

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ  
КУРГАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ по спецкурсу для студентов направлений 551400 (15.02; 15.05; 15.06); 552900 (12.01; 12.02); 551800 (12.05)

Часть I

Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

Спецкурс "Механические испытания материалов"

Составили: В.А. Бубнов - проф., докт. техн. наук (работа 28),  
С.Г. Кустечко - доц., канд. техн. наук (работы 25, 26),  
С.Г. Тетрин - асс., канд. техн. наук (работа 27).

Утверждено на заседании кафедры 24 02 94

Рекомендовано методическим советом института

24

мая

1994 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Механические испытания материалов являются неотъемлемой частью науки о прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций самого различного назначения.

Спецкурс "Механические испытания материалов" направлен на более углубленное изучение студентами механических свойств материалов, методов их испытаний. Значительное место в нем отводится экспериментальному исследованию напряженно-деформированного состояния элементов конструкций.

Единицы силы и механического напряжения, встречающиеся в методических указаниях

1 килограмм-сила (кгс); 1 ньютон (Н); 1 меганьютон (МН);

1 паскаль (Па); 1 мегапаскаль (МПа).

1 кгс = 10 Н; 1 МН =  $10^6$  Н; 1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>;

1 МПа =  $10^6$  Па = 1 МН/м<sup>2</sup> = 10 кгс/см<sup>2</sup>; 1 кгс/мм<sup>2</sup> = 100 кгс/см<sup>2</sup>.

## РАБОТА 25

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы - опытное определение твердости металлов по Бринеллю и по Роквеллу.

#### Основные положения

Одним из важнейших механических испытаний металлов является испытание их на твердость.

Испытание на твердость производится на поверхности образца и осуществляется за счет внедрения в металл другого более твердого, чем исследуемый металл, тела. Таким образом, твердость определяется в результате сообщения металлу пластической деформации в пределах малого объема металла.

Твердостью называется сопротивление деформации на поверхности тела при заранее установленном механическом воздействии другого, более твердого тела заданной формы и размеров.

Величины, характеризующие твердость называются числами твер-

дости, которые определяются разными способами. Широкое распространение получили такие способы, как статическое вдавливание стального шарика (определение твердости по Бринеллю) и алмазных конусов или пирамид (определение твердости по Роквеллу и по Виккерсу). Из других способов можно отметить упругую отдачу падающего бойка (определение твердости по Шору), царапание металлов алмазным конусом.

В последнее время получили распространение метод определения микротвердости, который предназначен для определения твердости очень малых объемов материалов. Его применяют для измерения твердости мелких деталей, тонкой проволоки или ленты, твердых поверхностных слоев и т.д.

### Определение твердости по Бринеллю

Сущность способа состоит в том, что в образец вдавливают стальной закаленный шарик определенного диаметра  $D$  (рис. 25.1).

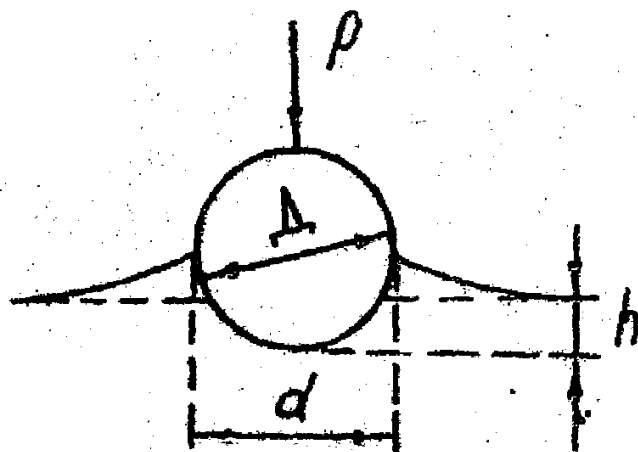


Рис. 25.1

Шарик выдерживает определенное время под нагрузкой  $P$ , в результате чего на поверхности остается лунка диаметром  $d$ . Отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка называется числом твердости по Бринеллю

$$HB = \frac{P}{F} \quad (\text{кгс/мм}^2) \quad (25.1)$$

Площадь поверхности отпечатка можно определить по формуле

$$F = \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (\text{мм}^2) \quad (25.2)$$

Центр отпечатка должен находиться на расстоянии не менее

диаметра шарика от края образца, а расстояние от центра соседнего отпечатка должно быть не менее  $2d$ . Диаметр отпечатка измеряют по двум взаимно-перпендикулярным направлениям, после чего подсчитывается среднее значение. При определении твердости образца следует нанести 2-3 отпечатка. Измерение отпечатка производится с помощью микроскопа. Для быстрого определения по измеренному отпечатку чисел твердости используются таблицы /2/.

Измерение твердости по методу Бринелля производится на приборе ТБ 5004, схема которого представлена на рис. 25.2.

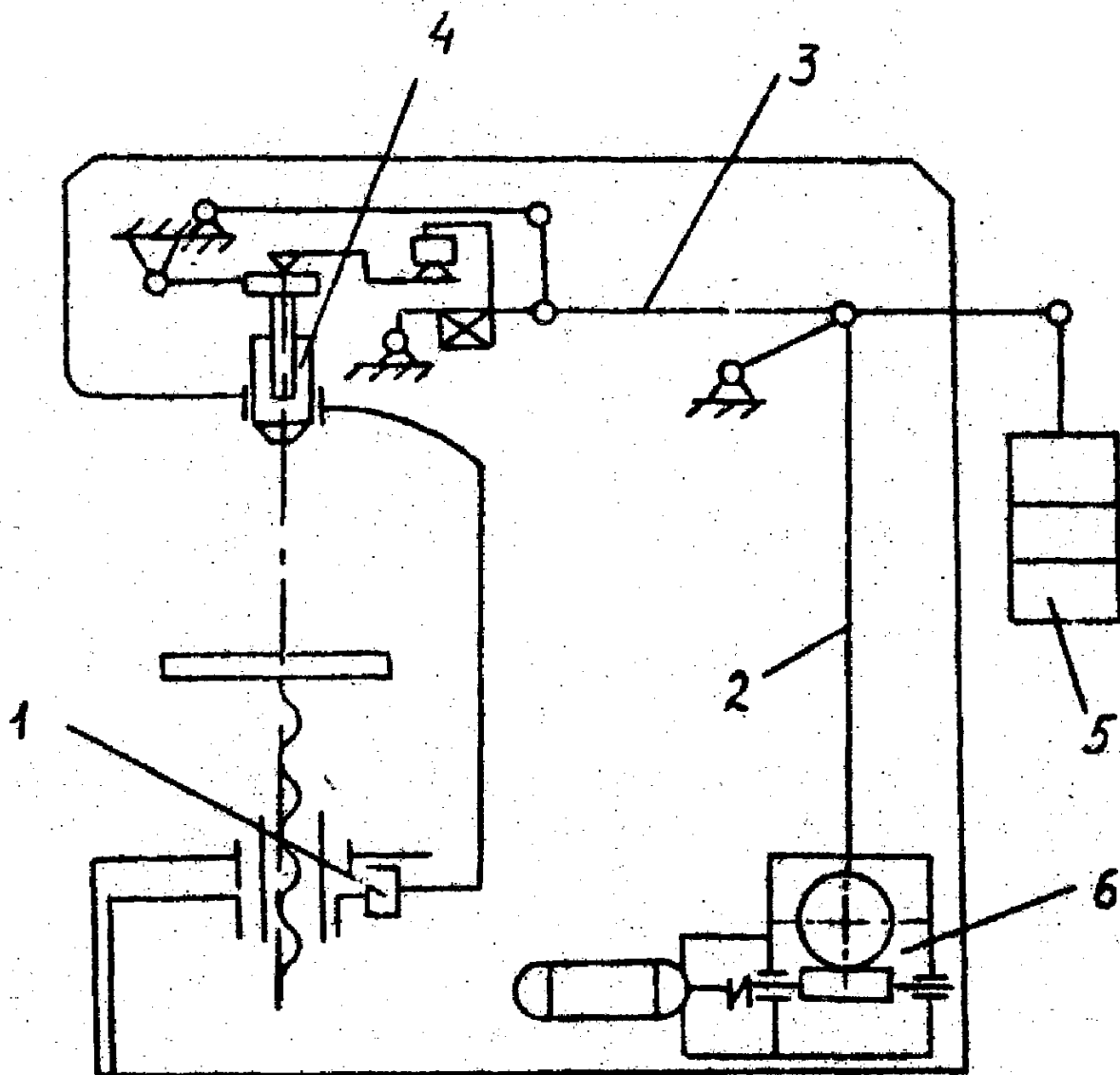


Рис. 25.2

Прибор состоит из следующих основных частей:

- механизма останова I, предназначенного для остановки стола с изделием;

- механизма подъема 2, служащего для подъема и опускания рычажной системы 3;
- рычажной системы 3 для воспроизведения испытательных нагрузок;
- измерительной головки 4;
- грузовой подвески 5, служащей для создания нагрузки;
- привода 6, обеспечивающего приложение и снятие испытательных нагрузок;
- пульта управления.

Последовательность работы узлов и механизмов следующая. Испытуемое изделие помещают на испытательный стол и подготавливают прибор к испытаниям. Измерительный стол перемещают маховиком в верхнее положение до момента стопорения его механизмом остановки I. Если переключатель режима работ стоит в положении "ручн", нажимают на кнопку "пуск", при этом включается в работу привод нагружения 6. Если переключатель стоит в положении "авт", нагрузка прикладывается автоматически, т.е. сигнал от датчика подается на привод нагружения 6, который посредством механизма подъема 2, грузовой подвески 5, через рычажную систему 3 обеспечивает приложение предварительной нагрузки. Происходит внедрение шарика в испытуемое изделие. Переключатель режима работ должен быть в положении "работа". Механизм подъема 2 продолжает опускаться до отрыва его от рычажной системы 3. В этот момент срабатывает микропереключатель и обесточивается электродвигатель привода 6. Одновременно включается реле времени. По окончании времени выдержки включается электродвигатель привода 6. Рычажная система 3 приходит в исходное положение, после чего обесточивается электродвигатель привода.

