

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

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве лабораторного практикума для студентов очной и заочной форм
обучения, обучающихся по всем направлениям подготовки бакалавров
и специалистов в области техники и технологии*

Уфа 2019

Составители: В. С. Жернаков, Р. Х. Гафаров, А. Н. Ермоленко

УДК 539.3/.6 + 620.1(07)

ББК 30.121я7

С64

Рецензенты:

начальник лаборатории ЦЗЛ

ПАО ОДК «УМПО» канд. техн. наук А. И. Дубин;

вед. науч. сотр. ИМех УФИЦ РАН

канд. физ.-мат. наук А. Г. Хакимов

Сопротивление материалов : лабораторный практикум / Уфимск. С64 гос. авиац. техн. ун-т ; [сост. : В. С. Жернаков, Р. Х. Гафаров, А. Н. Ермоленко]. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019. – 267 с.

ISBN 978-5-4221-1343-9

Рассмотрены способы определения механических свойств материалов и экспериментальная проверка основных закономерностей в области механики твердого деформированного тела.

Предназначен для студентов, изучающих сопротивление материалов.

УДК 539.3/.6 + 620.1(07)

ББК 30.121я7

ISBN 978-5-4221-1343-9

© Корректурa РИК УГАТУ, 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Механические испытания являются неотъемлемой частью курса сопротивления материалов, так как эта наука нуждается в экспериментальном обосновании исходных гипотез, проверке теоретических выводов, оценке механических свойств конструктивных материалов.

Настоящий практикум предназначен быть руководством для проведения лабораторных занятий и подготовки к ним. Оно состоит из двух частей. В первой помещены лабораторные работы, сгруппированные исходя из основных задач лабораторного практикума: изучение механических свойств материалов и экспериментальная проверка выводов сопротивления материалов. Во второй дается описание оборудования лаборатории, используемого при проведении работ. Она знакомит студентов с современными машинами для испытаний и аппаратурой для измерения деформаций и перемещений.

С целью дифференциации и индивидуализации обучения (в зависимости от направления подготовки, отводимого времени и личной мотивации учащихся) представлены три категории работ: обязательные, факультативные и исследовательские. При минимальном объеме курса выполняются только обязательные работы. При большем числе отводимых часов к ним добавляются факультативные (согласно рабочей программе дисциплины). Исследовательские работы предназначены для студентов, проявляющих углубленный интерес к предмету и занимающихся научно-исследовательской работой на кафедре сопротивления материалов.

В описаниях работ указываются: цель опыта, краткие теоретические сведения, материальное оснащение эксперимента (испытательная машина, измерительные приборы, образцы), порядок проведения испытания, обработка результатов испытания, составление отчета. Каждая работа содержит также контрольные вопросы для самопроверки. В приложении приводятся формы отчетов к лабораторным работам, справочные данные по конструкционным материалам, а также контрольно-оценочные средства.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Научитесь делать черную работу в науке.
Изучайте, сопоставляйте, накапливайте факты.

И. П. Павлов

Практические работы в лаборатории, охватывающие основные разделы курса сопротивления материалов, имеют цели:

- ознакомить студентов с существующими методами опытного определения механических свойств конструкционных материалов;
- опытным путем проверить основные положения теорий;
- привить студентам навыки проведения экспериментов.

Таким образом, на лабораторных занятиях студенты приобретают навыки в экспериментировании и в то же время пополняют и углубляют теоретические знания. Студент становится как бы в положение исследователя, задачей которого является установление закономерностей изучаемого процесса.

В лабораторных занятиях можно выделить три основных элемента: воспроизведение явления, измерение характерных показателей его протекания, анализ и обобщение полученных результатов.

Готовиться к лабораторной работе следует заблаговременно, для этой цели служат описания лабораторных работ, приведенные в данном практикуме. Прежде чем студент придет в лабораторию, он должен проработать теоретический материал по теме предстоящего занятия.

Опыт следует проводить сознательно – необходимо знать цель работы, с какой точностью надо вести измерения, правильно ли протекает явление.

При хорошей подготовке и сознательном проведении исследования составление отчета будет несложной работой. Отчет не должен быть только констатацией проведенного исследования, простым протоколом. Следует провести анализ выполненной работы – указать, какие закономерности она подтвердила или выявила, с какой точностью, что было причиной неточностей, если получились отклонения от теоретических соотношений.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

1. Не нарушайте сами и останавливайте нарушающих правила безопасности работ и внутреннего распорядка.

Не трогайте, не включайте и не выключайте без разрешения руководителя или старшего лаборанта рубильники и другие приборы.

От ошибочного включения может произойти несчастный случай.

2. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с заданием, правилами безопасности работ, оборудованием, материалами и инструментом.

3. Немедленно сообщайте руководителю работ или старшему лаборанту о замеченных неисправностях и нарушениях правил техники безопасности.

4. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к выполняемой работе.

5. При работе в лаборатории выполняйте только ту работу, которая вам поручена. Категорически воспрещается производить другие работы.

6. Не входить в лабораторию или мастерскую, в которой не работает ваша группа.

7. Во время выполнения задания не ходите без дела по лаборатории или мастерской, так как этим отвлекаете товарищей и оставляете без наблюдения свою работу, что может повлечь за собой несчастный случай.

8. Берегите государственное имущество, бережно относитесь к приборам, лабораторному и аудиторному оборудованию.

9. Запрещается оставаться работать в лаборатории или мастерской одному.

10. Запрещается в аудиториях и лабораториях находиться в пальто, а также раздеваться в лабораториях и вешать пальто, кепки и шляпы на лабораторное оборудование.

11. По окончании работы приведите в порядок свое рабочее место.

После уборки заявите старшему по лаборатории об окончании работы и только после этого можете оставить лабораторию.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

РАБОТА № 1

Испытание материалов на растяжение

Цель работы. Изучить поведение материала при растяжении до разрушения, получить диаграмму растяжения и определить основные механические характеристики материала.

Краткие теоретические сведения. Испытания на растяжение являются основными и наиболее распространенными, так как с их помощью удается получить наиболее важные характеристики материала, находящие прямое применение в расчетной практике. Они проводятся в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Диаграмма растяжения. Основой для определения механических характеристик служит диаграмма растяжения, выражающая зависимость между растягивающей образец силой F и его удлинением Δl . На рис. 1, а показана диаграмма растяжения, типичная для малоуглеродистой стали. Полученная кривая условно может быть разбита на следующие четыре зоны: $0a$ – зона упругости, где материал подчиняется закону Гука; bc – площадка текучести; cd – зона упрочнения, в которой на образце намечается место будущего разрыва и образуется местное сужение, называемое шейкой; de – зона местной текучести.

Наличие площадки bc для металлов не является характерным. В большинстве случаев она не обнаруживается, и диаграмма растяжения имеет вид кривой, показанной на рис. 1, б.

Для хрупких материалов типичной является диаграмма, приведенная на рис. 1, в.

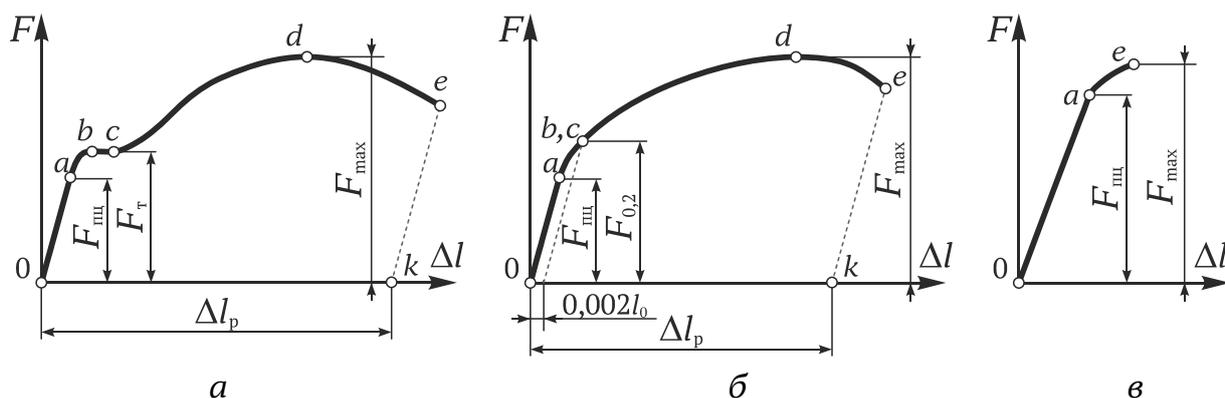


Рис. 1. Диаграммы растяжения: пластичных материалов (а – мало-углеродистая сталь; б – дюралюминий), хрупкого материала (в – чугун)

Диаграмма условных напряжений. Для количественной оценки механических свойств материала перестроим диаграмму растяжения в координатах σ и ε , разделив ординаты на A_0 и абсциссы на l_0 , где A_0 и l_0 – соответственно площадь поперечного сечения и расчетная длина образца до нагружения. Так как эти величины постоянны, то диаграмма напряжений (рис. 2) имеет тот же вид, что и диаграмма растяжения, но характеризует уже не свойства образца, а свойства материала.

Основные механические характеристики материала. Они делятся на две группы: характеристики прочности и характеристики пластичности.

Характеристики прочности. Предел пропорциональности $\sigma_{\text{мп}} = F_{\text{мп}} / A_0$ – наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука, соблюдается прямо пропорциональная зависимость между напряжениями и деформациями. Пределом упругости $\sigma_y = F_y / A_0$ называют напряжение, при котором нарушается пропорциональное соотношение между приложенной к образцу силой и деформацией. Пределу упругости соответствует величина остаточной деформации 0,001–0,005 %.

Предел текучести $\sigma_t = F_t / A_0$ – напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки, в материале начинает развиваться макропластическая деформация. Предел текучести является границей, разделяющей упругую и упругопластическую деформацию материала. При отсутствии на диаграмме растяжения выраженной площадки текучести определяют условный предел текучести, соответствующий 0,2 % (рис. 3) или 0,5 % остаточной деформации.

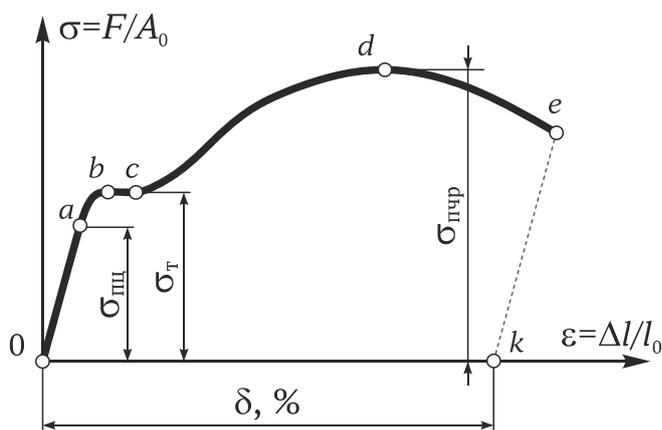


Рис. 2. Диаграмма деформирования
пластичного материала
с физическим пределом текучести

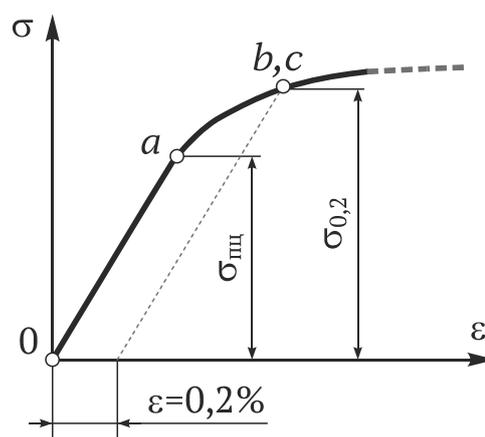


Рис. 3. Определение условного
предела текучести

Предел прочности $\sigma_{пч} = F_{\max} / A_0$ – отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения.

Характеристики пластичности. Относительное остаточное удлинение при разрыве

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \%$$

Относительное остаточное сужение при разрыве

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100 \%$$

Пластичные и хрупкие материалы. Способность материала без разрушения получать большие остаточные деформации носит название *пластичности*. Свойство пластичности имеет решающее значение для таких технологических операций как штамповка, вытяжка, волочение, гибка и др. Мерой пластичности является удлинение δ при разрыве: при $\delta > 5 \%$ материалы относятся к пластичным, а при $\delta < 5 \%$ – к хрупким.

К числу пластичных материалов относятся медь, алюминий, латунь, малоуглеродистая сталь и др. Менее пластичными являются дюраль и бронза. К числу слабо пластичных материалов относятся многие легированные стали.

Противоположным свойству пластичности является свойство *хрупкости*, т. е. способность материала разрушаться без образования

заметных остаточных деформаций. Материалы, обладающие этим свойством, называются хрупкими. К хрупким материалам относится чугун, высокоуглеродистая инструментальная сталь, стекло, кирпич, камни и др.

Разгрузка и повторное нагружение. Наклеп. Если при нагружении образца не был превышен предел упругости, то при разгрузке все деформации полностью исчезнут и при повторном нагружении этот образец будет вести себя так же, как и при первом нагружении. Если же образец был нагружен до напряжения, большего предела упругости, например до напряжения, соответствующего точке m (рис. 1.4), то разгрузка пойдет по прямой mn , параллельной линии $0a$. Упругая часть деформации (отрезок np) исчезнет, пластическая же часть деформации (отрезок on) останется.

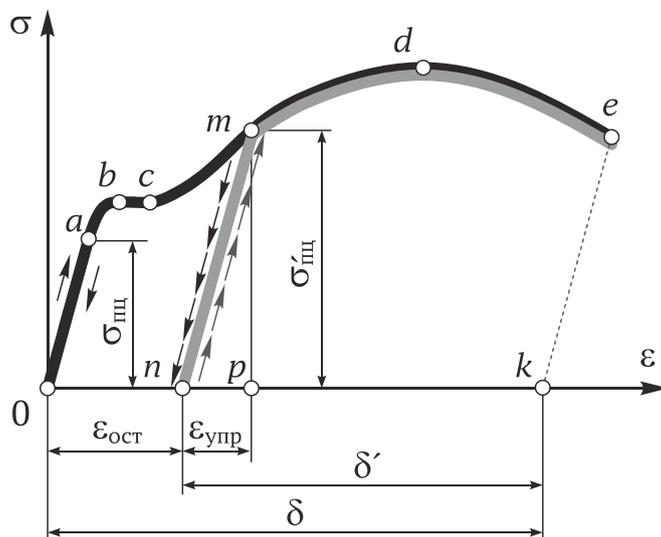


Рис. 4. Разгрузка материала за пределом текучести и повторное нагружение

При повторном нагружении образца диаграмма напряжений принимает вид прямой nm и далее – кривой mde , как будто промежуточной разгрузки и не было. Следовательно, в результате предварительного нагружения повышаются упругие свойства материала $\sigma'_{пл} > \sigma_{пл}$ и снижается его пластичность $\delta' > \delta$.

Явление повышения упругих свойств материала в результате предварительного пластического деформирования носит название *наклепа* и широко используется в технике.

Например, провода, цепи, тросы часто подвергаются предварительной вытяжке силами, превышающими рабочие, с тем, чтобы

избежать остаточных удлинений в дальнейшем. В некоторых случаях явление наклепа оказывается нежелательным, как, например, в процессе штамповки многих тонкостенных деталей. В этом случае для того чтобы избежать разрыва листа, вытяжку производят в несколько ступеней. Перед очередной операцией вытяжки деталь подвергают отжигу, в результате которого наклеп снимается.

Материальное обеспечение эксперимента. Образцы. Применяют как цилиндрические образцы (рис. 5, а, б, в) диаметром 3 мм и более, так и плоские (рис. 5, г) толщиной 0,5 мм и более. Характерными размерами образцов являются: длина расчетной части l_0 , где реализуется однородное напряженное состояние материала, и диаметр d_0 (для цилиндрических образцов) или диаметр равно-великого круга $d_{\text{рав}} = 1,13\sqrt{A_0}$ (для плоских образцов). Образцы называются *длинными (нормальными)*, если $l_0 = 10d_0$ (для плоских $l_0 = 10d_{\text{рав}} = 11,3\sqrt{A_0}$), или *короткими*, если $l_0 = 5d_0$ (для плоских $l_0 = 5,65\sqrt{A_0}$). При испытании цилиндрических образцов в качестве основных применяют образцы диаметром $d_0 = 10$ мм.

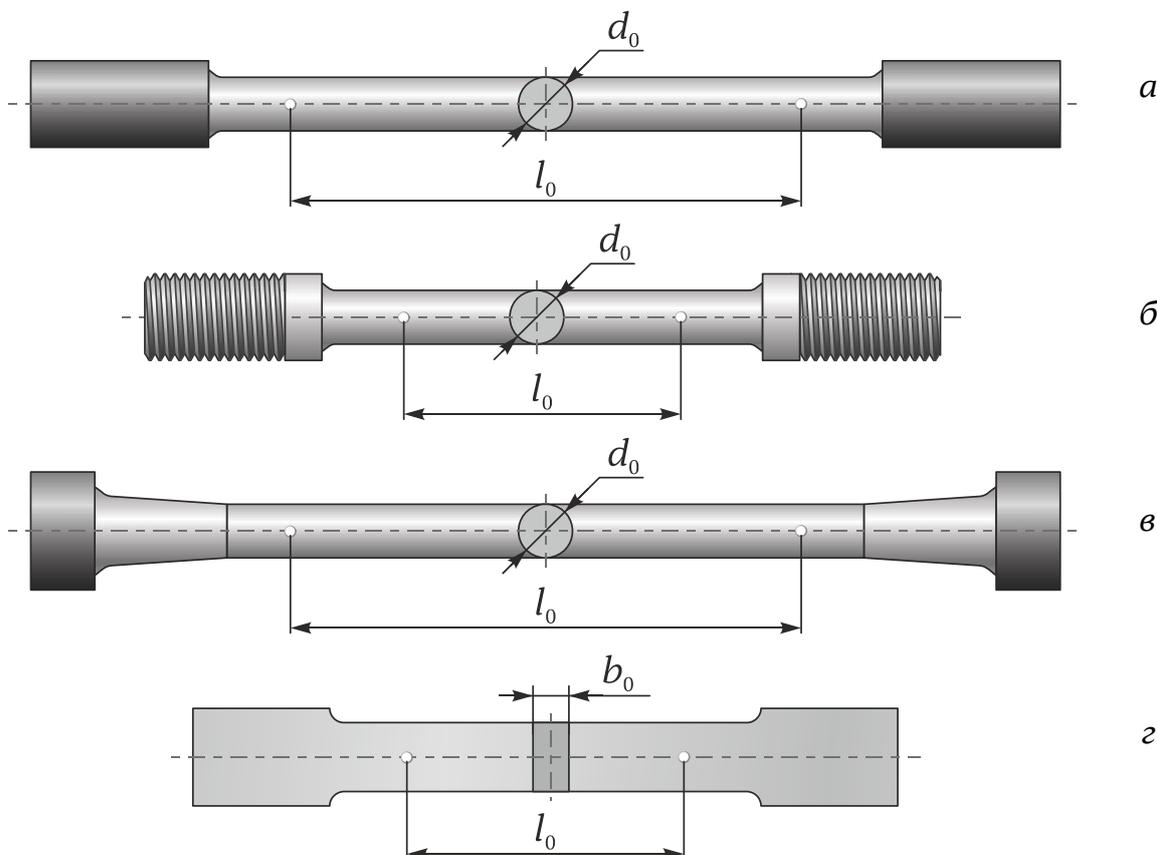


Рис. 5. Типы образцов: а, б, в – цилиндрические с различными типами хвостовиков под захваты испытательной машины; г – плоский образец

Измерительный прибор. Для измерений используется штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм (см. ч. II, п. 1.1).

Испытательная машина. Растяжение образца производится на разрывной машине Р-5 (см. ч. II, п. 2.1). Масштаб записи нагрузки будет зависеть от шкалы, установленной во время испытаний (например для образцов диаметром $d_0 = 8$ мм он может составлять 150 Н/мм), а масштаб деформаций 10:1.

Порядок проведения эксперимента. Перед испытанием ознакомиться с устройством машины Р-5, на которой будут проводиться испытания, и в отчете записать тип машины, цену деления силоизмерительного устройства, масштаб записи диаграммы по нагрузке и деформации.

Измерить диаметр образца d_0 и расчетную длину l_0 , отметив ее на образце рисками или нанесенными маркером реперными точками.

Все последующие действия, связанные с работой на испытательной машине, выполняются лаборантом. Закрепить образец в захватах машины. Проверить работу диаграммного аппарата, для чего повернуть барабан вхолостую и получить нулевую линию. Включить электродвигатель испытательной машины и наблюдать за процессом растяжения образца.

Записать значение нагрузки F_T , соответствующей достижению площадки текучести для малоуглеродистой стали (в этот момент стрелка силоизмерительного устройства останавливается, хотя деформация продолжает расти), и максимальной нагрузки F_{\max} .

После разрушения образца выключить электродвигатель, вынуть из захватов машины обе части образца, снять с барабана бумагу с диаграммой растяжения образца. Приступить к обработке результатов испытания.

Обработка результатов эксперимента. Обе части разрушенного образца сложить вместе и измерить расстояние между рисками l_1 и диаметр образца в месте разрыва d_1 . Определить удлинение образца при разрыве $\Delta l_p = l_1 - l_0$ и площадь поперечного сечения в месте разрыва $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$.

