.6)$$

где F_k для цилиндрических образцов вычисляют по результатам измерения диаметра d_k в шейке (см. рис. 1.4) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

1.3.3. Диаграммы напряжений

Диаграмма условных напряжений. Все механические характеристики, которыми оцениваются свойства материала, определяют по отношению к начальным размерам образца (площади F_0 , длине l_0) и не учитывают изменений размеров образца в процессе его деформирования – уменьшения площади и увеличения длины. В этом заключается их условность. Если перестроить машинную диаграмму $P-\Delta l$ в координаты «напряжение¹ σ – относительная деформация² ε » $\sigma = f(\varepsilon)$, то последняя в некотором масштабе повторит диаграмму (см. рис. 1.2).

Диаграмма истинных напряжений. В исследовательской практике используют истинную диаграмму растяжения, построенную в координатах

$$s - \psi \text{ или } s - e,$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения образца (1); s – истинное напряжение³ (интенсивность напряжений при растяжении) – отношение осевой растягивающей нагрузки P к текущей площади поперечного сечения рабочей части образца F (т. е. к изменяющейся площади) в любой момент испытания

$$s = \frac{P}{F} = \frac{P_i}{F_i} \text{ [МПа]}, \quad (1.7)$$

где F_i – истинная площадь поперечного сечения при каждом значении Δl , находится из условия постоянства (неизменности) объема металла при пластической деформации

$$F_0 l_0 = F(l_0 + \Delta l),$$
$$F = \frac{F_0 \cdot l_0}{l_0 + \Delta l}; \quad (1.8)$$

¹ $\sigma = \frac{P}{F_0}$ [МПа] – условное напряжение.

² Относительная деформация (удлинение) – отношение абсолютного удлинения Δl к первоначальной длине l : $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, где $\Delta l = l - l_0$ – абсолютное удлинение (приращение

начальной расчетной длины образца в любой момент испытания).

³ При одноосном растяжении истинное напряжение равно интенсивности напряжений

$$\sigma_{\text{и}} = \sigma_i = \frac{P_i}{F_i}.$$

e – истинная (логарифмическая) деформация, определяется по формуле

$$e = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{F_0}{F_i} = \ln \left(\frac{1}{1 - \psi} \right), \quad (1.9)$$

где l_i – текущая длина образца. При одноосном растяжении истинная деформация равна интенсивности деформаций

$$e = \ln \frac{l_i}{l_0} = e^e + e^p = \ln \frac{l}{l_0 + \Delta l^p} + \ln \frac{l_0 + \Delta l^p}{l_0}.$$

Рассмотрим рис. 1.5. До достижения нагрузкой своего максимального значения P_{\max} (напряжение σ_B) образец пластически деформируется равномерно (сечение m): истинное напряжение s_m постоянно во всех сечениях, диаметр $d_m < d_0$ и одинаков по всей расчетной длине образца.

На участке сосредоточенной деформации в шейке (сечение n) минимальный диаметр образца значительно меньше начального $d_n \ll d_0$. Истинные напряжения распределяются не равномерно по длине образца, как на участке упрочнения, а становятся значительно больше условных $s_n \gg \sigma_n$. В момент разрушения превышение s_k над σ_B может достигать 30–50 %.

Истинная диаграмма более информативна, т. к. имеет больший физический смысл, чем условные. Их используют в существующих и вновь создаваемых методиках расчета при сложном напряженном состоянии.

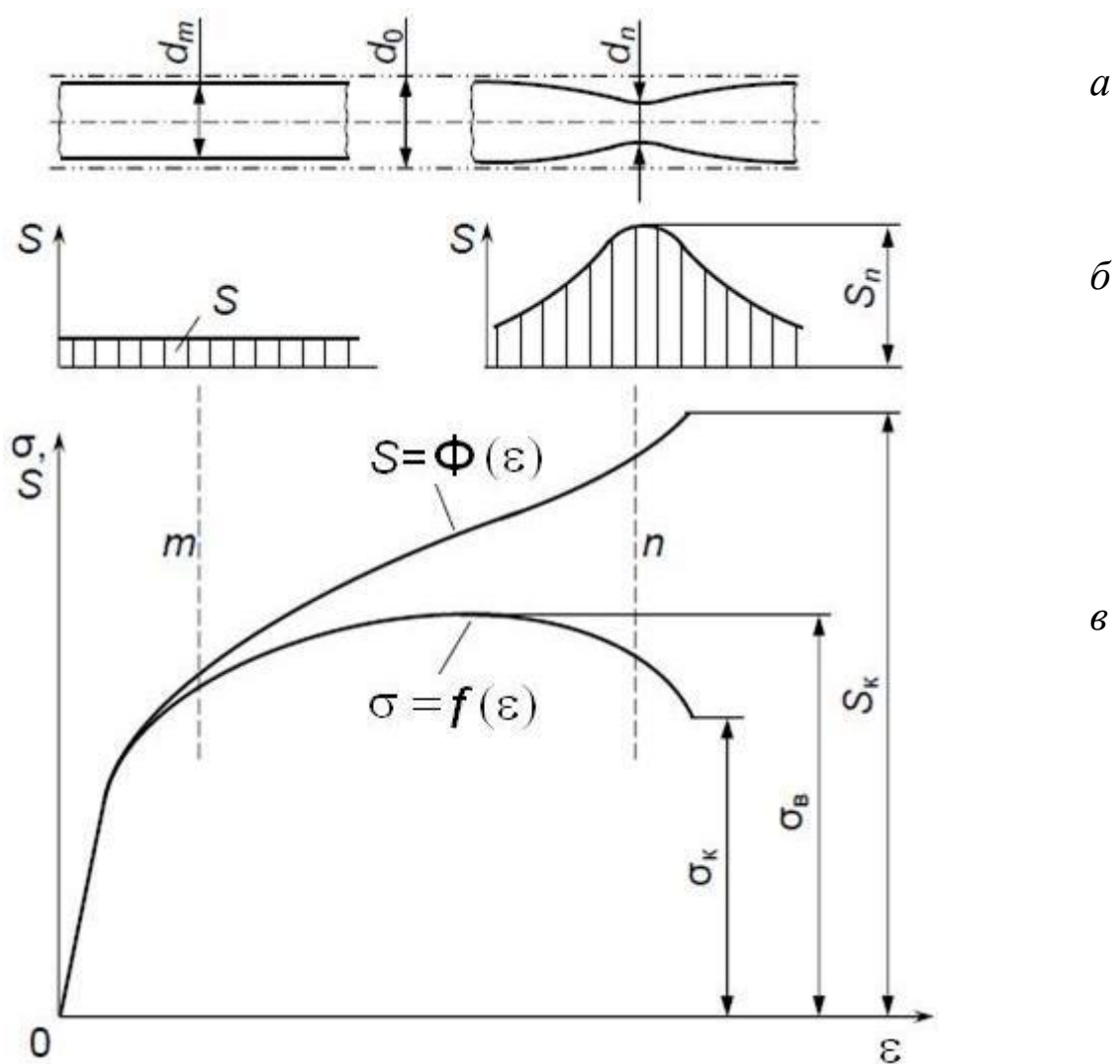


Рис. 1.5. Изменение конфигурации образца на различных стадиях деформирования (а); распределение истинных напряжений по длине образца при равномерном (m) и сосредоточенном (n) деформировании (б); диаграммы истинных $s = \Phi(\epsilon)$ и условных $\sigma = f(\epsilon)$ напряжений (в)

Диаграмма деформирования. Важное значение в теории ОМД имеет диаграмма деформирования – зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ϵ_i – $s = \Phi(\epsilon)$. Эта зависимость входит в определяющие соотношения краевой задачи технологической пластичности для расчета напряженно-деформированного состояния заготовки в конкретных технологических операциях штамповки. Например, определяющие соотношения теории малых упруго-пластических деформаций имеют вид

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} (\sigma_x - \sigma_0); \varepsilon_y = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} (\sigma_y - \sigma_0); \varepsilon_z = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} (\sigma_z - \sigma_0); \\ \gamma_{xy} = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} \tau_{xy}; \gamma_{yz} = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} \tau_{yz}; \gamma_{zx} = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} \tau_{zx}, \end{cases} \quad (1.10)$$

где $\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ и отношение $\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}$ определяется по диаграмме деформирования $\sigma_i(\varepsilon_i)$.

Действительная диаграмма деформирования – это истинная диаграмма растяжения, в которой исключен участок упругой деформации и у которой истинные напряжения и деформации заменены на σ_i и ε_i . При расчетах технологических операций и процессов ОМД упругими деформациями, ввиду их малости по сравнению с пластическими, пренебрегают, т. е. рассматривают модель жестко-пластического тела, когда предел текучести соответствует $\varepsilon_i = 0$.

1.3.4. Показатель деформационного упрочнения. Показатель деформационного упрочнения наиболее значим при холодной пластической деформации.

Пластическое деформирование выше P_y идет по возрастающей нагрузке, т. к. металл в процессе деформирования упрочняется. Упрочнение металла при деформировании называется наклепом.

Наклеп металла увеличивается до момента разрыва образца, хотя растягивающая нагрузка при этом уменьшается от P_{\max} до P_k . Это объясняется появлением в образце местного утонения – шейки, в которой сосредотачивается пластическая деформация. Несмотря на уменьшение нагрузки, растягивающие напряжения повышаются до тех пор, пока образец не разорвется.

Показатель деформационного упрочнения n характеризует способность металлов к упрочнению в процессе пластической деформации. Его величина при растяжении численно равна максимальному равномерному удлинению ε_p :

$$n = \varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_b}, \quad (1.11)$$

где d_0 – диаметр образца до испытания (рис. 1.9); d_b – диаметр образца в момент максимальной нагрузки (соответствует диаметру образца в точке N , рис. 1.2).