Пользуясь числом твердости Бринелля, можно без разрушения образца установить приближенное значение его предела прочности. Например, для углеродистой стали (при HB > 175)  $\sigma_B = 0,36 \text{ HB}$ . Однако метод Бринелля имеет ряд недостатков:

- нельзя испытывать образцы, если их твердость близка к твердости шарика, так как в этом случае шарик сам получает значительные деформации и это приводит к искажению результатов;
- из-за большой глубины отпечатка нельзя определить твердость обработанного поверхностного слоя, так как шарик проникает через этот слой в более мягкую внутреннюю часть;
- измерение диаметра отпечатка бывает неточным вследствие вспучивания выдавливаемого шариком металла около краев отпечатка.

## Определение твердости по Роквеллу

Сущность способа состоит в применении стандартного наконечника - алмазного конуса с углом при вершине в  $120^\circ$  (рис.25.3) или стального шарика, вдавливаемого в металл последовательными нагрузками (предварительной  $P_0 = 10$  кгс и общей  $P$ , в свою очередь состоящей из предварительной и основной  $P_D$ ).

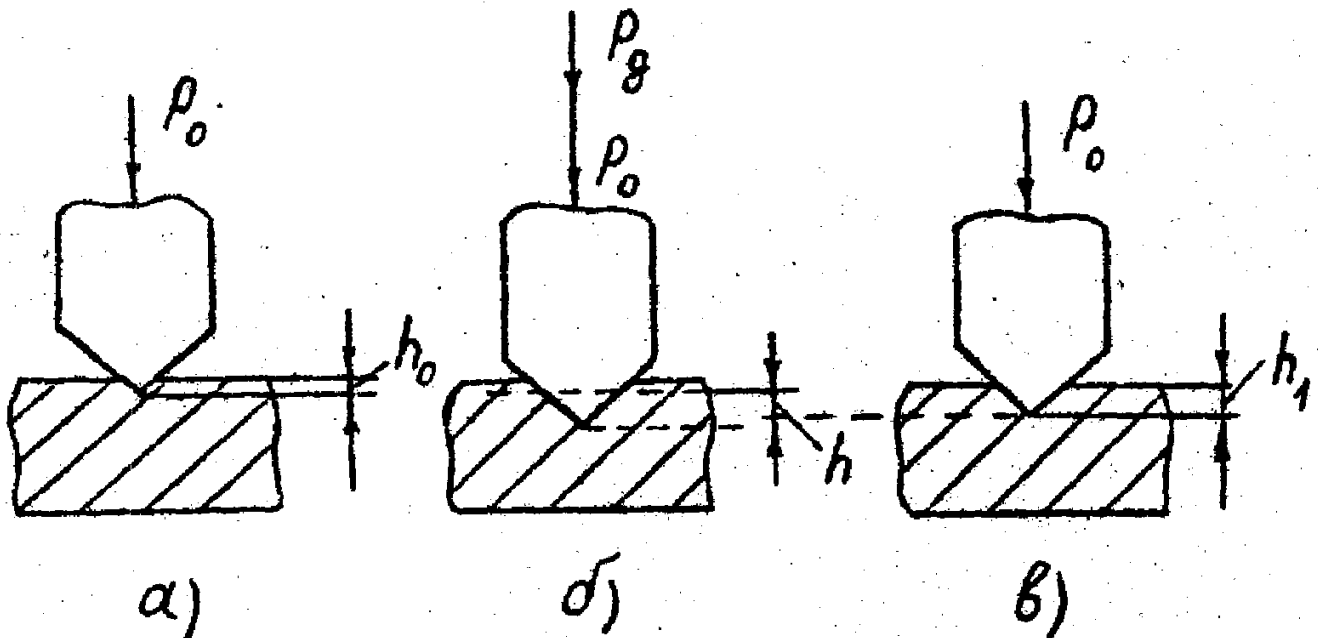


Рис.25.3

Под действием предварительной нагрузки в 10 кгс наконечник проникает в металл на глубину  $h_0$  (рис.25.3, а); при добавлении основной нагрузки до величины  $P = P_0 + P_D$  глубина отпечатка увеличивается (рис.25.3, б) и после снятия основной нагрузки остается равной  $h_1$  (рис.25.3, в). Глубина отпечатка, определяемая по формуле

$$h = h_1 - h_0 \quad (25.3)$$

характеризует твердость по Роквеллу.

Число твердости по Роквеллу связано с глубиной  $h$  следующей зависимостью:

для алмазного конуса 
$$HRC = 100 - \frac{h}{0,002} \quad (25.4)$$

для стального шарика 
$$HRB = 130 - \frac{h}{0,002} \quad (25.5)$$

Измерение твердости по методу Роквелла производится на приборе TP 5006. Глубина отпечатка измеряется индикатором, на котором

нанесены шкалы В, С, А. Шкала В предназначена для стальных шариков. В большинстве случаев применяется шарик диаметром  $d = 1,59$  мм при общей нагрузке  $F = 100$  кгс. Шкала В служит для испытания материалов средней и малой твердости (цветные металлы, конструкционная сталь). Для удобства измерения глубины отпечатка шариком начало отсчета берется от цифры В 30, которая подводится к стрелке поворотом циферблата при первоначальной нагрузке  $P_0 = 10$  кгс.

Шкалы С, А предназначены для определения твердости алмазным конусом. Предварительная нагрузка берется равной 10 кгс. Если общая нагрузка  $F = 150$  кгс, то твердость обозначается через Н R C. Шкала С используется для определения твердости закаленных и термически обработанных сталей. Отсчет по шкале С производится от нуля. При  $HRC > 70$  на алмаз действует большое давление и он может крошиться. Поэтому для твердых материалов и для тонких образцов общую нагрузку принимает равной  $F = 60$  кгс и твердость обозначается H R A.

Таким образом, числом твердости по Роквеллу называется условная величина, зависящая от глубины отпечатка, образованного различными наконечниками при разной нагрузке. Способ Роквелла обладает следующими преимуществами:

- число твердости фиксируется непосредственно на шкале прибора;
- применяя наконечник из самого твердого материала, можно произвести испытания достаточно твердых материалов, чего нельзя сделать по методу Бринелля.

#### Порядок выполнения работы

##### Определение твердости методом Бринелля

1. Установить на стол испытываемое изделие, соответствующую испытательную нагрузку и тип наконечника.
2. Установить переключатель режима работ в положение "ручн" или "авт" ("ручн" - приложение нагрузки от кнопки "пуск", "авт" - приложение нагрузки автоматически).
3. Установить переключатель режима работ в положение "работе".
4. Установить реле времени на заданное время (10-15 сек).
5. Выключатель сети установить в положение "вкл", при этом загорается сигнальная лампа "сеть и контроль".
6. Поджать образец вращением маховика, при этом большая стрелка индикатора должна показывать "0".
7. Нажать кнопку "пуск" - нанести отпечаток.



8. Вращать маховик в обратном направлении для отвода стола с образцом.

9. Аналогично нанести 2-3 отпечатка, после чего измерить диаметры отпечатков в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью микроскопа и найти среднее арифметическое значение.

10. По формулам (25.1) и (25.2) или по таблицам чисел твердости в соответствии с выбранной нагрузкой и испытательным наконечником найти значение твердости испытываемого изделия.

#### Определение твердости методом Роквелла

1. Установить на стол испытываемый образец. Подвести вращением маховика стол с образцом к наконечнику и, продолжая медленно и плавно вращать маховик, приложить предварительную нагрузку (большая стрелка индикатора должна находиться на нуле черной шкалы, а малая - на черной риске).

2. Приложить основную нагрузку, переместив рукоятку из нижнего положения в верхнее.

3. Выдержав общую нагрузку в течение 4-8 сек., снять основную нагрузку, переместив рукоятку в исходное положение.

4. Отсчитать твердость по шкале индикатора. При измерении по шкалам А, С твердость отсчитывается по черной шкале. При измерении по шкале В твердость отсчитывается по красной шкале.

5. Всю нагрузку снять, образец передвинуть на новое место и повторить испытания 2-3 раза. При этом расстояние между центрами отпечатков или от края образца должно быть не менее 2,5-3 мм для алмазного конуса и не менее 4 мм для стального шарика.

#### Контрольные вопросы

1. Что понимается под твердостью?
2. Какие способы существуют для определения твердости?
3. В чем заключается сущность определения твердости методом Бринелля и методом Роквелла?
4. Какие недостатки имеет метод Бринелля?
5. Какие зависимости существуют между числом твердости по Роквеллу и глубиной отпечатка?

#### Отчет о работе

1. Название и цель работы.
2. Испытательные машины.
3. Измерительные приборы.

#### 4. Результаты опыта.

Таблица 25.1

Материал: № отпечатка : № измерения : Среднее значение : Число твердости по Бринеллю (кгс/мм<sup>2</sup>)

$d$  (мм) :  $d$  (мм) :  $d_{cp}$

1-ое : 2-ое

Среднее значение

$d_{cp}$

Таблица 25.2

Материал: № отпечатка : Число твердости по Роквеллу : шкала А (HRA) : шкала В (HRB) : шкала С (HRC)

Среднее значение

#### 5. Выводы по работе.

##### Список литературы

1. Авдеев Б. А. Поверка машин и приборов для механических испытаний материалов. - М., 1969. - 176 с.
2. ГОСТ 9012-59 (СТ СЭВ 468-77). Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю. - М., 1987. - 40 с.
3. Золотаревский В. С. Механические испытания и свойства металлов. - М.: Металлургия, 1974. - 303 с.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 2. - М.: Машиностроение, 1974. - 368 с.