Произвести обработку диаграммы растяжения (рис. 6). На диаграмму наносят координатные оси. Ось абсцисс (ось удлинения) совмещают с нулевой линией диаграммы, а для проведения оси орди-

нат (*оси нагрузок*) находят начало координат – точку 0, продолжая прямолинейный участок до пересечения с осью абсцисс. Таким образом из рассмотрения исключается начальный криволинейный участок диаграммы, который возникает вследствие первоначального смятия головок образца в захватах машины.

На диаграмме отмечают характерные точки: точку *a* (конец прямолинейного участка), точку *b* (начало участка, параллельного оси абсцисс, который называется площадкой текучести), точку *c* (конец площадки текучести), точку *d* (соответствует максимальной нагрузке F_{\max}), точку *e* (соответствует моменту разрыва образца).

Из точки *e* проводят линию *ek*, параллельную прямолинейному участку *0a* диаграммы. Эта линия отсекает на оси удлинений отрезок Δl_p , равный величине остаточного удлинения образца в масштабе записи диаграммы. Найденное значение должно совпадать с ранее полученным по результатам замера образца до и после разрыва.

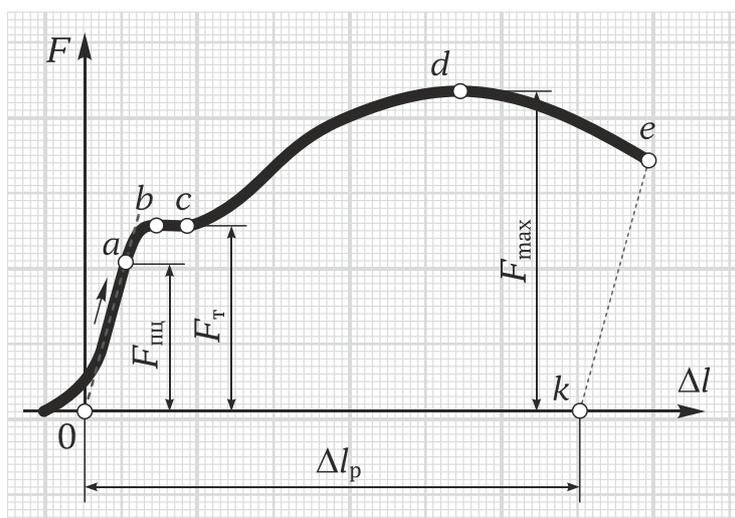


Рис. 6. Обработка диаграммы растяжения

По полученным при испытании данным вычисляют механические характеристики материала: предел пропорциональности $\sigma_{пл}$, предел текучести σ_t , предел прочности $\sigma_{пл}$, относительное остаточное удлинение при разрыве δ , относительное остаточное сужение ψ .

Подробное описание обработки диаграммы растяжения приведено в разделах прил. 1: «Ручная обработка диаграммы растяжения» и «Определение допускаемых напряжений».

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит эскиз образца до испытания и после разрушения; диаграмму растяже-

ния, вычерченную в масштабе с указанием всех характерных точек; вычисление основных механических характеристик материала и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Что называют диаграммой растяжения образца?
3. Какие образцы применяют для испытаний на растяжение?
4. Какие механические свойства материала можно определить по диаграмме растяжения?
5. Какие параметры характеризуют прочность материала?
6. Какие параметры характеризуют пластичность материала?
7. Почему начальный участок диаграммы растяжения криволинейный?
8. Какие явления наблюдают при нагружении образца силой, вызывающей напряжения выше предела упругости?
9. Выделите на диаграмме растяжения образца упругую часть его полного удлинения для момента действия максимальной силы.
10. Как распределяются деформации по длине образца до и после появления шейки? Когда появляется шейка?
11. Как определить остаточную деформацию после разрушения образца?
12. Что понимают под условным пределом текучести, площадкой текучести? По какой величине относительного остаточного удлинения определяют условный предел текучести?
13. Как определяют условный предел текучести по диаграмме растяжения?
14. Для какого участка диаграммы растяжения справедлив закон Гука?
15. Чем отличается хрупкий материал от пластичного?
16. По каким признакам заключают, что стекло – хрупкий материал?
17. Почему нежелательно применять хрупкие материалы для изготовления деталей, работающих при динамических нагрузках?
18. Как изменяются свойства материала, если он подвергнулся предварительной вытяжке за предел текучести?
19. Какие механические свойства можно определить по диаграмме растяжения малоуглеродистой стали и чугуна?
20. Как по результатам испытаний на растяжение определить марку стали и чугуна?

РАБОТА № 1

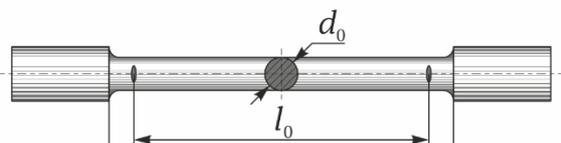
Испытание материалов на растяжение

Цель работы. Изучить поведение материала при растяжении до разрушения, получить диаграмму растяжения и определить основные механические характеристики материала.

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина: тип _____, предельное усилие _____ кН, цена деления силоизмерительного устройства _____ Н.

1.2. Испытуемый образец

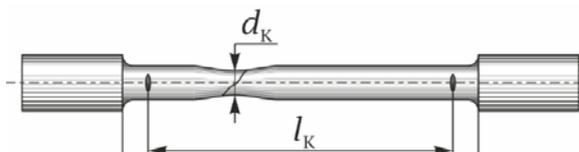


Геометрические характеристики	сталь	чугун
Диаметр d_0 , мм		
Расчетная длина l_0 , мм		
Площадь сечения $A_0 = \pi d_0^2 / 4$, мм ²		

1.3. Измерительный прибор – штангенциркуль с ценой деления _____ мм.

2. Результаты опыта

2.1. Стальной образец после разрыва



$d_k = \text{_____ мм}$

$l_k = \text{_____ мм}$

$A_k = \pi d_k^2 / 4 = \text{_____ мм}^2$

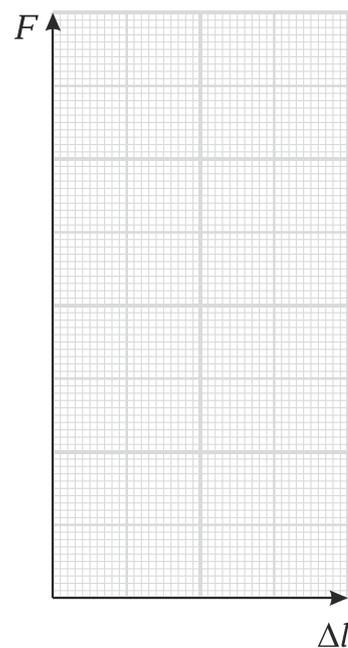
2.2. Сопротивление образца, кН

	сталь	чугун
$F_{пц}$		-
F_T		-
F_{max}		

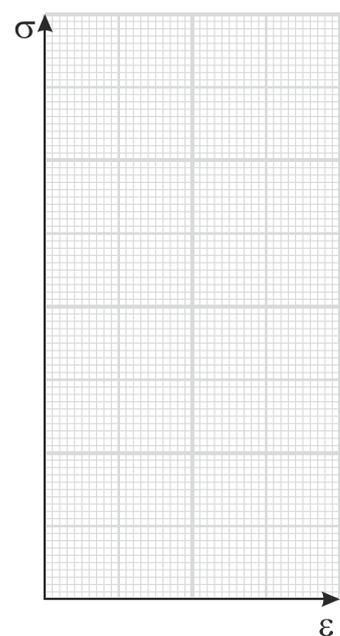
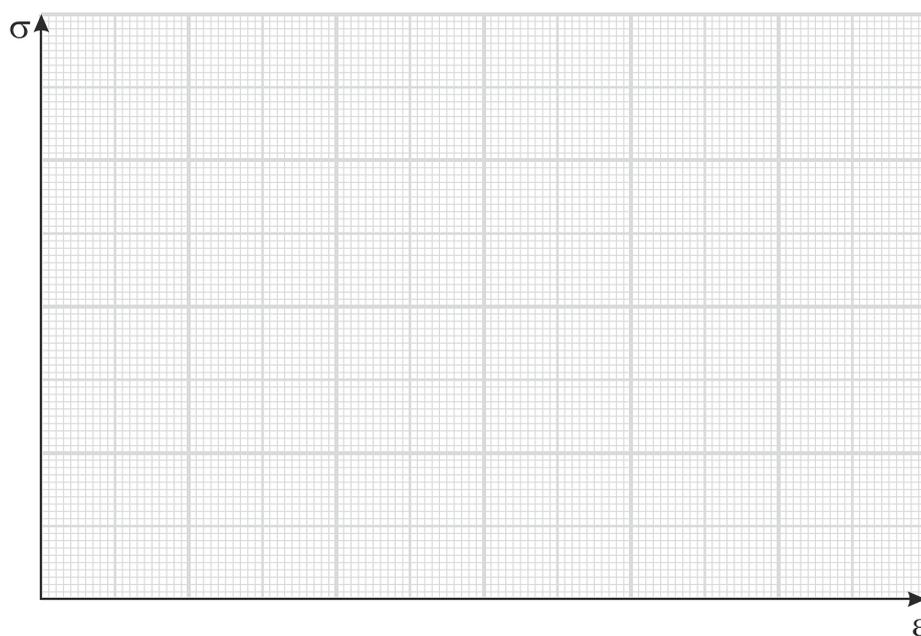
2.3. Механические характеристики материала

	сталь	чугун
1. Характеристики прочности, МПа		
Предел пропорциональности $\sigma_{пц} = F_{пц} / A_0$		-
Предел текучести $\sigma_T = F_T / A_0$		-
Предел прочности $\sigma_{пч} = F_{max} / A_0$		
2. Характеристики пластичности, %		
Относительное остаточное удлинение $\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100 \%$		-
Относительное остаточное сужение $\psi = [(A_k - A_0) / A_0] \cdot 100 \%$		-

2.4. Диаграмма растяжения



2.5. Диаграмма условных напряжений



3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 2

Определение модуля продольной упругости

Цель работы. Проверить закон Гука и определить модуль продольной упругости E .

Краткие теоретические сведения. Модуль продольной упругости (модуль Юнга). В начальной стадии упругой деформации образца для большинства металлов справедлив закон Гука

$$\sigma = E\varepsilon \text{ или } \Delta l = \frac{Fl}{EA},$$

выражающий пропорциональность между удлинением Δl образца и действующей нагрузкой F , $\sigma = F/A$ – нормальные напряжения; A – площадь поперечного сечения; ε – относительная линейная деформация; l – длина образца; E – модуль упругости.

Физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации называется модулем упругости и может быть рассчитана следующим образом:

$$E = \frac{F l}{A \Delta l}.$$

Видно, что с возрастанием E деформация образца Δl уменьшается, т. е. с физической точки зрения модуль продольной упругости характеризует жесткость материала, его способность сопротивляться упругим деформациям. Фактически модуль упругости представляет собой напряжения в идеально упругом материале, вызывающие деформацию $\varepsilon = 1 = 100\%$ или увеличение длины образца вдвое.

Если рассмотреть диаграмму деформирования металла (рис. 1), то можно увидеть, что модуль упругости представляет собой:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg}\alpha.$$

Следовательно, геометрически модуль Юнга представляет собой угловой коэффициент прямой, изображающей закон Гука.

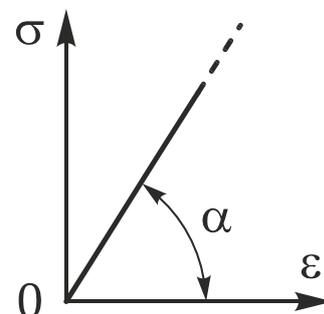


Рис. 1. Фрагмент диаграммы деформирования

Проверка закона Гука. Чтобы установить зависимость удлинения Δl от осевой нагрузки, нагружение образца производят несколькими ступенями, при этом нагрузку каждый раз увеличивают на равную величину.

После каждого нагружения измеряют удлинение образца Δl .

Приращение удлинения на одну и ту же величину подтверждает наличие прямой пропорциональности между деформацией и нагрузкой, свидетельствуя о справедливости закона Гука.

Величина ступени нагружения ΔF зависит от материала образца и размеров его поперечного сечения; ее выбирают таким образом, чтобы наибольшая нагрузка при испытании не вызывала остаточных деформаций.

Полагая σ_{\max} равным пределу пропорциональности материала $\sigma_{\text{пл}}$, найдем величину наибольшей нагрузки $F_{\max} = \sigma_{\text{пл}} A$.

Число ступеней нагружения, как правило, равно 5. Тогда величина каждой ступени нагружения $\Delta F = F_{\max} / 5$.

Материальное обеспечение эксперимента. Образцы. Модуль продольной упругости можно определять при испытании на растяжение и сжатие.

При испытании на образце устанавливают приборы, измеряющие деформацию, поэтому длина образца должна быть относительно большой. Длинные образцы удобнее испытывать на растяжение, так как при испытании на сжатие они не будут достаточно устойчивыми.

Форма поперечного сечения образца зависит от конструкции прибора для измерения деформации. Обычно применяют образцы кругового или прямоугольного поперечного сечения.

Испытательная машина. Растяжение образца производится на разрывной машине типа Р-0,5 (см. ч. II, п. 2.1).

Измерительные приборы. Для измерений линейной деформации используются два индикатора часового типа (см. ч. II, п. 1.2), которые ставятся по одному на диаметрально противоположных сторонах образца, чтобы снизить влияние неизбежного эксцентриситета приложения нагрузки к образцу, обусловленного конструктивно-технологическими факторами изготовления образца и захватов машины, на значения осевой деформации. Цена деления прибора составляет 0,01 мм (10 мкм).

Порядок проведения эксперимента. Перед началом работы ознакомиться с устройством испытательной машины и принципом

действия измерительных приборов. В журнале наблюдений записать тип машины, цену деления силоизмерительного устройства, базу измерения деформации l , диаметр образца d и цену деления измерительного прибора.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.

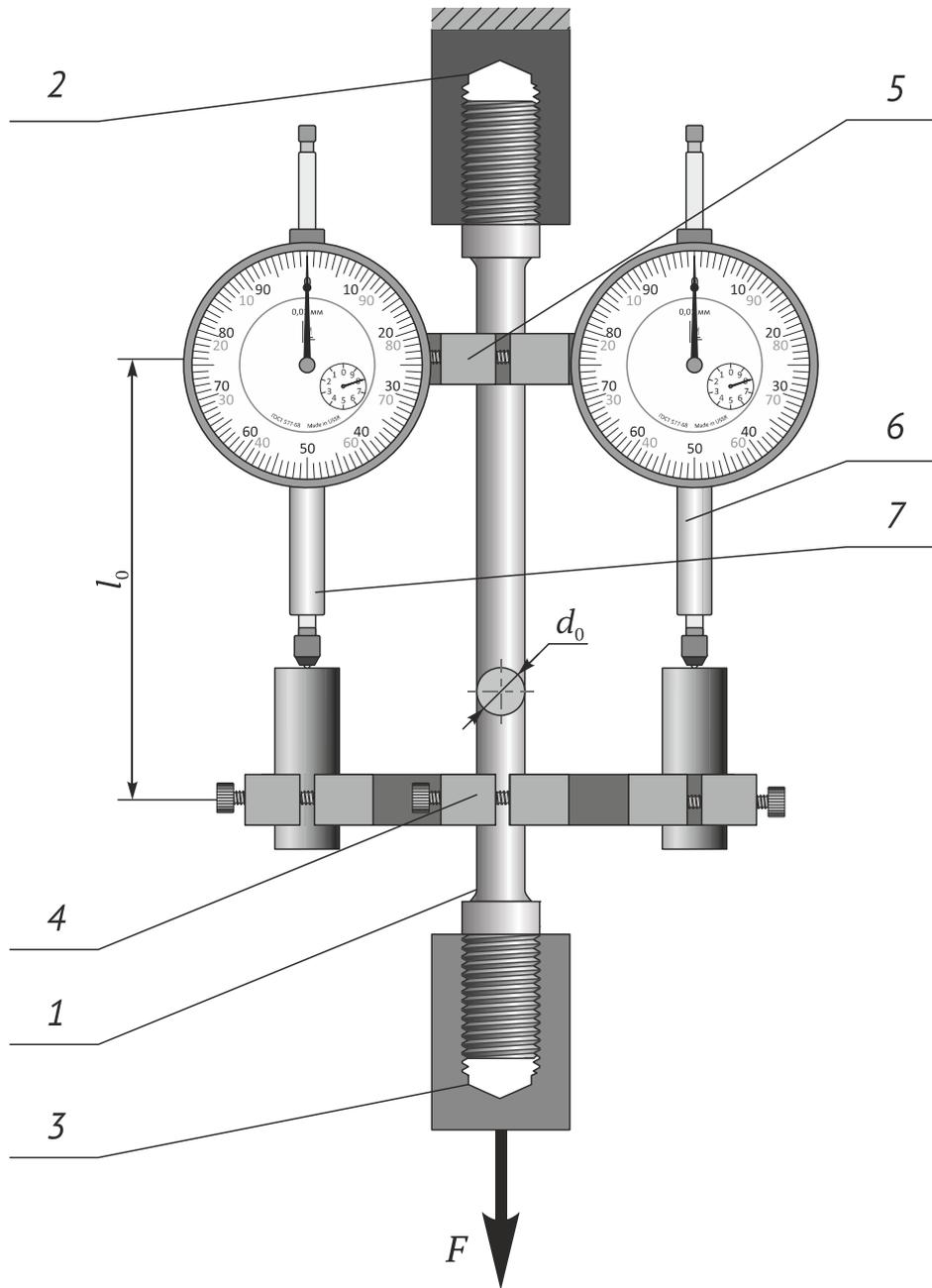


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – испытуемый образец; 2 – неподвижный захват испытательной машины; 3 – подвижный захват испытательной машины; 4 – струбцина крепления упоров тензометров; 5 – струбцина крепления подвеса тензометров; 6, 7 – тензометры

На базовой длине l_0 образца с помощью струбцин закреплены датчики измерения перемещений, чьи показания позволяют определить линейную деформацию образца. Нагружение на испытательной машине происходит путем сообщения перемещения подвижной траверсе, в результате чего происходит растяжение образца.

Все последующие действия, связанные с работой на испытательной машине, выполняются лаборантом. Определить значение максимальной нагрузки F_{max} и величину ступени нагружения ΔF . Произвести предварительное нагружение для обжатия головок образца в захватах машины. Нагрузка F_0 при этом может быть равна или несколько больше ступени нагружения. Зафиксировать эту нагрузку в журнале испытаний.

Выполнить пять последовательных нагружений образца равными ступенями, записать после каждого показания обоих приборов. Закончив испытания, образец разгрузить и приступить к обработке результатов испытания.

Обработка результатов эксперимента. Вычислить средние арифметические значения отсчетов по тензоретрам (рис. 3):

$$n_{срi} = \frac{n_{i1} + n_{i2}}{2}, i = 1, 2, \dots, 5,$$

где i – ступени нагружения, n_{i1} и n_{i2} – показания первого и второго тензоретра на i -й ступени нагружения, $n_{срi}$ – среднее значение показаний тензоретров на i -й ступени нагружения. Определить приращения показаний тензоретров

$$\Delta n_{срi} = n_{срi} - n_{срi-1}, i = 1, 2, \dots, 5,$$

и деформацию образца, равную сумме приращений:

$$\Delta l = \sum_i \Delta n_{срi}, i = 1, 2, \dots, 5.$$

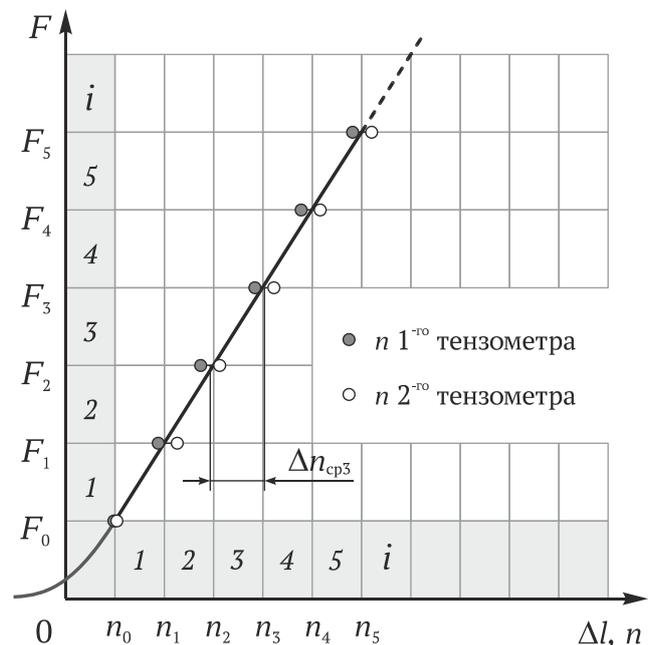


Рис. 3. Обработка результатов эксперимента

Определить полное приращение нагрузки

$$\Delta F_{\Sigma} = F_5 - F_0.$$

Запись промежуточных отсчетов при наблюдениях в пределах действия закона Гука необходима для контроля, так как промежуточные отсчеты позволяют следить за пропорциональностью между нагрузками и деформациями.

