

620  
112

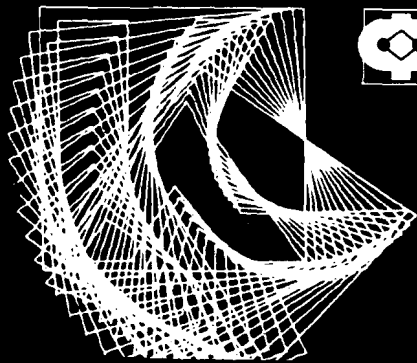
**МФТИ**

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

+

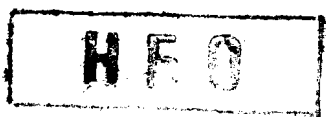
93

М. М. Астахов В. Ю. Гольцев А. В. Логинов  
Л. П. Лошманов



ФАКУЛЬТЕТ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ  
ФИЗИКИ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.  
ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ**



Москва 1989

620  
Л12

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

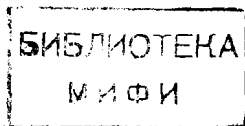
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

М.М. Астахов В.Ю. Гольцев А.В. Логинов Л.П. Лошманов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.  
ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

*Утверждено  
редсоветом института  
в качестве учебного пособия*



Москва 1989

УДК 620.178.746.2.05.089.6:006.354:

Астахов М.М., Гольцев В.Ю., Логинов А.В.,  
Лошманов Л.П. Лабораторный практикум "Методы механических испытаний. Динамические испытания металлов." М.: Изд. МИФИ, 1989. — 52 с.

В лабораторном практикуме представлены описания 4-х лабораторных работ. Даны описания маятниковых копров и установки для импульсного нагружения образцов и методы определения механических свойств металлов на этих установках. Практикум по курсу "Механика материалов" предназначен для студентов 4-го курса специальности "Физика прочности".

Рецензенты:

Е.А. Аверченков, В.М. Клемперт



Московский  
инженерно-физический  
институт, 1989 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий практикум является частью общего практикума по курсу "Механика материалов", одного из профилирующих по специализации "Физика прочности" и включает в себя описания 4-х лабораторных работ. Практикум отражает современный уровень определения механических свойств материала при ударном и импульсном нагружении. Установка для импульсного нагружения образцов разработана в МИФИ и защищена авторскими свидетельствами. Лабораторные работы 1 и 2 подготовлены Гольцевым В.Ю., 3 и 4 – коллективом авторов Астаховым М.М., Логиновым А.В., Лошмановым Л.П.

## МАЯТНИКОВЫЕ КОПРЫ И МЕТОДЫ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

**Ц е л ь :** ознакомление с маятниковыми копрами МК-30, 2130 КМ-0,3, МК-1, методом проверки копров и методами ударных испытаний металлов.

### ВВЕДЕНИЕ

Важными механическими характеристиками материала, оценивающими его сопротивление разрушению при ударном нагружении, являются работа удара или ударная вязкость. Эти характеристики играют большую роль при оценке качества металлов и сплавов главным образом сталей и используются для выявления склонности стали к хрупкому разрушению и определения температурного интервала хрупкости. Определяются они при ударном изгибе надрезанного образца на маятниковых копрах.

Маятниковый копер предназначен для разрушения образца, свободно лежащего на его опорах, тяжелым маятником, падающим из взведенного состояния. Маятниковые копры изготавливаются по ГОСТ 10708-76 и основные их параметры должны соответствовать требованиям ГОСТа. По конструкции они разделяются на копры с переменным запасом энергии с одним молотом и копры с определенным запасом энергии со сменными молотами.

### ОПИСАНИЕ МАЯТНИКОВОГО КОПРА МК-30 С ПЕРЕМЕННЫМ ЗАПАСОМ ЭНЕРГИИ

Копер состоит из станины, двух полок, тяжелого маятника, закрепленного на растяжках и свободно качающегося на оси, подъемной рамы, которую можно устанавливать на различной высоте. В верхней части рамы имеется защелка для удержания маятника во взведенном положении. Подъемная рама, опирающаяся на храповики, позволяет менять запас энергии в пределах от 1 до 30 кгс·м. Опоры для образца вынесены на угол  $\gamma = 17^\circ$  от вертикальной оск.

Массивный маятник копра в поднятом (взведенном) положении обладает определенным запасом потенциальной энергии. При падении маятника часть энергии затрачивается на деформацию и разрушение образца, а часть расходуется на подъем маятника после удара. Зная запас энергии маятника до удара и измерив оставшуюся часть ее (по высоте подъема маятника после

удара), можно подсчитать работу, затраченную на деформацию и разрушение образца. Схема регистрации работы удара на копре приведена на рис. 1.1.

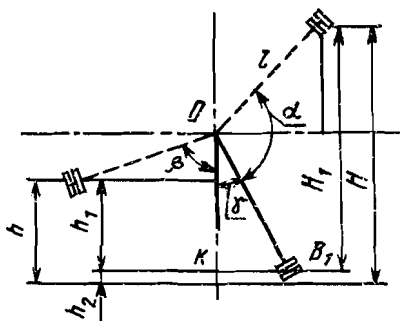


Рис. 1.1. Схема регистрации работы удара на копре МК-30

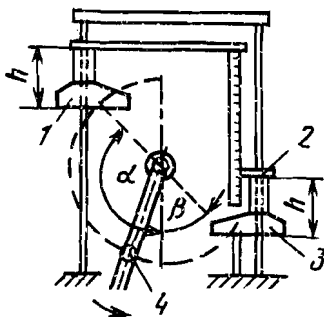


Рис. 1.2. Измерительное приспособление для регистрации работы удара

Запас энергии маятника для копров этого типа равен  $E = PH_1$ .

Из схемы также следует, что  $H_1 = H - h_2$ , где  $H = l(1 - \cos \alpha)$ ,  $h_2 = l(1 - \cos \gamma)$ . Тогда  $H_1 = l(\cos \gamma - \cos \alpha)$  и  $E = Pl(\cos \gamma - \cos \alpha)$ . Остаток энергии маятника после разрушения образца  $E_1 = Pl(\cos \gamma - \cos \beta)$ , а работа удара  $K = E - E_1 = Pl(\cos \beta - \cos \alpha)$ , где  $P$  – вес маятника, кгс (Н);  $l$  – расстояние от оси качания до центра тяжести, м;  $H$  – высота подъема центра тяжести маятника, м;  $\alpha$  – угол подъема маятника в исходное положение;  $\beta$  – угол подъема маятника после разрушения образца.

Энергия, затраченная на разрушение образца, отсчитывается при помощи специального измерительного приспособления (рис. 1.2) по шкале, градуированной в Дж.

Это измерительное приспособление состоит из двух горизонтальных планок: планки 1, соединенной с вертикальной шкалой, и планки 3, соединенной с указателем 2, которые перемещаются по тонкому вертикальному стержню с трением, достаточным для преодоления его веса. На оси маятника на специальном поводке установлен ролик 4. При установке маятника в начальное положение этот ролик поднимает ближайшую к нему планку 1, а вместе с ней и шкалу на величину, пропорциональную высоте подъема центра тяжести маятника. После спуска маятника, когда он пройдет вертикальное положение, ролик начинает поднимать по вертикали планку 3 и связанный с ней указатель 2 на высоту, пропорциональную энергии, оставшейся не израсходованной. Указатель остается в этом положении вследствие наличия сил трения и указывает на шкале некоторую величину, пропорциональную разности высот центра тяжести маятника до и после удара, т.е. пропорциональную работе, затраченной на разрушение образца.

## ОПИСАНИЕ МАЯТНИКОВОГО КОПРА 2130 КМ-0,3

Маятниковый копер 2130 КМ-0,3 предназначен для испытания образцов из металлов и сплавов на двухопорный ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 9454-78. Он снабжен маятником с номинальным значением потенциальной энергии 150 Дж (14,7 кгс·м) и дополнительными накладками, позволяющими увеличить номинальное значение потенциальной энергии маятника до 300 Дж (29,4 кгс·м).

Копер как испытательный комплекс состоит из следующих основных частей: собственно копра, пульта, цифropечатающей машины и микрокалькулятора. Этот комплекс позволяет автоматически регистрировать результаты испытания образцов. Сам копер состоит из массивной чугунной опоры с закрепленными на ней стойками, маятника, подъемного устройства – пневмоцилиндра и стрелы, служащей для подъема маятника, тормоза для остановки движения маятника после разрушения образца, рычага подачи образцов, блока измерения, электрооборудования и пневмооборудования, переднего и заднего ограждений.

Опора для образца расположена таким образом, что маятник производит удар по образцу, находясь в вертикальном положении. Энергия, затраченная на разрушение образца, высвечивается в цифровой форме на табло блока измерения в джоулях. Ударную вязкость образца определяют согласно ГОСТ 9454-78.

Порядок работы на копре 2130 КМ-0,3 следующий.

1. Оцените ориентировочную работу разрушения испытываемого образца и настройте копер на соответствующий запас энергии маятника 150 или 300 Дж. Для этого откройте переднее ограждение и снимите или закрепите на маятнике четыре накладки. Сцепите маятник со стрелой и закройте переднее и заднее ограждения.

2. Перед включением копра все переключатели и тумблеры установите в исходное положение: на панели копра тумблер СТРЕЛА – положение ВВЕРХ, на стойке копра автомат СЕТЬ – в положение ВКЛ, запорный вентиль – в положение ОТКРЫТО, давление воздуха на манометре – нуль. Стрела и маятник в нижнем положении.

3. Откройте запорный вентиль на корпусе копра. Регулятором давления установите по манометру на копре давление 0,35 МПа, если подвешен маятник на 300 Дж или 0,25 МПа, если подвешен маятник на 150 Дж, при этом стрела с маятником должна подняться до исходного положения, определяемого регулируемым упором на стреле.

4. Включите автомат СЕТЬ – на панели копра должна загореться сигнальная лампочка.

5. Рычагом подачи образцов установите образец на опоры копра.

6. Включите тумблер на отсчетном устройстве копра – на табло должны высветиться цифры "000.0".

7. Нажмите на кнопку УДАР. При этом срабатывают электромагниты, удерживающие маятник. Маятник падает, разрушает образец, поднимается на высоту, соответствующую запасу его оставшейся энергии, идет назад и проскакивает мимо стрелы, включая микропереключатель, который подает сигнал на отключение электромагнитов. Стрела подхватывает маятник и поднимает его в исходное положение — маятник подготовлен к следующему испытанию, а на табло высвечивается значение работы разрушения.

При испытании следующего образца к зафиксированной ранее работе разрушения добавляется работа разрушения очередного образца.

### ПРОВЕРКА МАЯТНИКОВЫХ КОПРОВ

При проверке копра должны быть выполнены следующие операции:

внешний осмотр;

опробование;

определение размеров ножа маятника и опор копра;

определение отклонения от горизонтальности положения опор в направлении оси образца;

определение перпендикулярности боковых поверхностей молота относительно вертикальной и горизонтальной поверхностей опоры;

определение расстояния между опорами;

определение разности расстояния от оси качания маятника до середины образца и от оси качания до середины кромки ножа;

определение непараллельности боковых поверхностей молота маятника относительно плоскости его качания;

определение осевого люфта оси маятника;

определение скорости движения маятника в момент удара;

определение разности расстояний от оси качания маятника до середины образца и расстоянием от оси качания до центра удара;

определение периода полного колебания маятника и количества полных колебаний;

определение относительной погрешности показаний копра по шкале.

При проведении внешнего осмотра должно быть установлено: соответствие копров требованиям ГОСТ 10708-76 в части внешнего вида, комплектности, маркировки, покрытий; отсутствие на поверхности копров механических и коррозионных повреждений; плотное прилегание подвижных опор к опорным плоскостям и надежное крепление их на корпусе зажимными болтами; наличие на копре шкалы с четко нанесенными цифрами и надписями.