Показатель деформационного упрочнения зависит от химического состава стали, вида термической обработки, вида испытаний, скорости деформации.

1.3.5. Схематизированные кривые деформирования.

При испытаниях при комнатной температуре со скоростями деформации $2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ в диапазоне логарифмических степеней деформации 0,1–1,25 кривые упрочнения не упрочненных пластической деформацией в холодном состоянии сталей и цветных металлов аппроксимируются уравнением

$$\sigma_s = m\varepsilon^n, \quad (1.12)$$

где m – напряжение течения при $\varepsilon = 1,0$; n – показатель деформационного упрочнения.

1.3.6. Напряженное состояние образца в шейке. Моменту начала образования шейки соответствует максимальная сила растяжения образца P_{\max} . После образования шейки удлиняется только область шейки и, соответственно, уменьшается диаметр, а вне шейки диаметр образца не меняется, он равен d_ϕ – диаметру образца в момент образования шейки (рис. 1.6).

В зоне шейки объемное (осесимметричное) напряженное состояние. Напряжения в наименьшем поперечном сечении (в любой точке) можно определить по формулам

$$\sigma_\rho = \sigma_\theta = \frac{r}{2R} \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right) \cdot \sigma_i; \quad (1.13)$$

$$\sigma_z = \left(1 + \frac{r}{2R} - \frac{\rho^2}{2r \cdot R} \right) \cdot \sigma_i,$$

где σ_ρ , σ_θ , σ_z – радиальное, тангенциальное и осевое напряжение соответственно; r – радиус образца в зоне шейки; наименьшего сечения шейки; ρ – текущее значение радиуса (радиус рассматриваемой точки поперечного сечения шейки – точка C);

R – радиус кривизны контура (продольного сечения) образца в зоне шейки; $\sigma_i = \frac{P}{\pi r^2} \left(1 + \frac{r}{4R}\right)$ или $\sigma_i = \sigma_1 - \sigma_2$.

Величины r и R измеряются непосредственно на разорванном образце.

Напряжения по сечению шейки распределяются неравномерно. На оси образца возникает объемное напряженное состояние (схема трехосного растяжения), и начинается распространение микро-трещины.

Максимальные напряжения возникают при $\rho = 0$, поэтому разрушение образца (это подтверждено экспериментально рентгеновским просвечиванием) наступает в осевой части шейки.

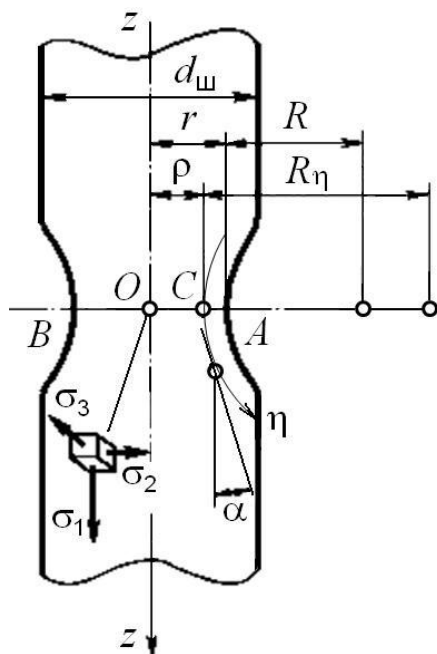


Рис. 1.6. Геометрия шейки при растяжении: η – линия действия напряжения σ_1 в т. С; R_η – радиус кривизны линии η в т. С

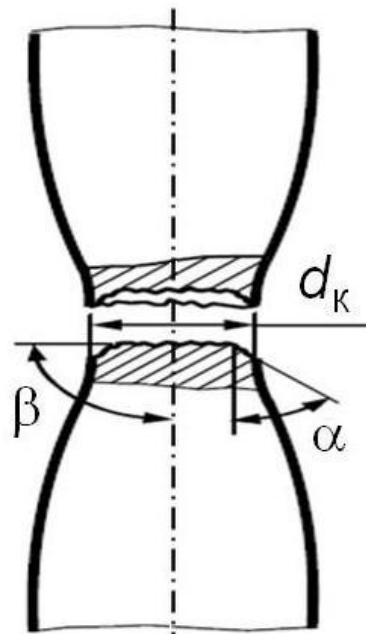


Рис. 1.7. Пластичный характер разрушения с образованием шейки и разрывом типа «конус – чашка». В центре разрушение развивалось путем отрыва (угол β близок к прямому), на периферии – путем сдвига (угол α близок к 45°)

1.4. Лабораторное оборудование

1.4.1. Испытательная машина. Испытания проводят на разрывной машине¹ 1231У-10 с механическим приводом и электронным силоизмерителем. Машина предназначена для статических испытаний металлических образцов на растяжение, сжатие, изгиб, малоцикловое растяжение, сжатие, ползучесть и релаксацию в широком диапазоне испытательных нагрузок, скоростей деформирования и температур (рис. 1.8).

Машина содержит:

- 1) высокочувствительный тензорезисторный силоизмеритель;
- 2) электропечь ПР-1200-4М (поз. 4) для нагревания образцов до температуры 1200 °С (печь содержит трехсекционный нагреватель, установленный на поворотном кронштейне, закрепленном на левой стойке);
- 3) компьютер с программой записи диаграммы растяжения.

Основные элементы испытательной машины (рис. 1.8) следующие: станина 1, боковые стойки 3, нижняя траверса, верхняя траверса 5, подвижная траверса 4, ходовые винты с защитными чехлами 4, электродвигатель, редуктор в станине, сменные устройства для крепления образца и переходные тяги 7, 8, охлаждающее устройство 10, сменные силоизмерительные датчики 6, ограничитель хода траверсы. Машина оснащена электронной аппаратурой для измерения силы и перемещений, регистрирующей аппаратурой для записи диаграмм $P - l$.

Принцип работы испытательной машины: подвижная траверса 4 с закрепленным на ней активным захватом 8, перемещаясь вниз, создает в образце 11 силу растяжения P , которая передается через пассивный захват 7 силоизмерителю 6. Нагрузка фиксируется на компьютере. На экране монитора компьютера вычерчивается диаграмма растяжения. На станине 1 крепятся электропривод испытательной машины, соединенный с нагружающими винтами, точные гайки которых закреплены в подвижной траверсе, и перечисленные выше узлы и органы управления. В верхней траверсе находится датчик силы, несущий верхний захват для испытуемого образца. Нижний захват закреплен на подвижной траверсе.

¹В России первая машина для испытаний на растяжение была построена в 1824 г. по инициативе Г. Ламе на Петербургском механическом заводе. Первые машины рычажного типа были построены Р. Реомюром (1720) и П. Мушенброком (1729).

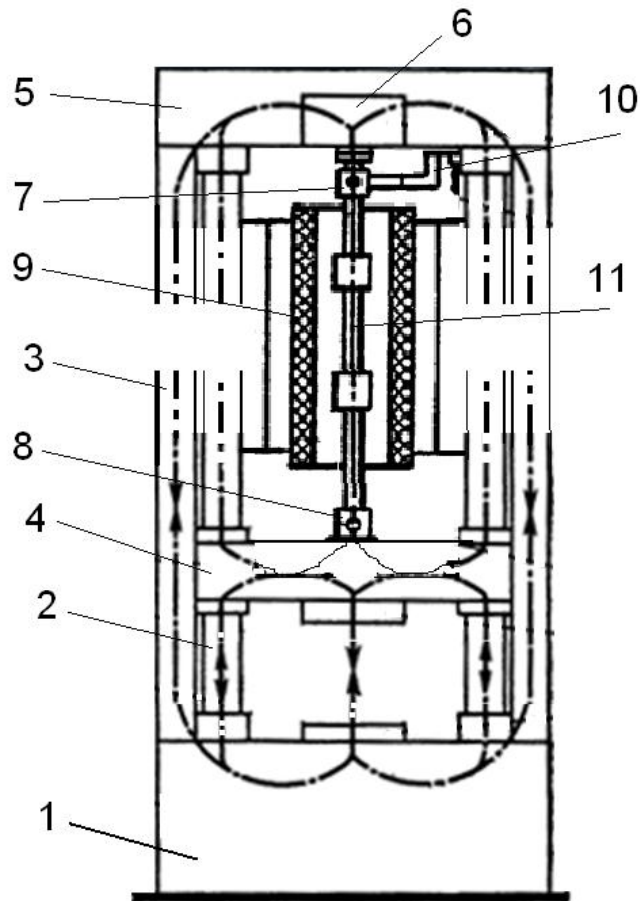


Рис. 1.8. Схема универсальной испытательной машины 1231У-10 с механическим приводом:

1 – станина; 2 – нагружающие винты; 3 – стойки; 4 – подвижная траверса; 5 – верхняя траверса; 6 – датчик силы; 7, 8 – захваты испытательной машины; 9 – электрическая печь; 10 – шланги; 11 – образец

1.4.2. Измерительные приборы

1. Штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм;
2. Микрометр с ценой деления 0,01 мм;
3. Инструментальный микроскоп.

1.5. Меры безопасности

1. Ознакомьтесь с работой испытательной машины и размещением органов управления.
2. Помните, что машина подключена к сети с напряжением 380 вольт, поэтому не следует без необходимости касаться ее металлических частей.

3. Испытательную машину включайте только после получения разрешения преподавателя и в его присутствии.