Вычислить модуль продольной упругости E по формуле

$$E = \frac{\Delta F_{\Sigma}}{A} \frac{l}{\Delta l}.$$

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит схему установки тензометров на образце; таблицу с результатами измерений; вычисление модуля продольной упругости для материала, из которого изготовлен образец и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое свойство материала характеризует модуль продольной упругости E ?
2. Какой физический и геометрический смысл модуля E ?
3. Что нужно измерить опытным путем при вычислении модуля продольной упругости?
4. Почему при определении модуля продольной упругости напряжения не должны превышать предела пропорциональности материала?
5. Как вычисляется наибольшая нагрузка, которую не следует превышать при испытании?
6. Почему для измерения деформации применяют несколько тензометров?
7. Какую закономерность можно установить, если регистрировать показания тензометров, увеличивая нагрузку равными ступенями?
8. Определите напряжение в стальной детали, если известно, что относительная деформация в ней равна $5 \cdot 10^{-4}$.

РАБОТА № 2
Определение модуля продольной упругости

Цель работы. Проверить закон Гука и определить модуль продольной упругости E .

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина:

тип _____, предельное усилие _____ кН,
 цена деления _____ Н.

1.2. Измерительный прибор:

наименование - индикатор часового типа,
 цена деления _____ мкм.

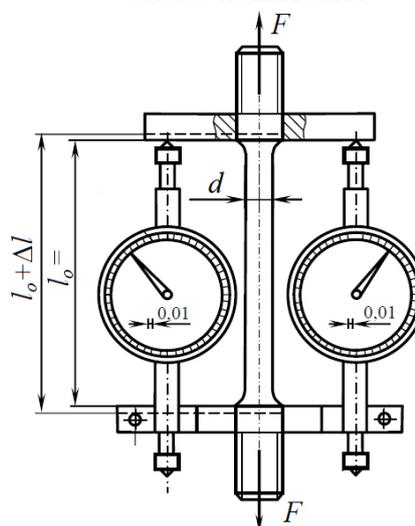
1.3. Испытуемый образец:

материал _____

($E =$ _____ ГПа, $\sigma_{\text{пл}} =$ _____ МПа),

$d =$ _____ мм, $l =$ _____ мм, $A = \pi d^2/4 =$ _____ мм²

Схема испытания



2. Результаты измерений

Ступени нагрузки	Нагрузка, Н		Отсчеты по приборам, мкм			
	F	ΔF	n_1	n_2	$n_{\text{ср}} = (n_1 + n_2)/2$	$\Delta n_{\text{ср}}$
0						
1						
2						
3						
4						
5						

Определение модуля продольной упругости

$\Delta F = F_5 - F_0 =$ _____ $=$ _____ Н, $\Delta l = \Sigma \Delta n_{\text{ср}} =$ _____ мкм,

$E = \frac{\Delta F_{\Sigma}}{A} \frac{l}{\Delta l} =$ _____ $=$ _____ ГПа.

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 3

Определение коэффициента Пуассона

Цель работы. Убедиться в постоянстве отношений поперечной деформации к продольной при осевом растяжении, определить величину коэффициента поперечной деформации (коэффициента Пуассона) для испытываемого материала.

Краткие теоретические сведения. Под действием осевой нагрузки стержень изменяет свою длину и размеры поперечного сечения (рис. 1). Соотношение между величинами поперечной и продольной деформации для каждого материала при одноосном растяжении или сжатии является постоянной величиной и характеризует упругие свойства материала.

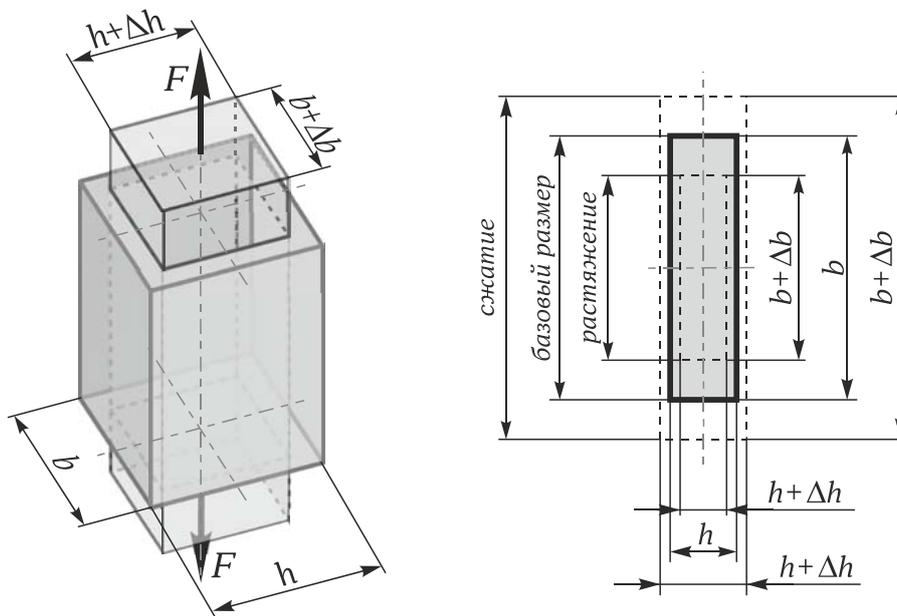


Рис. 1. Изменение поперечных размеров при действии осевой нагрузки

Большинство изотропных материалов при приложении в продольном направлении растягивающей нагрузки удлиняется, а в поперечном направлении сужается. Однако существуют материалы, которые при растяжении в продольном направлении удлиняются и расширяются в поперечном направлении, при сжатии укорачиваются и расширяются – такие материалы называют ауксетиками. Преимущественно такие свойства демонстрируют анизотропные материалы, различные полимеры. Расширение при растяжении также демонстрируют щелочно-галоидные кристаллы калия, галогениды лития и других металлов.

Коэффициентом Пуассона ν называют величину отношения относительной поперечной деформации $\varepsilon_{\text{поп}}$ к продольной деформации $\varepsilon_{\text{прод}}$:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} = -\frac{\Delta b}{b} \frac{l}{\Delta l} = -\frac{\Delta h}{h} \frac{l}{\Delta l}.$$

Его можно вычислить, если измерить линейные деформации стержня в поперечном и продольном направлениях при действии осевой нагрузки, вызывающей только упругие деформации.

Значение коэффициента Пуассона для большинства металлов близко к 0,3. Для стали его среднее значение, полученное из многочисленных опытов, составляет 0,28 и изменяется в пределах от 0,25 до 0,3. Для дюралюминия среднее значение составляет 0,34; крайние значения 0,31 и 0,36.

Материальное обеспечение эксперимента. Образцы. Величины поперечных деформаций значительно меньше продольных. Например, для стали поперечная деформация примерно в 3,5 раза меньше продольной. Для измерения малых поперечных деформаций лучше применять тензометры с увеличенной базой, поэтому образец для испытания должен быть в виде широкой полосы, а длина его в 4–5 раз больше ширины, чтобы исключить влияние неравномерности распределения деформации в местах приложения нагрузки к образцу.

Испытательная машина. Растяжение образца производится на разрывной машине Р-5 (см. ч. II, п. 2.1).

Измерительные приборы. Для измерений деформаций используются два одинаковых тензометра Аистова (см. ч. II, п. 1.4), установленных один в направлении оси стержня, а другой в перпендикулярном направлении. Цена деления тензометров составляет 1 мкм.

При нагружении образца стрелки приборов отклоняются на Δn делений, которые связаны с его относительной деформацией следующей зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\Delta n}{Ks},$$

где K – коэффициент увеличения прибора (в нашем случае $K = 1000$); s – база тензометра (в нашем случае $s = 40$ мм).

Таким образом, коэффициент Пуассона определяется:

$$\nu = -\frac{\Delta n_1}{\Delta n_2},$$

с учетом того, что показания продольной деформации $\Delta n_2 < 0$.

Порядок проведения эксперимента. Перед началом работы ознакомиться с устройством и принципом действия тензометров Аистова, установленных на плоском образце (рис. 2). В журнале наблюдений записать тип испытательной машины, цену деления силоизмерительного устройства, базу измерения деформации s , цену деления и коэффициент увеличения измерительного прибора, размеры поперечного сечения образца.

Определить значение максимальной нагрузки F_{\max} и величину степени нагружения ΔF . Произвести предварительное нагружение для выбора зазоров в цепочке нагружения образца машины. Нагрузка F_0 при этом может быть равна или несколько больше степени нагружения. Зафиксировать эту нагрузку в журнале испытаний. Выполнить 4-5 нагружений образца равными ступенями и после каждого нагружения записать показания обоих приборов.

Тензометры Аистова работают по принципу замыкания электрической цепи между подвижной ножкой-контактом и конусным контактным винтом тензометра. Поэтому показания тензометра рекомендуется снимать в момент размыкания контактов. Для этого вращают нимб контактного винта до замыкания электрической цепи, а затем плавно отводят назад, для исключения искажения показаний тензометра. Замыкание цепи отслеживают по показанию стрелок амперметров: показание «0» – цепь разомкнута, отклонение стрелки от 0 – замыкание цепи.

Также следует учесть, что при удлинении образца (увеличение длины s) подвижная ножка-контакт верхним концом будет перемещаться в сторону контактного винта, поэтому, прежде чем нагружать образец на очередную ступень, следует отвести вращением нимба винта контакт на достаточное расстояние от ножки, чтобы предотвратить ее деформацию и проскальзывание по образцу в момент его нагружения.

Закончив испытания, образец разгрузить, предварительно отведя вращением нимба винта поперечного тензометра его конусный кон-

такт, чтобы исключить надавливание на контактную ножку в процессе разгрузки. Приступить к обработке результатов испытания.

Обработка результатов эксперимента. Вычислить приращения показаний поперечного Δn_1 и продольного Δn_2 тензометров для каждой ступени нагружения, а по ним – суммы приращений $\Sigma \Delta n_1$ и $\Sigma \Delta n_2$.

Определить коэффициент Пуассона по формуле

$$\nu = -\frac{\sum \Delta n_1}{\sum \Delta n_2},$$

с учетом того, что показания продольной деформации $\Delta n_2 < 0$.

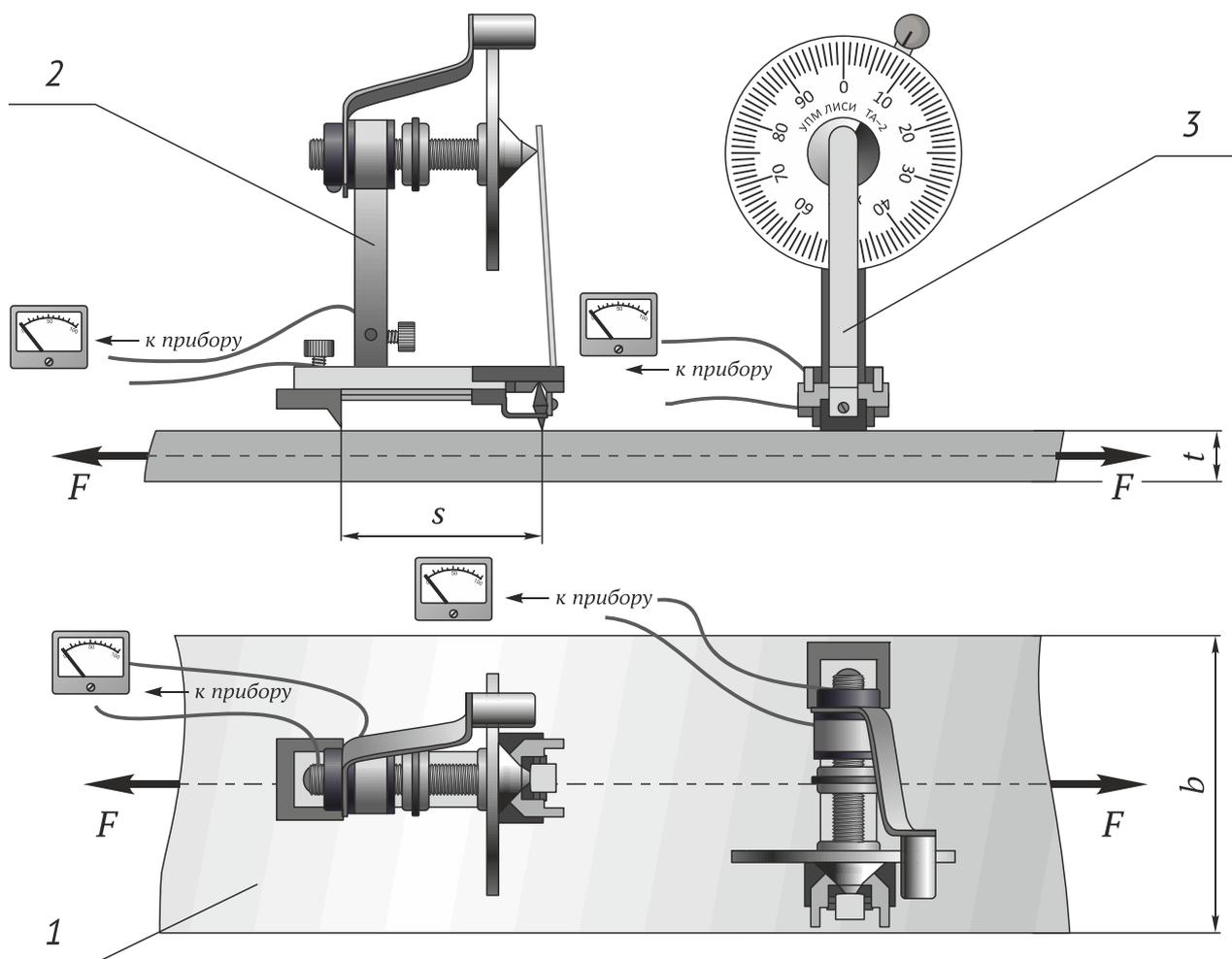


Рис. 2. Тензометры Аистова, установленные на плоском образце:
 1 – образец; 2 – тензометр для измерения продольной деформации;
 3 – тензометр для измерения поперечной деформации

Полученное значение коэффициента Пуассона сравнить с величиной этого коэффициента, указанной в справочной (см. прил. 1) и учебной литературе для испытуемого материала.

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит схему установки тензометров на образце; таблицу с результатами измерений; вычисление коэффициента Пуассона для материала, из которого изготовлен образец и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называют коэффициентом Пуассона? Может ли он быть отрицательным?
2. Как определить коэффициент Пуассона?
3. Какие деформации, возникающие при осевом растяжении, больше: продольные или поперечные?
4. Укажите пределы изменения коэффициента Пуассона?
5. Почему принят образец в виде полосы, а не цилиндрический?
6. Объясните принцип работы тензометра Аистова. Чему равна цена деления прибора?
7. Какому испытанию подвергался образец, если тензометр отметил увеличение поперечных размеров образца?
8. При проведении лабораторной работы были определены следующие значения коэффициента Пуассона для стали: 0,15; 3,33; 0,28. Укажите, в каких случаях опыт был проведен неправильно?

РАБОТА № 3

Определение коэффициента Пуассона

Цель работы. Убедиться в постоянстве отношений поперечной деформации к продольной при осевом растяжении, определить величину коэффициента поперечной деформации (коэффициента Пуассона) для испытываемого материала.

1. Организация опыта

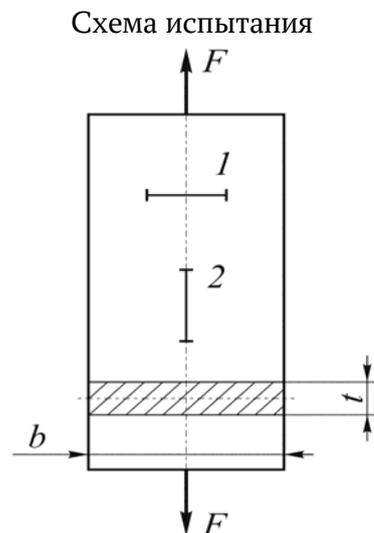
1.1. Испытательная машина:

тип _____, предельное усилие _____ кН,
цена деления _____ Н.

1.2. Измерительный прибор: наименование – тензометр Аистова, цена деления _____ мкм.

1.3. Испытуемый образец:

материал – дюраль ($E = 70$ ГПа, $\sigma_{\text{тц}} = 80$ МПа),
 $b =$ _____ мм, $t =$ _____ мм, $A = bt =$ _____ мм²



2. Результаты опыта

Ступени нагружения	Нагрузка, Н		Отсчеты по приборам, мкм				$\Delta n_1 / \Delta n_2$
	F	ΔF	n_1	Δn_1	n_2	Δn_2	
0							
1							
2							
3							
4							
5							

2.2. Определение коэффициента Пуассона

$\Sigma \Delta n_1 = n_{1-5} - n_{1-0} =$ _____ мкм, $\Sigma \Delta n_2 = n_{2-5} - n_{2-0} =$ _____ мкм,

$$\nu = - \frac{\sum \Delta n_1}{\sum \Delta n_2} = \frac{\text{_____}}{\text{_____}} = \text{_____}.$$

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 4

Испытание материалов на сжатие

Цель работы. Ознакомиться с методами испытания материалов на сжатие, определить механические характеристики пластичных и хрупких материалов при сжатии.

Краткие теоретические сведения. Согласно ГОСТ 25503-97 испытанием на сжатие определяют механические характеристики только хрупких материалов. При этом определению подлежит лишь предел прочности $\sigma_{пчс}$. Поэтому таким испытаниям подвергают, главным образом, хрупкие материалы, которые, как правило, лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению. Например, отношение предела прочности на сжатие $\sigma_{пчс}$ к пределу прочности на растяжение $\sigma_{пчр}$ для чугуна лежит в пределах 2,5...5; для керамических материалов – 5...10.

Диаграмма сжатия. Для построения диаграммы сжатия образцы испытуемых материалов помещают между параллельными плитами пресса или универсальной испытательной машины и подвергают сжатию возрастающей нагрузкой.

Для малоуглеродистой стали диаграмма сжатия имеет вид кривой, показанной на рис. 1. Здесь, как и для растяжения, обнаруживается площадка текучести с последующим переходом к зоне упрочнения. В дальнейшем, однако, нагрузка не падает, как при растяжении, а возрастает. Происходит это в результате того, что площадь поперечного сечения сжатого образца увеличивается; сам образец вследствие трения на торцах принимает бочкообразную форму.

Довести такой образец до разрушения практически невозможно. Испытуемый образец сожмется в тонкий диск и дальнейшее испытание ограничится нагрузочной возможностью разрывной машины. Поэтому предел прочности с физической точки зрения при сжатии для пластичных материалов не может быть найден. Из опытов определяют только пределы пропорциональности и текучести, а также могут быть определены упругие константы материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона); при растяжении и сжатии они практически одинаковы. В связи с этим для пластичных материалов допускается не проводить испытания на сжатие, если известны характеристики сопротивления материала растяжению.

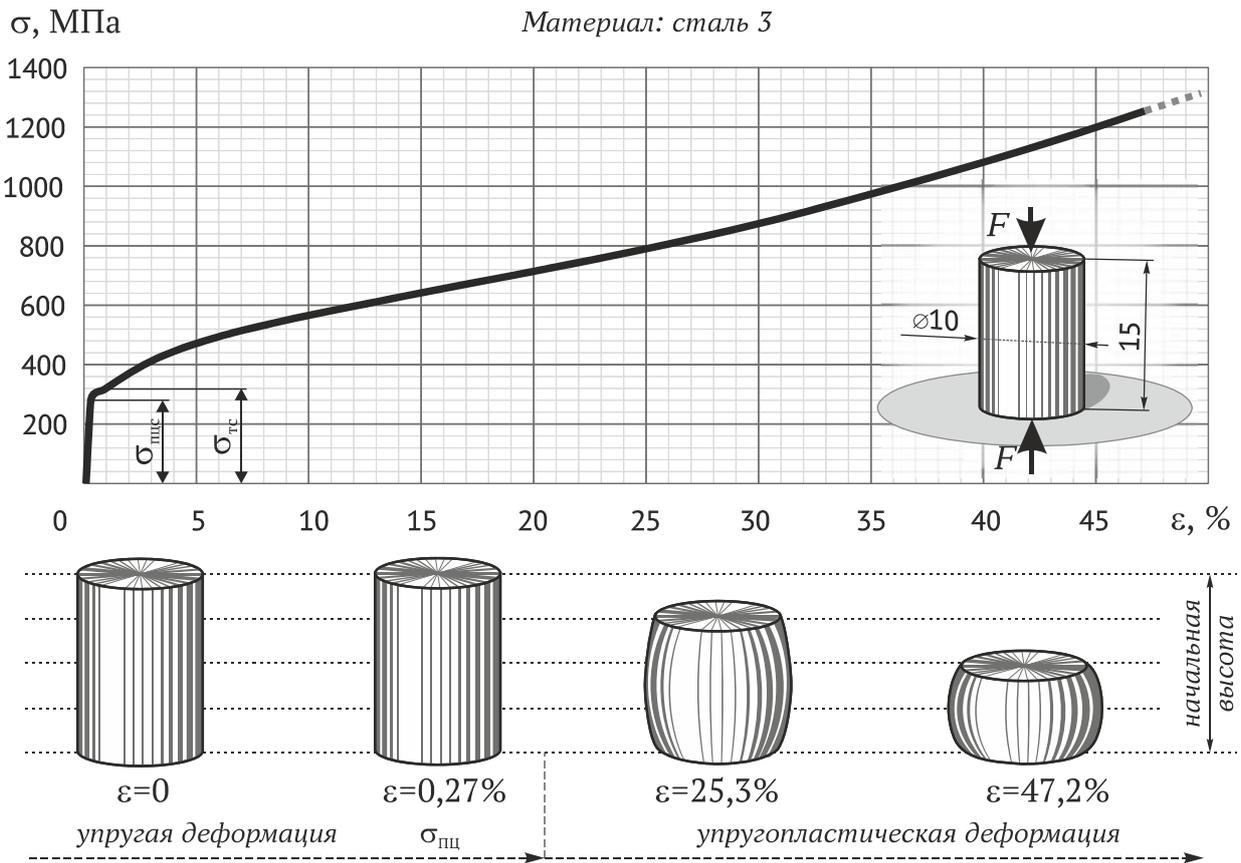


Рис. 1. Диаграмма деформирования при сжатии и стадии деформирования образца из малоуглеродистой стали

Иначе ведут себя при испытании на сжатие хрупкие материалы. На рис. 2 приведена диаграмма сжатия и показан характер разрушения образца из серого чугуна (трещины, появляющиеся на образце в начале разрушения, направлены под углом примерно 45° к его оси, в плоскости действия максимальных касательных напряжений). В зависимости от скорости деформирования хрупкие материалы могут демонстрировать некоторые пластические свойства при сжатии. Так, например, представленный на диаграмме деформирования при сжатии (рис. 2) чугун СЧ15 при малой скорости деформации демонстрирует определенный уровень остаточной пластической деформации, а при большой скорости разрушение происходит практически без остаточной деформации. Единственная характеристика, получаемая в результате этого испытания, – предел прочности при сжатии $\sigma_{пс}$.