#### РАБОТА 25

#### ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СРЕЗ

Цель работы - определение предела прочности материалов на срез.

##### Основные положения

Детали, предназначенные для соединения отдельных элементов машин или строительных конструкций, - заклепки, штифты, болты и т. д. - во многих случаях воспринимают нагрузки, перпендикулярные их продольной оси. Поперечная нагрузка в указанных деталях возникает, в частности, при растяжении (сжатии) соединяемых элементов. Дейст-

ительные условия работы рассматриваемых деталей сложны и зависят от технологии изготовления элементов конструкции и её сборки. Практические расчеты этих деталей носят весьма условный характер и базируются на следующих основных допущениях:

1. В поперечном сечении возникает только один внутренний силовой фактор — поперечная сила  $Q$ .

2. Касательные напряжения, возникающие в поперечном сечении, распределены по его площади равномерно.

3. В случае, если соединение осуществлено несколькими одинаковыми деталями (болтами, заклепками и т.д.), принимается, что все они нагружены одинаково.

Методика расчета элементов конструкций, работающих на срез, основывается на теории чистого сдвига. При чистом сдвиге величина допускаемого напряжения на срез для сталей составляет  $[\tau] = (0,6-0,8)[\sigma_p]$ , где  $[\sigma_p]$  — допускаемое напряжение на растяжение. Предел прочности материала на срез определяется по формуле

$$\sigma_{\tau} = \frac{P_{\max}}{F} \quad (26.1)$$

где  $P_{\max}$  — максимальная величина нагрузки, которую испытывает образец при испытании;

$F$  — площадь среза.

В работе испытанию подвергаются стальной и деревянный образец, причем деревянный образец испытывается на скалывание вдоль волокон.

Испытание образцов на срез проводится на разрывной машине с помощью специально изготовленных приспособлений.

Металлический образец I имеет цилиндрическую форму. При испытании его вставляют в отверстие приспособления, показанного на рис. 26.1.

Разрывная машина вытягивает диск 2 из вилки 3, за счет чего происходит сдвиг средней части образца относительно крайних его частей. Рабочая площадь  $F$  (площадь среза) равна удвоенной площади поперечного сечения образца, так как срез происходит одновременно по двум плоскостям.

$$F = 2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{2} \quad (26.2)$$

где  $d$  - диаметр образца

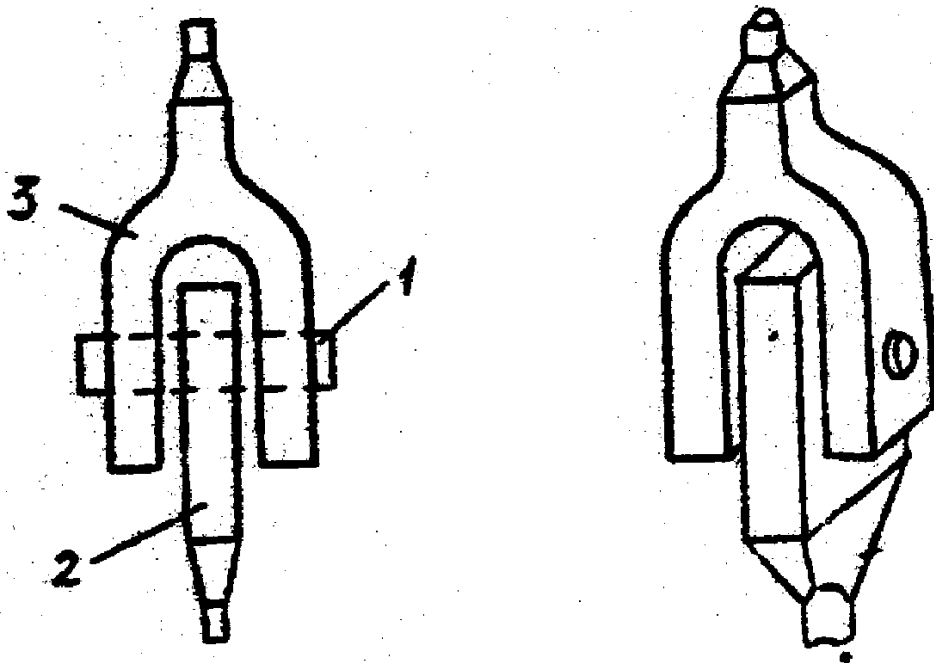


Рис. 26.1

Для испытания древесины на скалывание применяется образец 4 (рис. 26.2), который устанавливается на нижнюю опорную плиту прессы разрывной машины. Древесина испытывается на скалывание вдоль волокон.

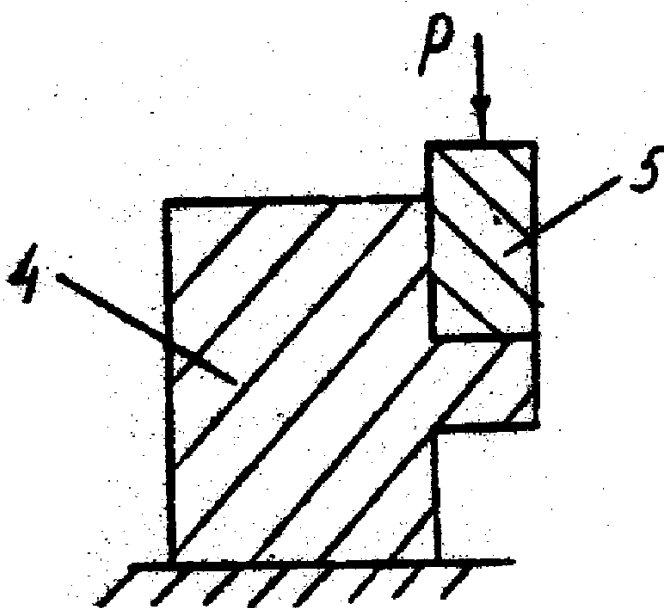


Рис. 26.2

Верхняя плита давит на бобышку 5, которая опирается на выступ в образце. При разрушающей нагрузке выступ сдвигается вдоль волокон относительно остальной части образца. При этом следует учитывать, что древесина оказывает различное сопротивление сдвигающей силе в зависимости от направления действия сил по отношению к волокнам древесины. Сопротивление древесины срезу поперек волокон в несколько раз больше, чем при скалывании вдоль волокон.

### Порядок выполнения работы

#### Испытание на срез стального образца

1. Замерить диаметр образца и установить испытательный образец в приспособление для среза.
2. Пустить машину в ход и наблюдать по шкале силоизмерительного устройства за возрастанием нагрузки.
3. Зафиксировать наибольшую нагрузку, разрушившую образец.
4. По формуле (26.1) вычислить предел прочности при срезе.

#### Испытание на срез деревянного образца

1. Замерить размеры выступа образца.
2. Вычислить площадь среза.
3. Установить образец на нижнюю опорную плиту машины. Нагрузка должна действовать вдоль волокон.
4. Подвергнуть образец испытанию до разрушения. При достижении максимальной нагрузки происходит скалывание выступа на образце и нагрузка падает. Испытание следует при этом прекратить. Величину  $R_{max}$  зафиксировать.
5. Определить предел прочности на срез по формуле (26.1).

### Контрольные вопросы

1. Что такое чистый сдвиг?
2. Как вычисляется предел прочности при срезе?
3. Действие каких напряжений подвержены болты, заклепки, штифты, работающие в конструкциях на срез?
4. Какое существует соотношение между  $\sigma_g$  и  $\sigma_{gr}$  установленное нормами?
5. Что представляет собой приспособление для испытания стального образца на срез?
6. Какие допущения принимаются при расчетах на срез?

### Отчет о работе

1. Название и цель работы.



ся легкоплавкие глины, которые при затворении водой способны образовывать пластическое тесто, превращающееся после обжига при 800-1000°C в камнеподобный материал. Кирпич изготавливают из чистых глин, либо из глин с добавкой непластичных материалов (крупнозернистый песок, шлак, шамот, т.е. бой изделий) или выгорающих добавок (молотый уголь, торф, опилки).

В качестве добавок, улучшающих природные свойства глины, применяются гипс, цементная пыль, техническая сода, в качестве красителя — руды железа, хрома, марганца, титана.

Для достижения необходимой прочности отформованный кирпич-сырец обжигается в печах или просушивается.

Силикатный кирпич получают в результате химического взаимодействия увлажненной смеси извести (7-10 %) и кварцевого песка (85-90 %) при нагреве под давлением в автоклавах. По сравнению с глиняным кирпичом он менее трудоемок в изготовлении. Название получил по основному компоненту — кварцевому песку, который, как известно, состоит из окислов кремния, а также их соединений с алюминием (алюмосиликаты), магнием (магниево-силикаты) и др. В качестве добавок могут быть использованы суглинки, а также зола и шлаки от ТЭС и металлургического производства.

Бетоны и строительные растворы также получают из смеси вяжущего (цемент, гипс, известь), заполнителей (песок, щебень) и воды. Свойства изделия определяются характеристиками составляющих и их количественным соотношением. Широко распространены строительный раствор состава 1:4 и бетон 1:2:3 (здесь первая цифра указывает количество весовых частей цемента в смеси, вторая — количество частей песка, третья — щебня). Для увеличения прочности конструкций из бетона их армируют сталью, получая железобетон.

Строительные материалы в сооружениях могут испытывать такие нагрузки, как сжатие, растяжение, изгиб, срез, удар, кручение. Но чаще всего они подвергаются деформациям сжатия, растяжения или изгиба.

