

**ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЧНОСТИ И  
ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ**  
Методические указания к лабораторной работе

Описаны методы определения характеристик прочности и пластичности материалов с применением государственных стандартов на проведение испытаний на растяжение и требования, предъявляемые к оформлению протоколов испытаний. Приводится список учебной и специальной литературы, а также вопросы для контроля знаний студентов. В приложении даны значения механических характеристик некоторых конструкционных материалов разных классов.

Предназначены для выполнения лабораторных работ по сопротивлению материалов и механическим свойствам металлов студентами механических специальностей всех форм обучения.

*Цель работы: изучение поведения конструкционных материалов при испытании на растяжение; ознакомление со стандартными методиками определения характеристик прочности и пластичности.*

## ВВЕДЕНИЕ

Испытания на растяжение, при которых определяются наиболее важные свойства материала, являются основными среди других видов испытаний. Определяемые при этом характеристики используются как минимум в трёх случаях. *Во-первых*, для выполнения расчётов 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 стандартизованы<sup>1</sup>. ГОСТ 1497–84 распространяется на проведение испытаний при комнатной температуре, ГОСТ 9651–84 – при повышенной, а ГОСТ 11150–84 – при пониженной температурах. В стандартах даны определения механических характеристик, приведены типы образцов, изложены требования к испытательному оборудованию, описана методика проведения испытаний и обработки результатов эксперимента.

Настоящая работа преследует две цели. Первая: закрепление на практике изучаемого теоретического материала. Вторая: ознакомление с наиболее распространённым видом работ, проводимых заводской лабораторией механических испытаний и требованиями, предъявляемыми к ним в производственных условиях. Достигается это следующим. Лаборатория механических испытаний кафедры оснащена стандартным испытательным оборудованием, соответствующим современным требованиям, предъявляемым к заводским лабораториям. На этом же оборудовании выполняются научно-исследовательские работы профессорско-преподавательским составом и научными сотрудниками кафедры.

Тип и размеры применяемых образцов соответствуют требованиям стандарта. Протоколы испытаний составляются по форме, рекомендованной ГОСТ и принятой в заводских лабораториях.

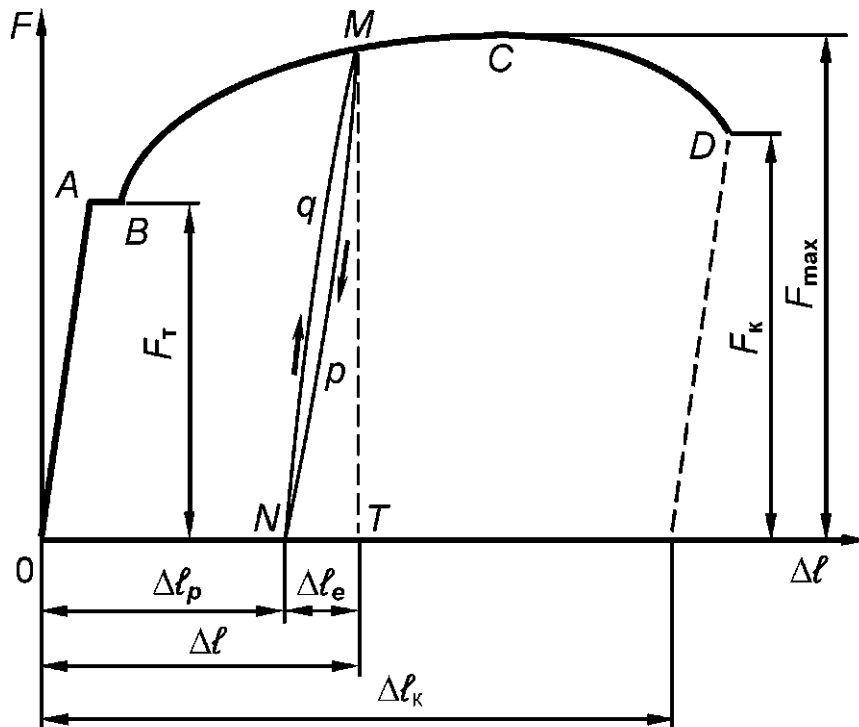
---

<sup>1</sup> Вероятно, одними из первых, кто производил испытания материалов на растяжение, были Леонардо да Винчи (1452–1519), Галилео Галилей (1564–1642), Эдме Мариотт (1620–1684), испытывавшие образцы из проволоки, камня, различных пород дерева, бумаги.

# 1. ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ

## 1.1. Машинные диаграммы растяжения

Вид машинной диаграммы растяжения<sup>2</sup> малоуглеродистой стали представлен на рис. 1. На диаграмме можно выделить несколько характерных участков:



ных участков:  $OA$  – упругих деформаций;  $AB$  – площадка текучести;  $BC$  – участок упрочнения;  $CD$  – участок снижения нагрузки.

На участке  $OA$  справедлив закон Гука – пропорциональная зависимость между усилием  $F$  и удлинением  $\Delta l$  (или напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$ :  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ). Этот участок используют для определения упругой постоянной материала – модуля нормальной упругости  $E = \sigma/\varepsilon$ .

На площадке текучести  $AB$  образец деформируется без увеличения нагрузки. Длина площадки текучести, выраженная в относительной деформации, составляет  $\varepsilon = 0,2-2,5 \%$ . Наличие площадки текучести характерно лишь для малоуглеродистых сталей, а также встречается у некоторых марок титановых сплавов и латуней. Иногда площадка начинается с "зуба текучести". Для сталей высокоуглеродистых, легированных, термически или механически обработанных, цветных металлов и сплавов, пластмасс площадки текучести не наблюдается (рис. 3, длина участка  $AB$  равна нулю, участок вырождается в точку). Участок упругих деформаций  $OA$  при испытании упомянутых материалов плавно переходит в участок упрочнения  $BC$ . Отсутствие площадки текучести затрудняет выявление предела текучести – характеристики чрезвычайно важной, поскольку она ог-

Рис. 1. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

<sup>2</sup> Диаграмму растяжения материала ввёл Жан Виктор Понселе (1788-1867). Он считал её важнейшей характеристикой материала и отметил, что площадь, ограниченная этой диаграммой и осью в определённом масштабе, равна отношению работы, необходимой для разрушения образца, к его объёму.