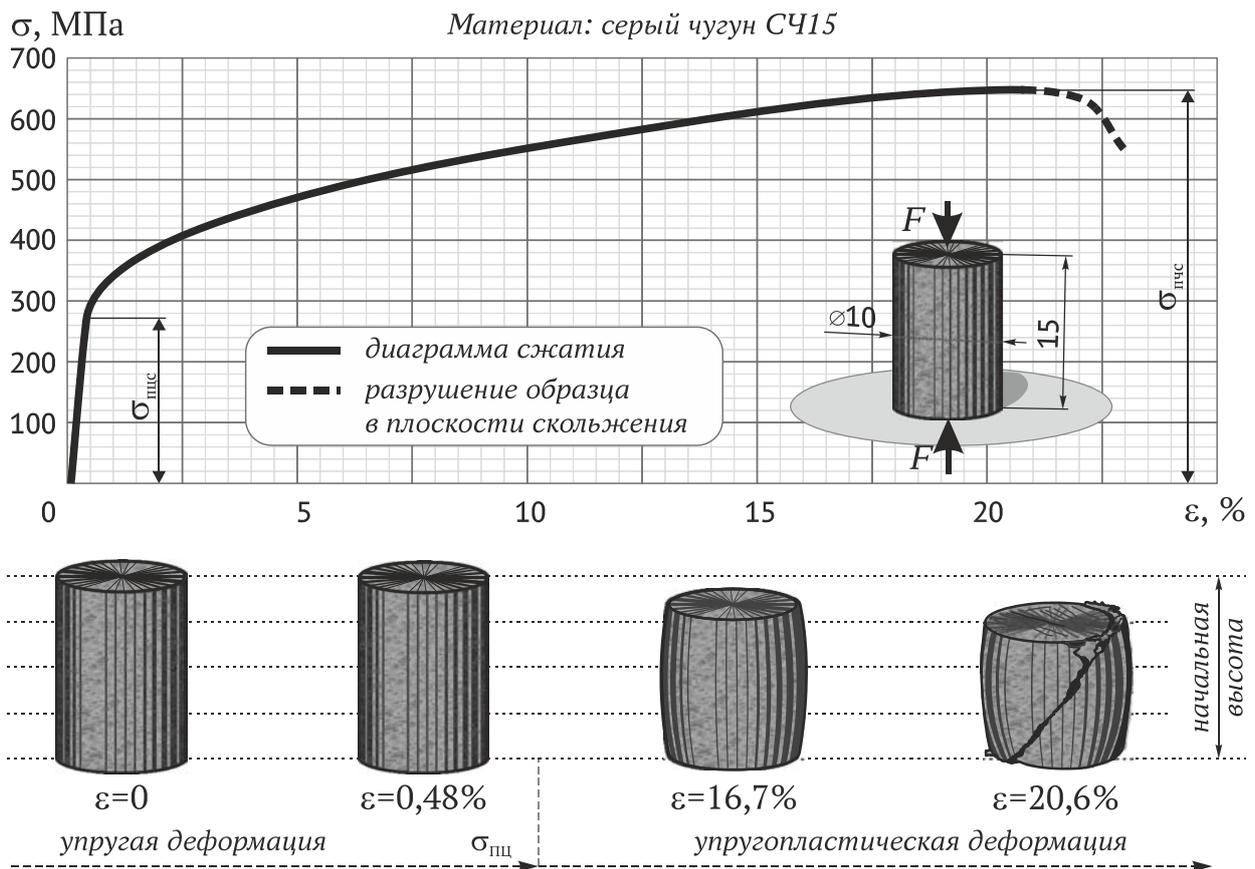


Рис. 2. Диаграмма деформирования при сжатии и стадии деформирования образца из серого чугуна

Дерево как анизотропный материал демонстрирует различные виды разрушения в зависимости от направления приложения нагрузки и обладает различной прочностью вдоль и поперек волокон, что наглядно иллюстрируется рис. 3 и 4. При сжатии поперек волокон диаграмма похожа на диаграмму пластичного материала, а при сжатии вдоль волокон дерево демонстрирует хрупкое разрушение и его диаграмма сжатия внешне похожа на диаграмму чугуна. Разрушение происходит с образованием поперечных складок и смятием торцов. Сжатие поперек волокон сопровождается уплотнением древесины без видимых признаков разрушения образца. Уловить момент потери несущей способности не представляется возможным. Поэтому за разрушающую нагрузку условно принимают такую силу, при достижении которой высота кубика уменьшается на $1/3$ первоначального значения. Различие механических свойств дерева вдоль и поперек волокон характеризуется коэффициентом анизотропии $K_a = \sigma'_{\text{плс}} / \sigma''_{\text{плс}}$, который для сосны лежит в пределах 7...10.

σ , МПа *Материал: сосна обыкновенная (Pinus sylvestris) с 15 % влажностью*

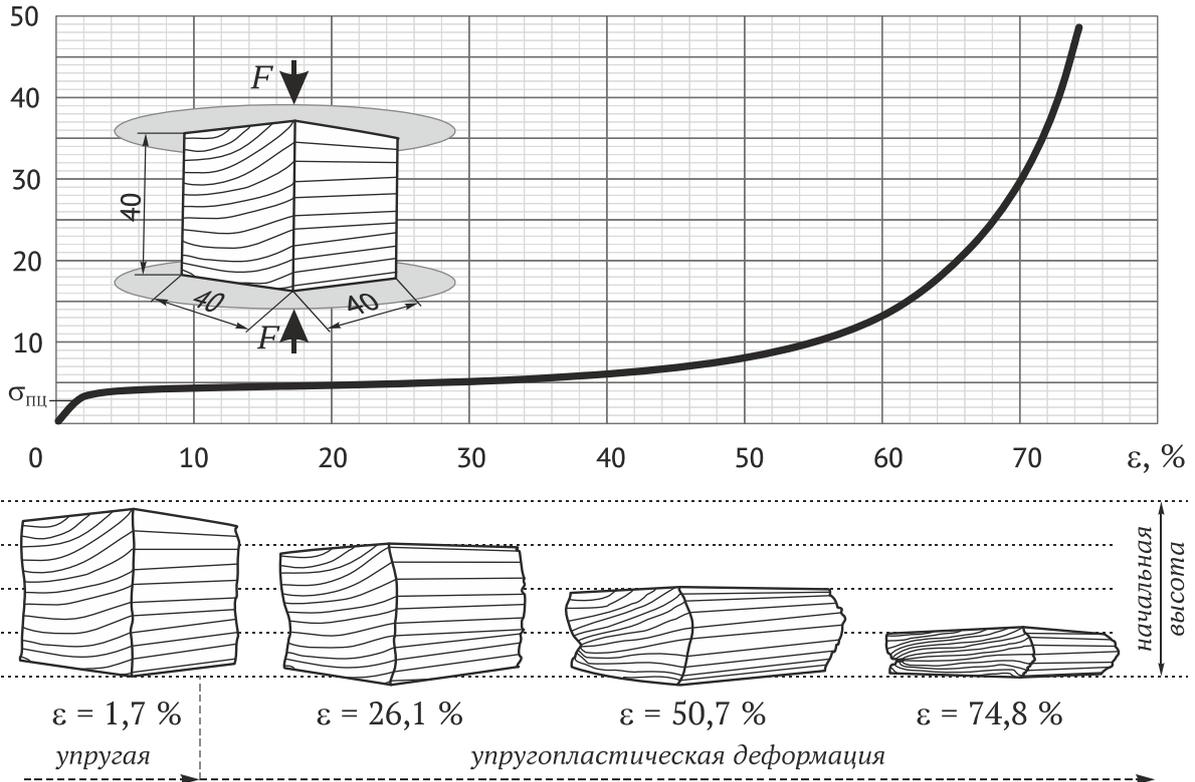


Рис. 3. Диаграмма деформирования при сжатии дерева поперек волокон

σ , МПа *Материал: сосна обыкновенная (Pinus sylvestris) с 15 % влажностью*

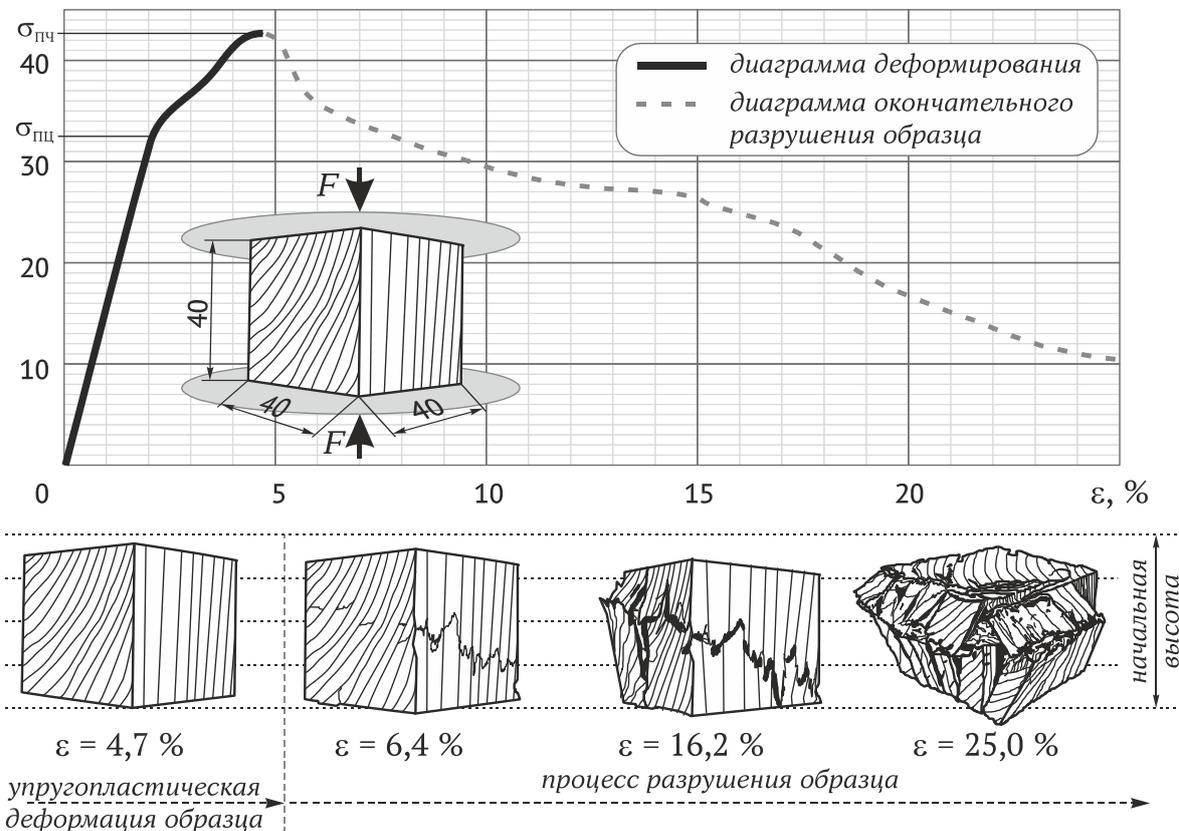


Рис. 4. Диаграмма деформирования при сжатии дерева поперек волокон

Материальное обеспечение эксперимента. Образцы. Форма и размеры образца зависят от материала:

– для металлов (чугун, сталь) применяют образцы в форме невысоких цилиндров ($h/d = 1 \dots 3$), так как при более длинных образцах может произойти их изгиб (рис. 5);

– для строительных материалов, включая дерево, берут образцы в форме кубиков (рис. 5).

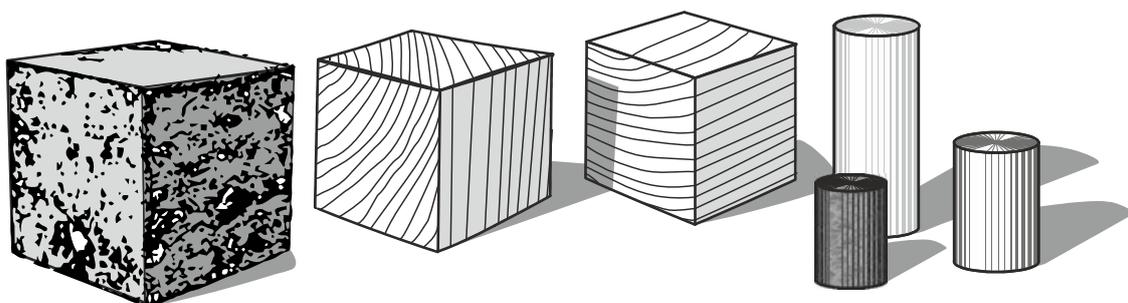


Рис. 5. Образцы для испытаний на сжатие: бетон, дерево, металл

Измерительный прибор. Для измерений используется штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм (см. ч. II, п. 1.1).

Испытательная машина. Сжатие образцов производится на универсальной гидравлической машине Р-20 (см. ч. II, п. 2.2).

Порядок проведения эксперимента. Перед испытанием ознакомиться с устройством машины Р-20, на которой будут проводиться испытания, и записать в отчете тип машины, предельную нагрузку и цену деления силоизмерительного устройства.

Измерить диаметр d и высоту h цилиндрических образцов, а также длину ребра кубика для образцов из дерева.

Все последующие действия, связанные с работой на испытательной машине, выполняются лаборантом.

Установить образец между опорными плитами машины. Включить насос испытательной машины и наблюдать за процессом сжатия образца. После каждого испытания остановить насос, произвести разгрузку машины, снять образец и зарисовать вид испытанного образца.

Сталь. Стальной образец при сжатии не разрушается, а только сплющивается, приобретая бочкообразную форму. При наличии диаграммы сжатия из опыта можно определить предел пропорциональности, текучести и значение напряжений, соответствующее деформации на $1/3$ от первоначальной высоты. В случае отсутствия фиксации диаграммы сжатия из опыта можно определить предел

текучести при сжатии $\sigma_{тс}$, ему будет соответствовать практически полная остановка стрелки силоизмерителя разрывной машины, а также значение напряжений, соответствующее деформации на $1/3$ от первоначальной высоты, которые в ряде методик считаются условным пределом прочности материала при сжатии.

Чугун. Испытание чугуна дает возможность определить предел прочности при сжатии $\sigma_{пчс}$, а также предел пропорциональности (при наличии диаграммы сжатия). Чугунный образец при сжатии разрушается, распадаясь на части. Разрушение происходит по плоскостям, наклоненным к оси образца под углом около $45^\circ \dots 50^\circ$, т. е. в плоскости действия максимальных касательных напряжений. Несущая способность чугуна при разрушении падает практически мгновенно, что характерно для хрупких материалов. Следует отметить, что $\sigma_{пчс}$ сильно зависит от условий испытания и отношения высоты h к диаметру d образца. Поэтому опыт следует проводить на образцах высотой от 1 до 3 диаметров и со скоростью перемещения подвижного захвата машины не более 2 мм/мин.

По шкале силоизмерительного устройства зафиксировать наибольшую нагрузку F_{max} в момент разрушения образца.

Дерево. Испытание деревянных образцов представляет особый интерес вследствие того, что прочность этого материала, имеющего волокнистую структуру, неодинакова вдоль и поперек волокон (анизотропия свойств материала). Разрушение дерева при сжатии вдоль волокон происходит при небольших деформациях. После достижения наибольшей нагрузки F_{max} образец начинает разрушаться, и нагрузка падает.

При испытании дерева поперек волокон кубик получает значительные деформации, но разрушения не происходит (дерево поперек волокон спрессовывается). При нагружении дерева поперек волокон предпочтительно выбрать такой образец, у которого угол укладки волокон будет наиболее параллелен грани, на которую будет прикладываться нагрузка. За разрушающую нагрузку условно принимают величину, при которой кубик сжимается на одну треть от своей первоначальной высоты. Уменьшение высоты образца определяют по шкале перемещений подвижной опоры машины. Величину нагрузки фиксируют по шкале силоизмерительного устройства. В дальнейшем в результате прессования нагрузка начинает быстро расти. В это время следует остановить процесс нагружения во избежание поломки частей машины.

По завершении испытания разгрузить машину и приступить к обработке результатов испытания.

Обработка результатов эксперимента. В журнале испытаний зарисовать эскизы образцов после проведения эксперимента, записать значения критических для образцов нагрузок – F_T , F_{max} и вычислить для испытанных материалов значения механических характеристик по формуле $\sigma = F/A_0$.

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит эскизы образцов до испытания и после разрушения; вычисление пределов прочности материалов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности испытаний на сжатие?
2. Какие образцы применяют для испытаний на сжатие?
3. Какие характеристики материала можно получить при испытании на сжатие малоуглеродистой стали, чугуна, дерева?
4. Чем объясняется образование бочкообразной формы у образцов из малоуглеродистой стали и чугуна?
5. Почему разрушение чугунного образца происходит по наклонным площадкам?
6. В каком направлении дерево прочнее при сжатии?
7. Можно ли довести до разрушения деревянный образец нагрузкой, направленной поперек волокон?
8. Как и почему разрушаются деревянные образцы при сжатии вдоль и поперек волокон?
9. Что такое анизотропия и каким параметром она характеризуется?
10. Чему равен коэффициент анизотропии для дерева?

РАБОТА № 4

Испытание материалов на сжатие

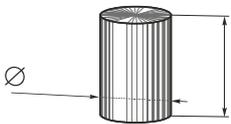
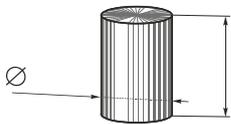
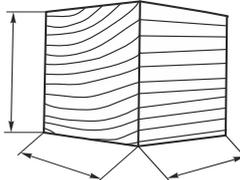
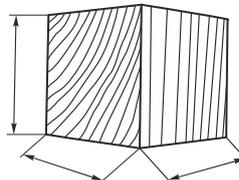
Цель работы. Изучить поведение материала при растяжении до разрушения, получить диаграмму растяжения и определить основные механические характеристики материала.

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина: тип _____, предельное усилие _____ кН, цена деления силоизмерительного устройства _____ Н.

1.2. Измерительный прибор – штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

1.3. Испытуемые образцы

Материал	Сталь	Чугун	Дерево	
			вдоль волокон	поперек волокон
Эскиз				
$A_0, \text{мм}^2$				

2. Результаты опыта

2.1. Эскизы образцов после испытания

Материал	Сталь	Чугун	Дерево	
			вдоль волокон	поперек волокон
Эскиз				
Нагрузка F , кН				

2.2. Характеристики прочности при сжатии (МПа)

Материал	Сталь	Чугун	Дерево	
			вдоль волокон	поперек волокон
Механическая характеристика $\sigma = \frac{F}{A_0}$, МПа				

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 5

Испытание материалов на срез

Цель работы. Изучение поведения материала под действием срезающей нагрузки и определение механических характеристик материалов при срезе.

Краткие теоретические сведения. При сдвиге в любом поперечном сечении стержня возникает только один внутренний силовой фактор – перерезывающая сила Q . Деформация сдвига, приводящая к разрушению материала, называется срезом. Расчет деталей, работающих на срез, основывается на теории чистого сдвига.

При чистом сдвиге прямоугольный элемент, выделенный в окрестностях некоторой точки и ориентированный определенным образом, испытывает только деформацию сдвига, а удлинения его сторон отсутствуют. По граням указанного элемента действуют только касательные напряжения (рис. 1, а).