Для того, чтобы судить о механической прочности конструкции, следует знать предел прочности данного материала, т.е. напряжения, возникающие под действием разрушающей нагрузки. Предел прочности материала одного и того же состава зависит от его плотности и, особенно пористых материалов, от влажности. Предел прочности определяется на основе экспериментальных данных.

Необходимо отметить, что в поведении таких строительных материалов, как кирпич, бетон, природные камни, при растяжении и сжа-

тии этого объема. Все это хрупкие материалы, т.е. разрушаются при весьма малых деформациях и сопротивляются сжатию гораздо лучше, чем растяжению (см. табл. 27.1).

Таблица 27.1

Пределы прочности строительных материалов, МПа

| Наименование материала                                     | При растяжении    | При сжатии |
|--|-------------------|------------|
| Сталь углеродистая обыкновенного качества (Ст 0...Ст 6 пс) | 310-590           | 310-590    |
| Дерево (дуб, сосна, ель) при 15 % влажности:               | - вдоль волокон   | 35-50      |
|  | - поперек волокон | 4-15       |
| Гранит, диабаз, гнейс, кварцит                             | 3-5               | 120-260    |
| Песчаник, известняк  | 2                 | 40-150     |
| Кирпич   | 1,8-4,4           | 7,5-30     |
| Бетон  | 1,5-5             | 5-35       |
| Стекло (отожженное)  | 35-85             | 500-2000   |

Диаграммы сжатия кирпича, бетона, природного камня однотипны и описываются отрезком прямой линии (рис. 27.1, а). Характер разрушения образцов из этих материалов под действием сжимающей нагрузки показан на рис. 27.1, б и 27.1, в.

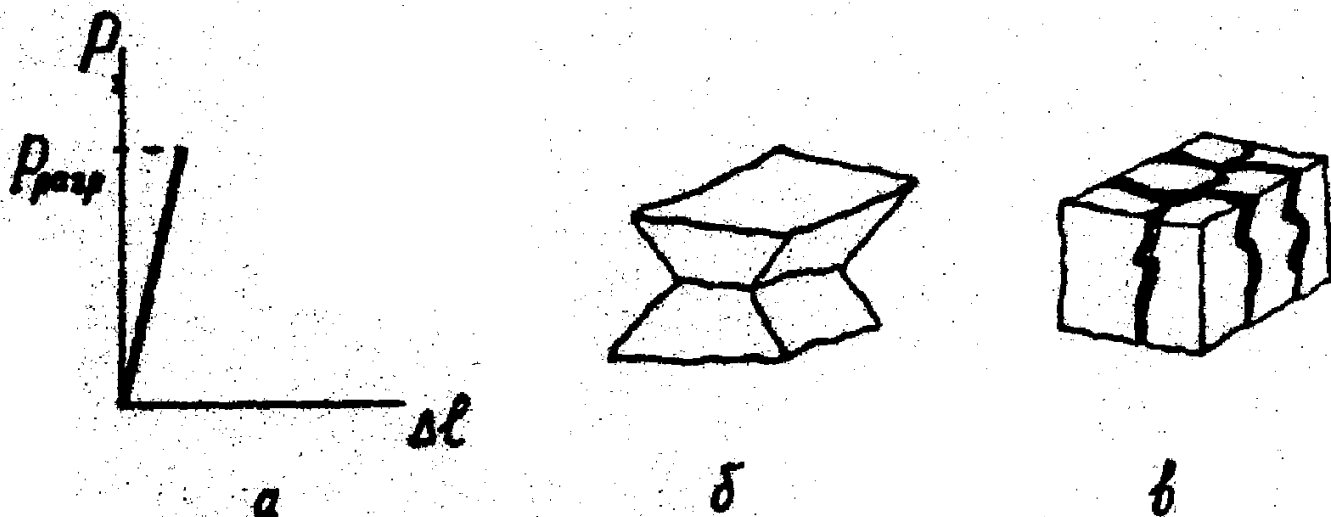


Рис. 27.1 Диаграмма сжатия (а) и характер разрушения (б, в) искусственного и природного камня

Кубический образец после разрушения имеет вид двух усеченных пирамид, соединенных меньшими основаниями (при наличии существенных сил трения между образцом и опорными плитами пресса). Если снизить это трение, например, путем смазывания парафином торцов кубика, то характер разрушения будет иным: образец разделяет-



ся на части трещинами, параллельными действию сжимающей силы (рис. 27.1, в). Разрушающая нагрузка для такого образца будет меньше, чем для кубика, испытанного обычным путем, без смазки.

Появление трещин, параллельных линии действия сжимающей силы, говорит о том, что разрушение происходит в результате отрыва отдельных частей образца.

Механические свойства бетона, согл. снв ГОСТ 10180-78, характеризует его прочность при сжатии, растяжении, изгибе и раскалывании. Однако наиболее часто нормируется и контролируется предел прочности бетона при сжатии.

Стандартные образцы для испытаний имеют вид куба или цилиндра с размером ребра (диаметра) 7, 10, 15, 20 и 30 см. При этом за эталон принят куб размером 15x15x15 см.

Формы для изготовления образцов должны быть разъемными, из плотных материалов, не впитывающих влагу. Из каждой пробы приготовленной смеси делают не менее трех образцов. Заполненные формы устанавливают на виброплощадку, закрепляют и подвергают вибрированию до прекращения оседания бетонной смеси и появления на ней цементного раствора.

После уплотнения образцы вместе с формами накрывают влажной тканью и выдерживают не менее суток в помещениях при температуре 16-20°C. Затем образцы вынимают из форм и помещают в камеру нормально-влажного хранения при температуре 20±2°C и влажности воздуха не менее 90%. Перед испытанием образцы вынимают из камеры, осматривают, измеряют и взвешивают.

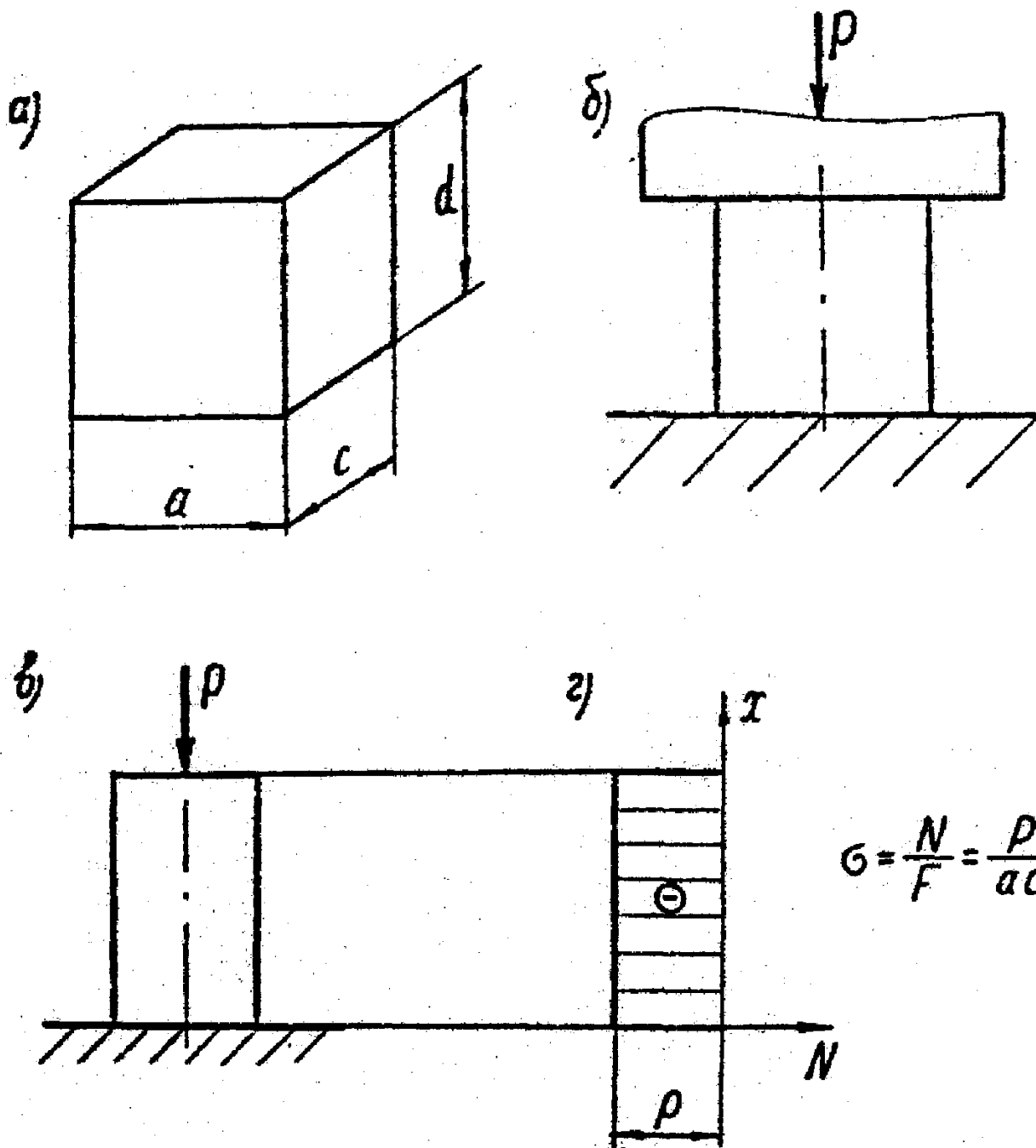
При испытании образцов сжимающее усилие прикладывают параллельно слоям укладки бетона так, чтобы напряжение в образцах возрастало с постоянной скоростью  $5 \pm 2 \cdot 10^4$  Па/с. Испытания доводят до их полного разрушения и отмечают наибольшую приложенную нагрузку (рис. 27.2).

Предел прочности при сжатии равен отношению разрушающей силы к первоначальной площади поперечного сечения образца и указывается в кг/см<sup>2</sup> в проектной марке бетона (табл. 27.2).