раничивает несущую способность. При нагрузке, соответствующей пределу текучести, материал в большинстве случаев не может считаться работоспособным с эксплуатационной точки зрения.

Если в какой-либо момент испытаний на участке упрочнения  $BC$ , например в точке  $M$  (см. рис. 1), снять нагрузку с образца, перо самописца прочертит линию  $MpN$  близкую к прямой, параллельной участку упругих деформаций  $OA$ <sup>3</sup>. При разгрузке удлинение  $\Delta l$  полностью не исчезает. Оно уменьшится на величину упругой части удлинения  $\Delta l_e$  (отрезок  $NT$ , см. рис. 1). При этом выделится пластическая (остаточная) деформация  $\Delta l_p$ , равная отрезку  $ON$ . Если вновь нагрузить образец, линия повторного нагружения  $NqM$  пройдет вблизи линии разгрузки  $MpN$ . Участок диаграммы  $MpNqM$  называется петлей гистерезиса. При дальнейшем увеличении силы пластическое деформирование будет происходить при нагрузке (ордината точки  $M$ ) значительно большей, чем при первоначальном нагружении (ордината точки  $A$ ). Произошло *упрочнение* материала – явление, давшее название участку  $BC$ . Это явление – изменение свойств материала в результате деформирования за пределом текучести иначе называют *наклёпом*.

Влияние наклёпа оценивается двояко. С одной стороны его роль отрицательна, т. к. снижается запас пластичности: в рассматриваемом случае при повторном нагружении может выделиться лишь деформация, равная разности  $(\Delta l_k - \Delta l)$ . С другой стороны можно считать явление наклёпа полезным, поскольку повышается напряжение перехода к пластическим деформациям. Упрочнение наклёпом применяют, например, для телефонных и телеграфных проволок, тросов подъёмных механизмов. В машиностроении распространён метод упрочняющей обработки – поверхностное пластическое деформирование ППД.

Участок  $BC$  ещё интересен тем, что здесь 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  $C$  наступает равновесие этих процессов, а после достижения  $F_{\max}$  при дальнейшем растяжении образца начинается участок  $CD$  снижения нагрузки, где геометрическое разупрочнение начинает преобладать. Деформация сосредоточивается только в области шейки<sup>4</sup>, а за её пре-

---

<sup>3</sup> Франтишек Иозеф Геретнер (1756–1832) установил: разгрузка подчиняется закону Гука; при вторичном нагружении напряжением того же знака пластические деформации возникают при напряжении, от которого производилась разгрузка, т. е. в результате нагружения за пределы пропорциональности границы справедливости закона Гука расширяются.

<sup>4</sup> Габриэль Ламе (1795–1870) заметил (1826) образование шейки при испытании образца на растяжение и его награв при деформировании за пределом пропорциональности.

делами размеры поперечного сечения перестают изменяться. Вследствие уменьшения площади в деформируемой части для дальнейшего удлинения образца нужна всё меньшая и меньшая сила, т. е. нагрузка падает. Однако истинные напряжения  $S$  (см. подраздел 1.3) в любом объёме образца продолжают увеличиваться. Деформирование на участке  $CD$  протекает на небольшой длине образца в образовавшемся *местном сужении* в виде шейки при уменьшающейся нагрузке  $F$ . В точке  $D$  наступает разрыв образца.

## 1.2. Напряжения, деформации, единицы измерения

Протяжённость (высота, длина) характерных участков машинных диаграмм растяжения зависит от свойств материала, размеров образцов и масштаба записи диаграммы, выбранного испытателем. Чтобы оценивать только **свойства материала** используют относительные величины, позволяющие абстрагироваться от размеров образца и масштабов диаграмм.

**Напряжение**<sup>5</sup>  $\sigma$  – отношение осевой растягивающей нагрузки  $F$  к начальной площади поперечного сечения рабочей части образца  $A_0$ ,  $\sigma = F/A_0$ .

**Истинное напряжение**  $S$  – отношение осевой растягивающей нагрузки  $F$  к текущей площади поперечного сечения рабочей части образца  $A$  в любой момент испытания,  $S = F/A$  (т. е. к изменяющейся площади).

**Абсолютное удлинение**  $\Delta\ell$  – приращение начальной расчётной длины образца в любой момент испытания  $\Delta\ell = \ell - \ell_0$ .

**Относительное удлинение** – отношение абсолютного удлинения  $\Delta\ell$  к первоначальной длине  $\ell_0$   $\varepsilon = \Delta\ell/\ell_0$ .

**Деформация упругая** – деформация исчезающая после снятия нагрузки. Пример упругой деформации – отрезок  $NT$  (см. рис. 1). 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  $ON$  (см. рис. 1).

**Деформация полная** – сумма упругой и пластической составляющих

$$\Delta\ell = \Delta\ell_e + \Delta\ell_p; \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p.$$

Пример полной деформации – отрезок  $OT$  на рис. 1.

<sup>5</sup> Понятия о напряжении и деформации установлены Огюстеном Луи Коши (1789–1857) в 1822 г. и Барресен-Венаном (1797–1886) в 1845 г.

Для оценки изменения размеров поперечного сечения в ходе испытаний используют *относительное сужение поперечного сечения*

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0}. \quad (1)$$

Для круглого сечения удобно применение формулы  $\psi = 1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^2$ .

Формулы, связывающие истинные и условные напряжения, а также различные выражения деформации можно найти в справочной и специальной литературе.

Линейные размеры в машиностроении измеряются в миллиметрах (мм); при расчётах в международной системе СИ представляются в метрах (м). Площадь в технической системе вычисляется в мм<sup>2</sup>; в системе СИ – м<sup>2</sup>. Усилия в технической системе измеряются в килограммах силы – (кгс); в системе СИ – ньютонах (Н) (1 кгс = 9,80665 Н).