1.6. Задание

Подготовить три круглых укороченных образца с расчетной длиной $l_0 = 5,65\sqrt{F} = 5d_0$ (рис. 1.9) для испытания на растяжение, изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84¹, где

l – **рабочая длина образца** (часть образца с постоянной площадью поперечного сечения между его головками или участками для захвата);

l_0 – **начальная расчетная длина образца** (участок рабочей длины образца между нанесенными метками до испытания, на котором определяется удлинение);

l_k – **конечная расчетная длина образца** (длина расчетной части после разрыва образца);

d_0 – **начальный диаметр образца** (диаметр рабочей части цилиндрического образца до испытания);

d_k – **диаметр образца после разрыва** (минимальный диаметр рабочей части цилиндрического образца после разрыва);

F_0 – **начальная площадь поперечного сечения образца** (площадь поперечного сечения рабочей части образца до испытания);

F_k – **площадь поперечного сечения образца после разрыва** (минимальная площадь поперечного сечения рабочей части образца после разрыва).

Форма и размеры головок образцов определяются в основном конструкцией зажимных приспособлений, применяемых испытательных машин. Поскольку на результаты испытаний оказывает влияние состояние поверхности образца, ГОСТ 1497–84 накладывает ограничения на режимы механической обработки, шероховатость поверхности (рис. 1.9).

¹В цилиндрических образцах должно быть выдержано соотношение между расчетной длиной образца l_0 и его диаметром до испытаний d_0 : у длинных образцов $l_0 = 10d_0$ или $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$, у коротких – $l_0 = 5d_0$ или $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$. Применение коротких образцов предпочтительнее.

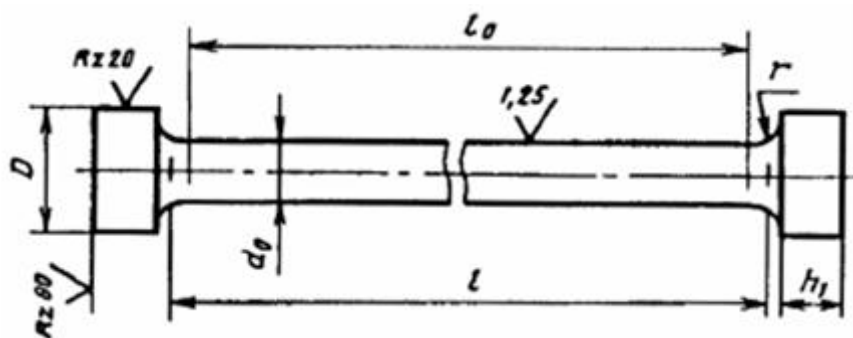


Рис. 1.9. Цилиндрические образцы согласно ГОСТ 1497–84

Таблица 1.1

Размеры цилиндрических образцов согласно ГОСТ1497-84

Номер образца	d_0	$l_0 = 5d_0$	l (рабочая длина) ¹	D	h_1	r
...			$l = (0,5...2)d_0$			
7	5	25	27,5...35	11	10	1,5
...						

1.7. Методика выполнения работ

1.7.1. Испытание на растяжение

1. Измерить диаметры образцов в трех местах. Среднее значение диаметра занести в табл. 1.2.

2. Отметить рабочую длину (базу) образца l_0 с точностью $\pm 0,05$ мм (рис. 1.8) с нанесением меток (маркер). Нанести промежуточные метки с шагом 5 мм.

3. Установить скорость перемещения захвата (скорость деформирования) $v_{\text{деф}}$ с учетом ограничений, накладываемых ГОСТ 1497–84 на скорость нагружения и скорость относительной деформации $v_{\text{деф}} = 0,23–1,3$ мм/мин.

4. Установить образец на разрывной машине 1231У-10. Запустить программу для записи испытаний на компьютере. Испытать образцы до разрыва. Сохранить файл испытаний $P \rightarrow \Delta l$

¹Чтобы исключить влияние головок на характер распределения напряжений в пределах расчетной длины образца, его рабочая длина l должна превышать расчетную l_0 на 1–2 диаметра (принцип Сен-Венана, изложенный им в 1853 г.: в сечениях, достаточно удаленных от мест приложения сил, напряжения мало зависят от способа нагружения).

на компьютере. При испытании делать остановки примерно через каждые $\Delta l = 1$ мм и, не снимая нагрузки, измерять диаметр образца в нескольких местах, записать его наименьшее значение и сделать отметки в тетради мест остановки.

5. После разрыва образца сложить две части разрушенного образца так, чтобы их оси образовывали прямую линию, измерить диаметр наименьшего сечения шейки d_k и конечную расчетную длину l_k между метками, ограничивающими расчетную длину. Результаты измерений занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Геометрические параметры образца

№ образца	l_0 , мм	d_0 , мм	F_0 , мм ²	d_B , мм	F_B , мм ²	l_B , мм	d_k , мм	F_k , мм ²	l_k , мм	P_k , кН
1.										
2.										
3.										

6. Определить:

1. $\sigma_{02} = \frac{P_{02}}{F_0} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right] = [\text{МПа}]$ – условный предел текучести (при отсутствии площадки текучести);

2. $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right] = [\text{МПа}]$ – временное сопротивление;

3. $\sigma_k = \frac{P_k}{F_0} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right] = [\text{МПа}]$ – условное разрушающее напряжение;

4. $s_k = \frac{P_k}{F_k} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right] = [\text{МПа}]$ – истинное разрушающее напряжение;

5. Δl_{\max} [мм] – абсолютное остаточное удлинение образца;

6. $\delta = \frac{\Delta l_{\max}}{l_0} \times 100 \%$ – максимальное относительное удлинение образца;

7. $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100 \%$ – относительное сужение поперечного сечения образца;

8. $n = \varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_B}$ – показатель деформационного упрочнения (максимальное равномерное удлинение).

Результаты занести в таблицу 1.3.

При отсутствии площадки текучести определить условный предел текучести σ_{02} .

Порядок определения σ_{02} :

- по оси деформаций машинной диаграммы из начала координат отложить отрезок $0,002l_0$ (см. рис. 1.2);
- параллельно участку упругой деформации провести прямую до пересечения с диаграммой растяжения;
- определить ординату P_{02} диаграммы растяжения;
- вычислить условный предел текучести

$$\sigma_{02} = \frac{P_{02}}{F_0}. \quad (1.14)$$

Таблица 1.3

Параметры диаграммы растяжения и характеристики прочности образцов

№ образца	P_{02} , кН	P_{max} , кН	σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	σ_{02}^{cp} , МПа	σ_B^{cp} , МПа
1.						
2.						
3.						

7. Для построения *условной и истинной диаграмм растяжения* проводят систему прямых CC' , MM' , NN' , LL' и т. д. параллельных прямой OA до пересечения с осью Δl , т. к. разгрузка происходит по прямым, параллельным OA (рис. 1.2). Замером отрезков OC' , OL' и т. д. (рис. 1.2) находят значения Δl , а также ε и $\dot{\varepsilon}$. Фактические площади F наименьших сечений образца для построения истинной диаграммы растяжения находят по замеренным при остановках наименьшим диаметрам образца.

Построить условную и истинную диаграммы растяжения с усреднением σ , s , ε , e по результатам испытания трех образцов, составив табл. 1.4.

Параметры диаграммы растяжений

i^{**}	Δl , мм	l_k , мм	ε	e	F_{\min} , мм ²	P , кН	σ , МПа	s , МПа
1.								
2.								
3.								

* составляют три таблицы для трех образцов соответственно;

** i – номер точки на оси Δl (рис. 1.2) (C – № 1, M – № 2 и т. д.), для которой определяются деформации и соответствующие им напряжения.

8. На диаграмме растяжения или диаграмме условных напряжений нанести механические схемы деформации для участков: OA , CN , NL (тензор напряжений, тензор деформаций).

9. Построить действительную диаграмму деформирования. Построение диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ осуществляется по истинной диаграмме растяжения $s - e$ исключением упругого участка, как показано на рис. 1.10. На диаграмме $s - e$ берется система точек A_i . Через т. A_1 проводится прямая A_1B_1 , параллельная линии упругого нагружения. Из т. B_1 восстанавливается перпендикуляр до пересечения в т. C_1 с горизонтальной линией, проведенной через т. A_1 . Полученные точки C_i совместно с точкой σ_{02} на оси ординат соединяются плавной кривой. Построить диаграмму деформирования по усредненной истинной диаграмме растяжения.

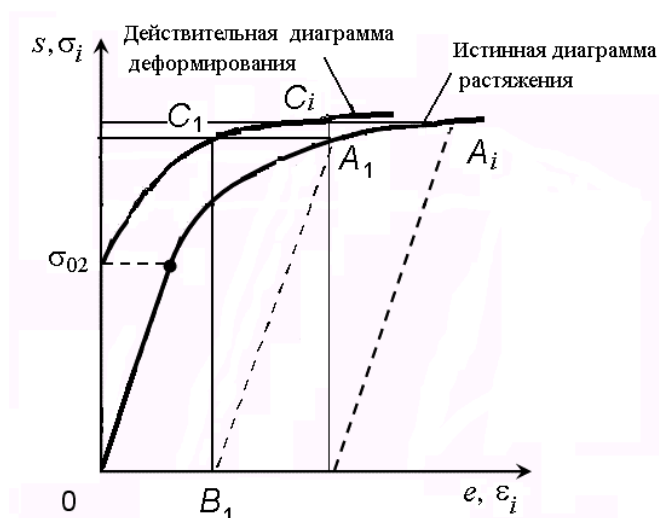


Рис. 1.10. Построение диаграммы деформирования

10. Нарисуйте вид разрушенного образца в месте разрыва.