Таблица 27.2

|                 |   |
|-----------------|---|
|                 | : М25; М35; М50; М75; М100; М150; М200; |
| Проектные марки | : М250; М300; М350; М400; М450; М500;   |
| бетона          | : М600; М700; М800                      |

Образец после разрушения, в зависимости от величины силы трения по опорным граням куба, может быть двух видов (рис. 27.1, б и в). Исключение составляют образцы из низкомарочного бетона



$$\sigma = \frac{N}{F} = \frac{P}{ac}$$

Рис. 27.2 Испытуемый образец (а), схема нагружения (б), расчетная схема (в) и эпюра продольных сил (г) при испытании на сжатие

(прочностью 5–10 МПа), у которых наличие трения в опорах практически не сказывается на результатах испытаний вследствие дробления материала образца в контакте с плитами прессы.

Механическую прочность глиняного кирпича и керамических камней (ГОСТ 8462–62), а также силикатного кирпича (ГОСТ 379–79) определяют пределы прочности при сжатии и изгибе.

Порядок определения предела прочности при сжатии аналогичен

рассмотренному выше. Для этого берут целые изделия или их полови-  
нки, укладывают друг на друга и соединяют цементным тестом. Образ-  
цы выдерживают 3-4 суток в закрытом помещении при температуре  
 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ . Испытывают образцы на прессе со скоростью нарастания дав-  
ления не более  $5 \text{ кг/см}^2$  в секунду до их полного разрушения.

Цифровое значение предела прочности изделий при сжатии (в  
 $\text{кг/см}^2$ ) определяет марку изделия. Если испытывается кирпич не  
основного размера  $250 \times 125 \times 65 \text{ мм}$ , а углощенный, то для определения  
его марки результаты испытания умножаются на коэффициент 1,5.

Предел прочности изделий при изгибе устанавливает на целых  
образцах, которые укладывают плоская на двух опорах из круглой  
стали с диаметром 20-30 мм с расстоянием  $l = 20 \text{ см}$  между ними.  
Нагрузка прикладывается посередине пролета через призму с таким  
же закруглением (рис. 27.3). Предел прочности при изгибе вычисля-  
ют по формулам сопротивления материалов:

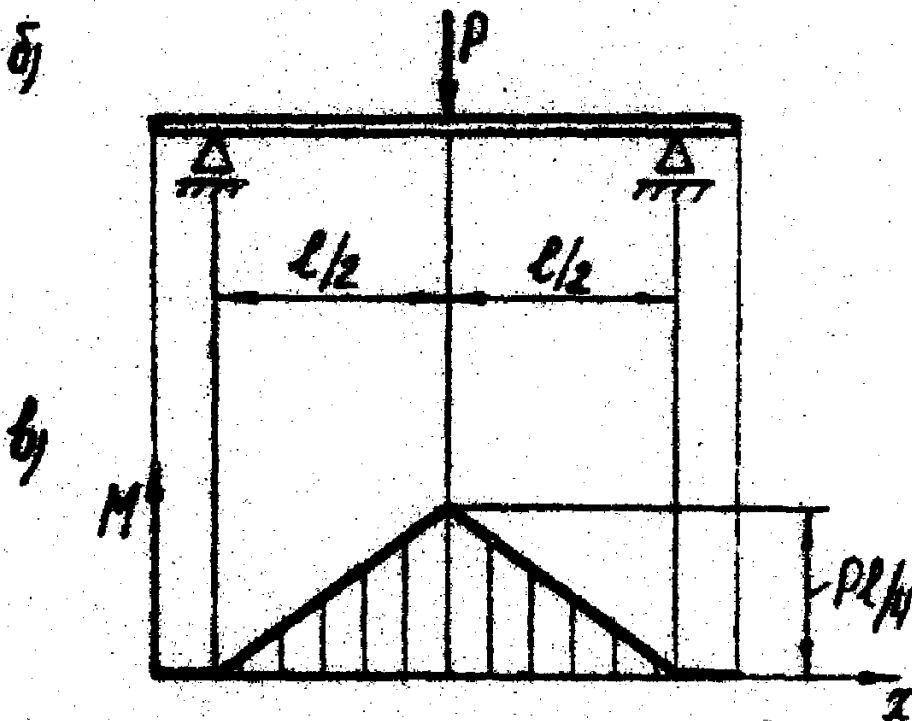
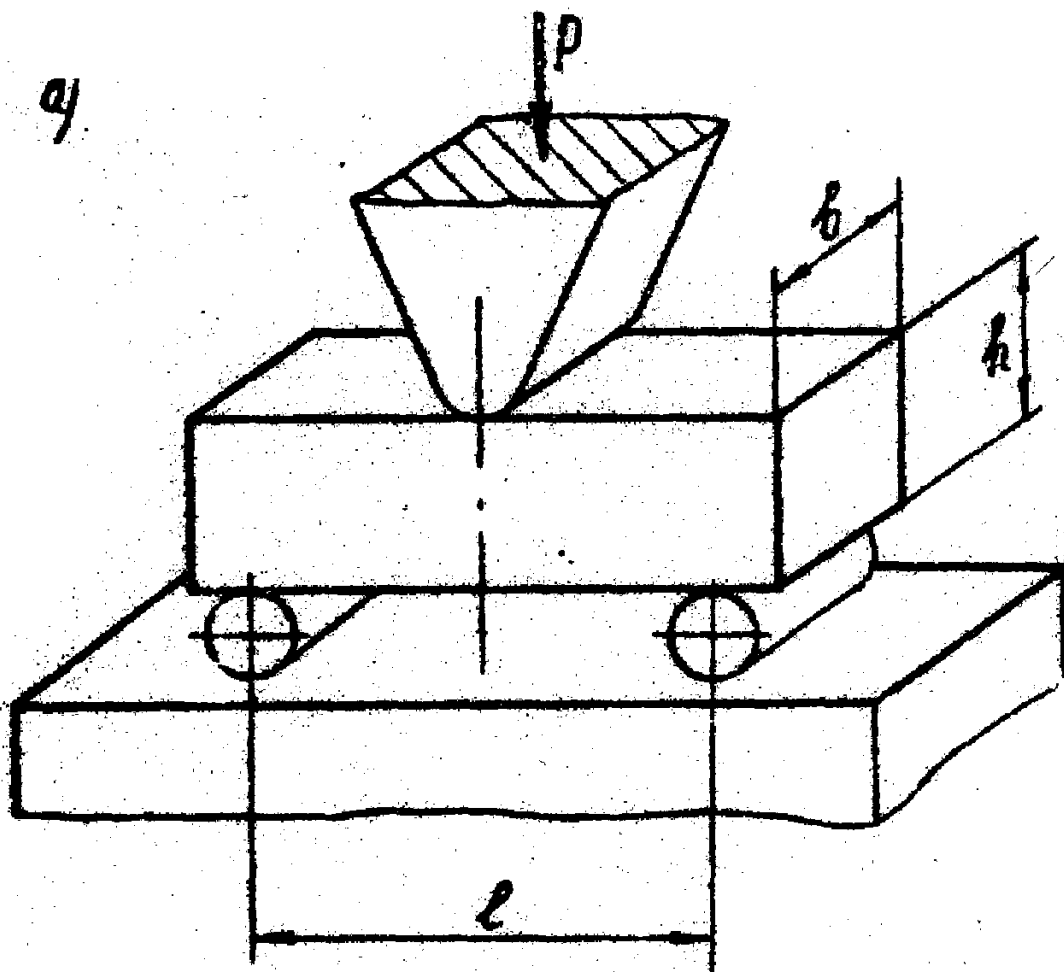
$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{\text{разр}} \cdot l}{b h^2},$$

где  $b, h$  - ширина и высота образца.

Средние величины пределов прочности при сжатии и изгибе  
кирпича разных марок приведены в табл. 27.3. Действующими нормами  
допускается снижение величины предела прочности отдельных кирпи-  
чей до 75 % от указанных значений.

Таблица 27.3

| Пределы прочности кирпича, $\text{кг/см}^2$ |             |            |                         |             |            |
|---|-------------|------------|-------------------------|-------------|------------|
| силикатного (ГОСТ 379-79)                   |             |            | глиняного (ГОСТ 530-71) |             |            |
| Марка:                                      | при сжатии: | при изгибе | Марка:                  | при сжатии: | при изгибе |
| 300   | 300         | 40         | 300                     | 300         | 44         |
| 250   | 250         | 35         | 250                     | 250         | 40         |
| 200   | 200         | 32         | 200                     | 200         | 34         |
| 150   | 150         | 27         | 150                     | 150         | 26         |
| 125   | 125         | 24         | 125                     | 125         | 25         |
| 100   | 100         | 20         | 100                     | 100         | 22         |
|   |             |            | 75                      | 75          | 18         |



$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{M}{W_{\text{но}}}$$

$$M = \frac{Pl}{4}$$

$$W_{\text{но}} = \frac{bh^2}{6}$$

Рис. 27.9 Схема нагружения (а), расчетная схема (б) и эпюра изгибающих моментов (в) при испытании кирпичца на прочность при изгибе

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием работы.
2. Определить линейные размеры испытываемых образцов.
3. Произвести испытания образцов, обращая особое внимание на центрирование их под нагрузкой:
  - а) бетон - без смазки и со смазкой опорных поверхностей на сжатие;
  - б) кирпич силикатный и глиняный - на изгиб.Закрепить разрушающее усилие.