Напряжения в технической системе вычисляются в кгс/мм<sup>2</sup>; в системе СИ – Н/м<sup>2</sup> = Па. Применяется кратная единица – мегапаскаль, 1 МПа = 10<sup>6</sup> Па. Соотношение между единицами напряжения 1 кгс/мм<sup>2</sup> = 9,807 МПа.

### 1.3. Истинная диаграмма растяжения

Все механические характеристики, которыми оцениваются свойства материала (см. подраздел 2), определяют по отношению к начальным размерам образца: площади  $A_0$ , 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  $F - \Delta l$  в координаты «напряжение  $\sigma$  – относительная деформация  $\varepsilon$ »  $\sigma = f(\varepsilon)$  (рис. 2), то последняя в некотором масштабе повторит машинную диаграмму. Истинные  $S$  напряжения начинают отличаться (в бóльшую сторону) от условных  $\sigma$  с первого момента нагружения (уменьшается площадь поперечного сечения образца). Истинная диаграмма растяжения  $S = \varphi(\varepsilon)$  – функция неубывающая. Существенные отличия диаграмм истинных и условных напряжений становятся заметными с началом пластической деформации (см. рис. 2). Считают, что до достижения нагрузкой своего максимального значения  $F_{\max}$  (см. рис. 2, напряжение  $\sigma_n$ ) образец пластически деформируется *равномерно* (см. рис. 2, 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 (см. рис. 2, 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 ус-

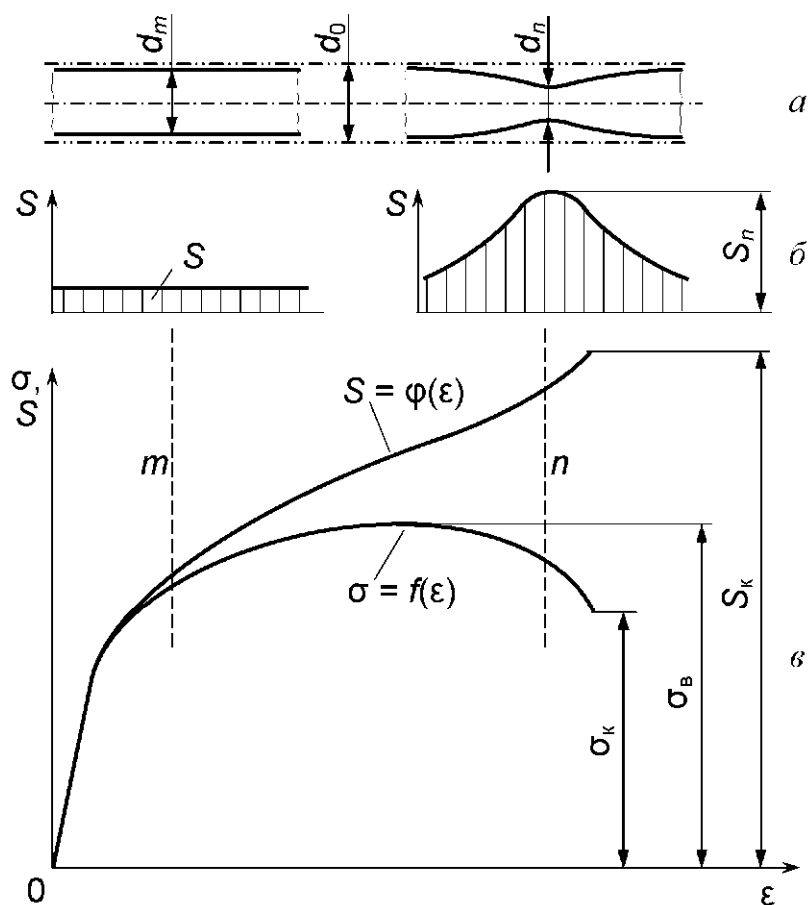


Рис. 2. Диаграммы истинных  $S = \varphi(\epsilon)$  и условных  $\sigma = f(\epsilon)$  напряжений (в). Распределение истинных напряжений по длине образца при равномерном (m) и сосредоточенном (n) деформировании (б). Изменение конфигурации образца на различных стадиях деформирования (а)

ловных  $S_n \gg \sigma_n$ . В момент разрушения превышение  $S_k$  над  $\sigma_B$  может достигать 30-50 %.

В исследовательской практике используют истинную диаграмму растяжения, построенную в координатах  $S - \psi$ , или  $S - e$ , где  $\psi$  – относительное сужение поперечного сечения образца (1);  $e$  – относительное истинное удлинение  $e = \ln(l/l_0)$ . Истинная диаграмма более информативна, что имеет немалое значение для правильного понимания основных закономерностей сопротивления пластической деформации. Истинные напряжения имеют больший

физический смысл, чем условные. Их используют в существующих и вновь создаваемых методиках расчёта при сложном напряжённом состоянии, действии циклических нагрузок и др.

## 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

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

### 2.1. Характеристики прочности

К характеристикам прочности относятся:  
предел текучести физический;

предел текучести условный;  
временное сопротивление (предел прочности);  
предел пропорциональности;  
предел упругости.

2.1.1. **Предел текучести физический**  $\sigma_T$  – напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки. Вычисляется физический предел текучести по формуле

$$\sigma_{\delta} = \frac{F_{\delta}}{A_0}, \quad (2)$$

где  $F_T$  – нагрузка, соответствующая площадке текучести (см. рис. 1);  
 $A_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца.