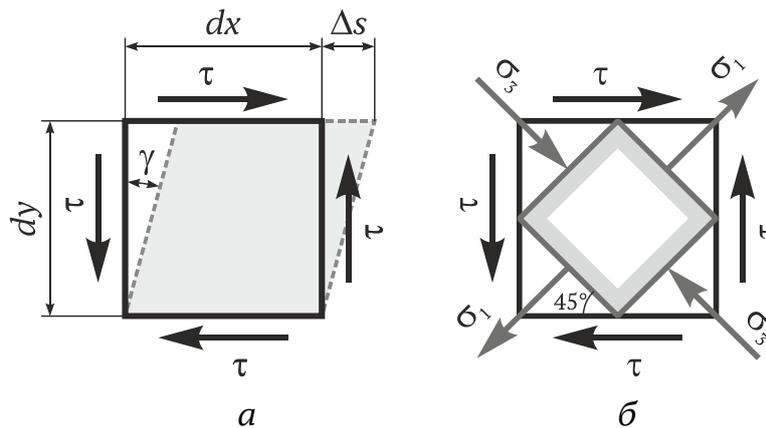


Рис. 1. Чистый сдвиг

Деформации характеризуются относительным сдвигом γ и абсолютным сдвигом Δs . Главные нормальные напряжения σ_1 и σ_3 (рис. 1, б) действуют на площадках, свободных от касательных напряжений. Величины главных напряжений соответственно равны $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_3 = -\tau$. Угол между исходными площадками равен 45° .

В машиностроительных и строительных конструкциях применяются заклепки, «чистые» болты, шпонки, штифты, и т. п. детали, нагруженные силами в плоскости стыка. Такая схема нагружения вызывает в них деформацию среза в плоскости поперечного сечения.

Условия работы рассматриваемых деталей очень сложные и учитывают также напряжения растяжения, сжатия и изгиба. Поэто-

му практические расчеты на срез базируются на инженерных допущениях о том, что:

- в сечении действует только один внутренний силовой фактор – перерезывающая сила Q ;
- распределение касательных напряжений от перерезывающей силы рассматривают равномерно распределенным по направлению среза в сечении;
- при наличии множественных соединений одинаковыми деталями в рассматриваемой зоне нагружения, предполагается, что все они воспринимают нагрузку в равной мере.

Фактически в деталях, работающих на срез, возникают сложные напряженные состояния, нежели чистый сдвиг, поскольку распределение сдвиговых напряжений в сечении неравномерно и в дополнение они испытывают изгиб и смятие. Поэтому результаты испытаний на срез имеют условный инженерный характер, не отражающий фактического распределения напряжений.

Однако в большинстве случаев ввиду того, что сдвиговые деформации оказываются существенно большими в сравнении с деформациями изгиба и смятия, такой подход к расчету и экспериментальному определению напряжений имеет хорошую корреляцию с результатами опытов по определению механических характеристик материалов при растяжении-сжатии и кручении.

В настоящей работе производится исследование прочности материалов на срез путем испытаний цилиндрических и плоских образцов. Величина срезающих касательных напряжений определяется по формуле:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F}{A_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где F – сила, действующая на объект; $A_{\text{ср}}$ – площадь среза.

Материальное обеспечение эксперимента. Испытание на срез производится на разрывной машине Р-20 с предельной нагрузочной способностью в 200 кН, предназначенной для статических испытаний на растяжение и сжатие.

В испытаниях на срез используются образцы двух типов. На рис. 2 и 3 показаны схемы испытаний приспособления и образцы пластинчатой и цилиндрической формы.

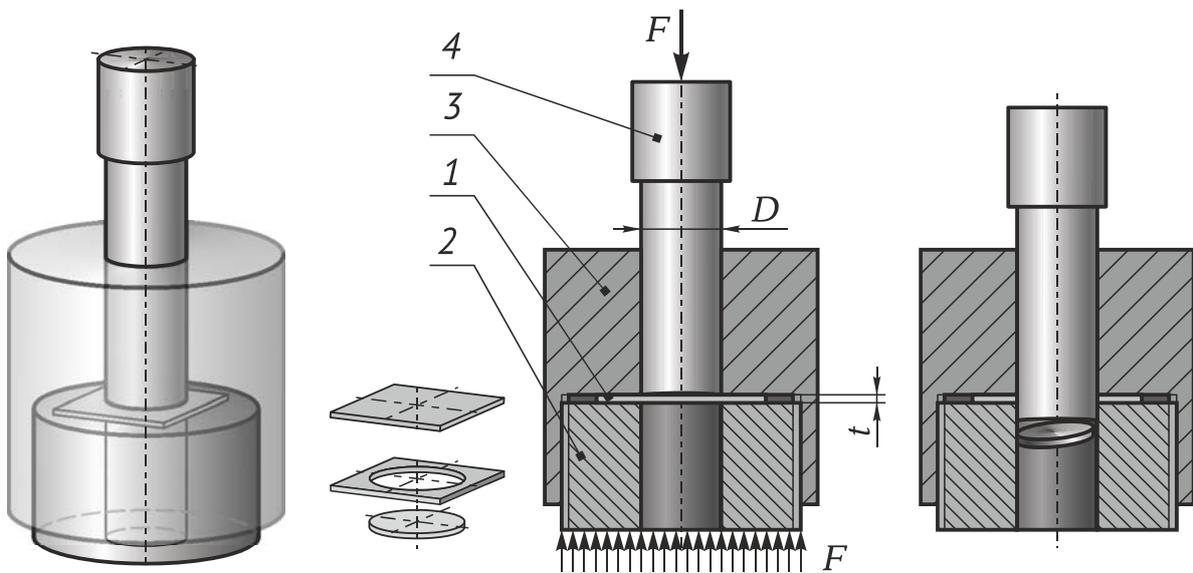


Рис. 2. Испытание на срез пластины: 1 – испытуемый образец – пластина; 2 – основание матрицы; 3 – корпус матрицы; 4 – пуансон

Испытания образцов на срез проводятся с помощью приспособлений, имитирующих реальные условия нагружения деталей – вырубка отверстия и двусторонний срез заклепочного соединения.

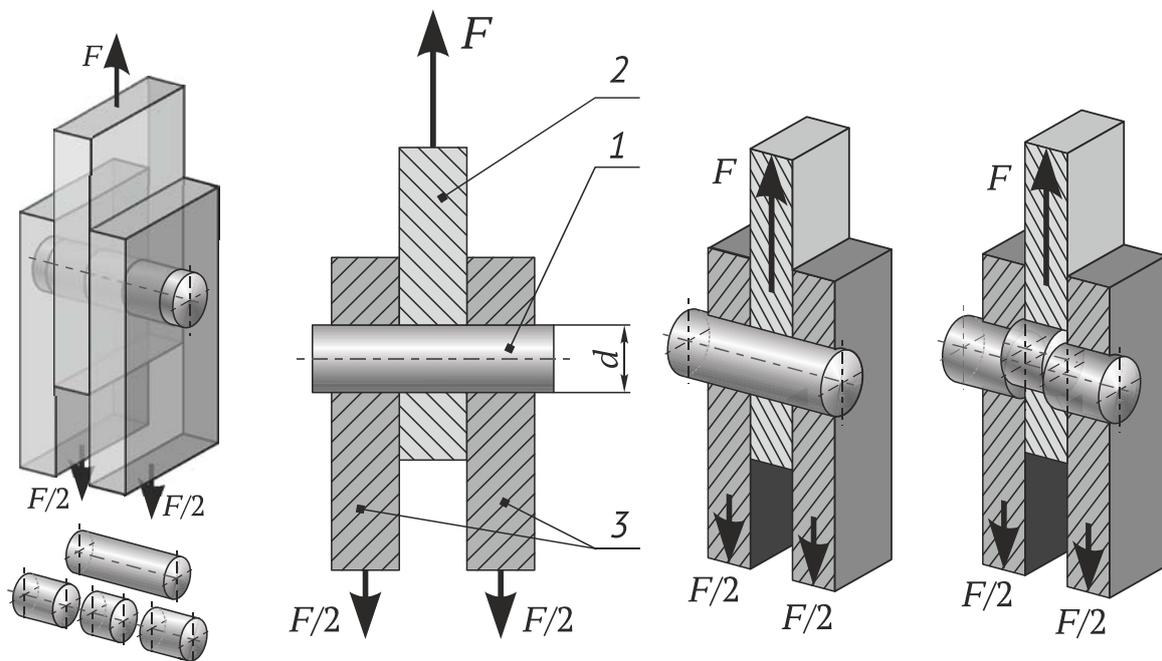


Рис. 3. Испытание на двусторонний срез: 1 – испытуемый образец – цилиндр; 2 – центральная пластина; 3 – боковые пластины

Порядок проведения эксперимента. Перед испытанием ознакомиться с устройством машины Р-20 (см. ч. II, п. 2.2), на которой будут проводиться испытания, и записать в отчете тип машины, предельную нагрузку и цену деления силоизмерительного устройства.

Все последующие действия, связанные с работой на испытательной машине, выполняются лаборантом.

Срез пластины. Измерить диаметр d пуансона и толщину t пластины. При испытании на срез пластины (рис. 2) квадратный образец из листового материала 1 помещается между основанием 2 и корпусом матрицы 3. Затем в матрицу устанавливают пуансон 4. Устанавливают приспособление в разрывную машину между плитами для испытания образцов на сжатие, производят нагружение и фиксируют разрушающую нагрузку. Часть материала образца продавливается через отверстие матрицы, при этом происходит срез по круговому контуру. Площадь среза равна боковой поверхности вырезанного цилиндра:

$$A_{\text{ср}} = \pi dt.$$

Двусторонний срез стержня круглого поперечного сечения. Измерить диаметр d стержня. Испытание стержня на двойной срез проводится в приспособлении, показанном на рис. 3. Данное приспособление закреплено в захватах разрывной машины. Для установки образца в отверстия в пластинах первоначально требуется их совместить. Совмещение достигается за счет перемещения подвижной траверсы (обычно в нее устанавливают центральную пластину).

Боковые пластины 3 жестко соединены болтовыми соединениями, исключающими их раскрытие. Также выборка зазора между пластинами принципиальна с точки зрения уменьшения влияния изгибных нагрузок на стержень во время испытания. В совмещенное отверстие в боковых 3 и центральной пластине 2 продевают образец 1. Затем производят его нагружение до разрушения и фиксируют разрушающую нагрузку. При этом средняя часть образца сдвигается относительно крайних частей. Срез происходит в двух сечениях. Площадь среза $A_{\text{ср}}$ равна удвоенной площади поперечного сечения образца:

$$A_{\text{ср}} = 2A = 2 \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{2}.$$

Составление отчета. Значения механических характеристик при срезе существенно зависят от условий проведения эксперимента,

зазора между пуансоном и матрицей, радиуса притупления кромок пуансона, соотношения диаметра пуансона и толщины образца.

Подобные же погрешности сопутствуют испытаниям круглых образцов кроме среза, образец подвергается изгибу и смятию, доля которых зависит от условий испытания (соотношения диаметра образца и толщины срезающих ножей, плотности посадки образцов в отверстие приспособления, наличия зазоров между ножами приспособления, притупления, кромок отверстия и т. п.), а также свойств материала.

Поэтому величина предела прочности срезу $\tau_{ср}$, определяемая по величине разрушающей нагрузки, в известной мере по упомянутым выше причинам условна. В связи с этим полученные результаты необходимо сопоставить с результатами, известными из литературы, и сделать соответствующие выводы.

Предел прочности при срезе определяют по зависимости (1) и заносят в таблицу.

Контрольные вопросы

1. В чем разница между деформацией сдвига и среза?
2. Каков характер распределения напряжений в поперечном сечении при действии срезающей нагрузки?
3. Как предварительное упрочнение повлияет на характер среза образца?
4. Какие внутренние силовые факторы возникают в сечении при срезе?
5. Будут ли одинаковы величины предела прочности при срезе образца в виде пластины и стержня круглого поперечного сечения?
6. Как изменяются фактические значения срезающих напряжений при срезе в поперечном сечении?

РАБОТА № 5

Испытание материалов на срез

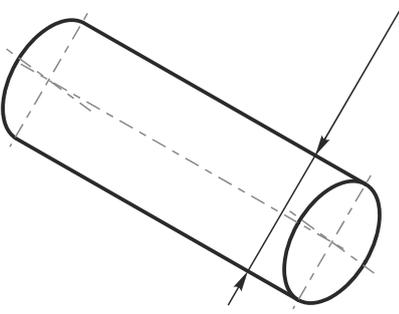
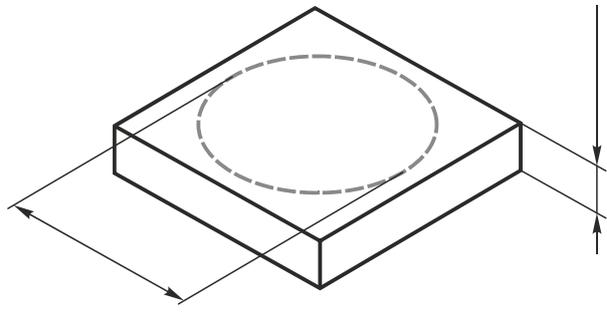
Цель работы. Изучение поведения материала под действием срезающей нагрузки и определение механических характеристик материалов при срезе.

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина: тип _____, предельное усилие _____ кН, цена деления силоизмерительного устройства _____ Н.

1.2. Измерительный прибор – штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

1.3. Испытуемые образцы

Материал		
Эскиз		
$A_{ср}, \text{мм}^2$		

2. Результаты опыта

Эскиз образца после испытания		
$F, \text{кН}$		
$\tau_{ср}, \text{МПа}$		

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 6

Испытание материалов на кручение

Цель работы. Изучить характер разрушения пластичных и хрупких материалов при кручении и определить механические характеристики материалов при кручении.

Краткие теоретические сведения. Испытания на кручение относятся к числу основных, так как с их помощью определяются механические характеристики материалов при чистом сдвиге. Они проводятся в соответствии с ГОСТ 3665–80.

Характер разрушения материалов при кручении. При кручении стержней кругового поперечного сечения (рис. 1) в плоскостях, перпендикулярных к его продольной оси, а также в плоскостях, совпадающих с этой осью, действуют только касательные напряжения; в плоскостях, расположенных под углом 45° – только нормальные. Напряженное состояние во всех точках – чистый сдвиг. Нормальные и касательные напряжения по величине равны между собой, поэтому разрушение образца может произойти от сдвига или отрыва. Так как сопротивление сдвигу и отрыву у различных материалов неодинаково, то разрушение образцов при испытании на кручение будет происходить различно.

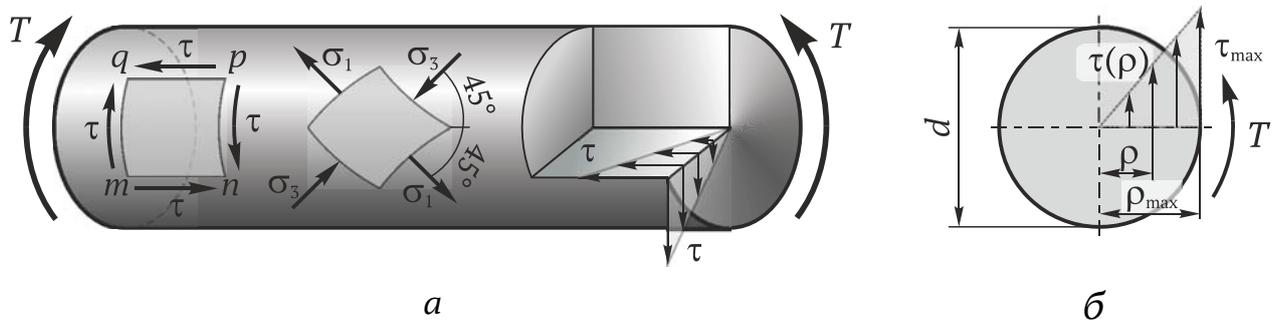


Рис. 1. Распределение напряжений в стержне круглого поперечного сечения

Стальные образцы разрушаются под действием касательных напряжений, возникающих в поперечном сечении. Они буквально срезаются по поперечному сечению (рис. 2, а). Аналогично разрушаются стержни из других пластичных металлов (сплавы алюминия, меди и т. п.).

Элемент $mnpq$ испытывает чистый сдвиг (рис. 1, а), поэтому на площадках, наклоненных под углом 45° к оси стержня, возникают

только нормальные напряжения, равные по величине τ . При этом одно из них σ_1 является растягивающим, а второе σ_3 – сжимающим. Если материал плохо сопротивляется растягивающим напряжениям, как, например, чугун (рис. 2, б), то разрушение произойдет по сложной винтовой поверхности, соответствующей максимальным растягивающим напряжениям. След этой поверхности на поверхности цилиндра представляет собой винтовую линию, наклоненную к оси стержня под углом 45° .

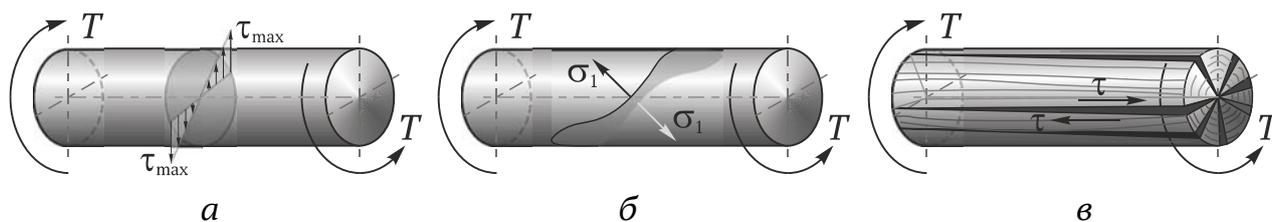


Рис. 2. Разрушение при кручении различных материалов:
а – сталь; б – чугун; в – дерево

Наличие касательных напряжений в поперечных сечениях обуславливает (согласно закону парности) существование точно таких же напряжений и в продольных сечениях (рис. 1, а), которые обнаруживаются, например, при испытании на кручение деревянных образцов. Дерево, как известно, обладает ярко выраженной анизотропией упругих и прочностных свойств. Древесина, имеет сравнительно низкую прочность на скалывание вдоль волокон. Поэтому разрушение деревянного образца при кручении начинается с образования продольных трещин (рис. 2, в).

Диаграмма кручения. Основой для определения механических характеристик материалов при чистом сдвиге служит диаграмма кручения, выражающая зависимость между крутящим моментом T и углом закручивания φ . На рис. 3 на примере дюралюминия показана диаграмма кручения, типичная для пластичных материалов.

Она имеет вид, напоминающий диаграмму растяжения, точнее – часть ее до начала образования шейки. Сначала идет прямолинейный участок OA , соответствующий линейной зависимости между крутящим моментом T и углом закручивания φ , где материал подчиняется закону Гука:

$$\varphi = \frac{Tl}{GI_p}, \quad (1)$$

где T – крутящий момент; l – длина образца; G – модуль сдвига;
 $I_p = \frac{\pi d^4}{32}$ – полярный момент инерции сечения.

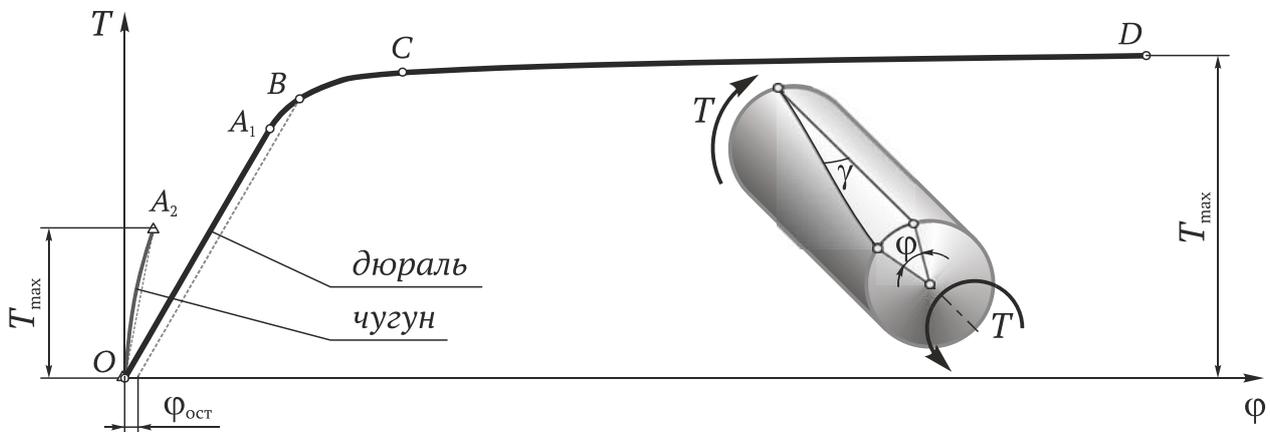


Рис. 3. Диаграммы кручения дюралюминия и чугуна

Касательные напряжения в поперечном сечении распределяются по линейному закону

$$\tau = \frac{T}{I_p} \rho. \quad (2)$$

Максимальное касательное напряжение

$$\tau_{max} = \frac{T}{W_p}, \quad (3)$$

где $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$ – полярный момент сопротивления.

По моменту T в конце прямолинейного участка (точка A) определяется предел пропорциональности при кручении:

$$\tau_{мп} = \frac{T_{мп}}{W_p}.$$

При дальнейшем нагружении пропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией нарушается, появляются пластические деформации, угол закручивания начинает заметно возрастать. Площадки текучести не наблюдается. В связи с этим по существующим нормам определяется условный предел текучести $\tau_{0,3}$, равный напряжению, при котором остаточный угол сдвига $\gamma_{ост} = 3$ мрад (0,3 %).

Он может быть определен, если по $\gamma_{0,3}$ вычислить соответствующий ему угол закручивания. Остаточный угол закручивания $\varphi_{\text{ост}} = (2l/d)\gamma_{0,3}$ (для нормального образца $\varphi_{\text{ост}} = 20\gamma_{0,3} = 60$ мрад). Исходя из $\varphi'_{\text{ост}}$ по диаграмме кручения находится $T_{0,3}$, а по нему искомый условный предел текучести $\tau_{0,3} = T_{0,3} / W_p$.