## Контрольные вопросы

1. Какова цель испытаний материалов до разрушения?
2. Чем отличается глиняный кирпич от силикатного?
3. Что общего и в чем разница между строительным раствором, бетоном и железобетоном?
4. Как определить предел прочности при сжатии?
5. Какие образцы применяются при прочностных испытаниях бетона, кирпича?
6. Какой вид имеет диаграмма сжатия природного камня? А искусственного камня?
7. Каков характер разрушения образцов из камня при сжатии?
8. О чем говорит цифра в марке кирпича или бетона?
9. Чем объясняется выламывание средней части образца при испытании его на сжатие?
10. Какие факторы оказывают существенное влияние на механические характеристики искусственного камня?
11. Почему нормируют размеры бетонных образцов?
12. В каком случае разрушающее усилие больше: при испытании на сжатие образца со смазкой опорных поверхностей, или без нее и почему?
13. Укажите расчетную схему для определения предела прочности при сжатии (изгибе). Какие допущения приняты при составлении этих расчетных схем?
14. Докажите правильность построения эпюр внутренних силовых факторов.
15. Почему предел прочности кирпича при изгибе намного меньше предела прочности его при сжатии?
16. Как, по Вашему мнению, соотносятся пределы прочности кирпича при растяжении и изгибе?

## Отчет о работе

1. Название и цель работы.
2. Схемы нагружения образцов, расчетные схемы и эпюры внутренних силовых факторов.
3. Эскизы образцов до и после разрушения.
4. Расчеты пределов прочности исследуемых материалов.
5. Определение марки изделий.
6. Выводы по работе.

### Список литературы.

1. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. - М.: Наука, 1976. - 508 с.
2. Вербницкая А. Г., Кириносое В. И. Определение механических свойств материалов. - М.: Госстандарт, 1984. - 192 с.
3. Госкин Н. Я., Соболев М. А. Производство глиняного кирпича. Справочное пособие. - М.: Стройиздат, 1971. - 208 с.
4. Лещинский М. Ю. Испытание бетона: Справ. пособие. - М.: Стройиздат, 1980. - 360 с.
5. Лабораторные работы по курсу сопротивления материалов. - Красноярск: КИИ, 1974. - 168 с.
6. Сопротивление материалов (Лабораторные работы) / Под ред. Сторожева Н. Ф. - М.: Высшая школа, 1969. - 180 с.
7. Технология стекла / Под общ. ред. Китайгородцева И. И. - М.: Стройиздат, 1961. - 624 с.
8. Хавкин Л. М. Технология силикатного кирпича. - М.: Стройиздат, 1982. - 384 с.
9. Черняевский Е. В. Производство глиняного кирпича. - М.: Стройиздат, 1974. - 143 с.

## РАБОТА 28

### ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы - продемонстрировать усталостное разрушение материала под действием повторно-переменных нагрузок и ознакомить с методом определения предела выносливости при симметричном цикле изменения напряжений изгиба.

Усталостные поломки составляют основной вид (более 80 %) разрушений конструкций и деталей машин и нередко приводят к тя-

желым последствиям, так как возникает внезапно, без заметной пластической деформации, при напряжениях, меньших предела упругости.

Вследствие неоднородности строения материалов пластические деформации в отдельных кристаллах появляются уже на самой ранней стадии нагружения и при достижении предела упругости относительные остаточные деформации достигают 0,001-0,005%. Эта величина пренебрежимо мала при действии статической нагрузки, однако при действии переменных напряжений происходит постепенное накопление повреждений материала, что приводит к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Этот процесс называют усталостью.

Усталостному разрушению подвержены такие важные детали, как коленчатые вали, поршневые пальцы двигателей, вали и зубчатые колеса редукторов и коробок передач, пружины и рессоры, рамы и кузова транспортных средств, оси железнодорожных вагонов, стыки рельсов и многие другие. С явлением усталости материалов мы встречаемся и в быту, когда отламываем кусок проволоки путем многократного изгиба её.

Для поверхностей излома, возникающих при усталостном разрушении детали, характерно наличие двух ясно различимых зон: зоны с гладкой, притертой поверхностью (зона постепенного развития трещины) и зоны с шероховатой поверхностью, возникающей в завершающей стадии разрушения из-за недостаточной прочности сечения по трещине (долом).

Как показывают опыты, число циклов нагружения до усталостного разрушения материала определяется наибольшим и наименьшим напряжениями цикла ( $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$ ), а влияние частоты и закона изменения напряжений внутри цикла не существенно. Следовательно, циклы, показанные на рис. 28.1, являются равноценными. Исключение составляют испытания при высоких температурах, а также при воздействии коррозионной среды.

Для характеристики цикла используется коэффициент асимметрии

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (28.1)$$

Для симметричного цикла (рис. 28.2)  $R_\sigma = -1$ , так нагружены, например, оси железнодорожных вагонов); для отн/левого, или

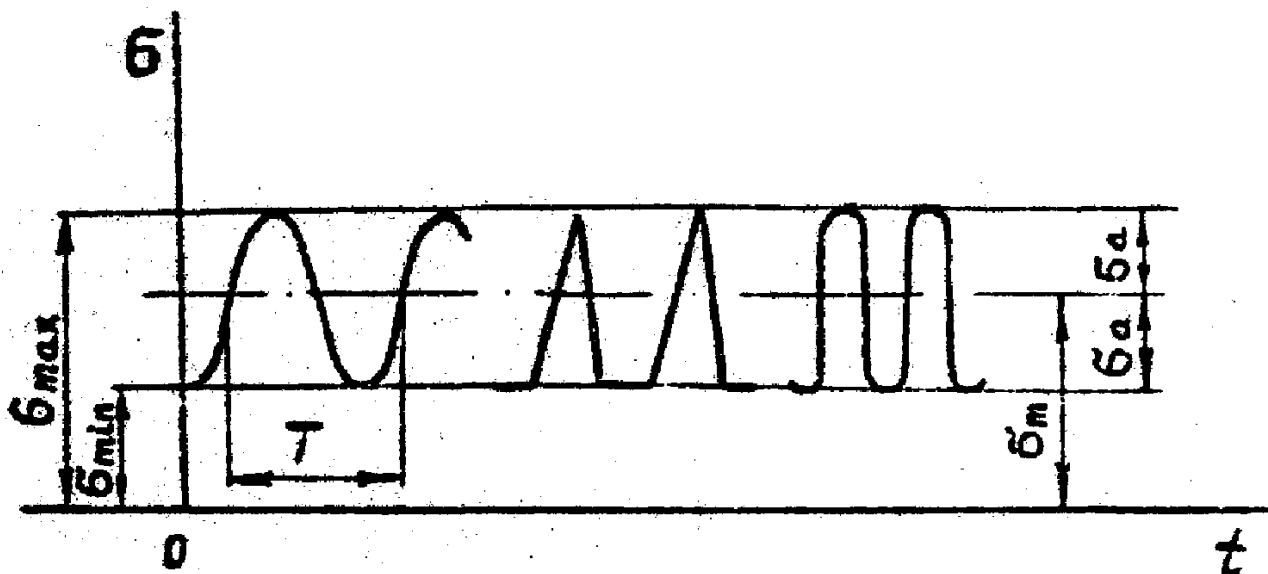


Рис. 28.1

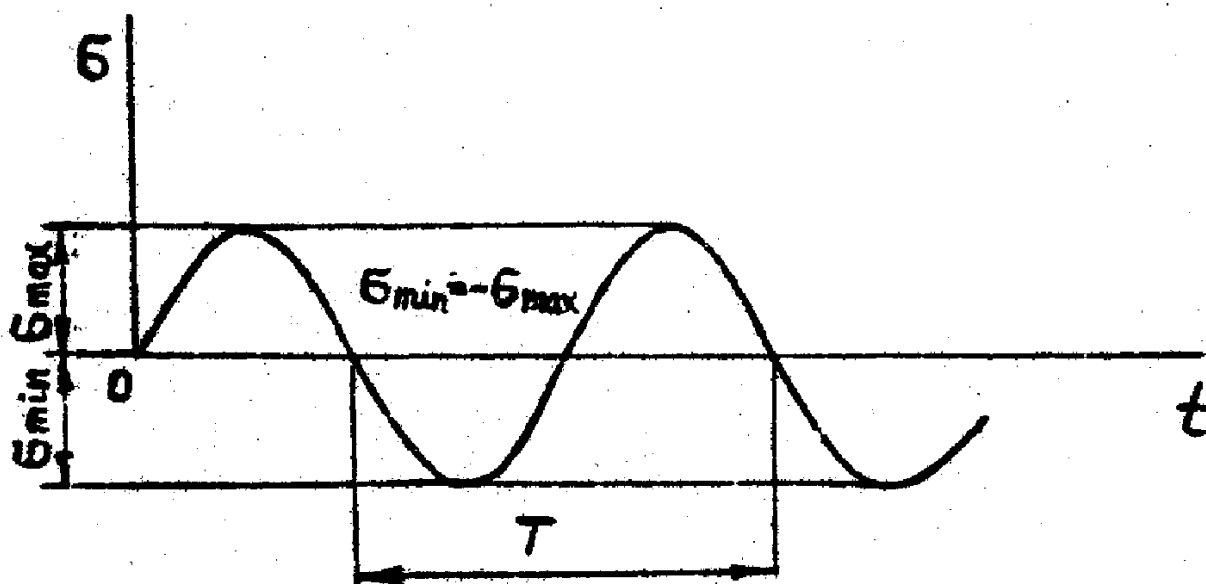


Рис. 28.2

пульсирующего цикла -  $R_{\sigma} = 0$  (грузоподъемные устройства) или  $R_{\sigma} = \infty$  (зубила, вельсы); при действии постоянных напряжений  $R_{\sigma} = 1$ .

Зависимости числа циклов до разрушения материала от величины амплитуды переменных напряжений цикла  $\sigma_a$  называется кривыми усталости. В логарифмических координатах кривые усталости описываются полигональными кривыми (отрезками прямых линий).