Опробование копра проводят при холостом режиме, при этом копры должны удовлетворять следующим требованиям:



молот должен быть надежно без люфтов закреплен к подвеске или к штанге, маятник должен подниматься на заданную высоту плавно;

предохранительное устройство должно надежно запирать спусковое устройство при поднятом маятнике, маятник должен легко освобождаться под действием спускового приспособления;

у копров с запасом энергии больше 5 кгс·м (50 Дж) после взлета (обратного хода маятника) должно автоматически включаться тормозное приспособление и маятник должен останавливаться;

указатель стрелки, а также шкала (копров типа МК-15 или МК-30) должны легко передвигаться и фиксироваться в поднятом положении.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЯТНИКОВОГО КОПРА

Размеры ножа маятника и опор копра проверяют штангенциркулем, угломером с нониусом и радиусным шаблоном.

Горизонтальность установки опор копра в направлении оси образца определяют рамным уровнем, установленным на опоры. Отклонение от горизонтальности не должно превышать 0,15 мм на длине 100 мм.

Отклонение от перпендикулярности боковых поверхностей молота относительно вертикальной и горизонтальной поверхностей опоры определяют поверочной линейкой, поверочным угольником. Оно не должно быть более 0,3 мм на длине 100 мм.

Расстояние между опорами при различных установках опор должно соответствовать расстояниям, указанным на установочных горизонтальных шкалах, и должно регулироваться в пределах от 40 до 120 мм для копров с запасом потенциальной энергии до 150 кгс·м. Проверку проводят штангенциркулем.

Разность между расстоянием от оси качания маятника и отметкой на середине ножа маятника и расстоянием от оси качания маятника до середины контрольного образца не должна превышать 1 мм (измеряется штангенциркулем или штангенрейсмасом).

Ненарallelность боковой поверхности молота маятника относительно плоскости его качания не должна превышать 0,3 мм на длине 300 мм (измеряется индикатором часового типа ИЧ10, класса 0).

Осевой люфт оси качания маятника не должен быть более 0,25 мм. Он измеряется индикатором часового типа, закрепленным на станине копра магнитной стойкой так, чтобы измерительный стержень упирался в торец оси маятника. Осевой люфт определяют, перемещая ось маятника перпендикулярно плоскости качания.

Скорость движения маятника в момент удара вычисляют по формуле  $v = \sqrt{2gL(\cos\gamma - \cos\alpha)}$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $L$  — расстоя-

ние от оси качания маятника до середины образца, м;  $\gamma^0$  — угол выноса опор от вертикали, град.;  $\alpha$  — угол подъема маятника, град.

Расстояние  $L$  измеряют рулеткой и штангенциркулем. Угол определяют угломером с нониусом. Скорость движения маятника в момент удара у копров с наибольшим значением запаса потенциальной энергии от 5,0 до 250 кгс·м. (от 50 до 2500 Дж) должна составлять 5,0 — 5,5 м/с.

Разность между расстоянием  $L$  от оси качания маятника до середины ножа и расстояние  $l$  от оси качания маятника до центра удара (приведенная длина маятника) не должна превышать  $\pm 1\%$  от расстояния  $L$ . Длину математического маятника  $l$ , изохронного с данным физическим, подсчитывают по формуле  $l = \frac{g}{4\pi^2} T^2$ , где  $T$  — период полного колебания маятника;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  для Москвы. Для определения периода полного колебания необходимо отклонить маятник приблизительно на  $10^\circ$  от вертикали, опустить и, пустив секундомер, определить время, необходимое для 80—100 полных колебаний.

Следует также иметь в виду, что число полных колебаний маятника до полной остановки, отклоненного на  $10^\circ$  от вертикали и отпущенного для свободного качания, должно быть не менее 125. Это характеризует усилие затяжки подшипников и трение в подшипниках.

Относительную погрешность показаний копра по шкале, %, подсчитывают по формуле:

$$\psi = \frac{E_1 - E}{E} \cdot 100\%,$$

где  $E_1$  — наибольшее значение работы поверяемого диапазона шкалы;  $E$  — запас энергии маятника для поверяемого угла подъема, вычисляют по формуле:

$$E = Rl_1 (\cos \gamma^0 - \cos \theta).$$

Здесь  $R$  — реакция опоры маятника,  $l_1$  — расстояние от оси качания до точки опоры,  $\gamma^0$  — угол выноса опор от вертикали (угол, под которым маятник встречается с образцом),  $\theta$  — поверяемый угол подъема маятника.

Погрешность показаний шкал удобно определить, сравнивая величину действительного запаса энергии маятника в горизонтальном положении  $K = Rl_1$  с паспортной, на основании которой проведена градуировка шкалы.

Для определения этой величины необходимо отклонить маятник в горизонтальное положение и непосредственно взвесить его, оперев серединой ударного ножа на призму, установленную на чашку весов, или использовать специальное приспособление для взвешивания, которое прилагается к копру.

Приспособление состоит из планки, стального тросика, одним концом закрепленного на планке и имеющего крючок на другом. При помощи этого приспособления необходимо маятник копра привести в горизонтальное поло-

жение. Планка помещается под растяжками, на которых закреплен маятник, а тросик перекидывается через ролик, укрепленный в раме, поддерживающей маятник в поднятом состоянии. С помощью грузов, подвешиваемых на конце тросика, маятник вывешивается в горизонтальное положение. Тросик от планки к ролику должен иметь вертикальное положение. Найденный таким образом вес груза  $G_1$ , умноженный на расстояние до точки подвеса тросика  $l_1'$  дает произведение  $G_1 l_1'$ . Повторное взвешивание производят, изменяя положение планки (пропуская тросик через ролик с противоположной стороны). Взвешивание производится с погрешностью до  $\pm 10$  г. Расстояние  $l_1'$  от оси качания маятника до ребра призмы или тросика измеряется линейкой с погрешностью до 0,5 мм.

Среднее арифметическое результатов двух измерений принимается за действительный запас энергии маятника  $K$ :

$$K = Rl_1 = \frac{G_1 l_1' + G_2 l_2'}{2}.$$

Найденная величина  $K$  не должна отличаться от паспортной действительного запаса энергии маятника (указывается на копре) более чем на +1%. Отличие найденной величины  $K$  от паспортной характеризует погрешность показаний шкалы копра.

#### МЕТОДЫ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ МЕТАЛЛОВ

Ударные испытания металлов проводят по ГОСТ 9454-78. Метод основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятника копра. Концы образца располагают на опорах. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе (работу удара)  $K$  или ударную вязкость  $KG$ . Под ударной вязкостью следует понимать работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

ГОСТ предусматривает возможность использования 20 типов образцов, различающихся размерами, глубиной и формой надреза (рис. 1.3-1.5, табл. 1.1). Наибольшее распространение в СССР получает испытание образца II типа, который принят в качестве основного (образец Шарпи -- V) во многих странах мира. Допускается испытывать образцы и без надреза. Риски на поверхности концентраторов видов U и V, видимые без применения увеличительных средств, не допускаются. Концентратор вида T (трещина) получают в вершине начального надреза при диклическом изгибе образца в одной плоскости. Число циклов, необходимое для получения трещин заданного размера, должно быть не менее 3000. Остаточный прогиб на всей длине образца, образовавшийся при нанесении трещины на образцах с концентратором T, не должен превышать 0,25 мм для образцов длиной 55 мм.

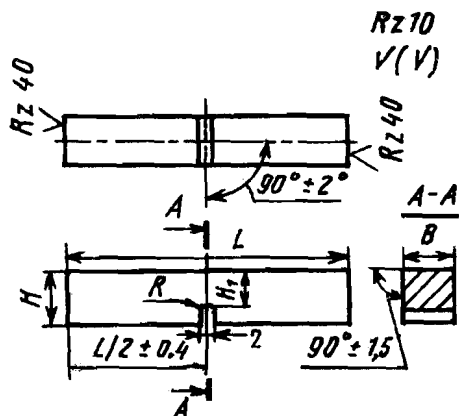


Рис. 1.3. Образец с концентратором  
вида U

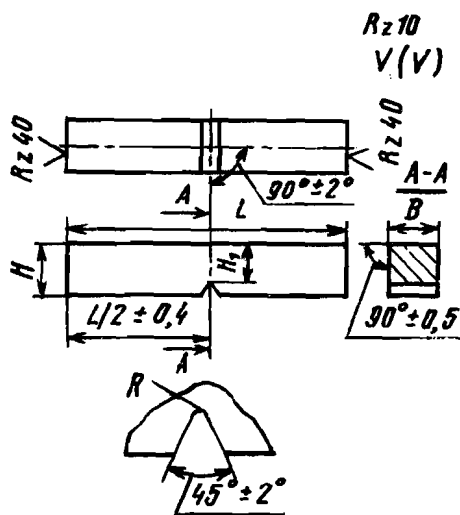


Рис. 1.4. Образец с концентратором  
вида V

Перед началом испытаний необходимо проверить положение указателя работы при свободном падении маятника. Указатель работы должен показывать "нуль" с отклонением до 0,5% от максимальной энергии удара маятника, но не более 1 (0,1) Дж (кгс·м). Максимальная энергия удара маятника должна быть такой, чтобы значение работы удара составляло не менее 10% и не более 80% от максимальной энергии удара применяемого маятника.

При проведении испытаний образец должен свободно лежать на опорах копра. Установка образца производится с помощью шаблона, обеспечивающего симметричное расположение концентратора относительно опор с погрешностью не более 0,5 мм.

Испытание должно проводиться при ударе маятника со стороны, противоположной концентратору, в плоскости его симметрии. Работу удара

Типы и размеры образцов

Радиус концентратора, мм	Длина (предельное отклонение $\pm 0,6$ ), мм	Ширина, мм	Высота (предельное отклонение $\pm 0,1$ ), мм	Глубина надреза (предельное отклонение $\pm 0,1$ ), мм	Глубина концентратора (предельное отклонение $\pm 0,6$ ), мм	Высота рабочего сечения, мм	
1	55	10 $\pm$ 0,10	10	—	—	8 $\pm$ 0,1	
2		7,5 $\pm$ 0,10					
3		5 $\pm$ 0,05					
4		2 $\pm$ 0,05	8			6 $\pm$ 0,1	
1+0,07		10 $\pm$ 0,10	10			7 $\pm$ 0,1	
6		7,5 $\pm$ 0,10					
7		5 $\pm$ 0,05					
8		10 $\pm$ 0,10					
9		7,5 $\pm$ 0,10					5 $\pm$ 0,1
10		5 $\pm$ 0,05					
11	10 $\pm$ 0,10	10		2	2		8 $\pm$ 0,05
12	7,5 $\pm$ 0,10						
0,25 $\pm$ $\pm$ 0,0025	13		5 $\pm$ 0,05				
14	2 $\pm$ 0,05	8	6 $\pm$ 0,05				
15	55	10 $\pm$ 0,10	11	1,5	3,0		
16		7,5 $\pm$ 0,10					
Трещина		17				5 $\pm$ 0,05	
18		2 $\pm$ 0,05				9	
19		10 $\pm$ 0,10				10	3,5
20	140	25 $\pm$ 0,10	25	10,0	12,5		

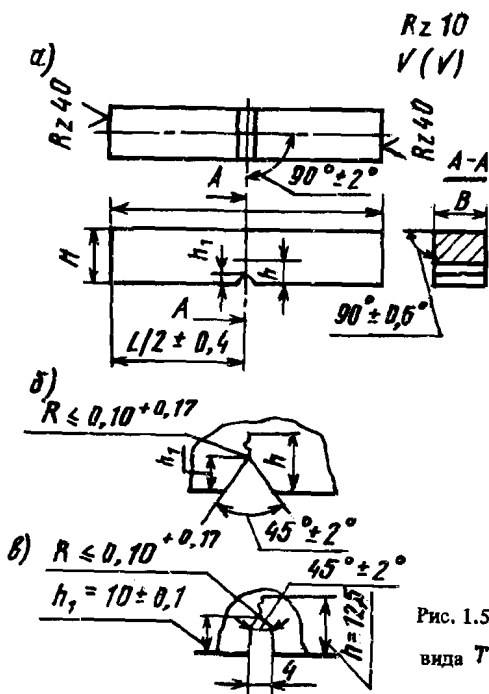


Рис. 1.5. Образец с концентратором вида  $T$  (с усталостной трещиной)

определяют по шкале маятникового копра. За окончательный результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов  $U$  и  $V$  и ударную вязкость для образцов с концентратором вида  $T$ . Работу удара обозначают двумя буквами ( $KU$ ,  $KV$  или  $KT$ ) и цифрами. Первая буква  $K$  – символ работы удара, вторая буква  $U$ ,  $V$  или  $T$  – вида концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Цифры не указывают при определении работы удара на копре с максимальной энергией удара маятника 300 (30) Дж (кгс·м) при глубине концентратора 2 мм для концентраторов видов  $U$  и  $V$  и 3 мм для концентратора вида  $T$  и ширине образца 10 мм (образцы 1, 11, 15 типов).