Величина предела прочности при кручении $\tau_{\text{пч}}$ точно не может быть определена. Обычно пользуются приближенной формулой, полученной в теории пластичности и хорошо согласующейся с опытами:

$$\tau_{\text{пч}} = \frac{3}{4} \frac{T_{\text{max}}}{W_p}.$$

Диаграмма кручения хрупкого материала на примере чугуна показана на рис. 3. Она имеет вид слегка выпуклой вверх кривой. Больших остаточных деформаций не наблюдается. Поскольку линия диаграммы мало уклоняется от прямой, предел прочности приблизительно определяется по формуле $\tau_{\text{пч}} = T_{\text{max}}/W_p$.

Материальное обеспечение эксперимента. Образцы. Согласно ГОСТ 3665-80 для испытания металлов на кручение применяют нормальные образцы кругового поперечного сечения диаметром в рабочей части $d_0 = 10$ мм и расчетной длиной $l_0 = 100$ мм (рис. 6).

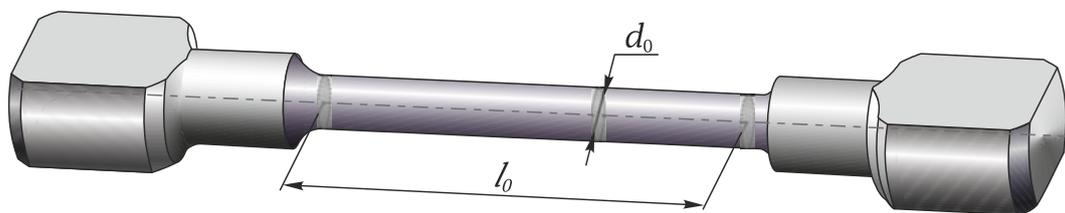


Рис. 6. Форма образца для испытаний на кручение

Измерительный прибор. Для измерений используется штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм (подробнее см. приложение). **Испытательная машина.** Скручивание образцов производится на специальной машине КМ-50.

Порядок проведения эксперимента. Перед испытанием ознакомиться с устройством машины КМ-50 (см. ч. II, п. 2.3) и в отчете записать тип машины, предельную нагрузку и цену деления силоизмерительного устройства.

Измерить диаметр d_0 с точностью до 0,1 мм и расчетную длину l_0 с точностью до 1 мм. Отмаркировать на образце образующую

для удобства визуального контроля деформации кручения образца во время испытаний. Рекомендуется на светлых материалах наносить темную линию (например, черным перманентным маркером), а на темных материалах – светлую линию (белым красочным маркером или штрих-корректором текста и т. п.).

Все последующие действия, связанные с работой на испытательной машине, выполняются лаборантом.

Закрепить образец в захватах машины. Включить электродвигатель испытательной машины и наблюдать за процессом кручения образца. По шкале силоизмерительного устройства зафиксировать наибольшую нагрузку T_{\max} в момент разрушения образца.

После разрушения образца выключить электродвигатель, вынуть из захватов машины обе части образца и зарисовать вид испытанного образца.

На рис. 7–8 показаны образцы из дюралюминия и чугуна до и после испытаний.

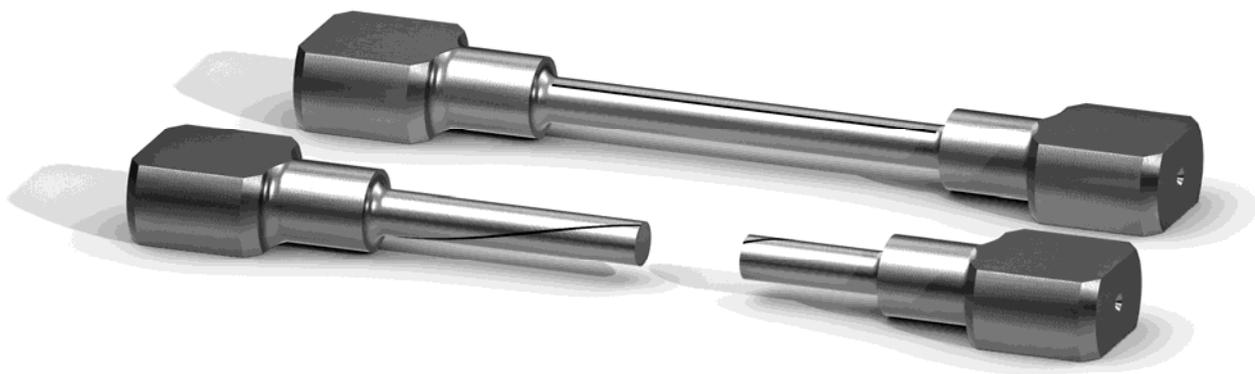


Рис. 7. Образцы из дюралюминия до и после испытания

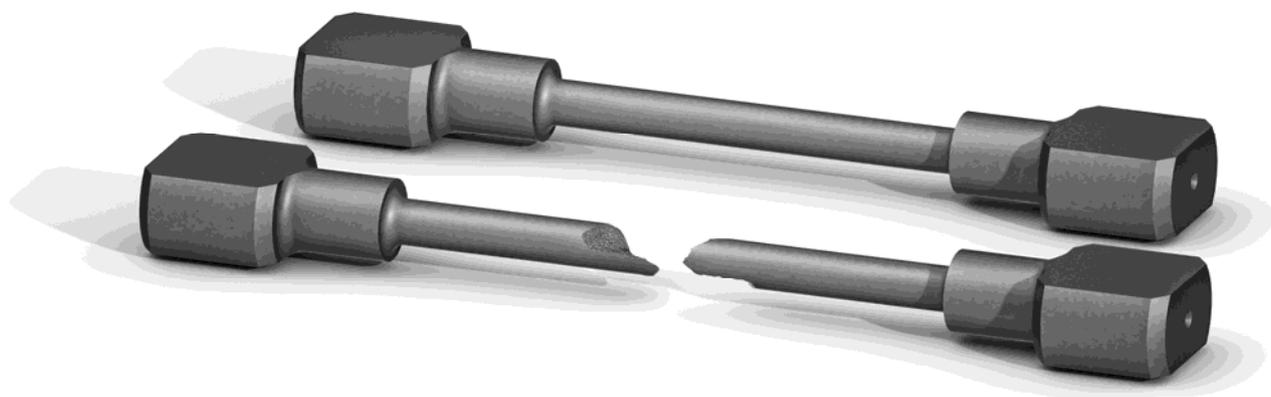


Рис. 8. Образцы из чугуна до и после испытания

Обработка результатов эксперимента. В журнале испытаний зарисовать эскизы образцов после деформации, записать значения разрушающей нагрузки T_{\max} для них и вычислить для испытанных материалов значения предела прочности при кручении по формуле:

– для дюралюминия $\tau_{\text{ПЧ}} = 0,75 \frac{T_{\max}}{W_p}$;

– для чугуна $\tau_{\text{ПЧ}} = \frac{T_{\max}}{W_p}$.

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит эскизы образцов до испытания и после разрушения, вычисление пределов прочности и текучести материалов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие образцы применяют для испытаний на кручение?
2. Какое напряженное состояние имеет место при кручении?
3. Какие напряжения возникают в точках образца при кручении: в плоскостях, перпендикулярных к оси, а также в плоскостях, расположенных под углом 45° к оси стержня?
4. Каков вид разрушенного образца: из дюралюминия, чугуна, дерева? Объясните разный характер их разрушения.
5. Почему разрушение чугунного образца происходит по площадкам, наклоненным под углом 45° к оси стержня?
6. Как по характеру разрушения образца определить, какой вид напряжения наиболее опасен для данного материала?
7. Что можно сказать о свойствах материала, если разрушение образца произошло по плоскости, расположенной под углом 45° к его оси?
8. При испытании было установлено, что один образец разрушился при угле закручивания 1 рад, а другой – при угле 9 рад. К какой категории относятся испытанные материалы?
9. Какие характеристики материала можно получить при испытании на кручение пластичных и хрупких материалов?
10. Чем отличаются формулы для подсчета условного предела прочности при кручении для образцов из пластичных и хрупких материалов?

РАБОТА № 6

Испытание материалов на кручение

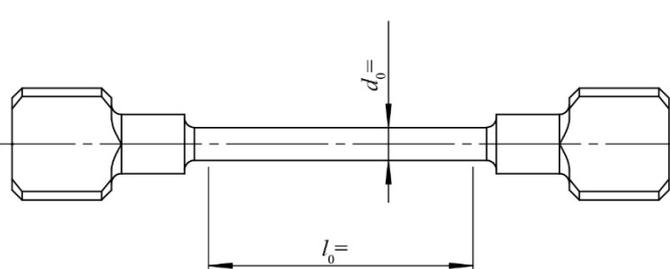
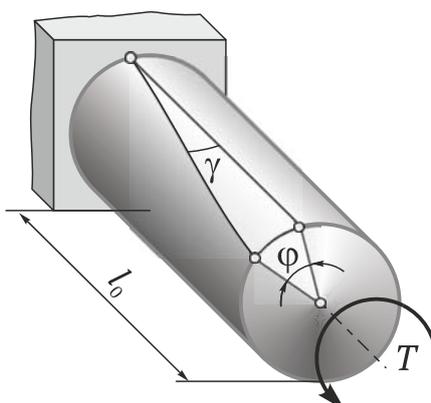
Цель работы. Изучить характер разрушения пластичных и хрупких материалов при кручении и определить механические характеристики материалов при кручении.

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина: тип _____, предельное усилие _____ Нм, цена деления силоизмерительного устройства _____ Нм.

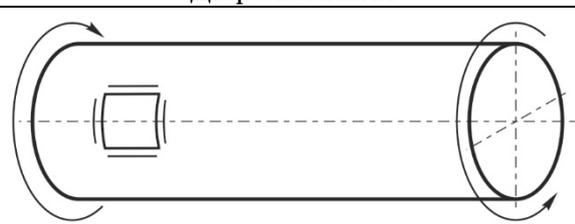
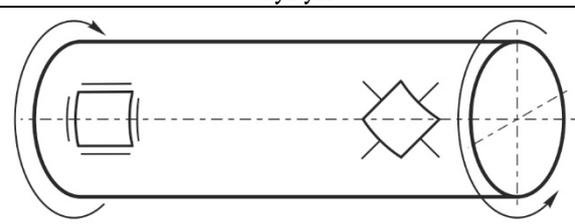
1.2. Измерительный прибор – штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

1.3. Испытуемые образцы

Эскиз				Схема испытания	
					
Дюралюминий	d_0 , мм		W_p , мм ³		
Чугун	мм		мм ³		

2. Результаты опыта

2.1. Эскизы образцов после испытания

Дюралюминий	Чугун
	

2.2. Журнал испытаний

Материал	Дюралюминий	Чугун
Максимальный момент M_{max} , Нм		
Предел прочности $\tau_{пч}$, МПа		

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

2. ПРОВЕРКА ВЫВОДОВ И ФОРМУЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

РАБОТА № 7

Определение модуля упругости при сдвиге

Цель работы. Экспериментальная проверка закона Гука при чистом сдвиге и кручении и определение модуля упругости при сдвиге в соответствии с ГОСТ 3565-80.

Краткие теоретические сведения. В основе работы материала при кручении лежит деформация сдвига. Например, при кручении участка стержня круглого поперечного сечения (рис. 1) продольные слои материала получают деформацию сдвига γ , а поперечные сечения поворачиваются на угол закручивания $d\varphi$.

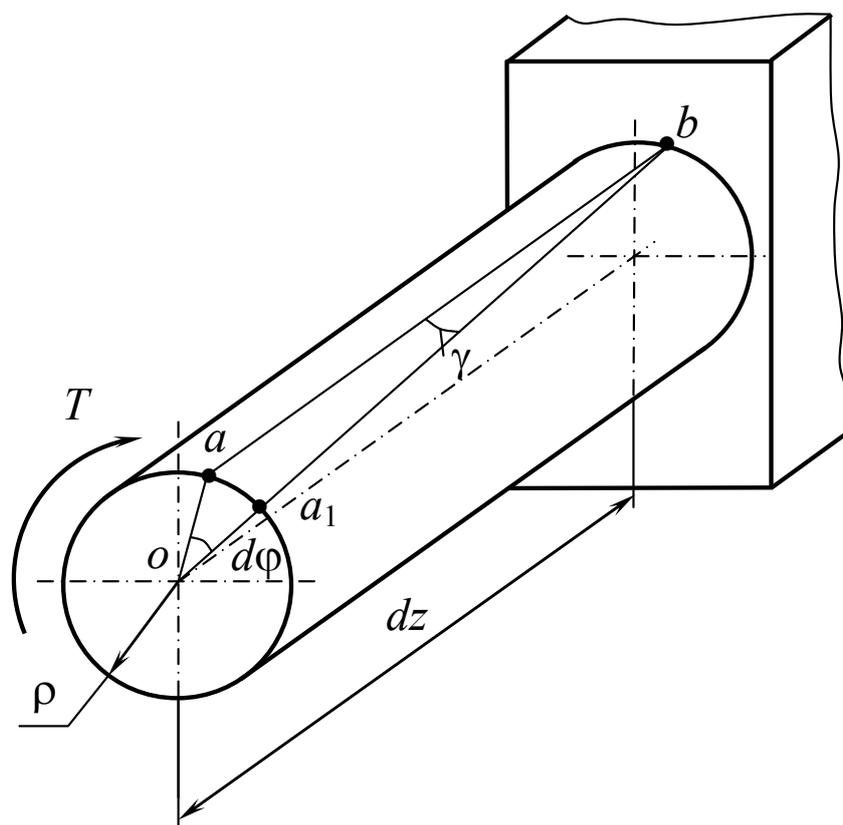


Рис. 1. Деформации стержня круглого сечения при кручении

Дуга aa_1 может быть определена с одной стороны через угол aoa_1 , а с другой стороны через угол сдвига γ :

$$\rho d\varphi = dz\gamma = \widehat{aa_1}. \quad (1)$$

Известно, что касательные напряжения в пределах упругости пропорциональны деформации сдвига

$$\tau = G\gamma, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига.

Также известно, что касательные напряжения при кручении:

$$\tau = \frac{T}{I_p} \rho. \quad (3)$$

Подставив в (2) значение τ из (3), получим

$$\frac{T}{I_p} \rho = G\gamma \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{T\rho}{I_p G},$$

полученное значение γ подставим в (1), получим

$$d\varphi = \frac{T}{GI_p} dz.$$

Для стержня длиной l полный угол закручивания равен

$$\varphi = \frac{Tl}{GI_p},$$

откуда определяем модуль сдвига

$$G = \frac{Tl}{\varphi I_p} \quad (4)$$

где T – крутящий момент, Н·мм; l – длина стержня, в пределах которой измеряют угол закручивания, мм; φ – угол закручивания на длине l , рад; I_p – полярный момент инерции круглого сечения, мм⁴.

Кроме того, величину модуля сдвига можно определить и по результатам опытов на растяжение. Для этого нужно определить модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (5)$$

Материальное обеспечение эксперимента. Экспериментальное определение модуля упругости при сдвиге G реализуется в опыте на кручение. Согласно зависимости (4) для определения модуля упругости необходимо измерить величину крутящего момента T и соответствующую величину угла закручивания. Другие величины, входящие в формулу (4), вычисляются до начала опыта. Величины крутящего момента и угла закручивания измеряют на установке, конструктивная схема которой (см. ч. II, п. 3.2) показана на рис. 2, а.

Правый конец образца 1 круглого поперечного сечения диаметром d жестко зашцеилен в опоре 3 , а левый свободно вращается в шарико-подшипнике, установленном в опоре 4 . На свободном конце образца закреплен круговой вектор 5 , радиус которого R_1 . К сектору с помощью тросика подвешивают грузы весом F . Таким образом, образец нагружают крутящим моментом, равным $T = FR_1$. Для измерения угла закручивания непосредственно на образце закрепляется угломерное приспособление, состоящее из рычага 6 , в котором на расстоянии R_2 установлен индикатор часового типа 7 .

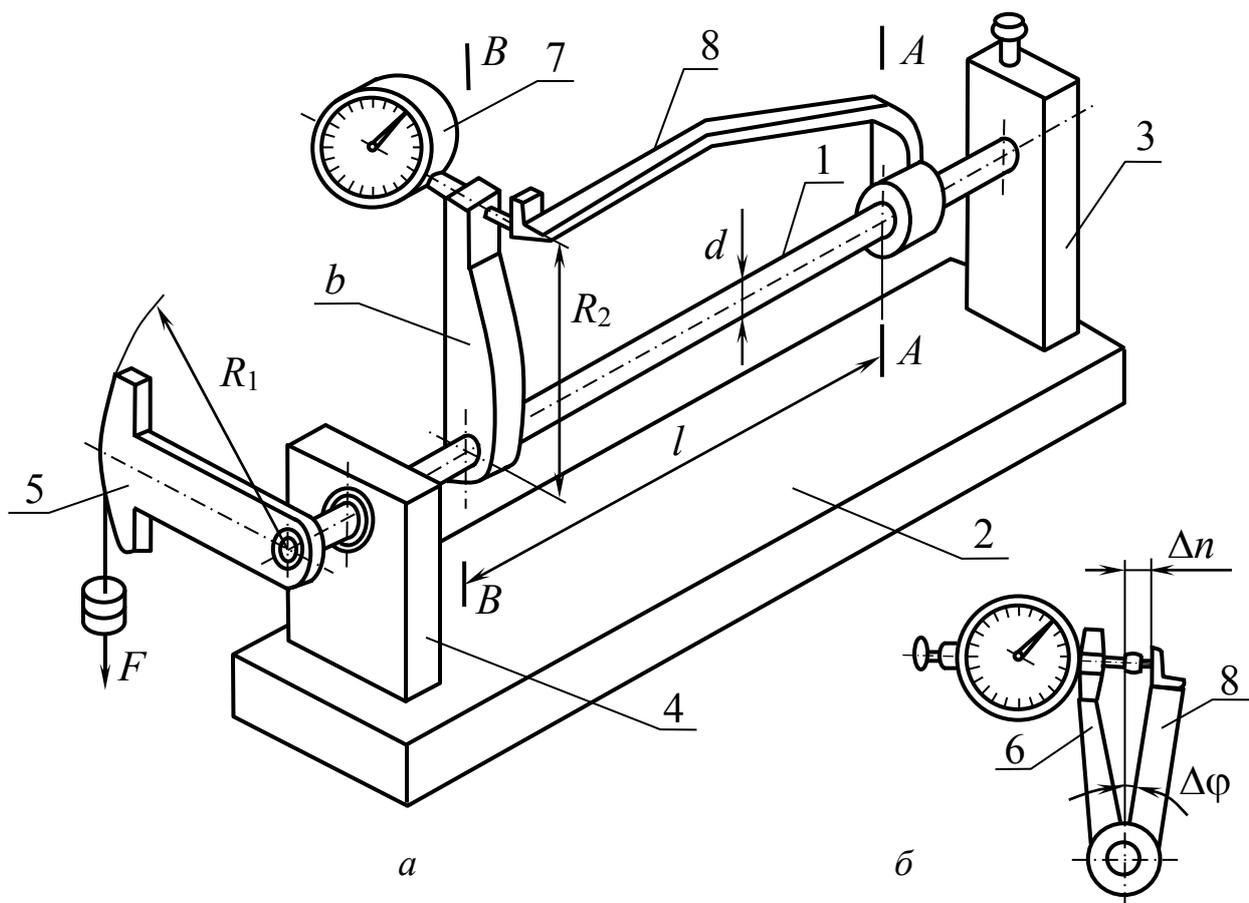


Рис. 2. Установка для определения модуля упругости при сдвиге:
 а – схема установки с образцом; б – измерение перемещения

Рычаги 6 и 8 закреплены в сечениях $A-A$ и $B-B$, расстояние между ними l . Установка смонтирована на станине 2 . Измерение угла закручивания очевидно из рис. 2, б. При действии крутящего момента происходит взаимный поворот сечений $B-B$ и $A-A$, при этом рычаг 6 с индикатором также поворачивается относительно рычага 8 на угол $\Delta\varphi$, а ножка индикатора перемещается на величину Δn ,

достаточно близкую к величине дуги, стягивающей угол $\Delta\varphi$, следовательно, угол закручивания будет

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta n}{R_2},$$

где Δn – показания индикатора, мм (цена деления индикатора 0,01 мм); R_2 – радиус, мм.

Величины l , d , R_1 и R_2 берут в соответствии с паспортными данными установки.

Порядок проведения эксперимента.

1. Записать паспортные данные установки (l , d , R_1 и R_2).
2. Нагрузить образец крутящим моментом равными ступенями, навешивая грузы $F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_i$ на сектор 5 приспособления.
3. Записать после каждой ступени нагружения показания индикатора Δn . Отчет вести от нулевого положения стрелки.
4. Занести результаты экспериментов в таблицу наблюдений (см. форму отчета).
5. Повторить эксперимент три раза с целью исключения случайных ошибок.

Обработка результатов эксперимента.

1. Построить по результатам эксперимента (таблицы наблюдений) график зависимости T_i и φ_i (рис. 3). Если экспериментальные точки окажутся на линии, близкой к прямой, то проводят эту прямую так, чтобы точки равномерно располагались по обе стороны от этой линии.