Выделяют три типа кривых усталости. Кривая первого типа (рис. 28.3, а), характерная для углеродистых сталей, имеет горизонтальный участок. Обычно точка перелома соответствует  $N_0 = 10^6 - 10^7$  циклам. Величина амплитуды напряжения в точке перелома называ-



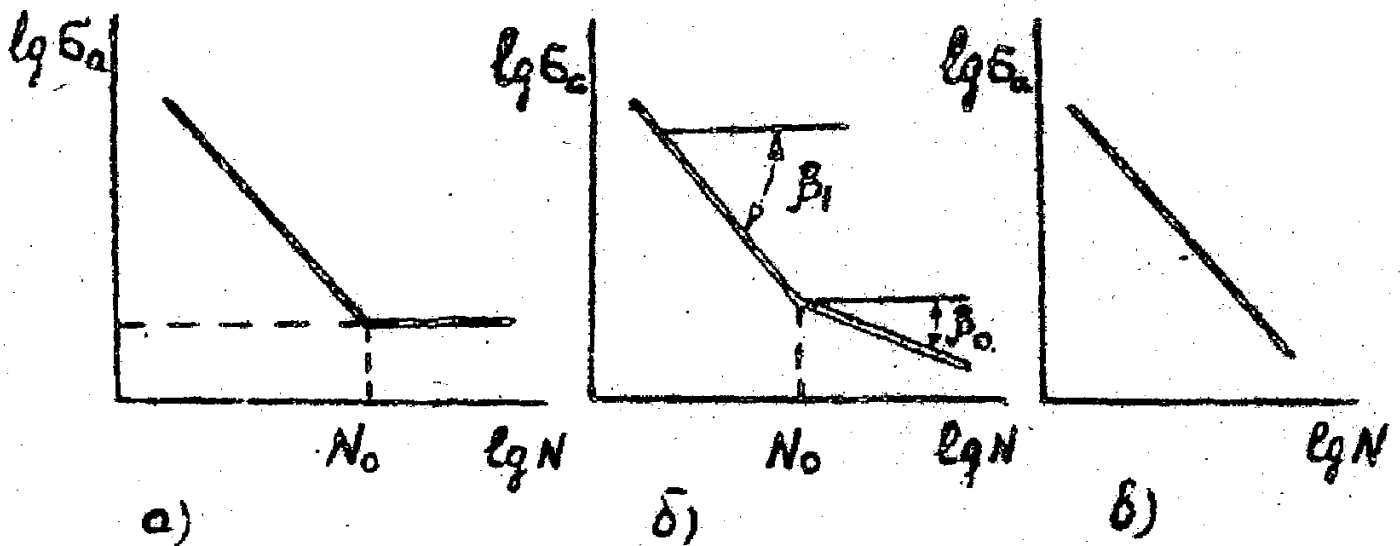


Рис. 28.3 Кривые усталости различных материалов

ется пределом выносливости. Таким образом, предел выносливости — это максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостного разрушения. Предел выносливости обозначается  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{-2}$  и т. п., где индекс соответствует коэффициенту асимметрии цикла.

Кривые усталости второго типа (рис. 28.3, б), свойственные высоколегированным сталям и титановым сплавам, после точки перелома имеют наклон ( $\operatorname{tg} \beta_0 \approx 0,1 \operatorname{tg} \beta$ ). Для третьего типа кривых усталости, характерных для легких цветных металлов и жаропрочных сплавов, (рис. 28.3, в) наклон прямой не меняется вплоть до очень малого уровня напряжений. Таким образом, предел выносливости для кривых второго и третьего типа является условной величиной и определяет напряжение, при котором еще не происходит усталостного разрушения до базы испытаний, т. е. до предварительно задаваемого числа циклов нагружений.

Очевидно, предел выносливости тем выше, чем выше механические характеристики прочности металла. Так отношение  $\sigma_{-1}/\sigma_b$  для стали составляет 0,4–0,6; для латуни 0,4–0,3; алюминиевых сплавов 0,4–0,25. Однако, на предел выносливости влияют также вид нагружения и химико-термической обработки, концентрация напряжений, абсолютные размеры поперечного сечения детали, состояние поверхности — её шероховатость, наличие коррозии, скалины и др.

Вследствие большого разнообразия факторов, влияющих на сопротивление усталости материала, далеко не всегда удается воспользоваться справочными данными (табл. 28.1). Поэтому усталостные

испытания широко распространены в инженерной практике.

Таблица 28.1

Механические свойства сталей (МПа) после нормализации (Н) или закалки с высоким отпуском (З+ОВ) /4/

| Марка стали: | Режим термообработки ( $t, ^\circ\text{C}$ ): | $\sigma_{\text{т}}$ | $\sigma_{\text{в}}$ | $\sigma_{\text{с}}$ |
|--------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| 10           | Н   | 210                 | 340                 | 200                 |
| 15           | Н   | 230                 | 380                 | 217                 |
| 20           | Н   | 250                 | 420                 | 210                 |
| 20Г          | Н, 880  | 280                 | 460                 | -                   |
| 20Г          | Н, 910  | -                   | 500                 | 295                 |
| 40           | З+ОВ  | 445                 | 663                 | 317                 |
| 40Г          | З+ОВ  | 640                 | 730                 | 335                 |
| 40Х          | З+ОВ  | 650                 | 850                 | 380                 |
| 45           | З+ОВ  | 475                 | 690                 | 338                 |

Рассмотрим один из наиболее распространенных способов испытаний на выносливость — испытание в условиях симметричного цикла, а именно, чистый изгиб вращающегося образца.

На рис. 23.4 показана схема машины МУИ-6000 для испытания образцов при чистом изгибе. Образец I зажат во вращающихся цапгах 2 и 3. Частота вращения составляет 100 Гц. Усилие передается от груза, подвешенного на серьгах 4 и 5. В результате материал вращающегося образца оказывается попеременно то в растянутой, то в сжатой зонах. Счетчик 6 фиксирует число оборотов образца с точностью до 100 оборотов. При разрушении образца происходит автоматическое отключение двигателя конечным выключателем 8.

Порядок проведения усталостных испытаний регламентируется ГОСТ 8860-65. Для построения кривой усталости испытывают не менее 10-15 одинаковых образцов из деформируемых сплавов и не менее 15 из литейных (рис. 28.5).

База испытаний для определения пределов выносливости принимается равной: а)  $10^7$  циклов для металлов и сплавов, имеющих практически горизонтальный участок на кривой усталости; б)  $10^8$  циклов для легких сплавов и других металлов и сплавов, ординаты кривых усталости которых по всей длине непрерывно уменьшаются с ростом числа циклов.

Для сравнительных испытаний база при определении предела выносливости для черных и цветных металлов принимается  $5 \cdot 10^6$  и  $2 \cdot 10^7$  циклов соответственно.