Ударную вязкость обозначают сочетанием букв и цифр. Первые две буквы  $KС$  обозначают символ ударной вязкости, третья буква – вид концентратора; первая цифра – максимальную энергию удара маятника, вторая – глубину концентратора и третья – ширину образца. Цифры не указываются для образцов типа 1, 11 и 15.

Например:  $KСТ^{+100} 150/3/7,5$  – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида  $T$  при температуре  $+100^{\circ}\text{C}$ . Максимальная энергия удара маятника 150 Дж (15 кгс·м), глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Ударную вязкость КС, Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>), вычисляют по формуле:

$$КС = \frac{K}{S_0},$$

где  $K$  – работа удара, Дж (кгс·м);  $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, м<sup>2</sup> (см<sup>2</sup>), вычисляемая по формуле  $S_0 = H_1 B$ . Здесь  $H_1$  – начальная высота рабочей части образца, м (см),  $B$  – начальная ширина образца, м, (см),  $S_0$  округляют при ширине образца более 5 мм до второй значащей цифры.

Для образцов с концентратором вида  $T$  значение  $H_1$  определяют как разность между полной высотой  $H_1$ , измеренной до испытания с погрешностью не более 0,005 см и расчетной глубиной концентратора  $h_p$ , измеренной с помощью оптических средств с увеличением не менее  $7^*$  на поверхности излома образца после его испытания по схеме, приведенной на рис. 1.6 с погрешностью не более 0,005 см.

Значение КС записывают в протокол с округлением до 1 (0,1) Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>) при значении КС более 10 (1) Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>) и до 0,1 (0,01) Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>) при значении КС менее 10 (1) Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>) (приложение 1.1).

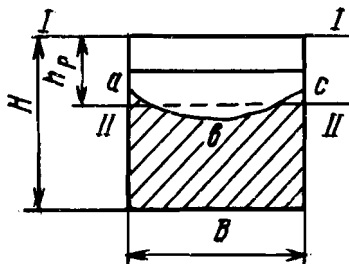


Рис. 1.6. Схема измерения площади излома:

авс – фронт усталостной трещины; I-I – положение визирной линейки окуляра микроскопа в начальный момент измерения (совпадает с гранью образца); II-II – положение визирной линейки микроскопа при окончании измерения (положение II-II выбирается так, чтобы заштрихованная площадь выше линии была бы равна незаштрихованной площади ниже визирной линии)

Исходные данные и результаты испытания образцов записывают в протоколе испытания, форма которого приведена в приложении 1.2.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Определение метрологических характеристик маятникового копра.

1. Провести внешний осмотр маятниковых копров КМ-30 и 2130 КМ-0,3 и познакомиться с порядком проведения испытаний образцов на этих копрах.

2. Провести опробование копров на холостых режимах (без образца).
3. Определить метрологические параметры одного маятникового копра, используя соответствующие инструменты и приспособления. Результаты измерений внести в протокол поверки маятникового копра (приложение 1.1). Сделать вывод о возможности использования поверяемого копра для механических испытаний ударных образцов.
4. Обмерить образец для ударных испытаний и установить его тип.
5. Испытать образец и определить его ударную вязкость. Результаты испытаний внести в протокол испытания на ударный изгиб (приложение № 1.2).

Отчет о работе должен содержать:

результаты поверки маятникового копра МК-30, выводы о пригодности его для механических испытаний, форму, размеры и типы испытанных образцов, результаты их испытания.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 10708-76. Копры маятниковые. Технические условия.
2. ГОСТ 8.264-77. Копры маятниковые. Методы и средства поверки.
3. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.
4. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Т. 1. М.: Машиностроение, 1974, с. 160—170.



ПРОТОКОЛ  
ПОВЕРКИ МАЯТНИКОВОГО КОПРА

№ \_\_\_\_\_ тип \_\_\_\_\_

изготовленного \_\_\_\_\_

принадлежащего \_\_\_\_\_

поверен \_\_\_\_\_ 198\_\_ г.

Результаты поверки

1. Соответствие копра техническим требованиям, проведенным внешним осмотром \_\_\_\_\_

2. Результаты поверки размеров элементов копра

3. Потери энергии при свободном качании маятника

4. Относительная погрешность показаний копра по шкале

5. Наибольшее значение потенциальной энергии маятника копра

6. Потенциальная энергия маятника копра в горизонтальном его положении \_\_\_\_\_

7. Расстояние от оси качания маятника до середины образца

8. Расстояние от оси качания маятника до центра удара

9. Разность расстояний от оси качания маятника до середины образца и от оси качания до центра удара \_\_\_\_\_

Заключение о результатах поверки.

Выдано свидетельство № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 198\_\_ г.

Поверку проводил \_\_\_\_\_  
(подпись)

( фамилия, имя, отчество )

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

Марка копра \_\_\_\_\_

Максимальная энергия удара маятника при испытании \_\_\_\_\_

Скорость маятника в момент удара \_\_\_\_\_

Испытуемый материал \_\_\_\_\_

Маркировка образца	Тип образца	Температура испытания °С	Ширина образца В, м (см)	Высота образца Н, м (см)	Глубина концентратора, м (см)	Высота рабочего сечения, Н, м (см)	Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup> (см <sup>2</sup> )	Работа удара К, Дж (кгс·м)	Ударная вязкость КС, Дж/м <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )	Примечание :

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ МАТЕРИАЛА

**Ц е л ь :** знакомство с понятием критической температуры хрупкости  $T_k$ , экспериментальными методами ее определения, определением  $T_k$  для предложенного материала.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Под критической температурой хрупкости  $T_k$  понимается температура, при которой происходит изменение характера разрушения материала от хрупкого к вязкому. Она определяется по энергии, затрачиваемой на разрушение, в качестве показателя которой принимается ударная вязкость, и по виду излома образцов, в качестве показателя которого принимается доля вязкой составляющей в изломе или значение поперечного расширения образца в зоне излома. В качестве пограничных величин принимается определенный уровень ударной вязкости материала, зависящей от предела текучести материала, или наличие 50% вязкой (хрупкой) фазы в изломе по площади.

Характеристика  $T_k$  — критическая температура хрупкости. Совместно с критическим коэффициентом интенсивности напряжений (вязкость разрушения)  $K_{Ic}$  и пределом текучести  $R_{P0,2}^T$  используется для расчета на сопротивление хрупкому разрушению элементов оборудования и трубопроводов АЭУ на стадии проектирования для всех режимов эксплуатации, включая нормальные условия эксплуатации (НУЭ), нарушение нормальных условий эксплуатации (ННУЭ), аварийные ситуации (АС), гидравлические (пневматические) испытания.

Изменение свойств материала в процессе эксплуатации учитывают введением в расчет сдвигов критической температуры хрупкости вследствие различных воздействий в процессе эксплуатации.

Расчет на сопротивление хрупкому разрушению с использованием характеристики  $T_k$  заключается в следующем.

Сопротивление хрупкому разрушению считается обеспеченным, если для выбранного расчетного дефекта в виде трещины в рассматриваемом режиме эксплуатации выполняется условие:

$$K_I \leq [K_I]_c ,$$

где  $[K_1]$  — допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений. Индекс  $i$  указывает, что допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений выбирают различным в зависимости от расчетного случая:  $i = 1$  — для НУЭ,  $i = 2$  — для ННУЭ и условия гидравлического (пневматического) испытания,  $i = 3$  для АС.

При определении  $[K_1]_i$  значения флюенса нейтронов  $F$  и температуры  $T$  принимают равными их значениям в точке, соответствующей наибольшей глубине выбранной расчетной трещины.

Расчет на сопротивление хрупкому разрушению можно не производить для элементов конструкций, не подвергающихся нейтронному облучению (или подвергающихся облучению при температурах  $250 \div 350^\circ\text{C}$  до флюенса не более  $10^{22}$  нейтр./ $\text{м}^2$  при  $E \geq 0,5$  МэВ), или:

элементы конструкции изготовлены из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса или цветных сплавов;

материалы элементов конструкций, включая сварные соединения, имеют предел текучести при температуре  $20^\circ\text{C}$  менее 300 МПа ( $30 \text{ кгс/мм}^2$ ), а толщина стенки элемента конструкции составляет не более 25 мм;

материалы элементов конструкций, (включая сварные соединения), имеют предел текучести при температуре  $20^\circ\text{C}$  менее 600 МПа ( $60 \text{ кгс/мм}^2$ ), а толщина стенки элемента конструкции составляет не более 16 мм;

толщина стенки рассматриваемого элемента конструкции  $S$  удовлетворяет условию:

$$S \leq 8 \cdot 10^3 \left( \frac{[K_1]_i}{R_{p0,2}^T} \right)^2, \text{ мм}$$

при  $[K_1]$  в МПа·м<sup>1/2</sup> и  $R_{p0,2}^T$  в МПа (обе характеристики принимают при наименьшей температуре эксплуатации и критической температуре хрупкости  $T_K$ , соответствующей концу эксплуатации).

Допускаемые значения коэффициента интенсивности напряжений зависят от приведенной температуры  $(T - T_K)$  и расчетного случая. Зависимости  $[K_1]_i$  от  $[T - T_K]$  получают как огибающую двух кривых, определяемых по исходной температурной зависимости  $K_{1C}$ . Одну из этих кривых получают делением ординат исходной кривой на коэффициент запаса прочности  $n_K$ , другую — смещением исходной кривой вдоль оси абсцисс на величину температурного запаса  $\Delta T$ . Принимают

для НУЭ ( $i = 1$ )  $n_K = 2$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ ;

для ННУЭ и гидравлических (пневматических) испытаний ( $i = 2$ )  $n_K = 1,5$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ ;

для АС ( $i = 3$ )  $n_K = 1$ ,  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ .

Исходные температурные зависимости  $K_{1C}$  принимают по данным, приведенным в соответствующих аттестационных отчетах по материалам (основной металл, сварные соединения).

Критическую температуру хрупкости материала определяют по формуле:

$$T_K = T_{K0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F,$$

где  $T_{K0}$  — критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии;  $\Delta T_T$  — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения;  $\Delta T_N$  — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие циклической повреждаемости;  $\Delta T_F$  — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения.

Значения  $T_{K0}$ ,  $\Delta T_T$ ,  $\Delta T_N$ ,  $\Delta T_F$ , или коэффициента радиационного охрупчивания  $A_F$  принимают по данным соответствующих аттестационных отчетов по материалам (основной металл и сварные соединения), данным ТУ на материалы или на основе технических решений, согласованных с Госатомэнергонадзором.

Допускается определять значение  $\Delta T_N$  по формуле:

$$\Delta T_N = 20 \sum_{i=1}^m N_i / [N_i],$$

где  $N_i$  — число циклов нагружения при  $i$ -м режиме эксплуатации;  $[N_i]$  — допускаемое число циклов для  $i$ -го режима эксплуатации;  $m$  — число режимов.