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

Порядок определения:

- рассчитать допуск на величину остаточного удлинения  $\Delta\ell_{0,2} = 0,002 \cdot \ell_0$ ; где  $\ell_0$  – начальная расчётная длина образца (или база тензодатчика);
- в масштабе оси деформаций машинной диаграммы из начала координат отложить отрезок  $\Delta\ell_{0,2}$  (см. рис. 3, а);
- параллельно участку упругой деформации провести прямую до пересечения с диаграммой растяжения;
- измерить ординату  $F_{0,2}$  диаграммы растяжения и вычислить нагрузку, соответствующую точке пересечения прямой с диаграммой;
- вычислить условный предел текучести

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}. \quad (3)$$

2.1.3. **Временное сопротивление (предел прочности)**<sup>6</sup>  $\sigma_B$  – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $F_{\max}$ , предшествующей разрыву образца.

Определяется делением усилия  $F_{\max}$  на первоначальную площадь поперечного сечения образца (см. рис. 1)

$$\sigma_{\hat{a}} = \frac{F_{\max}}{A_0}. \quad (4)$$

Обратим особое внимание на характеристики сопротивления малым пластическим деформациям.

**Предел упругости** – наибольшее напряжение, до которого материал не получает остаточных деформаций.

---

<sup>6</sup> Введено в практику (1773) Семёном Кирилловичем Котельниковым (1723–1806). Академик Петербургской Академии наук, математик, механик.



*Предел пропорциональности* – наибольшее напряжение, превышение которого вызывает отклонение от закона Гука.

Анализ диаграмм растяжения, записанных с высокой точностью измерения деформаций, показывает, что отступление от закона Гука – прямой  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  для многих материалов наступает уже на ранних стадиях нагружения. Поэтому численные значения пределов пропорциональности и упругости зависят от условно принятой степени приближения, с которой начальный участок можно рассматривать, как прямую. Стандартом принято пределом пропорциональности считать

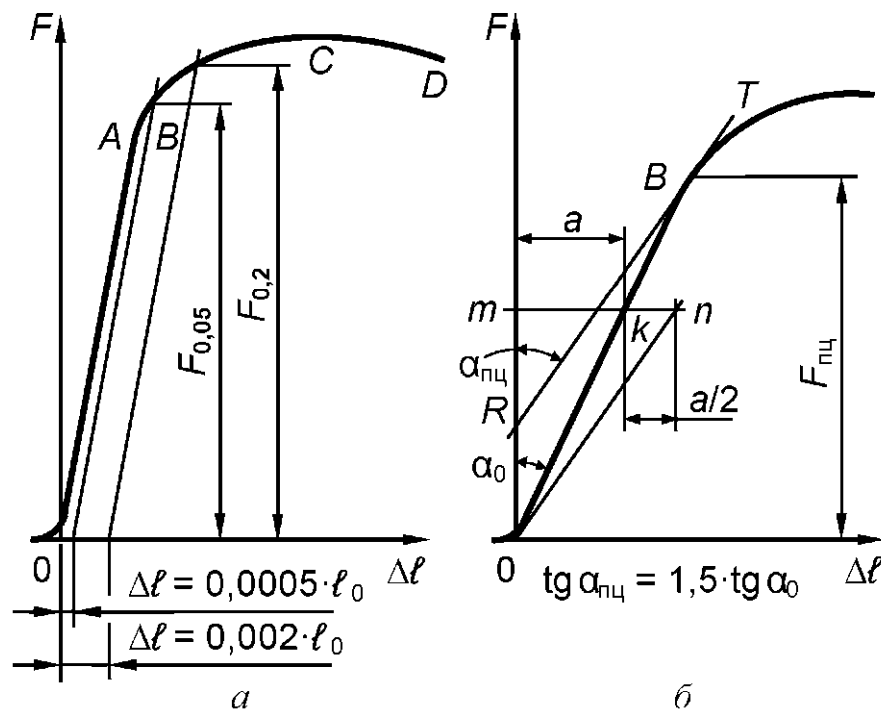


Рис. 3. Схемы к определению предела упругости, условного предела текучести (а) и предела пропорциональности (б)

напряжение, при котором так называемый “мгновенный” модуль упругости  $E = d\sigma/d\varepsilon$  (модуль упругости в текущий момент испытания; соответствует тангенсу угла наклона касательной к диаграмме с осью  $\varepsilon$ ) уменьшается от своего начального значения на 50%. Обе характеристики – предел упругости и предел пропорциональности близки по смыслу и, как установлено ещё Баушингером<sup>7</sup> в

1879–1886 гг., различие между ними настолько невелико, что их можно считать совпадающими.

**2.1.4. Предел упругости**  $\sigma_{0,05}$  – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % длины участка рабочей части образца, равного базе тензометра.

Методика определения такая же, как и для предела текучести условного, но допуск на остаточную деформацию в 4 раза меньше (см. рис. 3, а)

$$\sigma_{0,05} = \frac{F_{0,05}}{A_0}. \quad (5)$$

**2.1.5. Предел пропорциональности**  $\sigma_{пц}$  – напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением

<sup>7</sup> Иоган Баушингер (1834-1893) – немецкий математик, физик, механик. Изобрёл зеркальный тензомер высокой чувствительности с помощью которого были экспериментально определены модули упругости, коэффициенты Пуассона. Он ввёл понятия предела упругости, пропорциональности, текучести.

нием достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой "нагрузка – удлинение" в точке  $F_{\text{пл}}$  с осью нагрузок увеличивается на 50 % от своего значения на упругом (линейном) участке.

Порядок определения:

- на произвольном уровне по высоте диаграммы в пределах упругого участка или на его продолжении проводят прямую  $mn$ , параллельную оси абсцисс (см. рис. 3, б);
- измеряют длину  $a$  отрезка  $mk$  между осью ординат и диаграммой растяжения; справа от диаграммы откладывают отрезок  $kn = a/2$ ;
- из начала координат в точку  $n$  проводят луч  $On$  и параллельно ему касательную  $RT$  к диаграмме растяжения (при этом  $\text{tg } \alpha_{\text{пл}}$  будет на 50 % превышать  $\text{tg } \alpha$ );
- ордината точки  $B$  касания с диаграммой определит искомую нагрузку  $F_{\text{пл}}$ . Предел пропорциональности вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{F_{\text{пл}}}{A_0}. \quad (6)$$

2.1.6. **Истинное сопротивление разрыву**  $S_k$  – напряжение, вычисляемое путём деления разрушающего усилия  $F_k$  (см. рис. 1, ордината точки  $D$ ) на действительную площадь сечения в шейке  $A_k$

$$S_k = \frac{F_k}{A_k}, \quad (7)$$

Площадь  $A_k$  вычисляется по диаметру  $d_k$  (рис. 4).