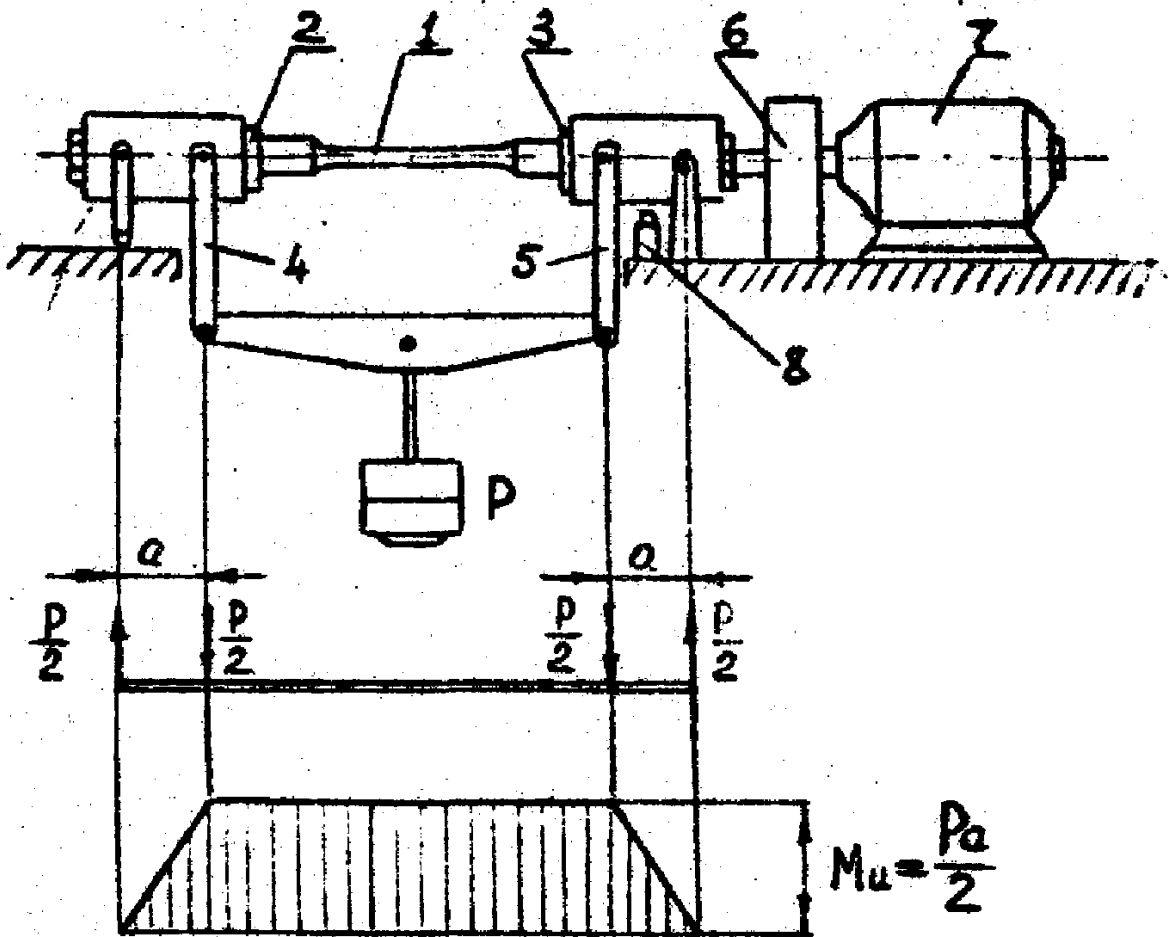


Рис.28.4

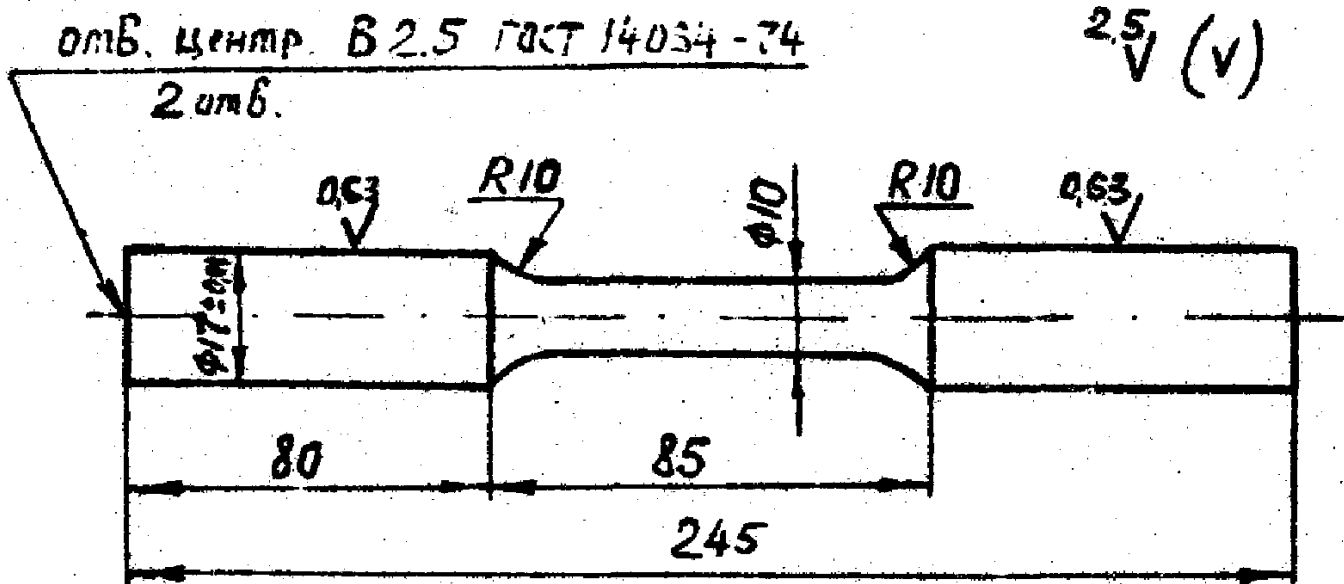


Рис.28.5 Образец для испытания на усталость

Кривые усталости строят путем графического интерполирования экспериментальных результатов или по способу наименьших квадратов.

Для первого образца напряжение обычно составляет  $\frac{2}{3} \sigma_B$ . Нижний предел напряжений выбирает из расчета  $(0,45-0,50) \sigma_B$ , а для высокопрочных сталей  $(0,3-0,4) \sigma_B$ . Напряжения для последующих образцов выбирают в зависимости от числа образцов.

По способу ускоренного получения кривой усталости напряжение на первый образец создают для сталей с  $\sigma_B \leq 800$  МПа из расчета  $\sigma_1 = 1,25 \sigma_{-1} = 1,25 \cdot 0,5 \sigma_B$  и для сталей с  $\sigma_B > 800$  МПа по формуле  $\sigma_1 = 1,12 \sigma_{-1} = 1,12 \cdot 0,45 \sigma_B$ .

Напряжение на второй образец назначается в зависимости от числа циклов до поломки первого образца  $N_1$ . При  $N_1 < 2 \cdot 10^5$  циклов напряжение на втором образце  $\sigma_2 = \sigma_1 - 20$  МПа, при  $N_1 > 2 \cdot 10^5$  -  $\sigma_2 = \sigma_1 + 20$  МПа. Таким образом, испытание первых двух образцов определяет положение верхней части кривой усталости.

Напряжение на третий образец выбирают в зависимости от числа циклов до разрушения первых образцов  $N_1$  и  $N_2$ . Если  $N_1$  или  $N_2$  находятся в пределах  $1 \cdot 10^5 - 3,5 \cdot 10^5$  циклов, то  $\sigma_3 = 0,8 \sigma_1$  (или  $0,8 \sigma_2$ ); если этот предел - от  $3,5 \cdot 10^5$  до  $10^6$  циклов, то  $\sigma_3 = 0,88 \sigma_1$  (или  $0,88 \sigma_2$ ).

Напряжение на четвертый образец назначается:

- 1) если третий образец не сломался при  $N_3 = 10^7$  циклов,  $\sigma_4 = (\sigma_3 + \sigma_1)/2$  (при  $\sigma_1 < \sigma_2$ ) или  $\sigma_4 = (\sigma_3 + \sigma_2)/2$ , если  $\sigma_2 < \sigma_1$ ;
- 2) если  $N_3 < 10^7$ , то  $\sigma_4 = \sigma_3 - (20 \dots 30)$  МПа.

Таким образом, напряжение  $\sigma_4$  выбирают из расчета  $10^6 < N < 10^7$  и оно должно быть близким к пределу выносливости для базы  $N_6 = 10^7$  циклов.

Уточнение предела выносливости производится на пятом образце:  $\sigma_5 = (\sigma_4 + \sigma_3)/2$ , причем необходимо, чтобы при одном из напряжений ( $\sigma_4$  или  $\sigma_3$ ) образец сломался, а при другом - не сломался до  $10^7$  циклов.

На уровне предела выносливости должно быть испытано не менее двух образцов.

Учитывая статистическую природу усталостной прочности, рекомендуется при напряжениях  $(0,95-1,05) \sigma_{-1}$  испытывать не менее трех образцов, причем половина из них не должна разрушиться до базового числа циклов.

При построении семейства кривых усталости испытания проводят на четырех-шести уровнях напряжений.

Отметим, что проведение усталостных испытаний довольно длительный процесс. Так, для достижения базы испытания  $10^7$  циклов ис-

пытательная машина МУИ-6000 должна работать 28 часов.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием работы.
2. Назначить уровень напряжений  $\sigma$  при испытании образца для получения первой точки в верхней части кривой усталости заданного материала и определить необходимый вес груза  $P$  на чаше испытательной машины.

По данным тарировки (с учетом длин и весов рычагов) используемой машины МУИ-6000

$$P = 1,364 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma \cdot d^3 - 0,9028, \text{ кгс} \quad (28.2)$$

Здесь напряжение  $\sigma$  имеет размерность кгс/мм<sup>2</sup>, а диаметр рабочей части образца  $d$  - мм.

3. Установить образец на испытательную машину, произвести пуск и, вращая маховичек, нагрузить изгибающим моментом.
4. Зафиксировать число циклов до разрушения образца.

### Контрольные вопросы

1. Что называется усталостью материала?
2. Всегда ли нужно выполнять расчет конструкции на выносливость?
3. Что является причиной усталостного разрушения?
4. Что такое предел выносливости?
5. Какие факторы оказывают влияние на величину предела выносливости?
6. Что называют циклом напряжений, какими величинами его характеризуют?
7. Чем отличается  $\sigma_{-1}$  от  $\sigma_0$ ?
8. Может ли предел выносливости быть равным пределу прочности, пределу текучести?
9. Почему образцы для определения предела выносливости должны иметь плавные переходы от головок к рабочей части?
10. Какой цикл напряжений задается на машине МУИ-6000?
11. Что показывает кривая усталости?
12. Может ли образец разрушиться при напряжении, меньшем предела выносливости, если материал образца - сталь 10; 40ХГТР; 37Х12Н8Г8МФБ?
13. С какими случаями усталостного разрушения материалов вы встречались на практике?

## Отчет о работе

1. Название и цель работы.
2. Эскиз образца и схема установки.
3. Обоснование выбора напряжений испытания.
4. Число циклов до разрушения образца, эскиз поверхности разлома с указанием характерных зон (после разрушения образца).
5. Кривая усталости ( $S-N$ ) по заданным данным.
6. Выводы по работе.

### Список литературы

1. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. - М.: Машиностроение, 1979. - 702 с.
2. ГОСТ 2860-65. Металлы. Методы испытания на усталость.
3. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения, обозначения.
4. Муравлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали. Справочник. - М.: Машиностроение, 1981. - 391 с.
5. Снитко Н. К. Сопротивление материалов. Учебное пособие. - Л.: ЛГУ, 1975. - 368 с.
6. Сопротивление материалов. Лабораторные работы / Под ред. Сторожева Н. Ф. - М.: Высшая школа, 1969. - 180 с.
7. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. Учебник для вузов. - М.: Наука, 1986. - 512 с.
8. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. - М.: Металлургия, 1978. - 304 с.

Валерий Андрианович Бубнов  
Сергей Григорьевич Костенко  
Сергей Геннадьевич Тютрин

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по спецкурсу для студентов направлений 551400 (15.02; 15.05; 15.06); 552900 (12.01; 12.02); 551800 (12.05)

Часть I

Редактор О. А. Пойлова

---

Подписано к печати 10.06.94

Бумага тип. № 1

Формат 60x84I/16

Усл. п. л. 2,0

Уч. изд. л. 2,0

Заказ 47

Тираж 100

---

Курганский машиностроительный институт, корпус Б, ротационт  
г. Курган, ул. Пролетарская, 62