11. Сопоставьте найденные механические характеристики испытанных материалов с данными, выписанными из стандартов и справочников по конструкционным материалам. Найдите отклонение в процентах найденных (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Результаты испытаний образцов

№ образца	l_0 , мм	d_0 , мм	F_0 , мм ²	d_B , мм	F_B , мм ²	l_B , мм	d_K , мм	F_K , мм ²	l_K , мм	P_K , кН	δ , %	Ψ , %	s , МПа
1.													
2.													
3.													
Среднее значение характеристики													

1.8. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется на листах стандартного формата А4, с угловой надписью по ГОСТ 5293–60 (форма 2) на первом листе и должен содержать:

- 1) тему (название) и цель работы;
- 2) теоретическую часть, содержащую сведения о характеристиках прочности и пластичности и их определения;
- 3) наименование оборудования для испытаний, его характеристики: марка испытательной машины, завод-изготовитель, тип силового привода (механический, гидравлический), обозначение шкал силоизмерителя и диапазон измеряемых нагрузок. Указать принцип измерения сил и деформаций (рычажно-механический, тензометрический);
- 4) эскизы образцов до испытания и после;
- 5) марку материала. На диаграмме «железо – углерод» показать разрез для этой марки стали. Зарисовать кристаллическую решетку для стали 10Ю. Указать плоскости скольжения и направления скольжения;
- 6) результаты эксперимента (табл. 1.5), их обработку, анализ полученных данных;
- 7) схемы построения условной и истинной диаграмм растяжения и диаграмм деформирования (рис. 1.2, 1.9);
- 8) схемы, поясняющие графические методы определения σ_{02} ;

- 9) построенные диаграммы растяжения и деформирования;
 10) экспериментально определенные характеристики механических свойств (заполненные таблицы);
 11) протокол № 1 испытаний на растяжение цилиндрических образцов на машине _____ согласно ГОСТ 1497-84;

Таблица 1.6

Протокол № 1 испытаний на растяжение цилиндрических образцов на машине _____ согласно ГОСТ 1497-84

Марка стали	d_0 , мм	d_K , мм	l_0 , мм	l_K , мм	P_{max} , Н	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, σ_T , МПа	δ_p , %	δ , %	ψ , %	s_k , МПа

- 12) сравнение характеристик материала с табличными (по справочникам материалов);
 13) эскизы образцов после разрушения с указанием вида разрушения (хрупкое, вязкое, смешанное);
 14) результаты аппроксимации диаграммы деформирования. Исходную поверхность образца отполировать и во время испытаний обратить внимание, как меняется цвет поверхности во время деформирования. Объяснить, зарисовать;
 15) заключение (выводы) по работе;
 16) список использованной литературы;
 17) к отчету прилагаются обработанные диаграммы растяжения образцов, эскизы.

1.9. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение рабочей и расчетной длины образца. В чем отличие между ними и чем оно обусловлено?
2. Дать определение характеристик механических свойств металлов: упругости, прочности, пластичности.
3. Какими механическими характеристиками оценивается прочность материала, а какими – пластичность?
4. В пределах какого участка диаграммы растяжения сохраняет силу закон Гука?
5. Дайте определение пределу текучести физическому и пределу текучести условному. Укажите размерность.

6. Какая из характеристик прочности имеет большее значение – предел упругости или предел текучести условный?

7. Для каких конструкционных материалов диаграмма растяжения может иметь площадку текучести?

8. Дайте определение временному сопротивлению разрыва. Укажите его размерность.

9. Какая из характеристик прочности имеет большее значение – временное сопротивление или истинное сопротивление разрыву?

10. Приведите формулы, по которым вычисляются характеристики пластичности, укажите их размерность.

11. Расшифруйте записи δ_5, δ_{10} .

12. В какой момент растяжения образца начинается образование местного сужения – шейки?

13. Что такое «условное напряжение», «истинное напряжение», «сопротивление деформации», «относительная и истинная деформации при растяжении»?

14. Для чего нужно знать характеристики прочности и пластичности при разработке технологических процессов ОМД?

15. С какой целью и на каком основании принимается условие несжимаемости?

16. С какого момента испытаний в образце из пластичного металла начинается образование местного сужения? Как называется эта область образца?

17. Каково условие начала образования шейки на образце? Как влияет здесь деформационное упрочнение?

18. Дайте схемы главных напряжений и главных деформаций в центре шейки O и в точке A (рис. 1.5 и 1.6).

19. На каком основании при расчетах многих процессов ОМД можно пренебречь свойством упругости?

20. Как строится диаграмма деформирования без учета упругости? Какими функциями ее можно аппроксимировать?

21. Какие кривые упрочнения вы знаете? На основании чего они строятся? Зачем изучаются свойства кривых упрочнения?

22. В чем заключается явление наклепа материала? Каковы последствия наклепа?

23. Опишите вязкий характер разрушения образца из пластичного материала и сделайте соответствующий эскиз.

24. Из справочника металлов выберите для сравнения два металла, соответствующие материалу испытания. Сравните соответствующие им значения.

Список литературы

1. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986-01-01. М.: Стандартинформ, 2008.

2. Расчет и проектирование процессов объемной и листовой штамповки: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением» / В. Н. Субич [и др.]. М.: МГИУ, 2007. 411 с.

3. Прикладная теория пластичности: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150300 Прикладная механика / К. М. Иванов [и др.]; под ред. К. М. Иванова. СПб.: Политехника, 2009. 374 с.

4. Марочник сталей и сплавов / сост. М. М. Колосков [и др.]; под ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2001. 672 с.

Лабораторная работа № 2

Исследование влияния температуры и скорости деформации на сопротивление деформации и пластичность металлов при одноосном растяжении

2.1. Цель работы

Экспериментально изучить влияние температуры и скорости деформации при повышенных температурах на сопротивление деформации и пластичность металлов при одноосном растяжении.

2.2. Задачи:

1. Изучение методики испытания;
2. Подготовка образцов для испытания;
3. Проведение испытаний;
4. Обработка результатов эксперимента.

2.3. Теоретическая часть

Основные понятия и теоретические положения

Важными внешними макроскопическими параметрами пластической деформации металлов и сплавов являются температура и скорость деформации. По определению скорость деформации есть первая производная степени деформации по времени

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}. \quad (2.1)$$

При одноосном растяжении цилиндрического образца с постоянной скоростью деформирования v на стадии равномерного удлинения дифференциал степени деформации

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l_0} = \frac{v \cdot d\tau}{l_0}, \quad (2.2)$$

где dl – приращение длины образца за время $d\tau$; l_0 – исходная длина образца.

Подстановка (2.2) в (2.1) дает

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v \cdot dt}{l_0 dt} = \frac{v}{l_0} [c^{-1}],$$

т. е. при растяжении образца с постоянной скоростью деформирования начальная скорость деформации определяется делением скорости деформирования на исходную длину образца. С увеличением степени деформации длина образца увеличивается. Скорость деформации в каждый данный момент времени определяется как

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l},$$

где l – текущая длина образца. Поэтому при растяжении

с $v = \text{const}$ $\dot{\varepsilon}$ непрерывно уменьшается.

С повышением температуры t деформации уменьшается трение решетки при скольжении дислокаций (напряжение Пайерлса – Набарро) и снижается упрочнение, обусловленное деформацией из-за протекающих термоактивируемых процессов разупрочнения. Это обуславливает как снижение (по сравнению с холодной деформацией) начального напряжения течения, так и сопротивление деформации – текущего значения напряжения течения. В этой связи пластическая деформация при повышенных t протекает в условиях конкуренции процессов упрочнения и разупрочнения. Скорость процесса упрочнения задается скоростью деформации. Процессы разупрочнения (динамический возврат, полигонизация и рекристаллизация) имеют диффузионную природу и протекают с определенными скоростями. Следовательно, превалирование упрочнения или разупрочнения определяется температурой и скоростью деформации.

Можно утверждать, что наиболее часто с повышением t (при $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ и одинаковых структурных состояниях металла) сопротивление деформации σ уменьшается, а пластичность (деформация до

разрушения) увеличивается. Уменьшение $\dot{\varepsilon}$ при $t = \text{const}$ также приводит к уменьшению σ и повышению пластичности. Такое

влияние t и $\dot{\varepsilon}$ объясняется тем, что все атомные механизмы пластической деформации (дислокационное скольжение, двойникование, зернограничное проскальзывание и диффузионная ползучесть) являются термоактивируемыми, т. е. температура снижает энергетические пороги их протекания.

Повышение пластичности с ростом t и уменьшением $\dot{\varepsilon}$ объясняется термической активацией процессов разупрочнения.

При разупрочнении уменьшается плотность дефектов кристаллической решетки, в том числе неподвижных дислокаций, и снижается вероятность зарождения микротрещин – зародышей макроразрушения. Поэтому широко используемые в авиастроении труднодеформируемые (обладающие высоким сопротивлением деформации и малой пластичностью) высокопрочные сплавы штампуют на гидравлических прессах как более тихоходных из всего парка кузнечно-штамповочных машин.

Необходимо знать, что при температуре $T = (0,5 \div 0,8)T_{пл.}$, где $T_{пл.}$ – термодинамическая температура плавления (несколько выше температурного порога первичной рекристаллизации), для большинства сплавов наблюдается падение пластичности с выраженным межкристаллитным характером разрушения. Это явление называется красноломкостью. Оно характерно для сплавов железа, никеля, вольфрама, меди, магния и др. и связано с образованием на границах зерен и фаз легкоплавких оксидов и сульфидов.