## 2.2. Характеристики пластичности

К ним относятся:

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

Материалы, разрушению которых предшествует возникновение значительных остаточных деформаций, называют пластичными. Пластичность может быть охарактеризована остаточным относительным удлинением образца, доведённого при растяжении до разрыва и остаточным относительным сужением. Чем больше эти величины, тем пластичнее материал.

2.2.1. **Относительное удлинение после разрыва**  $\delta$  – отношение приращения расчётной длины образца ( $l_k - l_0$ ) после разрушения к начальной расчётной длине  $l_0$ , выраженное в

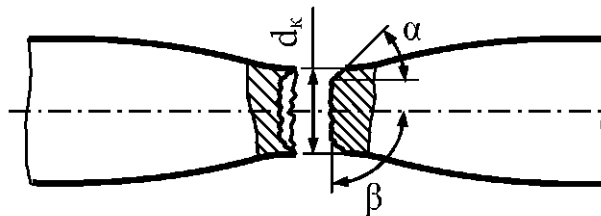


Рис. 4. Пластичный характер разрушения с образованием шейки и разрывом типа "конус – чашка". В центре разрушение развивалось путём отрыва (угол  $\beta$  близок к прямому), на периферии – путём сдвига (угол  $\alpha$  близок к  $45^\circ$ )

процентах.

Относительное удлинение образца после разрыва в процентах вычисляют по формуле

$$\delta_k = \frac{\ell_k - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100. \quad (8)$$

В протоколе испытаний (Приложение, табл. 1) должно быть указано, на какой расчётной длине определено относительное удлинение после разрыва  $\delta$ . Например, при испытании цилиндрических образцов с пятикратной расчётной длиной относительное удлинение после разрыва обозначают  $\delta_5$ , а с десятикратной –  $\delta_{10}$ .

**2.2.2. Относительное равномерное удлинение  $\delta$**  – 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.

**2.2.3. Относительное сужение после разрыва  $\psi$**  – отношение разности  $A_0$  и минимальной  $A_k$  площади поперечного сечения после разрушения к начальной площади поперечного сечения образца  $A_0$ , выраженное в процентах.

Относительное сужение после разрыва в процентах вычисляют по формуле

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100. \quad (9)$$

где  $A_k$  для цилиндрических образцов вычисляют по результатам измерения диаметра  $d_k$  в шейке (см. рис. 4) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

*Примечание.* В учебниках, справочной литературе и нормативной документации встречается также иное по сравнению с приведённым в ГОСТ 1497–84 обозначение характеристик прочности и пластичности:

$\sigma_{pr}$  – предел пропорциональности;

$\sigma_e$  – предел упругости; индекс e от *elastic*;

$\sigma_y$  – предел текучести; индекс y от *yield* (англ.) – текучесть;

$\sigma_b$ ,  $\sigma_u$  – предел прочности (временное сопротивление); индекс b от *break* (англ.) и *bruch* (нем.) – разрушать, ломать; индекс u от *ultimate* (англ.) – предельный;

$\varepsilon_r$ ,  $\psi_r$  относительные остаточные удлинение и сужение (соответственно) при разрыве; индекс r от *rest* (англ.) – остаток.

### 3. ОБРАЗЦЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

**3.1. Образцы.** Для определения прочности металла при растяжении образец, изготовленный из испытуемого материала, с помощью испытательной машины растягивается путём приложения продольной силы к головкам образца вплоть до разрыва его на две отдельные части. Для разрывных испытаний чаще всего применяют цилиндрические образцы (рис. 5), но в ряде случаев пользуются также и плоскими образцами, особенно при испытании листового металла. Размеры и соотношения между размерами разрывных образцов могут быть самыми разнообразными; однако для определения механических характеристик испытуемого материала, сопоставимых с характеристиками других материалов, а также полученных в других лабораториях, необходимо изготавливать образцы в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84.

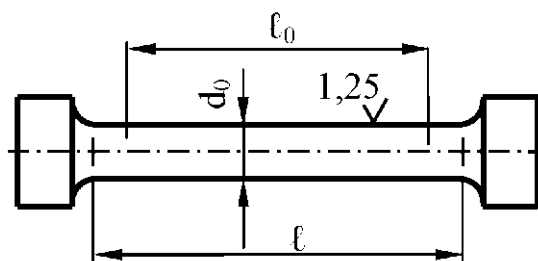


Рис. 5. Основные размеры цилиндрических образцов

**Рабочая длина образца  $l$**  – часть образца с постоянной площадью поперечного сечения между его головками или участками для захвата.

**Начальная расчётная длина образца  $l_0$**  – участок рабочей длины образца между нанесёнными метками до испытания, на котором определяется удлинение (см. рис. 5).

**Конечная расчётная длина образца  $l_k$**  – длина расчётной части после разрыва образца.

**Начальный диаметр образца  $d_0$**  – диаметр рабочей части цилиндрического образца до испытания.

**Диаметр образца после разрыва  $d_k$**  – минимальный диаметр рабочей части цилиндрического образца после разрыва.

**Начальная площадь поперечного сечения образца  $A_0$**  – площадь поперечного сечения рабочей части образца до испытания.

**Площадь поперечного сечения образца после разрыва  $A_k$**  – минимальная площадь поперечного сечения рабочей части образца после разрыва.