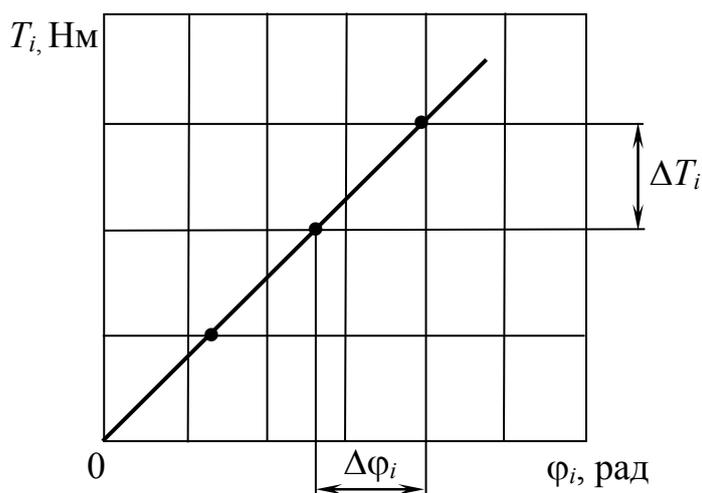


Рис. 3. Зависимость крутящего момента от угла закручивания

2. Выбрать по графику интервал крутящего момента между любыми точками прямой ΔT_i и соответствующий угол закручивания $\Delta\varphi_i$.

3. Вычислить в соответствии с зависимостью (4) модуль сдвига

$$G = \frac{\Delta T_i l}{\Delta \varphi_i I_p}.$$

4. Сопоставить полученный результат с известными величинами G из справочников или учебников по сопротивлению материалов и определить тип материала.

5. Сопоставить экспериментальную величину G с известной из справочников и сделать заключение о достоверности результатов.

Контрольные вопросы

1. Какой механической характеристикой материала ограничивается модуль упругости?

2. Какому геометрическому параметру диаграммы кручения соответствует модуль упругости?

3. Покажите, как влияет модуль упругости материала на величину деформации.

4. Сформулируйте варианты закона Гука при сдвиге.

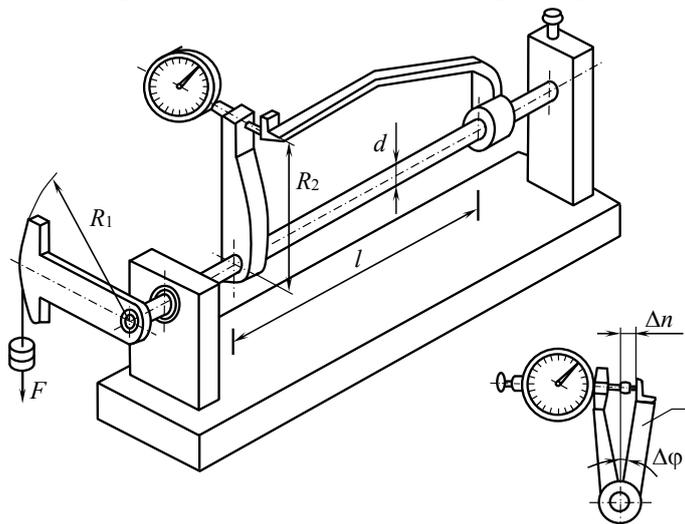
РАБОТА № 7

Определение модуля упругости при сдвиге

Цель работы. Экспериментальная проверка закона Гука при чистом сдвиге и кручении и определение модуля упругости при сдвиге в соответствии с ГОСТ 3565-80.

1. Организация опыта

Схема экспериментальной установки и размеры образца

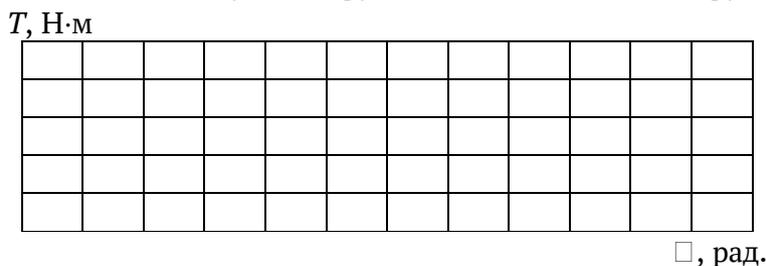


$d = \text{___ мм}, l = \text{___ мм}, I_p = \text{___ мм}^4.$

2. Результаты измерений

$F_i, \text{ Н}$							
$\Delta n, \text{ мм}$							
$\Delta \varphi, \text{ рад}$							

3. Диаграмма зависимости угла закручивания от величины крутящего момента



4. Вычисление модуля упругости

$G = \frac{Tl}{\phi I_p} = \text{_____}, \text{ ГПа.}$

5. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 8

Исследование напряжений при плоском изгибе

Цель работы. Определить опытным путем нормальные напряжения в различных точках поперечного сечения балки и сравнить их с вычисленными по теоретическим формулам.

Краткие теоретические сведения. Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке рабочих гипотез, положенных в основу выводов расчетных формул технической теории изгиба.

Распределение напряжений в поперечном сечении балки. Теория изгиба балок базируется на следующих основных гипотезах:

- материал балки подчиняется закону Гука, причем коэффициент Пуассона ν одинаков при растяжении и сжатии;
- поперечные сечения при деформации остаются плоскими;
- продольные волокна не давят друг на друга, под действием нормальных напряжений они испытывают только растяжение или сжатие;
- нормальные напряжения изменяются по высоте сечения, оставаясь постоянными по ширине.

Если действующие на балку нагрузки находятся в одной из главных плоскостей, то имеет место прямой изгиб и балка изгибается в плоскости действия нагрузки.

Исходя из приведенных выше гипотез нормальные напряжения в поперечном сечении балки при прямом изгибе определяются по формуле Навье

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y, \quad (1)$$

где M_x – изгибающий момент в данном сечении; I_x – момент инерции сечения балки относительно его нейтральной линии (*совпадающей с главной центральной осью инерции сечения*); y – расстояние от нейтральной линии до точки сечения, в которой определяется напряжение (рис. 1).

В соответствии с соотношением (1) напряжения распределяются по линейному закону по высоте сечения, при изгибе в вертикальной плоскости. Наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения возникают в точках, наиболее удаленных от нейтральной линии (рис. 1):

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = \frac{M_x}{I_x} y_P = \frac{M_x}{W_P}; \\ \sigma_{\min} = \frac{M_x}{I_x} y_C = \frac{M_x}{W_C}; \end{cases} \quad (2)$$

где $W_P = \frac{I_x}{y_P}$ и $W_C = \frac{I_x}{y_C}$ – моменты сопротивления поперечного сечения для растянутых и сжатых волокон.

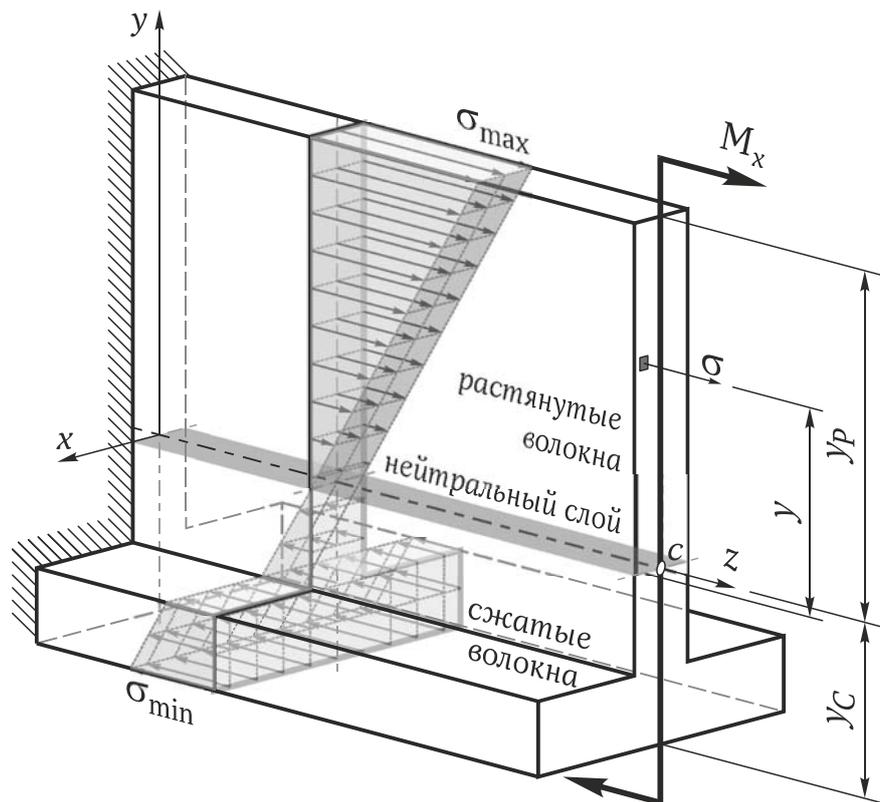


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений в балке при плоском изгибе

Для материалов, одинаково работающих на растяжение и сжатие (пластичные материалы), опасной является наиболее удаленная от нейтральной оси точка, где возникает наибольшее по абсолютной величине напряжение

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{I_x} y_{\text{наиб}} = \frac{M_x}{W_x},$$

где $W_x = \frac{I_x}{y_{\text{наиб}}}$ – осевой момент сопротивления.

Экспериментальное определение напряжений. Следует сразу подчеркнуть, что непосредственному измерению в процессе экспери-

мента подлежат не напряжения, а деформации, исходя из которых, используя физические зависимости (закон Гука), вычисляют величины напряжений в соответствующих точках.

Широкое распространение в современной технике получили электрические тензометры, в которых используются зависимости между деформацией и какой-либо величиной, измеряемой электрическими приборами: омическим сопротивлением, силой тока, емкостью и т. п.

Для измерения величины деформации к испытываемому образцу прикрепляют элемент, воспринимающий деформацию и преобразующий ее в электрическую величину. Он называется датчиком.

Изменение электрического параметра датчика передается на регистрирующий прибор. Таким образом, электрический тензометр состоит из двух основных частей: *датчика и регистрирующего устройства*.

В зависимости от того, какой электрический параметр датчика изменяется при деформации тела, различают *датчики сопротивления, индукционные и емкостные*. Наибольшее распространение получили фольговые датчики омического сопротивления.

Принцип работы датчика проиллюстрируем на примере проволочного датчика, аналогичного фольговому. Проволочный датчик сопротивления представляет собой несколько плоских петель тонкой проволоки (диаметром от 10 до 30 мкм), наклеенных на полоску бумаги. Датчик специальным клеем наклеивается на поверхность исследуемого объекта и при испытании деформируется вместе с ним.

Пропорционально деформации проволоки изменяется ее омическое сопротивление, что дает возможность определять деформацию по изменению сопротивления проволоки.

Измерительная аппаратура должна регистрировать небольшие изменения сопротивления, поэтому для такого рода измерений применяются мостовые схемы, позволяющие определять либо непосредственно изменение сопротивления датчика ΔR (*нулевой метод*), либо ток дисбаланса i_{Γ} , протекающий по диагонали моста и связанный линейной зависимостью с величиной ΔR (*с отсчетом показаний по гальванометру*). Последний метод используется в данной работе.

Поскольку электрический сигнал (*ток i_{Γ} в измерительной диагонали*) получается небольшим, его предварительно усиливают (*с помощью специального тензометрического усилителя*) и затем

подают на регистрирующий прибор (*гальванометр*). Блок-схема измерительной системы представлена на рис. 2.

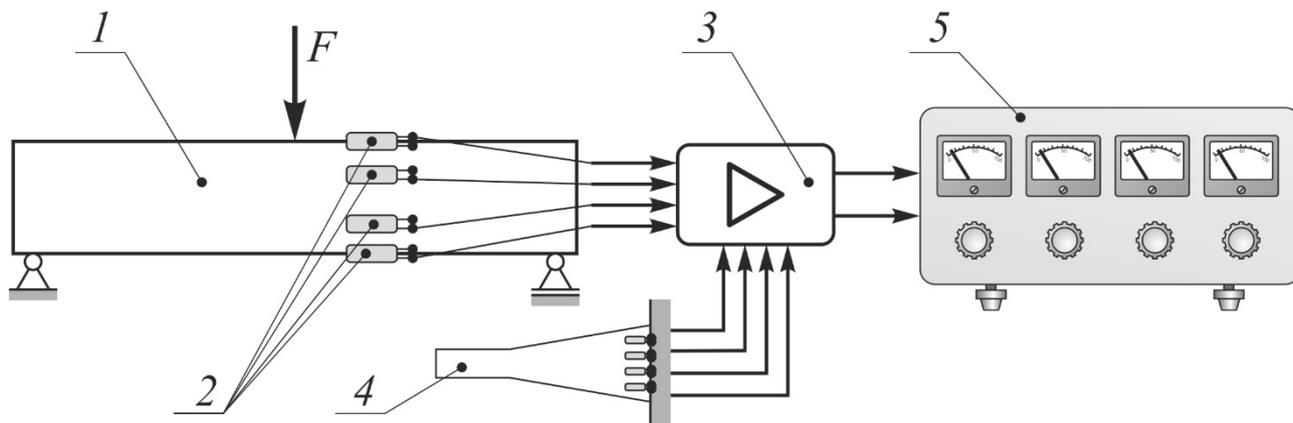


Рис. 2. Блок-схема измерений:

1 – испытываемая балка; 2 – тензодатчики; 3 – усилитель;
4 – тарировочная балка; 5 – регистрирующие приборы

Для определения деформации ε необходимо знать цену деления шкалы гальванометра k_ε , т. е. какой величине деформации соответствует отклонение стрелки на одно деление.

При деформации стрелка прибора отклонилась на n делений, тогда:

$$\varepsilon = k_\varepsilon n. \quad (3)$$

Пользуясь законом Гука, можно перейти непосредственно к напряжениям

$$\sigma = E\varepsilon = Ek_\varepsilon n. \quad (4)$$

Коэффициент k_ε – постоянная величина, зависящая только от геометрических и физических параметров датчика. Он определяется с помощью тарировочного устройства, роль которого играет специальный образец с наклеенным на его поверхности датчиком. В качестве образца берется либо растягиваемый стержень, либо балка равного сопротивления. В обоих случаях в зоне наклейки датчика реализуется однородное напряженное состояние.

Если при нагружении тарировочного устройства (*в нашем случае тарировочной балки*) в точке наклейки датчика возникает напряжение σ_T , а стрелка гальванометра отклоняется на n_T , то согласно (4):

$$k_{\varepsilon} = \frac{\sigma_T}{E_T n_T}.$$

Напряжения в испытываемой балке согласно (4)

$$\sigma_B = k_{\varepsilon} E_B n_B.$$

В итоге после подстановки k_{ε} получим:

$$\sigma_B = \sigma_T \frac{E_B n_B}{E_T n_T} = k_{\sigma} \frac{n_B}{n_T}, \quad (5)$$

где k_{σ} – тарировочный коэффициент.

Материальное обеспечение эксперимента. *Испытуемая балка.* Балка прямоугольного поперечного сечения высотой $h = 100$ мм и шириной $b = 60$ мм, изготовленная из дюралюминия ($E_B = 70$ ГПа), опирается по концам на две шарнирные опоры.

Измерительная система. Она включает в себя: тензодатчики омического сопротивления базой 20 мм и номинальным сопротивлением 200 Ом (см. ч. II, п. 1.5); блок питания; четырехканальный тензоусилитель типа ТА5; регистрирующие приборы (*гальванометры с ценой деления 1 мА*); стальную тарировочную балку равного сопротивления ($E_T = 200$ ГПа, $b_T = 60$ мм, $h_T = 6$ мм, $l_T = 305$ мм, $F_T = 30$ Н) с наклеенными на ней датчиками.

Испытательная машина. В качестве нагружающего устройства используется универсальная машина типа Р-5 (см. ч. II, п. 2.1).

Порядок проведения эксперимента.

Перед испытанием ознакомиться с устройством измерительной системы.

Записать в отчете тип испытательной машины, предельную нагрузку и цену деления силоизмерительного устройства.

Вычертить эскиз испытываемой балки с указанием мест наклейки пронумерованных датчиков.

Измерить характерные размеры для испытываемой балки (b , h , l) и тарировочной балки (b_T , h_T , l_T) с точностью до 1 мм. Записать их в отчете.

Определить величину максимальной нагрузки F_{\max} при испытании и принять значение начальной нагрузки F_0 с целью устранения зазоров в нагружающей системе (*обычно $F_0 = 0,1F_{\max}$*).

Все последующие действия, связанные с использованием измерительной системы и работой на испытательной машине, выполняются лаборантом.

Включить усилитель и прогреть его в течение 30 мин.

Выполнить тарировку тензодатчиков с помощью тарировочной балки, придерживаясь такой последовательности: для ненагруженной балки отбалансировать все тензометрические мосты (*каждый датчик поочередно подключить к регистрирующему устройству и регулировкой величины переменного сопротивления установить стрелку гальванометра на нуль*), затем нагрузить балку заданной силой F_T (обычно используется груз массой, равной 3 кг) и по гальванометру снять показания n_{Ti} для каждого датчика.

Включить электродвигатель испытательной машины и произвести предварительное нагружение образца до величины F_0 .

Отбалансировать все тензометрические мосты для испытываемой балки.

Произвести нагружение балки на величину $\Delta F = F_{\max} - F_0$.

Каждый датчик поочередно подключить к регистрирующему устройству и произвести отсчеты n_{Bi} .

Определить теоретические (*расчетные*) значения напряжений в заданных точках поперечного сечения балки по формуле (1).

$$\sigma_{\text{теор}i} = \frac{M_x}{I_x} y_i = \frac{1}{2} \frac{\Delta F a}{I_x} y_i.$$

Приступить к обработке результатов испытания.

Обработка результатов эксперимента. Определить тарировочный коэффициент по формуле

$$k_\sigma = \sigma_T \frac{E_B}{E_T},$$

где $\sigma_T = \frac{M_T}{W_T}$ – напряжения в зоне наклейки датчиков на тарировочной

балке от изгибающего момента $M_T = F_T l_T$, F_T – нагрузка, действующая

на балку; $W_T = \frac{b_T h_T^2}{6}$ – момент сопротивления поперечного сече-

ния балки в сечении, расположенном на расстоянии l_T от ее конца.

Пример. При $F_T = 30$ Н; $l_T = 305$ мм; $b_T = 60$ мм; $h_T = 6$ мм; $E_T = 200$ ГПа; $E_B = 70$ ГПа; $n_{Ti} = 100$ мА имеем: $M_T = F_T l_T = 30 \cdot 0,305 = 9,15$ Н·м; $W_T = b_T h_T^2 / 6 = 60 \cdot 6^2 / 6 = 360$ мм³; $\sigma_T = M_T / W_T = 9,15 / (360 \cdot 10^{-9}) = 25,4$ МПа; $\sigma_T = (E_B / E_T) \cdot \sigma_T = (70 / 200) \cdot 25,4 = 8,9$ МПа; $k_\sigma = 8,9 \cdot 70 \cdot 200 = 3,12$ МПа.

Записать найденное значение k_{σ} в таблице журнала испытаний.

Вычислить опытные значения напряжений в заданных точках поперечного сечения балки по формуле

$$\sigma_{опi} = k_{\sigma} n_{Би}/n_{Ti}.$$

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит эскиз испытываемой балки с отметкой мест наклейки датчиков, таблицу записи наблюдений и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие гипотезы лежат в основе теории прямого изгиба?
2. Как распределяются нормальные напряжения по высоте поперечного сечения балки?
3. Какой вид изгиба называется прямым?
4. В каких продольных волокнах возникают наибольшие нормальные напряжения при изгибе?
5. Как распределяются нормальные напряжения по ширине балки?
6. Как определить допускаемую нагрузку для заданной балки?
7. Как проходит нейтральная ось при изгибе балки?
8. Какими приборами измеряют деформацию?
9. От какой геометрической характеристики поперечного сечения зависит прочность балки?
10. На какой зависимости базируется работа электрических тензометров?
11. Для чего в работе используется тарировочная балка?
12. Почему тарировочная балка выполнена в форме балки равного сопротивления?

РАБОТА №8
Исследование напряжений при плоском изгибе

Цель работы. Определить опытным путем нормальные напряжения в различных точках поперечного сечения балки и сравнить их с вычисленными по теоретическим формулам.

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина: тип _____, предельное усилие _____ кН,
цена деления силоизмерительного устройства _____ Н.

1.2. Испытуемая балка

Схема испытания

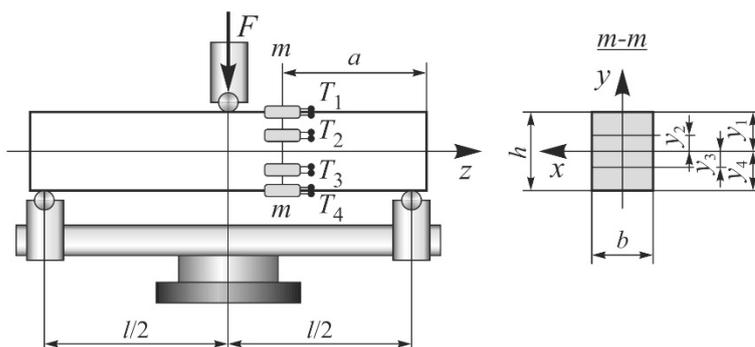
Материал балки – дюралюминий ($E_B = 70$ ГПа)

Геометрические параметры, мм

l	a	b	h

Координаты датчиков, мм

y_1	y_2	y_3	y_4



1.3. Тарировочная

$E_T =$ _____ ГПа; $F_T =$ _____ Н; $l_T =$ _____ мм; $b_T =$ _____ мм; $h_T =$ _____ мм;

балка $W_T = b_T h_T^2 / 6 =$ _____ мм³; $M_T = F_T l_T =$ _____ Нм; $\sigma_T = M_T / W_T =$ _____ МПа

1.4. Тарировочный коэффициент $k_\sigma = (E_B / E_T) \cdot (\sigma_T) =$ _____ МПа.