2.4. Оборудование и материалы

1. Универсальная испытательная машина для кратковременных испытаний образцов материалов 1958У-10;
2. Стандартные пятикратные разрывные образцы из металлического сплава в одном структурном состоянии;
3. Штангенциркуль.

2.5. Методика выполнения работы

1. Исследование влияния температуры на сопротивление деформации и пластичность:

а) деформировать растяжением до разрыва с одинаковой скоростью деформирования из интервала $v = 3 \div 5$ мм/мин по три образца при трех температурах (по указанию преподавателя) с фиксацией индикаторной диаграммы растяжения;

б) построить условные диаграммы растяжения при каждой температуре;

в) определить средние значения σ_{02} , σ_B , δ и ψ при температурах деформирования и заполнить табл. 2.1;

г) построить зависимости $\sigma_{02}(t)$, $\sigma(t)$, $\delta(t)$ и $\psi(t)$.

Сделать вывод в соответствии с целью работы.

Таблица 2.1

Протокол № 1 испытаний на растяжение цилиндрических образцов при различных температурах испытаний

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{02}^{\text{ср.}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}^{\text{ср.}}, \text{МПа}$	$\delta_{\text{ср.}}, \%$	$\Psi_{\text{ср.}}, \%$
t_1				
t_2				
t_3				

2. Исследование влияния скорости деформации при повышенных температурах на сопротивление деформации и пластичность:

а) деформировать растяжением до разрыва при t (по указанию преподавателя) с начальными скоростями деформации примерно 10^{-3}с^{-1} , $7 \cdot 10^{-3}\text{с}^{-1}$ и $3 \cdot 10^{-2}\text{с}^{-1}$ по три образца с фиксацией индикаторной диаграммы растяжения;

б) построить условные диаграммы растяжения для каждой скорости деформации;

в) определить средние значения σ_{02} , $\sigma_{\text{в}}$, δ и ψ для каждой $\dot{\epsilon}$ и заполнить табл. 2.2;

г) построить зависимости $\sigma_{02}(\dot{\epsilon})$, $\sigma_{\text{в}}(\dot{\epsilon})$, $\delta(\dot{\epsilon})$ и $\psi(\dot{\epsilon})$, сделать вывод в соответствии с целью работы.

Таблица 2.2

Протокол № 1 испытаний на растяжение цилиндрических образцов при различных скоростях испытаний

$\dot{\epsilon}, \text{с}^{-1}$	$\sigma_{02}^{\text{ср.}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}^{\text{ср.}}, \text{МПа}$	$\delta_{\text{ср.}}, \%$	$\Psi_{\text{ср.}}, \%$

2.6. Содержание отчета по работе

В отчете необходимо отразить:

- тему работы и ее цель;
- оборудование и материалы;

- методику проведения экспериментального исследования;
- результаты исследования в форме графиков и таблиц;
- выводы по полученным результатам.

2.7. Контрольные вопросы

1. Дайте определение горячей пластической деформации металлов.
2. Какие механизмы деформации могут работать при горячей деформации?
3. Почему при повышении температуры сопротивление деформации у металлов уменьшается, а пластичность увеличивается?
4. Какова причина влияния скорости деформации на сопротивление деформации и пластичность металлов при повышенных температурах?
5. Какие сплавы относятся к труднодеформируемым?

Список литературы

1. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 424 с.
2. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
3. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
4. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584 с.
5. ГОСТ 1497-73. Металлы. Методы испытания на растяжение. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. М.: Изд-во стандартов, 1977. 40 с.
6. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1979. 494 с.
7. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. М.: МИСиС, 1997. 527 с.

Лабораторная работа № 3

Количественная оценка предела текучести по параметрам структуры для низколегированной феррито-перлитной стали

3.1. Цель работы

Расчет по химическому составу стали и ее структуре предела текучести.

3.2. Задачи:

1. Изучение методики испытания;
2. Обработка результатов эксперимента.

3.3. Теоретическая часть

3.3.1. Количественная оценка предела текучести по параметрам структуры. Повышение предела текучести конструкционной стали с ферритно-перлитной структурой достигается вкладом следующих механизмов упрочнения

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р.} + \Delta\sigma_{п} + \Delta\sigma_{д} + \Delta\sigma_{д.у.} + \Delta\sigma_3 \text{ (или } \Delta\sigma_c), \quad (3.1)$$

где σ_0 – сопротивление решетки металла движению свободных дислокаций (напряжение трения решетки); $\Delta\sigma_{т.р.}$ – упрочнение твердого раствора растворенными в нем легирующими элементами и примесями (твердорастворное упрочнение); $\Delta\sigma_{п}$ – упрочнение за счет формирования перлита в нормализованных феррито-перлитных сталях либо сорбита в улучшаемых сталях; $\Delta\sigma_{д}$ – дислокационное упрочнение, обусловленное повышением плотности дислокаций; $\Delta\sigma_{д.у.}$ – упрочнение, вызванное образованием дисперсных частиц второй фазы при распаде пересыщенного твердого раствора (дисперсионное упрочнение); $\Delta\sigma_3$ – упрочнение границами зерен и субзерен (зернограничное упрочнение); $\Delta\sigma_c$ – субструктурное упрочнение; при его учете компонента зернограничного упрочнения в пределе текучести стали не учитывается. Вклад этих механизмов упрочнения в предел текучести каждого сплава различный.

3.3.2. Напряжение трения решетки α -железа. Напряжение трения решетки α -железа σ_0 определяется напряжением Пайерлса-Набарро $\sigma_{\text{П-Н}}$

$$\sigma_{\text{П-Н}} = \sigma_0,$$

где $\sigma_{\text{П-Н}}$ – минимальное напряжение, необходимое для движения краевых дислокаций в кристалле, зависит от свойств решетки и характеризует силы трения решетки. Сопротивление решетки железа движению свободных дислокаций принимается

$$\sigma_0 \approx 2 \cdot 10^{-4} G \text{ [МПа]}, \quad (3.2)$$

где для $\alpha\text{-Fe}$ $G = 84000$ МПа, теоретически $\sigma_0 \approx 17$ МПа. Эта величина зависит от содержания примесей в металле. Чем выше чистота металла, тем меньше это значение, но т. к. в твердом растворе содержатся примеси внедрения (около 10^{-2} (С + N)) и имеются дефекты кристаллического строения, принимают σ_0 для сталей на основе $\alpha\text{-Fe}$.

$$\sigma_0 \approx 30 \div 40 \text{ МПа}. \quad (3.3)$$

3.3.3. Твердорастворное упрочнение. Согласно теории упрочнения при легировании сопротивление движению дислокаций в твердых растворах больше, чем в чистых металлах, т. к.:

– возможна блокировка дислокаций атмосферами атомов легирующих элементов, т. к. при отрыве дислокации от окружающей атмосферы возрастает энергия сплава;

– при легировании возрастает сопротивление движению свободной (незаблокированной) дислокации за счет различия атомных диаметров (рис. 3.1) и модулей упругости атомов матрицы и растворенных легирующих элементов, а также распределения атомов легирующего элемента.

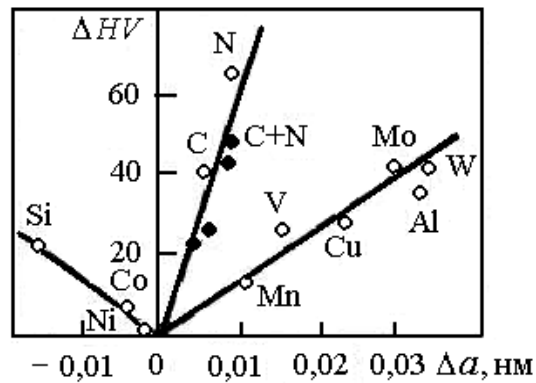


Рис. 3.1. Зависимость упрочнения аустенита (ΔHV) от изменения периода решетки (Δa) при легировании хромоникелевого аустенита 1 % (ат) различных элементов

Вклад твердорастворного упрочнения определяется по формуле

$$\Delta\sigma_{\text{т.р.}} = \sum_{i=1}^n k_i C_i, \quad (3.4)$$

где k_i – коэффициент упрочнения α -железа при легировании каким-либо элементом, равный приросту предела текучести при растворении в нем 1 % (по массе) i -го легирующего элемента, МПа / %; C_i – концентрация i -го легирующего элемента, растворенного в феррите, %.

Значения коэффициента k_i различны для феррита и аустенита. Значения k_i для элементов, входящих в состав сталей с ферритной основой, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения k_i для элементов, входящих в состав сталей с ферритной основой

Элемент	C+N	P	Si	Ti	Al	Cu	Mn	Cr	Ni	Mo	V
k_i , МПа / % (по массе)	4670	690	86	82	60	39	33	31	30	11	3

При расчете по формуле (3.4) берется концентрация легирующего элемента, растворенного в феррите, а не содержание этого элемента в стали.