Для испытания на растяжение применяют цилиндрические образцы диаметром 3 мм и более (до 25 мм). Основными считают образцы диаметром 10 мм. В цилиндрических образцах должно быть выдержано соотношение между расчётной длиной образца  $l_0$  и его диаметром до испытаний  $d_0$ : у длинных образцов  $l_0 = 10d_0$ , у коротких  $l_0 = 5d_0$ . Применение коротких образцов предпочтительнее. Эти соотношения можно выразить в несколько иной форме. Учитывая соотношения между площадью  $A_0$  и диаметром  $d_0$

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad d_0 = \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 1,13\sqrt{A_0}.$$

получим для длинных образцов  $\ell_0 = 11,3\sqrt{A_0}$ , (10)

а для коротких образцов  $\ell_0 = 5,65\sqrt{A_0}$ . (11)

Плоские образцы применяют толщиной 0,5 мм и более (до 25 мм). Для сопоставимости результатов испытаний образцов с круглой и некруглой формами поперечного сечения длину последних определяют, используя соотношения (10) и (11).

Форма и размеры головок образцов определяются в основном конструкцией зажимных приспособлений, применяемых испытательных машин. Несколько вариантов их приведены в ГОСТ 1497–84. Там же приведены требования к предельным отклонениям по размерам рабочей части образцов, чтобы исключить влияние головок на характер распределения напряжений в пределах расчётной длины образца, его рабочая длина  $\ell$  должна превышать расчётную  $\ell_0$  на 1-2 диаметра (принцип Сен-Венана, изложенный им в 1853 г.: в сечениях, достаточно удалённых от мест приложения сил, напряжения мало зависят от способа нагружения). Поскольку на результаты испытаний оказывает влияние состояние поверхности образца, ГОСТ 1497–84 накладывает ограничения на режимы механической обработки, шероховатость поверхности.

### 3.2. Испытательные машины, измерительные приборы

Для испытаний применяют разрывные машины<sup>8</sup> с механическим или гидравлическим приводом. Принцип работы и основные элементы испытательных машин любого типа следующие. Подвижная траверса 1 (рис. 6) с закреплённым на ней активным захватом 2, перемещаясь вниз, создаёт в образце 3 усилие растяжения  $F$ , которое передаётся через пассивный захват 4 силоизмерителю 5. Работа силоизмерителя основана либо на отклонении маятника-противовеса через систему рычагов<sup>9</sup>, либо (как показано на рисунке) используется метод тензометрии. Нагрузка отсчитывается по шкале 6 силоизмерителя. На диаграммном аппарате 7 вычерчивается машинная диаграмма. Привод диаграммного аппарата осуществляется либо механической передачей от стрелки силоизмерителя (координата  $F$ ) и перемещения подвижной траверсы (координата  $\Delta\ell$ ), либо, как показано на рисунке, средствами электроники: силоизмеритель 5, тензомер 8 → усилители → электродвигатели → перо самописца. На станине 9 крепятся электропривод испытательной машины, перечисленные выше узлы и органы управления.

<sup>8</sup> В России первая машина для испытаний на растяжение была построена в 1824 г. по инициативе Г. Ламе на Петербургском механическом заводе.

<sup>9</sup> Первые машины рычажного типа построены Р. Реомюром (1720 г.) и П. Мушенброком (1729г.)

Измерительные приборы: штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм, микрометр с ценой деления 0,01 мм, тензометр с ценой деления 0,002 мм для определения предела пропорциональности и предела упругости и 0,02 мм для определения предела текучести.

#### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ 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 состоять из следующих разделов.

Наименование и цель работы.

Теоретическая часть, содержащая сведения о характеристиках прочности и пластичности и их определения.

В разделе "Оборудование, образцы" указать марку 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).

Изложение результатов экспериментов, их обработка, анализ полученных данных.

Заключение (выводы) по работе.

К отчету прилагаются обработанные диаграммы растяжения образцов в нормализованном и закаленном состояниях. Протокол испытаний оформляется в соответствии с табл. 1 приложения.

#### 5. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. При вычислении *скорости перемещения захвата* во время подготовки испытания необходимо ориентироваться на ограничения, накладываемые ГОСТ 1497–84 на *скорость нагружения* и *скорость относительной деформации*. Они зависят не только от скорости перемещения за-

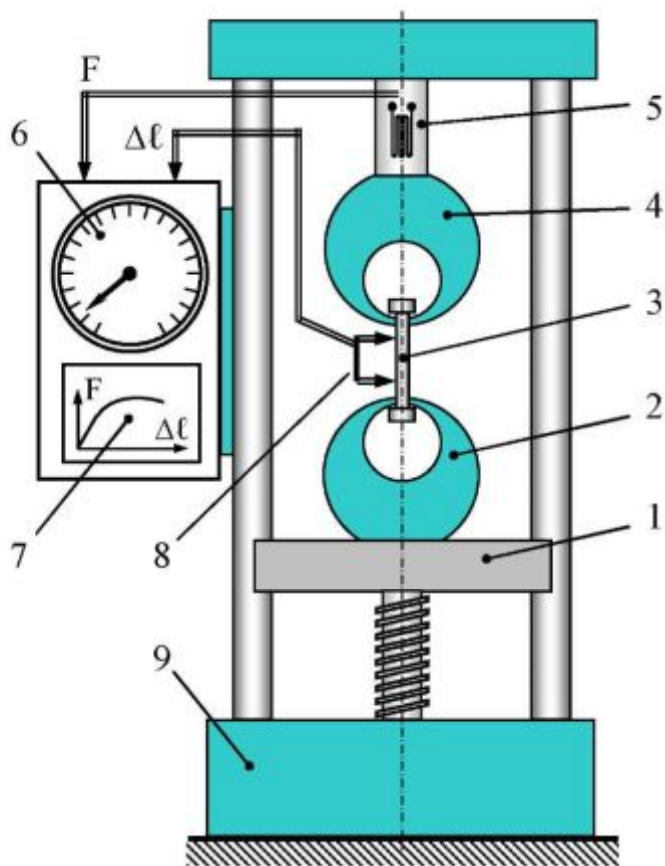


Рис. 6. Схема разрывной машины

хвата, но и от податливости испытательной машины и образца (длины, площади поперечного сечения, модуля упругости материала).