Допускается определять значение  $\Delta T_F$  по формуле:

$$\Delta T_F = A_F \left( \frac{F}{F_0} \right)^{1/3},$$

где  $A_F$  — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;  $F$  — флюенс нейтронов с  $E \geq 0,5$  МэВ нейтр./м<sup>2</sup>;  $F_0$  —  $10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

Формула справедлива при

$$10^{22} \leq F \leq 3 \cdot 10^{24} \text{ нейтр./м}^2.$$

## 2. ОБРАЗЦЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ

### 2.1. Образцы

Для определения критической температуры хрупкости  $T_K$  ( $T_{K0}$  — для материала в исходном состоянии) проводят испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 образцов П типа с V-образным надрезом в выбранном интервале температур. При каждой температуре должно испытываться не менее 3-х образцов. Аппаратура для проведения испытаний и правила проведения испытаний должны соответствовать ГОСТ 9454-78.

## 2.2. Маятниковые копры

Маятниковые копры с переменной или постоянной максимальной энергией удара должны соответствовать ГОСТ 10708-76. Максимальная энергия удара маятника должна быть такой, чтобы значение работы разрушения образца при ударе составляло не менее 10% от максимальной энергии удара применяемого маятника.

### 2.3. Проведение испытаний при пониженных температурах

Охлаждение образцов осуществляется с помощью жидкого азота (температура кипения  $-196^{\circ}\text{C}$ ) или смесью жидкого азота или сухого льда с незамерзающей при температуре испытания и нетоксичной жидкостью, например этиловым спиртом, ацетоном (температура заморзания ацетона около  $-90^{\circ}\text{C}$ ). В температурном интервале от  $-90^{\circ}$  до  $-196^{\circ}\text{C}$  охлаждение образцов осуществляется парами жидкого азота. Температура образца устанавливается с помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце и помещаемой в криостат с партией образцов, предназначенных для испытания. Градуировка термопары контрольного образца осуществляется с помощью термометра с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Образцы для испытаний при пониженных температурах следует несколько переохладить и убедиться в стабилизации температуры. В табл. 2.1 приведены значения температуры переохлаждения образца в зависимости от температуры испытания. После извлечения из криостата в течение 3–5 с образец должен быть помещен на опоры копра и испытан.

Таблица 2.1

Температура переохлаждения и перегрева образца в зависимости от температуры испытания

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	
	переохлаждения	перегрева
От $-60$ и ниже	4–6	–
$-60$ до $-40$	3–4	–
$-40$ до $+10$	2–3	–
$+30$ до $+200$	–	3–5
$+200$ до $+400$	–	5–10
$+400$ до $+500$	–	10–15

## 2.4. Проведение испытаний при повышенных температурах

Партия образцов с контрольным образцом, в котором зачеканена термопара, помещается в печь и нагревается до заданного уровня температуры с перегревом по отношению к температуре испытания. Необходимо убедиться в стабилизации температуры. Температуру образца устанавливают с помощью термопары, зачеканенной в контрольном образце. В табл. 2.1 указаны температуры перегрева образца в зависимости от температуры его испытания. Образец после извлечения из печи в течение 3–5 с должен быть помещен на опоры копра и испытан.

## 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 3.1. Выбор температурного интервала испытаний

Температурный интервал испытаний должен быть таким, чтобы в него обязательно входили точки  $(T_K \pm 10)$ ,  $(T_K \pm 20)$ ,  $(T_K \pm 30)$  °С. Если ориентировочное значение критической температуры хрупкости  $T_{K1}$  заранее известно, допускается проводить испытания в интервале температур  $T_{K1} - 10 < T < (T_{K1} + 40)$  °С. В случае, если ориентировочное значение  $T_{K1}$  заранее неизвестно, рекомендуется определить значение ударной вязкости при 20 °С (комнатной температуре) и в зависимости от полученного при этой температуре значения определить интервал дальнейших температурных испытаний. При полностью вязком изломе и высоких значениях ударной вязкости предварительного образца дальнейшие испытания следует проводить при пониженных температурах; при полностью хрупком изломе и низких значениях ударной вязкости – при повышенных температурах; при вязкохрупком изломе – расширить температурную область испытаний как в области отрицательных так и положительных температур.

### 3.2. Обработка результатов испытаний

Для каждого из испытанных образцов определить ударную вязкость, вязкую составляющую в изломе и поперечное расширение образца.

Ударную вязкость  $KCV$  определить как отношение работы разрушения образца к площади нетто-сечения в зоне надреза:

$$KCV = \frac{K}{S_0},$$

где  $K$  – работа удара;  $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора,  $\text{м}^2$  ( $\text{см}^2$ ).

Значения вязкой составляющей в изломе  $B$  определить согласно ГОСТ 4543-71 планиметрированием площади хрупкой фазы в изломе:

$$B = \frac{S_0 - S_x}{S_0} \cdot 100\%,$$

где  $S_x$  – площадь хрупкой фазы в изломе,  $\text{м}^2$  ( $\text{см}^2$ ).

Поперечное расширение  $\Delta b$  ударного образца представляет собой остаточную (пластическую) деформацию на грани, противоположной надрезу и измеренную в направлении надреза, как показано на рис. 2.1. Поперечное расширение  $\Delta b$  определяют по формуле:

$$\Delta b = b_1 - b_0 = \Delta_1 + \Delta_2.$$

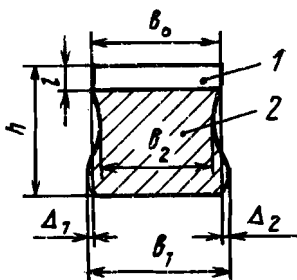


Рис. 2.1. Схема излома образца:  
1 – зона надреза; 2 – зона излома;  
 $b_0$  – ширина образца;  $h$  – глубина надреза;  $h$  – высота образца

Поперечное расширение определяют на половинках образцов, разрушившихся после испытания на ударный изгиб. Измерение поперечного расширения произвести с помощью микрометра с погрешностью  $\pm 0,01$  мм.

Построить графики температурных зависимостей ударной вязкости, вязкой составляющей в изломе и поперечного расширения образца, предварительно нанеся все экспериментальные результаты на график. Полученные графики (кривые) являются исходной информацией для определения критической температуры хрупкости материала.

В качестве критической температуры хрупкости  $T_K$  принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

1) при температуре  $T_K$  среднеарифметическое значение ударной вязкости (по результатам испытания трех образцов при каждой температуре) должно быть не ниже значений, указанных в табл. 2.2, а минимальные значения ударной вязкости – не ниже 70% значений, указанных в табл. 2.2;

2) при температуре  $(T_K + 30)^\circ\text{C}$  среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже значений, указанных в табл. 2.3,



Таблица 2.2

Критериальные значения ударной вязкости в зависимости от предела текучести материала

Предел текучести материала при 20 <sup>o</sup> C, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Ударная вязкость KCV Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
До 304 (31) включительно	29 (3,0)
Свыше 304 (31) до 402 (41) включительно	39 (4,0)
Свыше 402 (41) до 549 (56) включительно	49 (5,0)
Свыше 549 (56) до 687 (70) включительно	59 (6,0)

Таблица 2.3

Критериальные значения ударной вязкости в зависимости от предела текучести материала

Предел текучести материала при 20 <sup>o</sup> C, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
До 304 (31) включительно	44 (4,5)
Свыше 304 (31) до 402 (41) включительно	59 (6,0)
Свыше 402 (41) до 549 (56) включительно	74 (7,5)
Свыше 549 (56) до 687 (70) включительно	89 (9,0)

минимальные значения ударной вязкости — не ниже 70%, указанных в табл. 2.3, минимальное значение вязкой составляющей в изломе — не ниже 50%.

Если на одном из испытанных образцов не будет удовлетворяться какое-либо из условий, указанных выше в пп. 1 и 2, допускается проведение испытаний еще трех образцов. При этом при определении соответствия полученных результатов требованиям пп. 1 и 2 используют показания пяти образцов за исключением образца, для которого при первом испытании были получены неудовлетворительные результаты.

Если при дополнительных испытаниях хотя бы на одном образце будут получены неудовлетворительные показатели, то за критическую температуру  $T_K$  принимают ближайшую более высокую температуру, при которой результаты испытания удовлетворяют требованиям пп. 1 и 2.

При обнаружении дефектов в виде раковин, расслоений и т.п. в изломе образца допускается результаты его испытаний исключить из рассмотрения и испытать новый образец.

### 3.3. Порядок определения критической температуры хрупкости материала

1. По известному значению предела текучести материала при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  выбрать по табл. 2.2 и 2.3 соответствующие критериальные значения ударной вязкости  $(KCV)_1$  и  $(KCV)_2$ . При определении  $(KCV)_1$  и  $(KCV)_2$  для зоны сплавления или околошовной зоны сварного соединения использовать предел текучести основного металла. В качестве значения предела текучести исследуемого материала принимается среднее значение, если для его определения использовалось не менее 3-х образцов, и максимальное значение, если для его определения использовалось 2 образца.

2. На графике ударная вязкость – температура на оси ординат (ось  $KCV$ ) – отложить значение  $(KCV)_1$ . Через полученную точку провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принять за температуру  $T_1$ .

3. На графике ударная вязкость – температура на оси ординат – отложить значение  $(KCV)_2$ . Через полученную точку провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принять за температуру  $T_2$ .

4. На графике "вязкая составляющая в изломе – температура" на оси ординат отложить значение  $B = 50\%$ . Через полученную точку провести линию, параллельную оси абсцисс до пересечения с кривой "вязкая составляющая в изломе – температура", построенной по минимальным значениям вязкой составляющей. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принять за температуру  $T_2^{\#}$ .

5. Большую из двух температур  $T_2^I$  и  $T_2^{\#}$  обозначить  $T_2$ .

6. Если разность между температурами  $T_2$  и  $T_1$  оказывается менее  $30^{\circ}\text{C}$ , то температуру  $T_1$  принять в качестве ориентировочного значения критической температуры хрупкости  $T_K^I$ .

7. Если условие (6) не выполняется, то определить  $T_K^I$  по формуле:

$$T_K^I = T_2 - 30^{\circ}\text{C}.$$

8. Провести дополнительные испытания ударных образцов при температурах  $T_K^I \pm 10$ ,  $T_K^I \pm 20$ ,  $T_K^I \pm 30$ ,  $T_K^I \pm 40^{\circ}\text{C}$ , уточнить кривые ударной вязкости, вязкой составляющей в изломе и в соответствии с указаниями пп. 2–7 окончательно установить значение критической температуры хрупкости (если ранее уже были определены значения  $KCV$  и  $B$  при температурах, указанных в данном пункте, проведение дополнительных испытаний при этих температурах не требуется).

9. Если при выполнении требований пп. 2–4 линии, проведенные параллельно оси абсцисс, пересекают соответствующие кривые в двух и более точ-

ках, то температуры  $T_1$ ,  $T_2^I$  и  $T_2^{II}$  следует определять по правым крайним точкам пересечения.

#### 3.4. Подтверждение критической температуры хрупкости

В тех случаях, когда гарантированное значение  $T_K$  указано в нормативно технической документации на материал, возможно проведение испытаний по подтверждению критической температуры хрупкости. При подтверждении критической температуры хрупкости испытания проводятся с соблюдением требований настоящей методики в такой последовательности:

1. Провести испытания при гарантированной температуре  $T_K$  и температуре ( $T_K + 30$ ).

2. Проверить выполнение условий п. 1 раздела 3.2 при температуре  $T_K$  и п. 2 раздела 3.2 при температуре ( $T_K + 30$ ) °С. Если условия пп. 1 и 2 выполняются, то критическая температура хрупкости считается подтвержденной. Если требования пп. 1 и 2 одновременно выполняются при температуре  $T_K$ , то испытание при температуре ( $T_K + 30$ ) допускается не проводить.