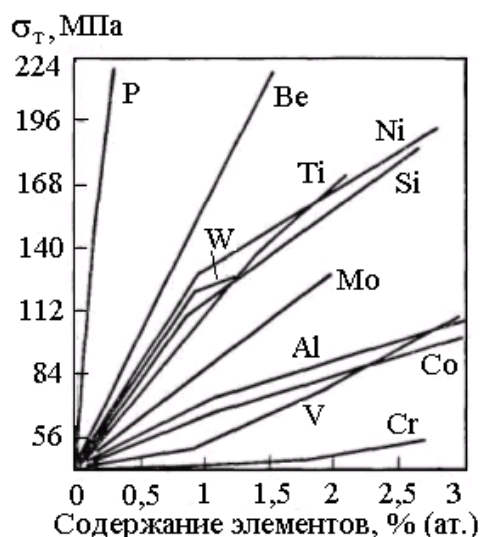


Рис. 3.2. Зависимость σ_T железа от содержания легирующих элементов замещения

Механические характеристики феррито-перлитных сталей определяются свойствами легированного феррита. Принято считать, что элементы Mn, Si, Ni, P целиком входят в состав феррита. Медь малорастворима в феррите и образует самостоятельную фазу. Содержание в феррите C, N, Cr, Mo, V, Nb, Ti зависит от числа упрочняющих карбонитридных фаз. Опытные данные горячекатаных сталей (нормализованных) показывают, что в феррите этих сталей обычно растворено $\sim 0,01 \div 0,02$ % (C+N). Остальное количество углерода и азота связано в цементит и специальные карбиды и нитриды. Из числа карбидообразующих элементов (Mn, Cr, Mo, V, Nb, Ti) практически целиком связаны в специальные карбиды V, Nb, Ti. Нитридообразователь Al обычно полностью связан в нитриды и неметаллические включения. Mo и Cr частично входят в состав карбидной фазы, а отчасти они растворены в феррите. Относительно слабый карбидообразователь Mn самостоятельных карбидов в стали не образует и фактически целиком растворен в феррите. Следовательно, в низколегированных сталях феррито-перлитных сталях Mn, Si, Ni, P практически целиком растворены в феррите, V, Nb, Ti, Al полностью входят в состав карбонитридной фазы, а Cr и Mo распределены между ферритом и карбидами. Учитывая невысокую концентрацию Cr и Mo в низколегированных сталях и малые значения их коэффициентов упрочнения k_i , влиянием этих элементов на прочность феррита можно пренебречь. Следовательно, основными легирующими элементами, определяющими твердорастворное

упрочнение феррито-перлитных сталей, являются Mn, Si, Ni, P и частично C+N. С учетом указанных допущений может быть оценено твердорастворное упрочнение этих сталей. Атомы внедрения на два порядка сильнее упрочняют феррит, чем атомы замещения. На рис. 3.1 представлено влияние концентраций элементов замещения на свойства железа высокой чистоты. Эти данные показывают, что в области малых концентраций наибольшее упрочняющее влияние оказывает фосфор, а хром, находящийся в феррите, – наименьшее влияние. Легирование увеличивает сопротивление движению дислокаций вследствие взаимодействия растворенных атомов легирующих элементов с дислокациями (рис. 3.3). Атомы растворенного элемента вызывают появление локальных внутренних искажений, создающих препятствия на пути движущейся дислокации. Величина искажений зависит только от разности размеров атомов растворителя и легирующего элемента, т. е. параметра несоответствия по размерам δ_a . Для разбавленных твердых растворов ($c \ll 1$), к которым относятся твердые растворы в сталях и многих сплавах, можно принять, что

$$\delta_a = \frac{2(a_m - a_p)}{a_m + a_p} \delta_a = 2(a_m - a_p)/(a_m + a_p), \quad (3.5)$$

где a_m и a_p – параметры решетки матрицы и растворенного элемента соответственно. На рис. 3.2, б, в показано взаимодействие дислокации с растворенными атомами в разбавленном растворе. Под действием приложенного напряжения дислокация прогибается, отрыв ее происходит при малом прогибе, таком как движение от *A* к *B*. *L* – расстояние между точками закрепления дислокации. Величина *L* обратно пропорциональна атомной концентрации легирующего элемента в твердом растворе.

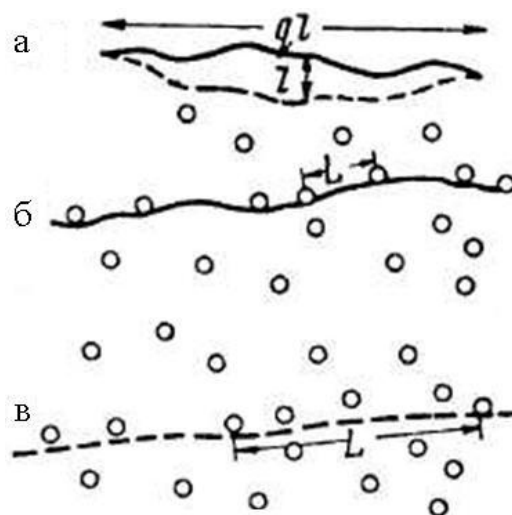


Рис. 3.3. Схема взаимодействия движущейся дислокации с атомами в твердом растворе:

- а* – элементарное перемещение дислокации по Мотту – Набарро;
б – жесткость движущейся дислокации в случае сильного взаимодействия с атомами легирующего элемента; *в* – то же в случае слабого взаимодействия

3.3.4. Дисперсионное упрочнение. Вклад дисперсионного упрочнения оценивается для различных сталей по-разному, в зависимости от действующих механизмов дисперсионного упрочнения. В конструкционных сталях, имеющих феррито-перлитную структуру (отожженных, нормализованных и горячекатаных) либо сорбитную (закалка с высоким отпуском), с карбонитридным упрочнением рассматривают упрочнение за счет перлитной составляющей и упрочнение дисперсными частицами.

Упрочнение за счет перлитной составляющей. В конструкционных сталях с феррито-перлитной структурой (отожженных, нормализованных и горячекатаных) при приложении нагрузки деформация начинает развиваться в феррите, а перлитные колонии являются «барьерами» для такой деформации. Поэтому феррито-перлитная структура рассматривается как структура дисперсионно-упрочненной стали, где перлитную составляющую рассматривают как жесткое включение в более мягкой матрице. При достижении предела текучести перлит практически не претерпевает деформации. Вклад перлитной составляющей $\Delta\sigma_{\text{п}}$ в предел текучести учитывается дополнительно к вкладу компоненты $\Delta\sigma_{\text{д.у.}}$. Количество перлитной составляющей, ее дисперсность, межпластинчатое расстояние и т. п. зависят от состава стали, устойчивости переохлажденного аустенита, скорости охлаждения, сечения проката и т. д. Все эти

параметры определяют механические свойства стали, в том числе предел текучести стали.

Вклад перлитной составляющей в предел текучести стали с ферритной основой определяют путем умножения эмпирического коэффициента на долю перлита стали. Значения этого коэффициента находятся в пределах 2,3–2,5 МПа / % П. Упрочнение за счет перлита в низколегированных сталях определяется по формуле

$$\sigma_{\text{П}} = 2,4П \text{ (МПа)}, \quad (3.6)$$

где $П$ – содержание перлитной составляющей, %.

Упрочнение дисперсными частицами $\sigma_{\text{д.у.}}$. Упрочнение дисперсными частицами карбидов и нитридов в стали описывается механизмом Орована. Согласно этой модели, дислокации при движении будут удерживаться на частицах до тех пор, пока прилагаемое напряжение не будет достаточным для того, чтобы линия дислокаций изогнулась и прошла между частицами, оставив около них дислокационную петлю (рис. 3.4, 3.5).

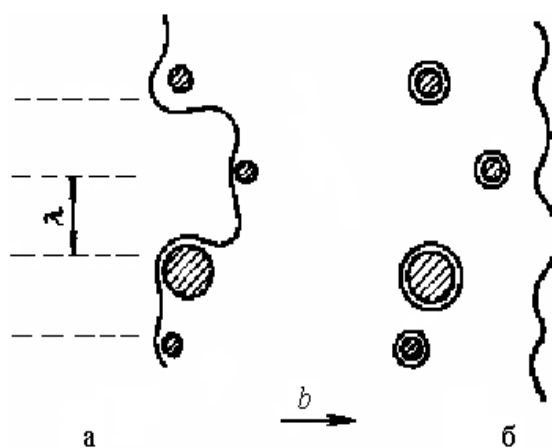


Рис. 3.4. Схема огибания частиц дислокацией по механизму Орована: *а* – прогиб дислокационной линии между частицами; *б* – дислокационные петли вокруг частиц после обхода дислокацией частиц

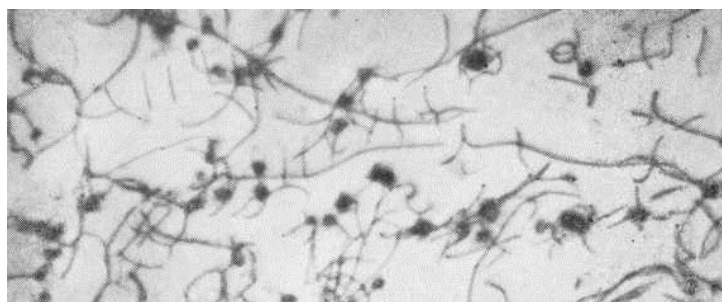


Рис. 3.5. Взаимодействие дислокаций с карбидными частицами в стали $\times 20\ 000$

Объемная доля частиц в низколегированных сталях практически всегда невелика ($< 1\%$), и межчастичное расстояние λ намного больше среднего размера частиц $\lambda \gg \bar{D}$, поэтому дислокации огибают некогерентные выделения, и компонентой $\sigma_{д.у.}$ можно пренебречь.

3.3.5. Дислокационное упрочнение $\Delta\sigma_{д.}$ Пластическая деформация металлов сопровождается образованием новых дислокаций, их определенным распределением, увеличением плотности. Чем больше плотность дислокаций, тем выше сопротивление металла пластическому деформированию.

Деформационное упрочнение определяется по формуле

$$\Delta\sigma_{д} = \alpha m G b \rho^{1/2}, \quad (3.7)$$

где α – коэффициент, зависящий от характера распределения и взаимодействия дислокаций при деформационном упрочнении; m – ориентационный множитель; G – модуль сдвига; ρ – плотность дислокаций, см^{-2} ; b – вектор Бюргерса.