Для нахождения характеристик сопротивления малым пластическим деформациям – предела текучести, предела упругости, определяемых по участку диаграммы в непосредственной близости к упругому  $OA$  (см. рис. 1 и 2) скорость нагружения задаётся в единицах [напряжение/время]:  $V = 1\text{--}30$  МПа/с.

Для определения временного сопротивления скорость задаётся в единицах [длина образца/время]:  $V < 0,4\ell_0$  мм/мин.

В соответствие с предварительно выполненными расчётами применительно к стальному образцу  $\ell_0 = 50$  мм,  $d_0 = 10$  мм установить скорость перемещения захвата  $V < 0,5$  мм/мин.

5.2. Измерение диаметра рабочей части до испытаний проводят микрометром с точностью 0,01 мм.

5.3. Начальную расчётную длину  $\ell_0$  с погрешностью до 1% ограничивают по рабочей длине образца кернами, рисками или иными метками.

5.4. Заправить диаграммный аппарат бумагой. Выбрать масштаб диаграммы с учётом максимально достижимого усилия (по оси ординат). При определении предела текучести физического  $\sigma_T$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  ограничения на масштаб по оси удлинения не вводятся, поскольку нагрузку  $F_T$  можно определить даже по кратковременной остановке стрелки силоизмерителя, а максимальную нагрузку  $F_{\max}$  – по показаниям контрольной стрелки. Для определения условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  масштаб диаграммы по оси удлинения должен быть не менее 50:1. Для определения предела упругости  $\sigma_{0,05}$  масштаб диаграммы по оси удлинения должен быть не менее 100:1 при базе тензометра 50 мм и более, и не менее 200:1, если база тензометра менее 50 мм.

5.5. Проведите испытания на разрыв образцов из пластичного и хрупкого материалов с записью полной диаграммы растяжения.

5.6. Снимите с барабана испытательной машины бумагу с записью диаграммы растяжения и в соответствие с целью работы определите характеристики прочности и пластичности.

5.7. Для определения конечной расчетной длины образца  $\ell_k$  разрушенные части образца плотно складывают так, чтобы их оси образовывали прямую линию. Определение конечной расчетной длины образца  $\ell_k$  проводится измерением расстояния между метками, ограничивающими расчётную длину.

5.8. Измерение минимального диаметра  $d_k$  проводится штангенциркулем в шейке (см. рис. 4) в двух взаимно перпендикулярных направлениях с отсчётом по нониусу с точностью до 0,1 мм.

5.9. Полученные величины характеристик прочности и пластичности округлите (приложение, табл. П2).

5.10. Исходные данные и результаты испытаний внесите в протокол испытаний (приложение, табл. П1).

5.11. Нарисуйте вид разрушенного образца в месте разрыва.

5.12. Сопоставьте найденные механические характеристики испытанных материалов с данными, выписанными из стандартов и справочников по конструкционным материалам. Найдите отклонение в процентах найденных характеристик от табличных.

5.13. Оцените влияние закалки на вид кривой растяжения и величину предела текучести.

5.14. Ориентируясь на диаграммы растяжения, помещённые на стенде, сделайте вывод о влиянии закалки на характеристики прочности и пластичности,

5.15. Ориентируясь на таблицу механических характеристик сталей различных марок, помещённую на стенде, сделайте вывод о влиянии содержания углерода в стали на характеристики прочности и пластичности.

## 6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какими механическими характеристиками оценивается прочность материала, а какими – пластичность?
2. В какой момент растяжения образца начинает образовываться местное сужение – шейка?
3. Какие формы поперечного сечения образцов рекомендует ГОСТ?
4. Какие соотношения между продольными и поперечными размерами образцов рекомендует ГОСТ?
5. Дайте определение рабочей и расчётной длины образца. В чём отличие между ними и чем оно обусловлено?
6. Для каких конструкционных материалов диаграмма растяжения может иметь площадку текучести?
7. В пределах какого участка диаграммы растяжения сохраняет силу закон Гука?
8. Хрупкое разрушение отличается от пластичного отсутствием шейки. Как, по Вашему мнению, выглядит диаграмма растяжения образца с хрупким характером разрушения?
9. Дайте определение пределу текучести физическому. Укажите его размерность.
10. Дайте определение пределу текучести условному. Укажите его размерность.
11. Опишите последовательность процедур, выполняемых при определении предела текучести условного.
12. Какая из характеристик прочности имеет большее значение, предел упругости или предел текучести условный? Ответ сопроводите рисунком и комментарием.



13. Дайте определение временному сопротивлению. Укажите его размерность.
14. Дайте определение истинному сопротивлению разрыву. Укажите его размерность.
15. Какая из характеристик прочности имеет большее значение, временное сопротивление или истинное сопротивление разрыву? Ответ сопроводите рисунком и комментарием.
16. Что называется пределом пропорциональности? Укажите его размерность. Какова последовательность операций для его определения?
17. Как будет изменяться разность между временным сопротивлением и истинным сопротивлением разрыву с уменьшением пластичности материала? Ответ сопроводите рисунком и пояснением.
18. Назовите ориентировочные значения характеристик прочности и пластичности конструкционных сталей, применяемых в общем машиностроении.
19. Приведите формулы, по которым вычисляются характеристики пластичности, укажите их размерность.
20. Расшифруйте записи  $\delta_5$ ,  $\delta_{10}$ .
21. Вводятся ли ограничения на масштаб записи диаграммы растяжения по оси деформаций для определения физического предела текучести и временного сопротивления? Ответ обоснуйте.
22. Вводятся ли ограничения на масштаб записи диаграммы растяжения по оси деформаций для определения предела упругости? Ответ обоснуйте.
23. В чём заключается явление наклёпа материала? Каковы последствия наклёпа?
24. Известно, что, начиная с первого момента растяжения образца, все его поперечные сечения в пределах расчётной длины начинают уменьшаться. Продолжается ли этот процесс вплоть до разрыва? Ответ обоснуйте, сопроводите рисунком.
25. Дайте определения деформациям упругой и пластической.
26. Если в момент достижения максимальной нагрузки  $F_{\max}$  на образце сравнить истинное  $S$  и условное  $\sigma$  напряжения, то какое из них будет выше?
27. С какого момента испытаний в образце из пластичного металла начинает образовываться местное сужение? Как называется эта область образца?
28. При обработке диаграммы растяжения малоуглеродистой стали (см. рис. 1) определили как физический, так и условный пределы текучести. В каком соотношении между собой их числовые значения?
29. Перечислите характеристики прочности, вычисление которых невозможно без точного знания расположения начала координат диаграммы растяжения.