Если требования пп. 1 и 2 раздела 3.2 при температурах  $T_K$  и ( $T_K + 30$ ) не удовлетворяются, то критическая температура хрупкости считается неподтвержденной.

Отчет о работе должен содержать:

цель работы, марку испытываемого материала и его механические свойства, характеристику испытываемого образца, протокол испытаний, графики  $KCV - T$ ,  $B - T$ ,  $\Delta b - T$ , значение критической температуры хрупкости материала и его обоснование.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.

2. П и НАЭГ-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

---

## ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

**Ц е л ь :** ознакомление с высокоскоростными механическими испытаниями (ВМИ) на растяжение, принципом работы и устройством установки ИД-16; с методикой определения механических характеристик сталей при высокоскоростном растяжении; со сравнением результатов высокоскоростных и статических испытаний.

## ВВЕДЕНИЕ

## Испытания материалов при высоких скоростях деформирования

В настоящее время в отличие от статических испытаний стандартных методик измерения механических свойств материалов при высокоскоростной деформации не существует. Однако необходимость знания механических характеристик материалов в условиях импульсного нагружения заставляет разрабатывать методики, необходимые для этого.

Отличительной особенностью высокоскоростных испытаний является существенное проявление волновых процессов в образцах, элементах схемы нагружения и регистрации. Механические испытания материалов характеризуются следующими параметрами:  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $v$  – скорость деформирования. В квазистатических условиях испытаний:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{dl}{dt} \left( \frac{1}{l} \right) = \frac{v}{l}, \quad (3.1)$$

где  $l$  – длина рабочей части образца.

Одним из основных видов высокоскоростных испытаний материалов являются испытания при постоянной скорости деформации ( $\dot{\epsilon} = \text{const}$ ), в которых определяют диаграммы напряжение – деформация ( $\sigma - \epsilon$ ).

На точность определения зависимости  $\sigma(\epsilon)$  материалов при высокоскоростных механических испытаниях, проводимых в квазистатических условиях, оказывают влияние следующие основные факторы:

форма и размеры образца (соотношение  $l/d_0$ , где  $d_0$  – начальный диаметр рабочей части образца);

линейные размеры динамометра и его материал;

соотношение между диаметрами динамометра и рабочей части образца;

способ крепления образца в подвижном захвате и динамометре; стабильность и форма нагружающего импульса.

### Выбор геометрии образца

При высокоскоростном растяжении используются образцы с соотношением  $l/d_0$  меньшим, чем предусмотрено по ГОСТ 1497-84 для статических испытаний, для создания по длине рабочей части этих образцов квазистатического напряженного состояния из-за малого времени процесса деформирования. Сообщение постоянной скорости перемещения подвижной головке образца, материал которого имеет плотность  $\rho$ , приводит к распространению по образцу со скоростью звука  $c_0$  упругой волной напряжением  $\sigma$

$$\sigma = \rho c_0 v. \quad (3.2)$$

Отражение прямой волны (рис. 3.1а) от неподвижного конца образца (предполагается абсолютно жесткая его заделка в динамометре) возбуж-

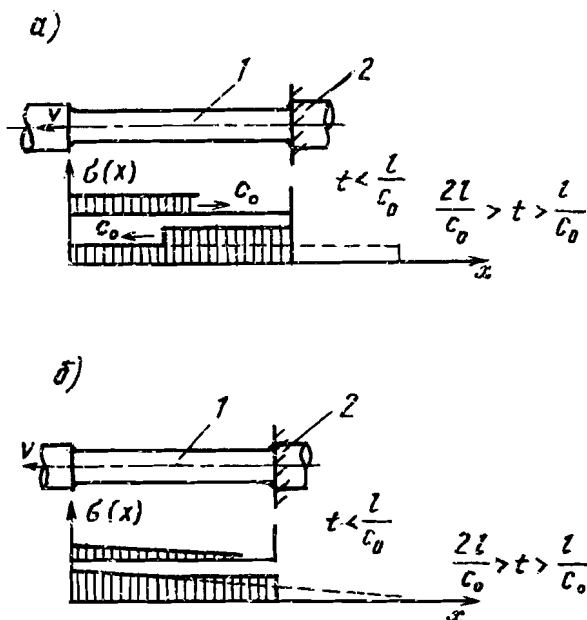


Рис. 3.1. Распределение напряжений по длине рабочей части образца при: а – ступенчатом, б – линейном нагружении в упругой области; 1 – образец; 2 – динамометр

дает упругую волну с противоположным направлением распространения, которая совместно с действием прямой волны приводит к удвоению напряжения. Высокий уровень напряжений в первой волне ударно-приложенной нагрузки, сравнимый с пределом текучести материала (при  $v = 10$  м/с,  $\sigma = 390$  МПа для стали) исключает возможность получения однородного напряженного состояния в образце при ступенчатом изменении скорости на его конце. Вследствие этого возможно развитие неоднородной деформации по длине образца: образование двух шеек, разрушение вблизи одной из головок.

В случае нарастания волны нагрузки по линейной зависимости (рис. 3.1,б) за время нарастания  $t = \frac{2l}{c_0}$  (к моменту прихода фронта отраженной волны к подвижной головке образца) по длине рабочей части устанавливается равномерное распределение нагрузки (квазистатическое напряженное состояние). Для этого момента напряжение

$$\sigma = \rho c_0 l \dot{\epsilon} \quad (3.3)$$

При таком нарастании нагрузки квазистатическое напряженное состояние устанавливается в области упругих деформаций при условии, что длина рабочей части образца удовлетворяет неравенству:

$$l \leq \frac{\sigma_T}{\rho c_0 \dot{\epsilon}} \quad (3.4)$$

Например, для стали (при  $\xi = 400$  МПа) максимальная длина образца оказывается равной 10; 1,0 и 0,1 см для скоростей деформации соответственно  $10^2$ ,  $10^3$  и  $10^4$  с<sup>-1</sup>. Следовательно, для получения квазистатического напряженного состояния по длине рабочей части образца последнюю необходимо уменьшать. Величина диаметра образца влияет на отклонение напряженного состояния от одноосного и его уменьшение при определенном диаметре динамометра позволяет получить более надежные данные о механических свойствах материалов. Минимальная величина диаметра ограничивается как конструктивными соображениями, так и необходимостью обеспечить соответствие регистрируемой кривой  $\sigma(\xi)$  усредненным по объему характеристикам материала. В лабораторной работе используются образцы с  $l = 5$  мм и  $d_0 = 2,5$  мм.

### Требования к конструкции динамометра

Регистрация усилия, сформированного при деформировании образца, без искажения является основным требованием при ВМИ в квазистатических условиях, выполнение которого встречает серьезные трудности, связанные с необходимостью учета волновых явлений в динамометре.

Для измерения нагрузки в образце поперечное сечение динамометрического стержня выбирают таким, чтобы напряжения в нем не достигали предела упругости материала динамометра. Кроме того, длину динамометра выбирают такой, чтобы можно было производить регистрацию только прямой волны нагрузки, сформированной в процессе деформации и разрушения образца, соединенного с динамометром при помощи захватного участка. Согласно такому условию длина динамометра должна быть достаточной для регистрации этой волны нагрузки до прихода к тензодатчикам на динамометре волны, отраженной от противоположного конца динамометра. Необходимо также обеспечить равенство волновых сопротивлений ( $F \cdot \rho \cdot c_0$ , где  $F$  — площадь поперечного сечения); в любом сечении захватного участка и динамометра с целью исключения возникновения продольных колебаний в цепи регистрации нагрузки.

### Методики высокоскоростных испытаний

Важное значение при проведении высокоскоростных испытаний придается испытательной машине, так как ее тип и принцип работы определяют возможную скорость деформации и вид нагружающего импульса.

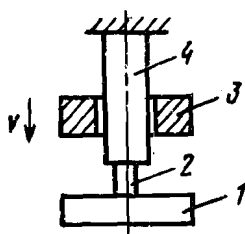


Рис. 3.2. Схема копра с падающим грузом:

1 — наковальня; 2 — образец; 3 — боек; 4 — динамометр

Наиболее распространенными являются копры с падающим грузом. Образец (рис. 3.2) подвергается растяжению или сжатию при ударе массивного падающего груза (бойка) по легкой наковальне, к которой одним концом прикреплен образец. Масса груза выбирается таким образом, чтобы его кинетическая энергия была на порядок выше энергии, необходимой для разрушения образца. При этом считается, что обеспечивается постоянная скорость деформирования в процессе испытания. Поэтому регистрируемую зависимость нагрузка-время  $P(t)$  рассматривают как зависимость нагрузка-перемещение. Вследствие ограниченности высоты падения груза скорость деформирования не превышает 10 м/с.. Для увеличения начальной скорости бойка в установках применяют различного рода ускорители (растянутые полосы резины, энергия ВВ, пневмогидравлические ускорители).

К недостаткам установок данного типа следует отнести:

- 1) невозможность обеспечения параллельности соударяющихся поверхностей бойка и наковальни в результате чего могут возникать изгибные колебания;
- 2) трудность обеспечения стабильности нагружающего импульса из-за различного контакта поверхностей соударения в различных опытах;
- 3) малый диапазон скоростей деформирования на копрах без ускорителей;
- 4) сложность обеспечения параметра  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  из-за наличия колебаний в элементах системы нагружения;
- 5) экспериментальные трудности при испытаниях при повышенных температурах.

В достаточно широко используемых ротационных копрах накопителем энергии является маховое колесо, разгоняемое до заданной скорости. При испытании один конец образца закрепляется в динамометре, а второй — на рычаге (рис. 3.3). При достижении маховиком заданной скорости производится сцепление кулачка с рычагом. Недостатки такого типа установок те же, что и у копров с падающим грузом. Кроме того, при передаче энергии от маховика к образцу возникают трудности из-за несоосности нагружения последнего.

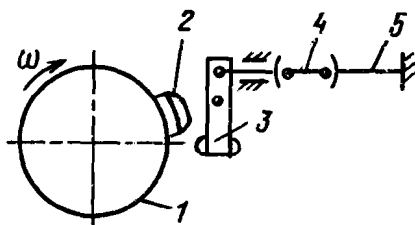


Рис. 3.3. Схема ротационного копра:  
1 — маховое колесо; 2 — кулачок;  
3 — рычаг; 4 — образец; 5 — динамометр

Широко распространены также установки с гидравлическим и пневматическим преобразователями, обеспечивающие скорости движения подвижного захвата до 15 м/с. Основным недостатком установок данного типа является невозможность обеспечения постоянства скорости деформирования в процессе испытания из-за наличия колебаний в деталях нагружающей цепи и их значительной инерционности.

В последнее время все большее распространение получают электромагнитные установки, деформирование в которых происходит за счет электрической энергии, запасенной в накопителях (например, в конденсаторах). Разряд накопленной энергии происходит в течение малого промежутка времени на одновитковую или многовитковую катушку. Взаимодействие магнитного поля катушки и сердечника, соединенного с образцом, приводит к деформации образца. Недостатком установок данного типа является нали-



чие электромагнитных наводок в регистрирующей аппаратуре в момент разряда батареи конденсаторов. Кроме того, разряд имеет колебательный характер, в результате чего сила, действующая на сердечник, не постоянна во времени. Это приводит к сложности реализации испытаний с параметром  $\dot{\epsilon} = \text{const}$ . Однако существенные преимущества электромагнитных установок, а именно: высокая стабильность нагружающего импульса, плавная регулировка скорости деформации, высокая производительность, возможность обеспечения температурных испытаний способствуют широкому их использованию.

### МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ УСТАНОВКА ИД-16 ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ $10^3 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$

#### Устройство и принцип работы установки

Основные характеристики установки:  
скорость деформирования — 5 ... 50 м/с;  
максимальная нагрузка — 10 кН;  
максимальный запас энергии конденсаторов — 30 кДж;  
диапазон исследуемых температур — 77 ... 1100 К;  
рабочая среда — воздух, инертный газ;  
максимальное рабочее напряжение — 5 кВ.