Для сталей с ферритной основой (α -Fe) параметры, входящие в это уравнение, принимают равными: $\alpha = 0,15-0,3$; $m = 2,75$; $G = 84\,000$ МПа; $b = 2,5 \cdot 10^{-7}$ мм. Поэтому принимают $\alpha m \approx 0,5$

Упрочнение феррито-перлитных сталей при повышении плотности дислокаций можно оценить по формуле

$$\Delta\sigma_{д} = 0,5 G b \rho^{1/2}. \quad (3.8)$$

В феррито-перлитных сталях, структура которых сформировалась при нормализации либо при охлаждении на воздухе из аустенитного состояния после горячей прокатки (горячекатаное состояние), плотность дислокаций обычно не превышает 10^9 см^{-2} и чаще всего составляет около 10^8 см^{-2} , поэтому $\Delta\sigma_{д} \approx 10$ МПа. Компонента $\Delta\sigma_{д}$ оказывает существенное влияние, когда сталь заметно наклепана в результате закалки или холодной пластической деформации или когда не полностью прошли процессы рекристаллизации после горячей пластической деформации (например, после ВТМО, изоформинга), и плотность дислокаций достигает значений $10^9-10^{10} \text{ см}^{-2}$, тогда значения $\Delta\sigma_{д}$ достигают 30–100 МПа. Максимальная плотность дислокаций при деформационном упрочнении или мартенситном превращении может достигать 10^{12} см^{-2} . При большем значении в силу неравномерного распределения структурных

дефектов отдельные объемы материала пресыщаются дислокациями. Это вызывает нарушение сплошности в виде субмикроскопических трещин и снижение прочности. При увеличении плотности дислокаций прирост предела текучести сталей на основе α -Fe за счет дислокационного упрочнения для различных значений ρ ориентировочно составит (табл. 3.2):

Таблица 3.2

Прирост предела текучести сталей на основе α -Fe за счет дислокационного упрочнения для различных значений ρ

$\rho, \text{см}^{-2}$	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}
$\Delta\sigma_{\text{д}}, \text{МПа}$	10	30	100	300	1000

При определении предела текучести в феррито-перлитных сталях, не подвергнутых наклепу, когда $\rho < 10^9 \text{ см}^{-2}$ и, соответственно, $\Delta\sigma_{\text{д}} < 30 \text{ МПа}$, компонентой дислокационного упрочнения можно пренебречь. Компоненту $\Delta\sigma_{\text{д}}$ в этих сталях учитывают при плотности дислокаций $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Зернограничное ($\Delta\sigma_{\text{з}}$) и субзеренное ($\Delta\sigma_{\text{с}}$) упрочнение.

Границы зерен и субзерен являются препятствиями на пути движения дислокаций, а потому требуется дополнительное повышение напряжения для их продвижения, и тем самым они способствуют упрочнению материала.

Дислокация не может перейти границу зерна, т. к. в новом зерне плоскости скольжения не совпадают с плоскостью движения этой дислокации. Дальнейшая деформация продолжается, если в соседнем зерне возникает новая дислокация, поэтому чем мельче зерно (больше протяженность границ), тем выше прочность металла (рис. 3.6).

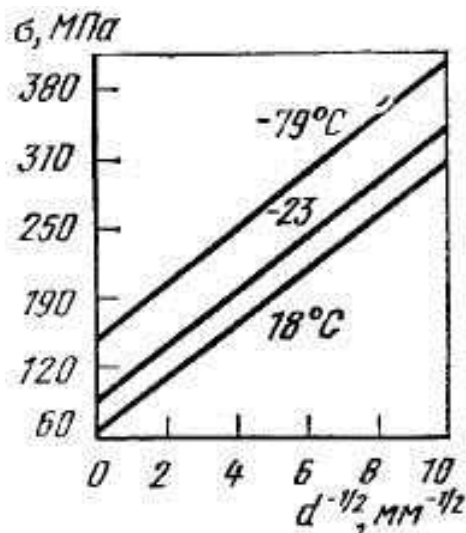


Рис. 3.6. Зависимость σ_T железа от размера зерна

Зернограничное упрочнение $\Delta\sigma_3$. Зернограничное упрочнение определяется как

$$\Delta\sigma_3 = K_y d^{-1/2} \text{МПа} \quad (3.9)$$

при условии, что разориентировка между зернами большеугловая. Скользящая дислокация вынуждена останавливаться у этих границ, т. к. в соседних зернах плоскость скольжения имеет другую ориентацию. Коэффициент k_y характеризует прочность блокировки дислокаций, и его значения для сталей зависят от содержания примесей внедрения. Значения коэффициента k_y для феррито-перлитных сталей, определенные как тангенс угла наклона прямых в координатах $\sigma_T - d^{-1/2}$, находятся в пределах $0,57-0,73 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Для малоуглеродистых феррито-перлитных сталей чаще всего принимают $k_y = 0,63 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ($2,0 \text{ кг/мм}^{3/2}$).

Уменьшение размера действительного зерна является эффективным способом повышения прочности конструкционных сталей, а также при упрочнении за счет этого механизма одновременно уменьшается склонность сталей к хрупким разрушениям. Размер зерна зависит от размера аустенитного зерна и наличия карбонитридных фаз. В феррито-перлитных сталях с карбидо- и нитридообразующими элементами при переходе через критическую точку A_{C_3} в структуре стали имеются соответствующие карбиды и нитриды, что приводит к образованию более мелкого зерна аустенита, т. к. эти фазы оказывают зародышевое влияние при

образовании новых зерен аустенита. Карбиды и нитриды тормозят рост зерна аустенита при дальнейшем его нагреве вплоть до температур растворения этих фаз в аустените. Нерастворенные карбиды и нитриды, а также выделившиеся из аустенита перед началом $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения служат зародышевыми центрами образования новых зерен феррита. Все это приводит к тому, что в феррито-перлитных сталях с дисперсными упрочняющими фазами происходит заметное измельчение зерна феррита. Отсюда можно сделать вывод, что дисперсные частицы в сталях вызывают дополнительное зернограничное упрочнение. То есть легирование, приводящее к дисперсному упрочнению, повышает и зернограничное упрочнение.

Эффективность зернограничного упрочнения и его доля в пределе текучести материала для конструкционных сталей с ферритной основой значительно больше, чем для аустенитных сталей. Это обусловлено двумя причинами: значительно меньшим размером зерна d и большим значением коэффициента зернограничного упрочнения k_y для феррито-перлитных сталей, чем для аустенитных. Так, в сталях на основе α -железа вследствие фазовой перекристаллизации обычно размер зерна достигает 10–30 мкм, тогда как в аустенитных сталях он чаще всего составляет 70–100 мкм и более. Соответственно, и коэффициент $k_y \approx 0,57 \div 0,73 \text{ МПа } \sqrt{\text{м}}$ для феррито-перлитных сталей, $k_y \approx 0,2 \div 0,5 \text{ МПа } \sqrt{\text{м}}$ – для аустенитных сталей.

Различные механизмы упрочнения вносят неодинаковый вклад в предел текучести сплавов, и зависит он от типа сплава. В конструкционных сталях на основе α -Fe зернограничное упрочнение занимает значительное место среди других механизмов, тогда как в аустенитных сталях и сплавах оно не определяет конструктивной прочности материала, и определяющее влияние на прочность оказывают твердорастворное, дислокационное и дисперсионное упрочнения.

Субструктурное упрочнение $\Delta\sigma_c$. В результате термомеханического воздействия или закалки на мартенсит и высокого отпуска в структуре стали возможно образование субзерен, т. е. участков металла, слабо разориентированных между собой малоугловыми дислокационными границами. Появление субзеренных границ вызывает дополнительное сопротивление развитию пластической деформации в зерне металла. Значение коэффициента k_c есть функция от

угла разориентировки θ . Уменьшение размеров субзерен и, соответственно, увеличение угла разориентировки порядка 20–40°, т. е. перерастание субзерен в зерна, приведет к достижению значений k_y . Значения коэффициента k_c определяются условиями высоко-температурной деформации и последующей термической обработки. Так как границы субзерен – это дислокационные стенки, то активизировать источники дислокаций в границах субзерен значительно легче, чем на границах зерен, и, следовательно, субграницы являются менее эффективными упрочнителями, поэтому можно рассчитывать вклад субзеренного упрочнения по уравнению

$$\Delta\sigma_c = k_c l^{-1}. \quad (3.10)$$

Это уравнение совпадает с результатами экспериментальных данных, и $\Delta\sigma_c$ можно рассматривать как напряжение, необходимое для распространения дислокационных петель через субзерно или дислокационную ячейку. Из экспериментов следует, что удлинение зерен эквивалентно измельчению зерен и ведет к увеличению прочности.

При формировании совершенной субструктуры для расчетов достаточно учитывать только $\Delta\sigma_c$, при этом $\Delta\sigma_z$ не учитывается.

При однородном распределении дислокаций внутри зерна или при несовершенной субзеренной структуре учитывается только $\Delta\sigma_z$.

3.4. Методика выполнения лабораторной работы

Исходные материалы:

- 1) марка стали и ее плавочный химический состав;
- 2) микрофотографии структуры стали;
- 3) электронно-микроскопические фотографии структуры тонкой фольги или реплики;
- 4) справочные данные:
 - коэффициенты упрочнения феррита с растворенными в нем легирующими элементами – k_i ;
 - модули упругости матрицы (железа) – G ;
 - ориентационный множитель – m ;
 - коэффициенты k_y ;
 - векторы Бюргерса – \vec{b} и др.