30. Для вычисления каких механических характеристик не используют значения начальной площади поперечного сечения образца?
31. Какие механические характеристики вычисляют с использованием сведений о размерах разрушенного образца?
32. Какие механические характеристики определяют без использования сведений о начальных размерах образца?
33. Опишите вязкий характер разрушения образца из пластичного материала и сделайте соответствующий эскиз.

## **7. ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ 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 её металлических частей. Испытательную машину включайте только после получения разрешения преподавателя и в его присутствии.

3. При разрушении образца возможен разлёт осколков, поэтому проследите, чтобы защитный экран был закрыт.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. Изд. стандартов, 1987. – 37 с.

2. Писаренко Г. С., Агарев В. А. и др. Сопротивление материалов. – Киев: Вища школа, 1979. – 694 с.

3. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 350 с.

4. Конструкционные материалы: Справочник / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Берне и др.; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

5. Малинин Н. Н. Кто есть кто в сопротивлении материалов / Под ред. В. Л. Данилова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э Баумана, 2000. – 248 с.

6. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. – 512 с.

Таблица П.2

## Округление результатов испытаний

Характеристика механических свойств	Интервал значений характеристики	Округление
Предел пропорциональности. МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	До 100 (10,0)	До 1,0 (до 0,1)
Предел упругости. МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Св. 100 до 500 (св. 10 до 50)	До 5,0 (до 0,5)
Предел текучести. МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ) Временное сопротивление. МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Св. 500 (св. 50)	До 10 (до 1)
Относительное удлинение после разрыва, %	До 10,0	До 0,1
Относительное сужение площади поперечного сечения после разрыва, %	Св. 10,0 до 25,0 Св. 25,0	До 0,5 До 1,0

Таблица П.3

Механические характеристики  
некоторых конструкционных материалов

Марка материала	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_{в}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi_k$ , %	Область применения
<b>Стали</b>					
Сталь углеродистая обыкн. качества Ст 3	230	–	25		Прокат сортовой или фасонный
Углеродистая качественная конструкционная сталь 30	295	490	21	50	Детали общего машиностроения. Прокат
Пружинная сталь общего назначения. Сталь 65 Г	785	980	8	30	Пружины механизмов и машин
Среднелегированная высокопрочная сталь 30ХГСН2А	1400	1750	8	–	Высоконагр. детали (цилиндры, балки, шпильки, оси, болты)
Высоколегированная высокопрочная сталь Н8К18М14	3400	3500	1	3	Криогенное машиностроение. Топливные баки ракетных двиг. Медицинские микроинструменты
<b>Цветные сплавы</b>					
Алюминиевый сплав Д16	320	450	19	–	Силовые элементы конструкц. самолетов

Латунь (медный сплав) ЛАН 39-3-2	235- 345	635- 435	7-11	20	Морское судостроение. Химически стойкие изделия.
Титановый сплав ВТЗ-1	1110	1140	14	31	Судостроение. Авиастроение. Газовая, нефтяная, химическая, пищевая, медицинская промышленность.
<b>Чугуны</b>					
	Пределы прочности (кгс/мм <sup>2</sup> ) при				
	растяж.	сжатии	изгибе	$\delta$ , %	
Серый СЧ 24	24	100	44	0,5	Гильзы карбюраторн. двигателей
Высокопрочный с шаровидным графитом ВЧШГ 60		200	60		Детали, работающие в условиях абразивного износа
Ковкий КЧ 37-12	37			12	Обладает повышенным пласт. свойствами

Примечание. Обратите внимание на соответствие марки чугуна, механическим характеристикам и их размерностям.

Таблица П.4

Пределы прочности при растяжении и плотность высокопрочных нитей и нитевидных кристаллов, используемых при создании композиционных материалов

Материал	$\sigma_{вр}$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Вольфрамовая проволока	4 000	19 300
Стекловолокно	3500-4600	2 500
Бороволокно	3 400	2 200-2 600
Карбидное волокно	3 400	3 000
Промышленное углеродное волокно	2 400	1 870
Усы (нитевидные кристаллы)		
Графит	до 20 000	2 200
Сапфир (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	до 15 000	4 000
Асбест	6 000	3 400

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Протокол испытаний на растяжение цилиндрических образцов на машине \_\_\_\_\_

Маркировка		
Начальный диаметр $d_0$ , мм.		
Диаметр после разрыва, $d_k$ , мм.		
Начальная расчетная длина $l_0$ , мм.		
Конечная расчетная длина $l_k$ , мм.		
Максимальная нагрузка, $F_{max}$ , Н (кГс)		
Нагрузка при пределе те- кучести, $F_{0.2}$ , Н (кГс)		
Нагрузка при пределе про- порциональности, $F_{тп}$ , Н (кГс)		
Нагрузка при пределе уп- ругости, $F_{0.05}$ , Н (кГс)		
Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа (кГс/мм <sup>2</sup> )		
Предел текучести $\sigma_T, \sigma_{0.2}$ , МПа (кГс/мм <sup>2</sup> )		
Предел пропорционально- сти $\sigma_{тп}$ , МПа (кГс/мм <sup>2</sup> )		
Предел упругости $\sigma_{0.05}$ , МПа (кГс/мм <sup>2</sup> )		
Относительное удлинение после разрыва $\delta$ , %		
Относительное сужение после разрыва $\psi$ , %		
Примечание		