Нагружение образцов в магнитно-импульсной установке ИД-16 осуществляется импульсным магнитным полем, создаваемым за счет разряда батареи конденсаторов через одновитковый индуктор. Основными частями установки являются энергоблок, герметичная камера с вакуумной системой, система нагрева и регистрации температуры образца, блок динамического нагружения.

Принципиальная электрическая схема энергоблока представлена на рис. 3.4. Он состоит из выпрямителя 1, батареи конденсаторов 2, измерителя напряжения 3, вакуумного разрядника 4, системы поджига 5, индуктора 6, системы защиты 7, 8.

Батарея конденсаторов является накопителем электроэнергии. Она состоит из 12 параллельно включенных конденсаторов ИС-5-200-У2 общей емкостью 2400 мкФ. Напряжение на конденсаторах измеряется с помощью делителя напряжения и микроамперметра М24, проградуированного в кВ по электростатическому киловольтметру С-196. Выпрямитель 1 предназначен для зарядки батареи конденсаторов.

Вакуумный разрядник является коммутирующим элементом в цепи батареи конденсаторов — индуктор. Он состоит из двух дискообразных токо-

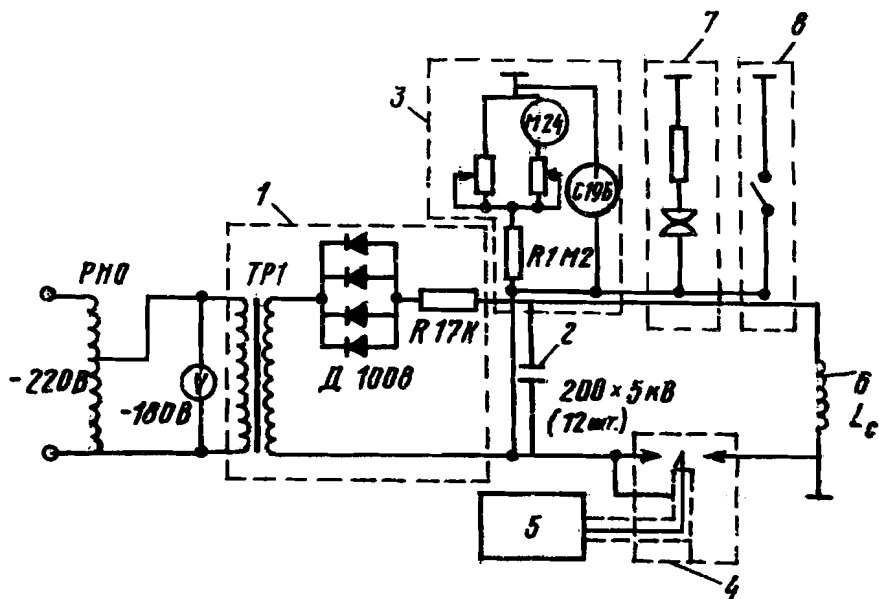


Рис. 3.4. Принципиальная электрическая схема установки ИД-16:

1 — выпрямитель; 2 — батарея конденсаторов; 3 — измеритель напряжения; 4 — вакуумный разрядник; 5 — система поджига; 6 — индуктор; 7 — фидер; 8 — рубильник

проводящих пластин 8 (рис. 3.5), двух вакуумно-плотных кольцевых изоляторов 9 и разделительной пластины, помещенной между изоляторами. Разрядник имеет электрическую прочность не менее 10 кВ и может пропускать в импульсе токи порядка сотен кА. Вакуум в разряднике ( $\sim 3$  Па) обеспечивается форвакуумным насосом 2НВР-5Д, вакуумными вентилями, вакуумметром ВИТ-2А и лампами ПМТ-4.

Система поджига, основным элементом которой является генератор высоковольтных импульсов, служит для управления пропускания тока через вакуумный разрядник при помощи высоковольтного разряда (до 20 кВ) между иглой поджига (13, рис. 3.5), закрепленной на разряднике, и токопроводящей пластиной 8. При киносъемке процесса высокоскоростной деформации образца для инициирования разряда батареи конденсаторов используется система поджига фоторегистратора ВФУ-1.

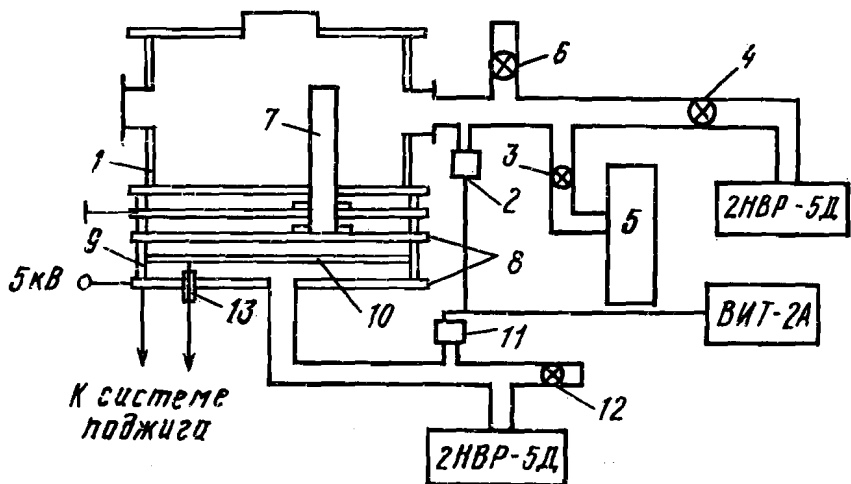


Рис. 3.5. Схема герметичной камеры с разрядником:

1 – рабочая камера; 2 – лампа ПМТ-4; 3, 4, 6, 12 – вакуумные вентили; 5 – баллон с газом; 7 – индуктор; 8 – токопроводящие пластины; 9 – изоляторы; 10 – разделительная пластина; 11 – лампа ПМТ-4; 13 – игла поджига

Система защиты предназначена для обеспечения безопасности работы на высоковольтной установке ИД-16. Электрическая защита представляет собой фидер 7 (см. рис. 3.4), в котором имеется подвижный контакт, управляемый при помощи электромагнита. Фидер позволяет в аварийных ситуациях разрядить батарею конденсаторов на землю через мощное сопротивление. Механическая защита представляет собой рубильник 8, замыкающий высоковольтные шины батареи конденсаторов на землю.

Герметичная камера 1 (см. рис. 3.5) предназначена для проведения испытаний образцов при повышенных температурах в инертной атмосфере.

Блок динамического нагружения (рис. 3.6) расположен в герметичной камере. В конструкцию блока входят: индуктор, подвижный и неподвижный захваты образца, центрирующее устройство и система улавливания подвижного захвата.

Индуктор, представляющий собой одновитковый соленоид, предназначен для получения импульсного магнитного поля и состоит из разъемной обмотки 1 и размещенного внутри обмотки концентратора 2, выполненного из меди.

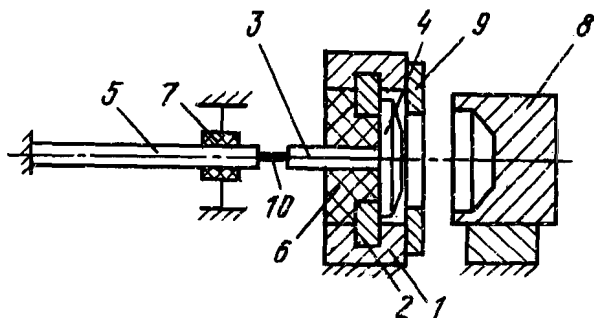


Рис. 3.6. Блок динамического нагружения:

1 – обойма; 2 – концентратор; 3 – тяга; 4 – кондуктор; 5 – динамометр; 6, 7 – центрирующие втулки; 8 – отражатель; 9 – резиновый клапан; 10 – образец

Подвижной захват состоит из тяги 3 – стального стержня диаметром 8 мм и кондуктора 4, изготовленного из сплава Д16 или латуни Л62. Неподвижным захватом является динамометрический стержень 5. Центрирующее устройство состоит из двух центрирующих втулок 6, 7.

Система улавливания предназначена для сохранения части образца и подвижного захвата после испытания.

Высокоскоростное растяжение образца осуществляется при взаимодействии наведенного тока в кондукторе с переменным магнитным полем тока индуктора при разряде батарей конденсаторов через него и последующего перемещения подвижного захвата. Регистрация магнитного поля в индукторе производится с помощью магнитного зонда с интегрирующей RC -цепочкой, который представляет собой двухвитковую катушку диаметром 7 мм, находящуюся в центре индуктора. Типичная осциллограмма магнитного поля индуктора представлена на рис. 3.7, из которой видно, что она имеет характер затухающего колебательного процесса с периодом 140 мкс. Индукция магнитного поля является линейной функцией напряжения на батарее конденсаторов.

#### Определение характеристик прочности, пластичности и скорости деформации

Регистрация волны нагрузки осуществляется с помощью стального стержня-волновода диаметром 8 мм и длиной 2300 мм. Диаметр волновода выбран так, чтобы площадь поперечного сечения была больше на порядок

площади поперечного сечения образца. На волноводе наклеены кремниевые тензометры типа КТД-7Б и КТЭ-7Б, включенные по мостовой схеме, как показано на рис. 3.8. Такие тензометры имеют базу  $l = 5$  мм и коэффициент тензочувствительности  $+100$ ,  $-100$  соответственно, что значительно увеличивает чувствительность динамометра по сравнению с проволочными тензодатчиками. Это позволяет регистрировать напряжение разбаланса моста без предварительного усиления. Питание тензометрического моста осуществляется с помощью источника Б5-31 напряжением 14 В, при этом чувствительность динамометра равна 0,17 мВ/Н. Тензометрический мост наклеен на расстоянии 800 мм от конца динамометра, на котором закреплен образец.

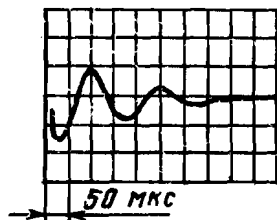


Рис. 3.7. Оциллограмма магнитного поля индуктора

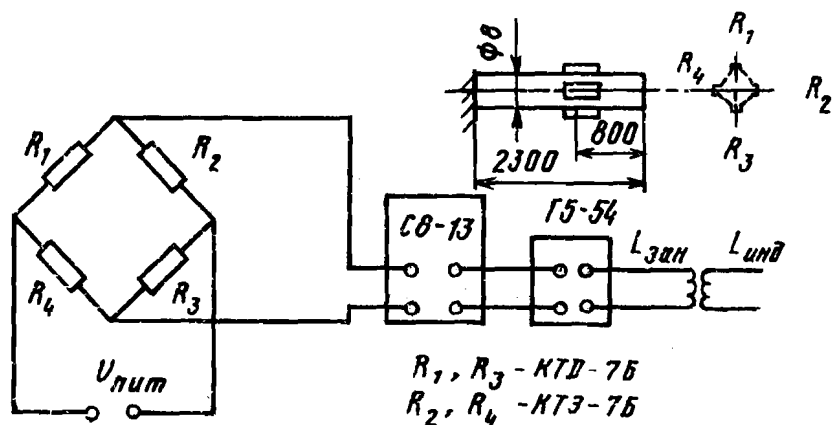


Рис. 3.8. Схема регистрации волны нагрузки

Такое удаленное расположение тензодатчиков уменьшает практически до нуля электромагнитные наводки в элементах схемы регистрации и аппаратуре в момент измерения подошедшей волны нагрузки. Длина динамометра выбирается таким образом, чтобы регистрируемый сигнал был свободен от влияния колебательных процессов. Для этого должно выпол-

няться условие  $\tau < \frac{2z'}{c_0}$ , где  $\tau$  – время процесса деформации образца до разрушения;  $z'$  – длина динамометра от места расположения тензодатчиков до свободного конца динамометра. Для выбранного динамометра  $\tau \leq 600$  мкс. Тарировка динамометров производится статическим методом, что возможно благодаря независимости модуля упругости стали от скорости деформации.