Выполнение работы. Экспериментальные данные определяются по материалам задания, а именно:

а) ориентировочному содержанию элементов, растворенных в феррите;

б) фазовому составу дисперсных упрочняющих фаз (например, VC, NbC, TiC, VN, NbN, TiN и др.).

Определить:

а) содержание перлита в структуре – P ;

б) средний размер зерна феррита – d или субзерна – l ;

в) плотность дислокаций – ρ ;

г) средний размер дисперсных частиц – \bar{D} ;

д) объемную долю частиц – f ;

е) межчастичное расстояние – λ .

Результаты внести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Исходные данные для количественной оценки предела текучести малоуглеродистых феррито-перлитных сталей

Характеристика стали		Марка стали	
1.	Состояние поставки (горячекатаная, нормализованная и др.)		
2.	Режим термообработки		
3.	Содержание легирующих элементов в α -Fe	содержание элемента	
		в стали	в феррите
	C+N		
	P		
	Si		
	Ti		
	Al		
	Cu		
	Mn		
	Cr		
	Ni		
	Mo		
	V		
4.	Упрочняющая фаза (дисперсные частицы)		
5.	Доля перлита, %		
6.	Размер зерна d мм (№ зерна по ГОСТ 5639-82)		
7.	Объемная доля дисперсных частиц f , %		

8.	Размер дисперсных частиц \bar{D} , нм	
9.	Межчастичное расстояние λ , нм	
10.	Характер дислокационной структуры: ρ^* , см ⁻²	
	Примечание	

Рассчитать следующие компоненты упрочнения:

- напряжение трения решетки – σ_0 ;
- твердорастворное упрочнение феррита – $\Delta\sigma_{т.р.}$;
- упрочнение, вносимое перлитом – $\Delta\sigma_{п}$;
- зернограничное упрочнение – $\Delta\sigma_3$;
- дислокационное (деформационное) упрочнение – $\Delta\sigma_{д.}$;
- дисперсионное упрочнение – $\Delta\sigma_{д.у.}$.

Результаты внести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Количественная оценка предела текучести низкоуглеродистых феррито-перлитных сталей

1. Компоненты упрочнения:		Показатели упрочнения		
		МПа	%	формула
1.1.	Напряжение трения решетки, σ_0			
1.2.	Легирование твердого раствора, $\Delta\sigma_{т.р.}$			
1.3.	Дисперсионное упрочнение: $\Delta\sigma_{д.у.} = \Delta\sigma_{д.ч.} + \Delta\sigma_{п}$			
1.3.1.	Перлитная составляющая $\Delta\sigma_{п}$			
1.3.2.	Упрочнение дисперсными частицами $\Delta\sigma_{д.ч.}$			
1.4.	Упрочнение границами зерен, $\Delta\sigma_3$			
1.5.	Упрочнение субграницами зерен $\Delta\sigma_c$			
2.	Предел текучести σ_T			
2.1.	Расчет по формуле (3.1)			
2.2.	Экспериментальное или табличное значение			
	Примечание			

Далее на основе определенных компонент упрочнения рассчитывается предел текучести стали σ_T (табл. 3.4).

3.5. Количественное определение параметров структуры

При оценке вклада различных структурных составляющих в упрочнение сталей и сплавов необходимо правильно определить объемные доли фазовых составляющих, размер зерна и субзерна, плотность дислокаций, количество и размер дисперсных частиц.

3.5.1. Определение объемной доли фаз. Основным принципом, на котором базируется определение относительного содержания фаз в многофазных материалах, заключается в том, что объемное соотношение фаз равно отношению площадей фаз, составляющих структуру сплава в произвольном плоском сечении образца, а также доле ее на произвольной линии, проведенной на шлифе сплава.

Линейный анализ. В основе линейного анализа лежит положение о том, что относительная длина отрезков (линий), пересекающих исследуемую область микроструктуры и попадающих на участки данной фазы, равна объемной доле этой фазы:

$$f_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{i\alpha}}{L_0}, \quad (3.11)$$

где $f_{\alpha} = \sum_{i=1}^n L_{i\alpha}$ – суммарная длина отрезков случайной секущей линии, проходящей через n участков данной фазы α ; L_0 – полная длина секущей линии, проходящей через исследуемое поле. Считаем распределение второй фазы однородным.

3.5.2. Определение среднего размера зерна. Средний размер зерна определяется методом случайных секущих, для чего на микрофотографии проводятся несколько отрезков произвольной длины, каждый из которых пересекает не менее 10 зерен. Средний условный диаметр зерна \bar{d} определяют по формуле

$$\bar{d} = L/n, \quad (3.12)$$

где L – суммарная длина отрезков на шлифе, мм; n – общее число пересеченных границ зерен.

3.5.3. Определение параметров дисперсных частиц. При оценке вклада упрочнения за счет дисперсных частиц необходимо знать средний размер частиц \bar{D} , расстояние между ними λ и объемную долю частиц f .

Определить расстояние между частицами λ можно как:
1) средний свободный путь – среднее расстояние между поверхностями частиц вдоль произвольной прямой, проведенной в структуре; 2) минимальное расстояние между частицами, определяемое как среднее расстояние между центрами ближайших частиц.

Определить λ как среднее расстояние между центрами ближайших частиц (рис. 3.7, б).

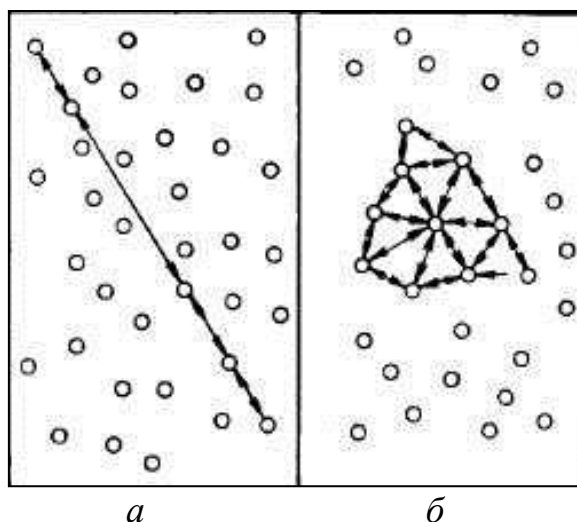


Рис. 3.7. Схема определения среднего свободного пути (а) и среднего расстояния между центрами ближайших частиц (б)

Определение плотности дислокаций ρ . Плотность дислокаций принимаем за одно из данных значений с учетом приведенной структуры и данных по термической обработке (п. 3.1.4).

3.6. Содержание отчета

1. Тема и цель работы;
2. Краткое изложение теоретической части;
3. Исходные материалы;
4. Порядок выполнения работы;
5. Экспериментальные данные и их объяснение.

3.7. Контрольные вопросы и задания

1. Что такое «(конструктивная) конструкционная прочность» и какие параметры используются для ее оценки?

2. Можно ли повысить конструктивную прочность низколегированной стали? Как?

3. Чем определяется максимальная прочность материала, которая может быть достигнута?

4. Почему наблюдается огромное различие между теоретической и практической прочностью?

5. Как влияют дислокации на прочность металла?

6. Блокировка дислокаций ведет к повышению или понижению сопротивления пластической деформации?

7. Подвижность дислокаций снижается при: а) отжиге; б) пластическом деформировании; г) закалке; д) отпуске (каком?); е) увеличении размера зерна. Выбрать правильный(-ые) ответ(ы) и объяснить.

8. Расположите образцы стали, закаленные в воде, в масле, на воздухе по плотности дислокаций.

9. Как влияет вид выделения на прочность сплава (когерентные, полуккогерентные, некогерентные выделения частиц)?

10. Выделения какой формы вносят наибольший вклад в упрочнение сплава: а) сферической; б) волокнистой; в) пластинчатой; г) иглообразной. Приведите примеры структур.

11. При старении прочность сплава повышается или снижается? Объясните ответ.

12. Твердость стали после закалки и после старения равны. Возможно ли это? Почему?

13. Даны два образца стали. В первом происходит выделение дисперсных частиц в теле зерна, а во втором – преимущественно по границам зерен. Как это связано с прочностью и пластичностью материала и как это используется?

14. В чем различие в фазовом составе продуктов отпуска при 650 °С и продуктов изотермического превращения аустенита при 650 °С стали с 0,4 %С?

15. Дано: низколегированная сталь, где p , % – содержание углерода, n , % – содержание легирующего элемента Me , где Me либо Nb, либо V, либо Ti. Считать объемные доли этих элементов равными. Сравнить размеры частиц карбидов, межчастичное расстояние между карбидами и упрочнение, вызванное этими частицами. Введение какого элемента наиболее эффективно?

16. Дано: сталь 40. Одна сталь легирована 2 % Cr, а другая – 0,2 % V. Термообработка: закалка + высокий отпуск. Какие карбиды

образуются в первой стали, а какие во второй? Сравнить размеры этих частиц. Какова объемная доля этих карбидов и почему? Сравнить межчастичное расстояние в этих сталях. Влияет ли природа упрочняющей фазы на упрочнение?

17. Пусть модуль упругости матрицы G_M , модуль упругости дисперсной частицы $G_{д.ч.}$. Для рис. 3.5 сравнить модули упругости матрицы и дисперсной частицы.

Список литературы

1. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов: учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.

2. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные сплавы: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1985. 408 с.

3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

4. Панин В. Е., Дударев Е. Ф., Бушнев Л. С. Структура и механические свойства твердых растворов замещения. М.: Металлургия, 1971. 208 с.

5. Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов и др. 3-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 648 с.