При проведении динамических испытаний сигнал с тензометрического моста подается на запоминающий осциллограф типа С8-13. Синхронизация запуска осциллографа и исследуемого сигнала осуществляется с помощью системы запускающий зонд – генератор Г5-54.

В результате испытания на осциллографе записывается диаграмма растяжения образца в координатах  $V - t$ , где  $V$  – напряжение разбаланса мостовой схемы при прохождении волны нагрузки по тензодатчикам,  $t$  – время деформации. Расчет напряжения в образце производится по формуле:

$$\sigma = \frac{V}{KS}, \quad (3.5)$$

где  $V$  – напряжение разбаланса моста, мВ;  $K$  – чувствительность динамометра, мВ/Н;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Измерение скорости деформирования образцов может осуществляться с помощью ВФУ-установки, либо по осциллограммам. В лабораторной работе определение скорости деформирования производится следующим образом: по осциллограмме  $V(t)$  определяется время пластической деформации образца; измеряется удлинение образца на инструментальном микроскопе; по этим данным вычисляется средняя скорость деформирования и деформации.

Измерение линейных размеров образца до и после испытания позволяет получить характеристики пластичности материала:  $\delta$  – относительное удлинение при разрыве;  $\psi$  – относительное сужение после разрыва.

Измерение линейных размеров образцов производится на микроскопе ИМЦ 100x50 А.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед включением установки необходимо проверить исправность электрической и механической защиты.

2. Включить контрольные и измерительные приборы и дать им прогреться в течение 30 мин. Измерить начальные размеры 2-х образцов. Поставить образец в захваты установки ИЦ-16.

3. Закрыть вентиль вакуумпровода разрядника и включить форвакуумный насос разрядника.

4. При достижении вакуума в разряднике  $\sim 65$  делений по шкале вакуумметра выключить механическую защиту и включить фидер, при этом должна загореться сигнальная лампа, указывающая на отключение электромагнитной блокировки.

5. Включить систему поджига, при этом должна загореться сигнальная лампа на пульте управления установки, свидетельствующая о готовности системы к работе.

6. Включить высоковольтный выпрямитель.

Контроль напряжения на батарее конденсаторов осуществлять по микроамперметру М-24. При достижении необходимой для эксперимента значения напряжения выключить выпрямитель.

7. Нажать кнопку "Разряд" на пульте управления, предупредив лиц, присутствующих в помещении, о включении установки. Контроль за разрядом осуществляется по микроамперметру М-24.

8. Выключить фидер. Проверить по микроамперметру отсутствие напряжения на батарее конденсаторов. Включить рубильник механической защиты.

9. Если дальнейшая работа не предусматривается, то необходимо выключить форвакуумный насос разрядника, открыть вентиль вакуумпровода разрядника, выключить контрольные измерительные приборы.

10. Зарисовать с экрана осциллографа (С-13 кривую  $V(t)$ ). Произвести расчет прочностных характеристик исследуемого материала.

11. Освободить из захватов части образца, произвести замер конечных размеров образца, рассчитать пластические характеристики материала и скорость деформации.

12. Произвести испытание второго образца на универсальной испытательной машине ZD 10/90 при скорости деформации  $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Зарисовать кривую деформации  $V = V(t)$ . Произвести расчет прочностных характеристик и, освободив части образца из захватов, произвести замер конечных размеров образца. Рассчитать пластические характеристики.

Рассчитать коэффициенты динамичности по следующим формулам:

$$\eta_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2}^A}{\sigma_{0,2}^{\text{ст}}} ; \quad (3.6)$$

$$\eta_B = \frac{\sigma_B^A}{\sigma_B^{\text{ст}}} ; \quad (3.7)$$

$$\eta_{\delta} = \frac{\delta^A}{\delta^{\text{ст}}} ; \quad (3.8)$$

$$\eta_{\psi} = \frac{\psi^A}{\psi^{ст}} . \quad (3.9)$$

где индексом "д" отмечены характеристики при высокоскоростном, а индексом "ст" – при статическом нагружении.

Отчет о работе должен содержать:

цель работы, диаграммы деформирования в координатах  $P(t)$ ; основные механические характеристики испытанных образцов  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , рассчитанные коэффициенты динамичности и скорости деформации, выводы о характере разрушения образцов и установленные закономерности влияния скорости деформации на механические свойства материала.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г.В. Уругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова Думка, 1979.-265 с.
2. Эпштейн Г.Н. Строение металлов, деформированных взрьбсом. М.: Металлургия, 1980.-256 с.
3. Астахов М.М., Кудрявцев О.Г., Логинов А. В., Лошманов Л.П., Троценко А.Е. Выбор образца для определения прочностных характеристик при различных скоростях растяжения. Заводская лаборатория, 1988, № 5. – 73–76 с.
4. Ионов В.Н., Селиванов В.В. Динамика разрушения деформируемого тела. М.: Машиностроение, 1987.-271 с.



ПРИЛОЖЕНИЕ

Протокол испытаний образцов при динамическом и статическом нагружении

№ образцов	1			2			Примечание
Материал							
$d_0$							
$\bar{l}$							
$d_K$							
$l_K$							
$\sigma_{0,2}^A$							
$\sigma_B^A$							
$\delta^A$							
$\psi^A$							
$\sigma_{0,2}^{CT}$							
$\sigma_B^{CT}$							
$\delta^{CT}$							
$\psi^{CT}$							
$\zeta_{0,2}$							
$\zeta_B$							
$\zeta_\delta$							
$\zeta_\psi$							

## ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ

**Ц е л ь :** ознакомление с методикой исследования распространения упругих волн напряжений в стержневых системах и экспериментальное определение стержневой скорости звука и модуля упругости материалов.

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие интенсивных динамических нагрузок в современных установках и машинах требует создание надежных методов прочностных расчетов элементов конструкций, работающих в условиях кратковременных импульсных воздействий и больших скоростей деформаций.

В связи с этим находят широкое распространение экспериментальные исследования по распространению механических волн, их взаимодействию между собой, а также воздействию волн на структуру материала и его физико-механические свойства. Непосредственное измерение параметров распространения волн в условиях одноосного деформированного состояния наиболее доступно в стержневых системах. Поэтому такого рода исследования получили широкое распространение тем более, что и теория упругих волн в стержневых системах развита в достаточной степени.

### Распространение продольных упругих волн напряжений в стержнях постоянного поперечного сечения

На рис. 4.1 показан элемент стержня длиной  $dx$ , который до деформации был заключен между сечениями  $a-b$  с координатой  $x$  и  $c-d$  с координатой  $x + dx$ . Смещение сечения  $a-b$  в момент времени  $t$ , обозначенное через  $u$ , является функцией времени и координаты в недеформированном состоянии, тогда смещение сечения  $c-d$  будет  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ . Если напряжение, действующее на сечение  $a-b$ , равно  $\sigma$ , тогда напряжение, действующее на сечение  $c-d$ , будет  $\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx$ . Результирующая сила, действующая на этот элемент, равна  $F \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx$ , где  $F$  — площадь поперечного сечения стержня. Под действием этой силы элемент, масса которого равна  $F \rho dx$  ( $\rho$  — плотность материала стержня) движется

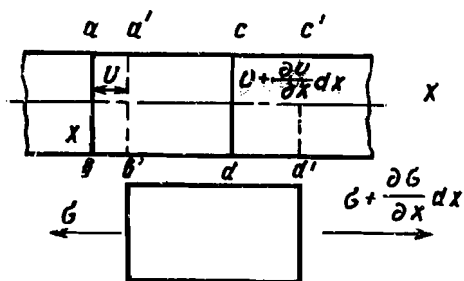


Рис. 4.1. Элемент стержня

с ускорением  $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ . Второй закон Ньютона для этого элемента запишется в виде уравнения:

$$\int F dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = F \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} dx. \quad (4.1)$$

Используя закон Гука  $\bar{\epsilon} = E \epsilon$ , где  $E$  — модуль Юнга,  $\epsilon$  — относительная деформация, равная  $\frac{\partial u}{\partial x}$ , можно записать равенство:

$$\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (4.2)$$

Подставляя это значение  $\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x}$  в уравнение (4.1), окончательно получаем дифференциальное уравнение, называемое волновым:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (4.3)$$

где отношение

$$\frac{E}{\rho} = c_0^2. \quad (4.4)$$

Решение волнового уравнения может быть представлено в виде суммы двух функций:

$$u(x, t) = f\left(t - \frac{x}{c_0}\right) + \varphi\left(t + \frac{x}{c_0}\right), \quad (4.5)$$

откуда следует, что  $c_0$  является скоростью распространения упругих волн смещений (напряжений) в стержне и называется стержневой скоростью звука.

Два слагаемых представляют собой две волны, распространяющиеся с одинаковой скоростью в противоположных направлениях:  $f\left(t - \frac{x}{c_0}\right)$  — в положительном,  $\varphi\left(t + \frac{x}{c_0}\right)$  — в отрицательном направлении оси  $x$ . Для определенности назовем  $f\left(t - \frac{x}{c_0}\right)$  прямой волной,  $\varphi\left(t + \frac{x}{c_0}\right)$  обрат-

ной. Используя решение волнового уравнения, можно определить соотношение между напряжением  $\sigma$  и массовой скоростью  $v$  частиц стержня в упругой волне. Рассмотрим прямую волну напряжений. Для нее можно записать следующие соотношения:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{1}{c_0} f' \left( t - \frac{x}{c_0} \right); \quad (4.6)$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} = f' \left( t - \frac{x}{c_0} \right).$$

Решение этой системы уравнений дает следующее равенство в абсолютных величинах:

$$v = c_0 \varepsilon. \quad (4.7)$$

Используя закон Гука и равенство  $c_0^2 = \frac{E}{\rho}$ , находим соотношение между  $\sigma$  и  $v$ :

$$\sigma = \rho c_0 v. \quad (4.8)$$

Таким образом, если к концу стержня внезапно приложить постоянную силу  $P$ , то по стержню начнет распространяться волна напряжений, представляющая собой ступеньку амплитудой  $\sigma$ . Фронт волны будет двигаться со скоростью  $c_0$  и через время  $t$  после момента приложения силы участок стержня длиной  $c_0 t$  будет равномерно растянут или сжат в зависимости от направления силы, все сечения на этом участке будут перемещаться со скоростью  $v = \frac{\sigma}{\rho c_0}$ . Остальная часть стержня остается ненапряженной.

Для определения функций прямой и обратной волн в каждом конкретном случае необходимо знать начальные и граничные условия. В качестве примера рассмотрим преобразование волны напряжений на границах стержня, которыми являются либо свободный торец, либо абсолютно жесткая заделка стержня.

Отражение падающей волны напряжений от свободного торца стержня с координатой  $x = l$  определяется из граничного условия  $\sigma(l, t) = 0$ , откуда следует:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0. \quad (4.9)$$

Дифференцируя функцию  $u(x, t)$ , находим

$$f' \left( t - \frac{l}{c_0} \right) = \psi' \left( t + \frac{l}{c_0} \right), \quad \left( t \geq \frac{l}{c_0} \right). \quad (4.10)$$

Так как скорость сечения

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = f' \left( t - \frac{x}{c_0} \right) + \psi' \left( t + \frac{x}{c_0} \right), \quad (4.11)$$

с учетом равенства (4.10) получим

$$\frac{\partial u}{\partial t}(l, t) = 2f' \left( t - \frac{l}{c_0} \right). \quad (4.12)$$

Таким образом, при отражении прямой волны напряжений от свободного торца стержня скорость этого торца удваивается. Следовательно, скорость смещения сечений в обратной волне равна по величине и направлению скорости смещения в прямой волне.

Из этого следует также, что деформации и напряжения в прямой и обратной волнах равны, но противоположны по знаку, т.е. после отражения волны растяжения от торца по стержню будет распространяться обратная волна сжатия и наоборот.

Особенности отражения волны напряжений от абсолютно жесткой заделки определяются граничным условием  $v(l, t) = 0$ , откуда следует:

$$\frac{\partial u}{\partial t}(l, t) = 0. \quad (4.13)$$

Дифференцируя функцию  $u(x, t)$ , находим

$$f' \left( t - \frac{l}{c_0} \right) = -\psi' \left( t + \frac{l}{c_0} \right), \quad \left( t \geq \frac{l}{c_0} \right), \quad (4.14)$$

т.е. скорость смещения сечений в обратной волне равна по величине и противоположна по направлению скорости смещения сечений в прямой волне. Из равенства (4.14) следует, что деформации и напряжения в прямой и обратной волнах равны и по величине и по знаку, так как

$$\epsilon_{пр} = \frac{\partial f}{\partial x}(l, t) = -\frac{1}{c_0} f' \left( t - \frac{l}{c_0} \right); \quad (4.15)$$

$$\epsilon_{об} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}(l, t) = \frac{1}{c_0} \psi' \left( t + \frac{l}{c_0} \right), \quad (4.16)$$

и наложение этих волн приводит к удвоению напряжений и деформаций в заделке. Таким образом, после отражения волны растяжения (сжатия) от абсолютно жесткой заделки по стержню будет распространяться обратная волна растяжения (сжатия).

#### Распространение продольных упругих волн напряжений в стержнях переменного сечения

Граничными условиями для волн, распространяющихся по стержням переменного сечения (рис. 4.2), являются условия неразрывности сопряжен-

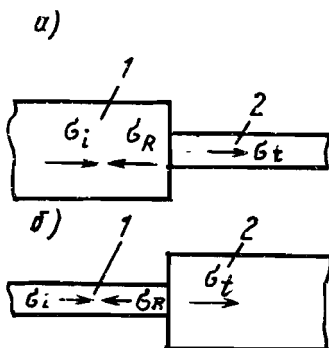


Рис. 4.2. Элемент стержня переменного сечения

ных сечений участков стержня с разными площадями поперечных сечений:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t}(l, t) = \frac{\partial u_2}{\partial t}(l, t), \quad (4.17)$$

а также условия равенства сил в сопряженных сечениях:

$$F_1 \frac{\partial u_1}{\partial x}(l, t) = F_2 \frac{\partial u_2}{\partial x}(l, t), \quad (4.18)$$

где  $u_1$ ,  $F_1$ ,  $u_2$ ,  $F_2$  — смещения и площади поперечных сечений 1-го и 2-го участков стержня соответственно.

В случае, если падающая волна распространяется по стержню с большим по площади поперечным сечением (рис. 4.2,а), уравнению (4.17) соответствует уравнение в абсолютных величинах

$$v_i + v_R = v_t \quad (4.19)$$

или с учетом выражений (4.8)

$$\sigma_i + \sigma_R = \sigma_t, \quad (4.20)$$

а уравнению (4.18) соответствует уравнение:

$$F_i (\sigma_i - \sigma_R) = F_t \sigma_t, \quad (4.21)$$

где  $\sigma_i$  — напряжения в падающей волне;  $\sigma_R$  — в отраженной от разрыва гладкости стержня волне;  $\sigma_t$  — в прошедшей волне нагрузки;  $F_i$  и  $F_t$  — площади поперечных сечений стержней, по которым распространяются падающая и прошедшая волны соответственно.

Решение системы уравнений (4.20) и (4.21) дает соотношения:

$$\sigma_t = \frac{2F_i}{F_i + F_t} \sigma_i, \quad (4.22)$$

$$\sigma_R = \frac{F_i - F_t}{F_t + F_i} \sigma_i. \quad (4.23)$$

В случае, если падающая волна распространяется по стержню с меньшим по площади поперечным сечением (рис. 4.2,б), то уравнению (4.17) соответствует уравнение (в абсолютных величинах)

$$v_i - v_R = v_t \quad (4.24)$$

или с учетом выражения (4.8)

$$\sigma_i - \sigma_R = \sigma_t, \quad (4.25)$$

а уравнению (4.18) соответствует уравнение:

$$F_i (\sigma_i + \sigma_R) = F_t \sigma_t. \quad (4.26)$$

Решением системы уравнений (4.25) и (4.26) будут являться соотношения:

$$\sigma_t = \frac{2F_i}{F_i + F_t} \sigma_i; \quad (4.27)$$

$$\sigma_R = \frac{F_t - F_i}{F_i + F_t} \sigma_i. \quad (4.28)$$

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

Экспериментальное исследование распространения упругих волн в стержневых системах проводится на магнитно-импульсной установке ИД-16 по схеме, представленной на рис. 4.3.

На кондуктор 1, установленный рядом с одновитковым индуктором 2, действует импульсное магнитное поле при разряде батареи конденсаторов 3 через разрядник 4.

Под действием давления магнитного поля движение кондуктора, жестко закрепленного на стальном стержне, создает волну растяжения, амплитуда которой зависит от напряжения на батарее конденсаторов. Регистрация волны напряжений производится при помощи полупроводниковых тензодатчиков 5 типа КТД-7Б и КТЭ-7Б, имеющих базу 5 мм и коэффициент тензочувствительности +100 и -100 соответственно. Тензодатчики наклеены на стержень 6, 7, 8 диаметрально противоположно и собраны по мостовой схеме. Напряжение разбаланса моста подается на зажимающийся осциллограф С8-13, синхронизация запуска которого осуществляется с помощью системы магнитный зонд - генератор Г5-54. При напряжении питания тензометрического моста, равного 14 В, чувствительность его равна 0,17 мВ/Н для стерж-

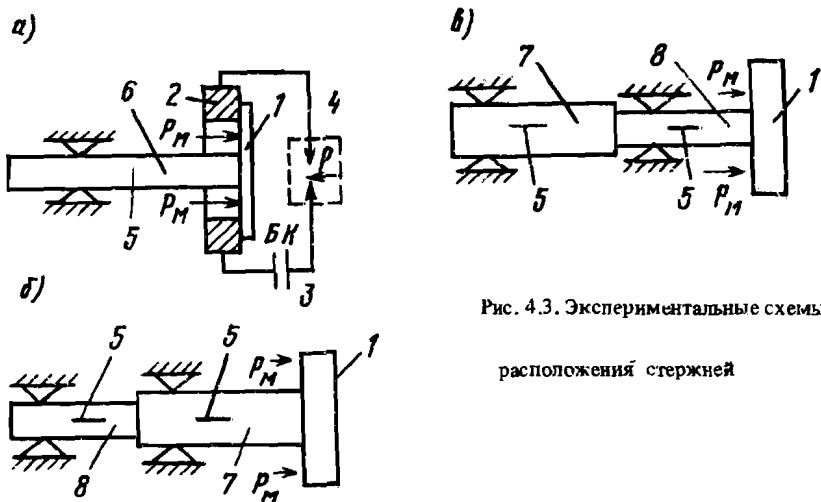


Рис. 4.3. Экспериментальные схемы  
расположения стержней

жня диаметром 8 мм и 0,43 мВ/Н для стержня диаметром 5 мм. Градуировка датчиков производится статическим методом ввиду независимости модуля Юнга стали от скорости деформации. Тензодатчики расположены на стержне таким образом, чтобы регистрировать волну нагрузки при ее однократном прохождении. Погрешность измерения усилия в волне нагрузки таким способом составляет  $\pm 4\%$ .

Напряжения в упругой волне определяются согласно выражению:

$$\sigma = \frac{V}{KS}, \quad (4.29)$$

где  $V$  – напряжение разбаланса моста, мВ;  $K$  – чувствительность тензомоста, мВ/Н;  $S$  – площадь поперечного сечения стержня,  $\text{м}^2$ .

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включение и выключение установки ИД-16 производить согласно п. 3.1–3.9 лабораторной работы 3.

2. Поставить на установку ИД-16 стержень №6 длиной  $l = 2300$  мм и диаметром 8 мм (рис. 4.3,а).

3. Измерить расстояние  $X$  от свободного торца стержня до середины тензодатчиков тензометрического моста 5.

4. Соединить тензометрический мост 5 с запоминающим осциллографом С8-13 и, осуществив импульсную нагрузку стержня, зафиксировать на экране осциллографа прошедшую волну растягивающей нагрузки и отраженную от свободного торца стержня волну сжимающей нагрузки.



5. На экране осциллографа измерить разницу времени между прошедшей и отраженной волн  $\Delta t$  и по формуле  $c_0 = \frac{2X}{\Delta t}$  рассчитать стержневую скорость звука.

6. Определить напряжение в волнах и рассчитать модуль упругости по формуле (4.4), используя значение плотности стали  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

7. Поставить систему из двух стержней разных площадей поперечных сечений № 7 ( $l = 1500 \text{ мм}$  и диаметром 8 мм) и № 8 ( $l = 1260 \text{ мм}$  и диаметром 5 мм) согласно рис. 4.3,б, затем систему согласно рис. 4.3,в.

Зафиксировать падающую и прошедшую через соединение стержней волны, найти отношения амплитуд этих волн и сравнить с соотношениями (4.22), (4.23), (4.27), (4.28).

Отчет о работе должен содержать:

цель работы, осциллограммы падающей и прошедшей волн нагрузки, определяемых экспериментально, вывод об их соответствии, определенные величины стержневой скорости звука и модуля упругости.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. З у к а с Дж.А., Н и к о л а с т Т., С в и ф т Х.Ф. и др. Динамика удара./Пер. с англ. М.: Мир, 1985. — 296 с.

2. С т е п а н о в Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова Думка, 1979. — 265 с.

3. М а й б о р о д а В.П., К р а в ч у к А.С., Х о л и н Н.Н. Скоростное деформирование конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1986. — 261 с.

4. А л и м о в О.Д., М а н ж о с о в В.К., Е р е м ь я н ц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. М.: Наука, 1985. — 357 с.

5. К л и н А.А. Деформация и разрушение твердых тел в ударных волнах. М.: Изд. МИФИ, 1986. — 51 с.

6. В и н о г р а д о в а М.В., Р у д е п к о О.В., С у х о р у к о в а А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. — 384 с.

7. Б х а т н а г о р П. Нелинейные волны в одномерных дисперсионных системах. М.: Мир, 1983. — 136 с.

8. Д ь е л е с а н Э, Р у а й е Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. М.: Наука, 1982. — 424 с.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ изме- рения	1	2	3	4	5	Примечание
$c_0$						
$E$						
$\sigma_z$						
$\sigma_R$						
$\sigma_t$						
$\sigma_R^{теор}$						
$\sigma_t^{теор}$						
$\delta_R \%$						
$\delta_t \%$						

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Лабораторная работа 1. Маятниковые копры и методы ударных испытаний .....	4
Лабораторная работа 2. Определение критической температуры хрупкости материала .....	18
Лабораторная работа 3. Высокоскоростные испытания на растяжение .....	27
Лабораторная работа 4. Изучение распространения упругих волн напряжений в стержневых системах и определение модуля упругости материалов .....	41

Астахов Михаил Михайлович,  
Гольцев Владимир Юрьевич,  
Логинов Алексей Викторович,  
Пошманов Леонид Павлович

Лабораторный практикум  
"МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.  
ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ"

Редактор *О.А. Сафронова*  
Техн.редактор *Н.М. Воронцова*  
Корректор *А.В. Козырев*

Тем. план 1989 г., поз. 41

---

Объем *3,25* пл., Уч.-издл. *3* Тираж 240 экз. Цена *20* коп.  
Изд. № 050-1 Подписано в печать *26/VI-1989* Формат 60x84 1/16  
Заказ 1035

---

Московский инженерно-физический институт. Типография МИФИ.  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31