1.5. Теоретическое определение напряжений $\sigma_{теор i} = (M_x / I_x) y_i = (0,5 \Delta F a / I_x) y_i$

2. Результаты опыта

2.1. Журнал испытаний

Тарировка прибора				Определение напряжений в балке					
F_T , Н	Показания гальванометра, мА				ΔF , кН	Показания гальванометра, мА			
	n_{T1}	n_{T2}	n_{T3}	n_{T4}		n_{B1}	n_{B2}	n_{B3}	n_{B4}
Тарировочный коэффициент k_σ , МПа									
Теоретические напряжения				Опытные напряжения $\sigma_{оп i} = k_{\sigma i} n_{Bi}$, МПа					
$\sigma_{теор1}$	$\sigma_{теор2}$	$\sigma_{теор3}$	$\sigma_{теор4}$	$\sigma_{оп1}$	$\sigma_{оп2}$	$\sigma_{оп3}$	$\sigma_{оп4}$		
$\delta \sigma_i = [(\sigma_{теор i} - \sigma_{оп i}) / \sigma_{теор i}] \cdot 100\%$									

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 9

Проверка теоремы о взаимности работ и перемещений

Цель работы. Освоение методики экспериментальной проверки теоремы о взаимности перемещений, теоремы о взаимности работ.

Краткие теоретические сведения. Для представления возможных перемещений рассмотрим процесс нагружения балки двумя силами F и P , приложенными в различной последовательности (рис. 1).

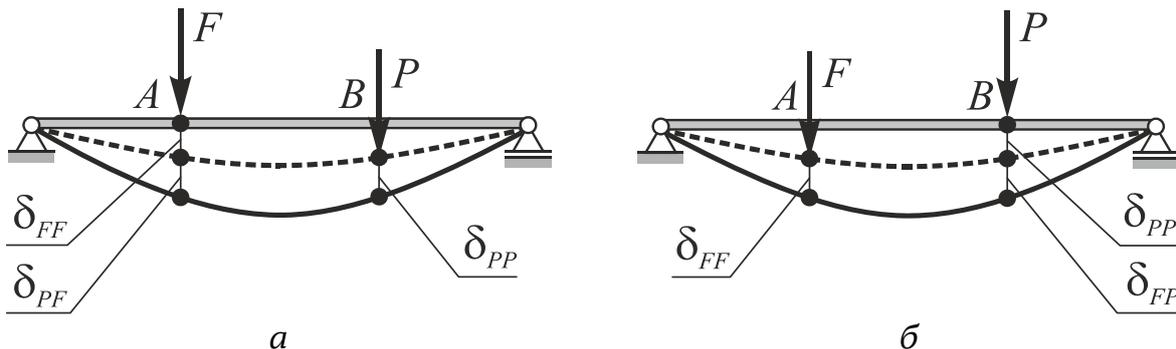


Рис. 1. Последовательность нагружения балки

Пусть на балку в первом случае действует сила F (рис. 1, а), приложенная статически от нуля до конечного значения. При этом вертикальное перемещение точки приложения силы δ_{FF} будет действительным перемещением.

Положим, что после действия силы F на балку в указанном состоянии действует также статически другая сила P , которая вызывает дополнительное перемещение точек оси балки (сплошная линия). При этом точка приложения силы F получит дополнительное возможное перемещение δ_{PF} . Точка приложения силы P получит действительное перемещение δ_{PP} .

Первый индекс в обозначении перемещений δ обозначает силу, вызывающую перемещение, а второй индекс указывает направление перемещения. Например, δ_{FF} или δ_{PP} – перемещение, вызванное силой F или P соответственно в направлении этой силы; δ_{PF} – перемещение, вызванное силой P в направлении силы F .

Рассмотрим теперь понятие о действительной и возможной работе силы. Действительная работа внешней силы F равна половине произведения силы на перемещение точки ее приложения по направ-

лению силы. Эта работа переходит в потенциальную энергию деформации системы

$$U_F = \frac{1}{2} F \delta_{FF}. \quad (1)$$

Возможной работой силы F называется работа этой силы на возможном перемещении, вызванном другой силой, равная произведению этой силы на возможное перемещение:

$$W_F = F \delta_{PF}. \quad (2)$$

Выражение для полной работы при последовательном нагружении балки силой F , а затем силой P (рис. 1, а) будет

$$U_1 = F \frac{\delta_{FF}}{2} + F \delta_{PF} + P \frac{\delta_{PP}}{2}. \quad (3)$$

Если изменить порядок приложения сил, а именно сначала приложить силу P , а затем силу F (рис. 1, б), то получим следующее выражение для полной работы:

$$U_2 = P \frac{\delta_{PP}}{2} + P \delta_{FP} + F \frac{\delta_{FF}}{2}. \quad (4)$$

От порядка приложения сил величина работы не меняется. Приравнявая (3) и (4), получим:

$$F \delta_{PF} = P \delta_{FP}. \quad (5)$$

Данное равенство выражает теорему о взаимности работ внешних сил (теорема Бетти): возможная работа первой силы на возможном перемещении, вызванном второй силой, равна возможной работе второй силы на возможном перемещении, вызванном первой силой.

В случае равенства сил $F = P$ теорема о взаимности возможных работ преобразуется в теорему о взаимности возможных перемещений (теорему Максвелла): перемещение точки приложения первой силы по ее направлению, вызванное действием второй силы, равно перемещению точки приложения второй силы по ее направлению, вызванному действием первой силы. Преобразуя (5) можно записать:

$$\delta_{PF} = \delta_{FP}. \quad (6)$$

Теоремы о взаимности работ и перемещений имеют большое значение в общей теории исследования напряженного и деформированного состояния стержней, пластинок, оболочек и других расчетных объектов. Их применение существенно упрощает решение многих задач механики, а также производство опытов по определению перемещений.

Материальное обеспечение эксперимента. Установка для испытаний на изгиб; измерительные средства; устройства тензометрирования.

Порядок проведения эксперимента. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образца в журнал испытаний. Определить деформации в сечениях, где установлены индикаторы часового типа, рассчитать эти деформации по приведенным теоретическим зависимостям.

На рис. 2 представлена конструктивная схема экспериментальной установки (см. ч. II, п. 3.3). Стальная балка 2 прямоугольного сечения расположена на опорах 3, установленных на станине 1. В точках *A* и *B* балки с помощью подвесок 6, 7 прикладываются силы *F* и *P*. В этих же точках установлены индикаторы часового типа 4, 5 (см. ч. II, п. 1.2). Цена одного деления индикатора 0,01 мм.

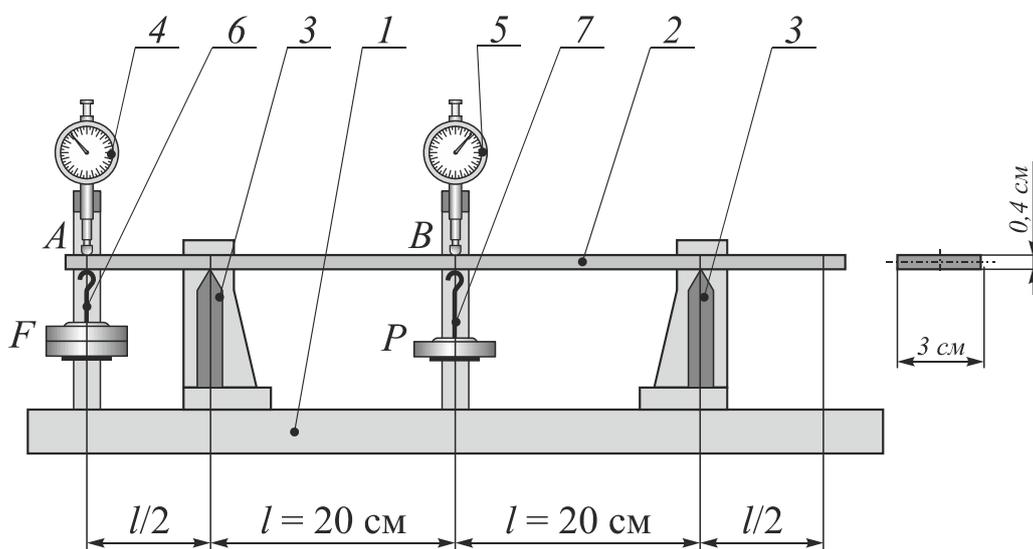


Рис. 2. Схема установки

При деформации балки по шкале индикатора отсчитывается величина перемещения. Эксперимент проводят в два этапа.

Первый этап. Вначале нагружают балку в точке *B* силой *P* и приводят к нулю шкалу индикатора 5. Затем нагружают балку в точке *A* силой *F* и записывают показание индикатора 5, которое соответствует возможному перемещению δ_{FP} . Разгружают балку, сняв силы *P* и *F*.

Второй этап. Нагружают балку в точке *A* силой *F* и приводят к нулю шкалу индикатора 4. Затем нагружают балку в точке *B* силой *P* и записывают показание индикатора 4, которое соответствует возможному перемещению δ_{PF} .

Теоретический расчет перемещений по способу Верещагина. На рис. 3 представлены схемы испытаний балки для двух грузовых состояний.

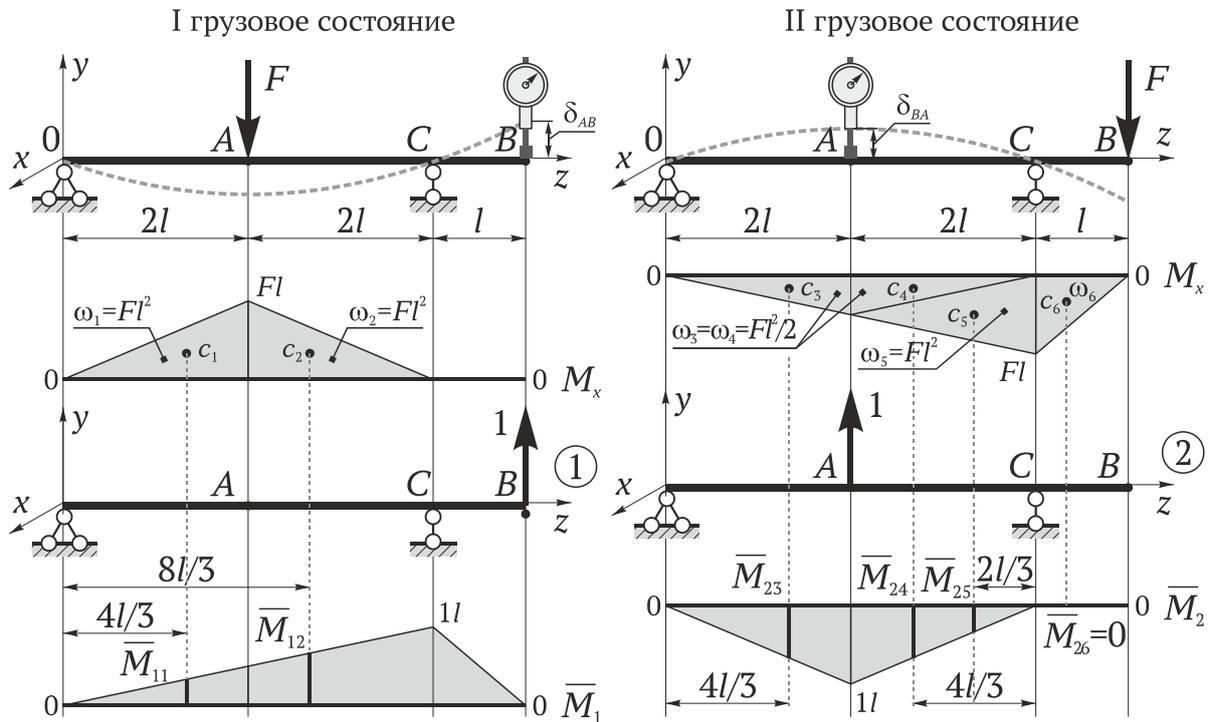


Рис. 3. Схемы испытаний

В соответствии со способом Верещагина в рамках расчетных участков производят разбиение эпюр от заданных нагрузок на элементарные площади, и отмечают на эпюрах, построенных от единичных состояний ординаты, взятые под центрами тяжести элементарных площадей. Тогда прогибы для первого и второго состояний определяются:

$$\delta_{AB} = \frac{M_x \overline{M}_1}{EI_x} = \frac{1}{EI_x} (\omega_1 \overline{M}_{11} + \omega_2 \overline{M}_{12});$$

$$\delta_{BA} = \frac{M_x \overline{M}_2}{EI_x} = \frac{1}{EI_x} (\omega_3 \overline{M}_{23} + \omega_4 \overline{M}_{24} + \omega_5 \overline{M}_{25} + \omega_6 \cdot 0).$$

Обработка результатов эксперимента. Полученные в результате эксперимента величины возможных перемещений подставляют в зависимость (5). Отличие левой и правой частей этого равенства не должно составлять более 5%. В случае равенства сил \$F\$ и \$P\$ величины возможных перемещений не должны отличаться более чем на 5%.

Составление отчета. На титульном листе отчета указывается наименование образовательного учреждения и его структурного подразделения, наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год.

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Приводят вычисления перемещений при различных последовательностях нагружения балки. Заполняют таблицу полученных в ходе эксперимента данных. В заключении анализируют полученные результаты, сопоставляют данные полученные расчетным и экспериментальным путем, дают заключение о погрешности метода, делают выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Справедлива ли теорема о взаимности работ за пределами упругости?
2. Какому закону механики соответствует теорема о взаимности работ?
3. Приведите примеры реальных объектов, иллюстрирующих теорему о взаимности перемещений.

РАБОТА № 9

Проверка теоремы о взаимности работ и перемещений

Цель работы. Освоение методики экспериментальной проверки теоремы о взаимности перемещений, теоремы о взаимности работ.

1. Организация опыта

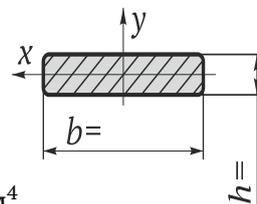
1.1. Образец: балка прямоугольного поперечного сечения

на двух опорах.

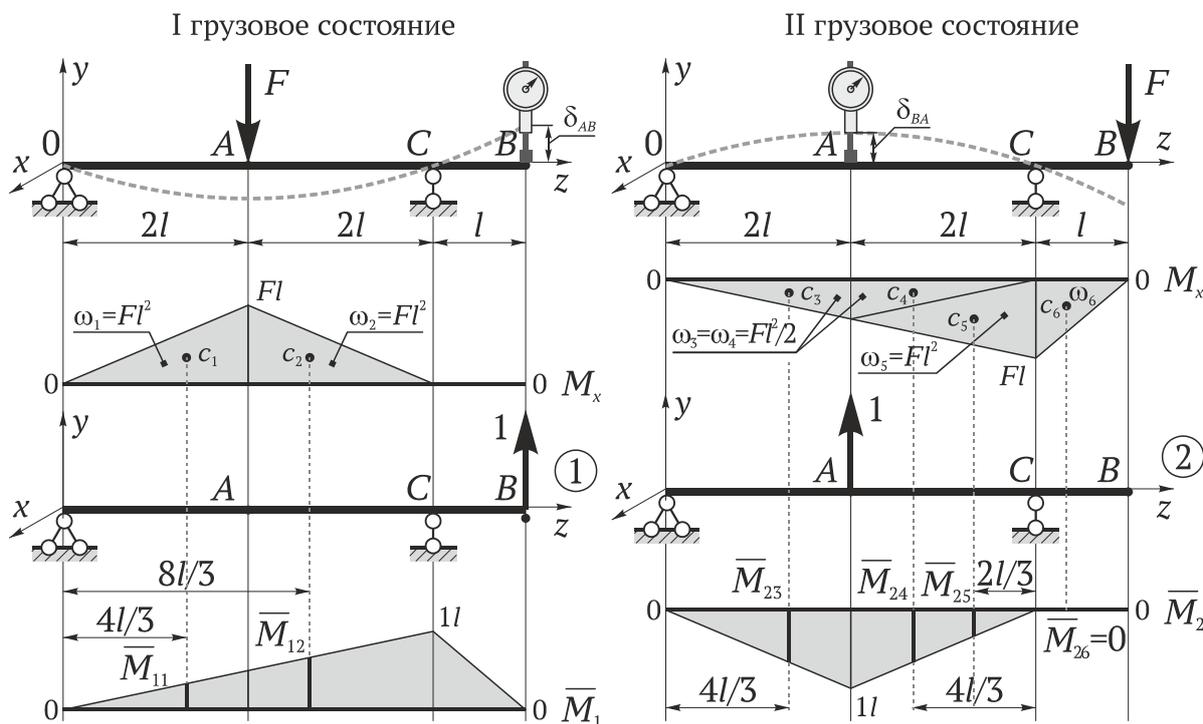
Длина участка l _____, мм. $OA = AC = 2l, CB = l$.

Величина силы $F = mg =$ _____, Н ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$). $E = 200 \text{ ГПа}$. $I_x =$ _____, мм⁴

Перемещения измеряют с помощью индикаторов часового типа с ценой деления _____ мм.



1.2. Схема испытания



$$\delta_{AB} = \frac{1}{EI_x} (\omega_1 \bar{M}_{11} + \omega_2 \bar{M}_{12}); \quad \delta_{BA} = \frac{1}{EI_x} (\omega_3 \bar{M}_{23} + \omega_4 \bar{M}_{24} + \omega_5 \bar{M}_{25}).$$

2. Результаты опыта

Перемещение	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Расхождение, $\Delta\delta = \frac{\delta_{теор} - \delta_{эксп}}{\delta_{теор}} 100\%$
δ_{AB}			
δ_{BA}			

4. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 10

Косой изгиб

Цель работы. Экспериментальная проверка аналитических зависимостей для определения перемещений стержня при косом изгибе.

Краткие теоретические сведения. Разновидность сложного изгиба, при котором плоскость действия нагрузки (силовая плоскость) не совпадает ни с одной из главных плоскостей, называют косым. Примером косого изгиба может быть действие силы, перпендикулярной оси стержня, линия действия которой не совпадает ни с одной из главных осей поперечного сечения (рис. 1).

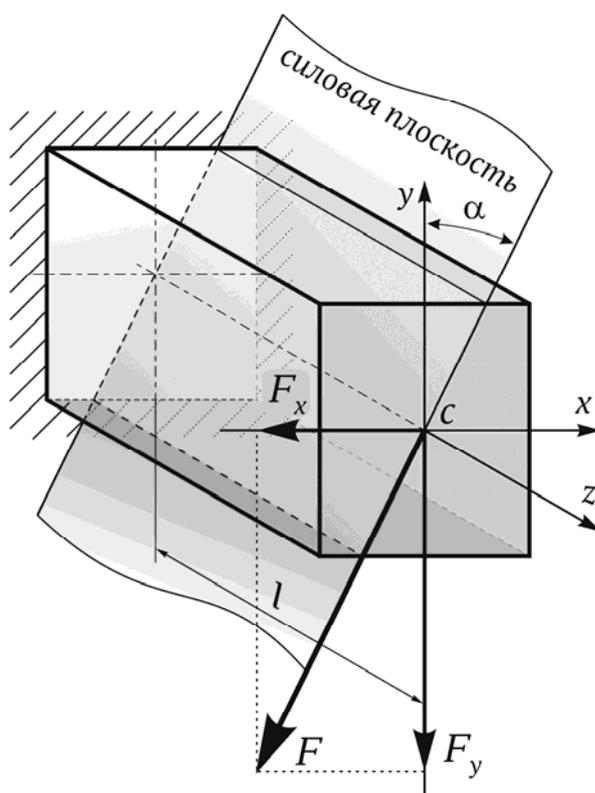


Рис. 1. Косой изгиб

Косой изгиб можно представить в виде двух плоских изгибов, разложив действующие нагрузки на составляющие, которые лежат в главных плоскостях zx и zy . Определим составляющие силы F , действующие вдоль направлений главных осей:

$$F_x = F \sin \alpha; F_y = F \cos \alpha.$$

Рассмотрим внутренние силовые факторы, возникающие в поперечном сечении стержня, от действия силы F (рис. 2). Под действием приложенных сил в поперечном сечении будут возникать изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$M_x = Fy l = Fl \sin \alpha; M_y = Fx l = Fl \cos \alpha.$$

Нормальные напряжения, возникающие в поперечном сечении от действия изгибающих моментов, могут быть определены по формуле Навье:

$$\sigma(M_x) = \frac{M_x}{I_x} y, \quad \sigma(M_y) = \frac{M_y}{I_y} x,$$

где $I_x = \frac{bh^3}{12}$; $I_y = \frac{hb^3}{12}$ - моменты инерции сечения относительно осей x и y соответственно; b, h - ширина и высота сечения; x, y - расстояния от главных осей до точек сечения, в которых определяют напряжения.

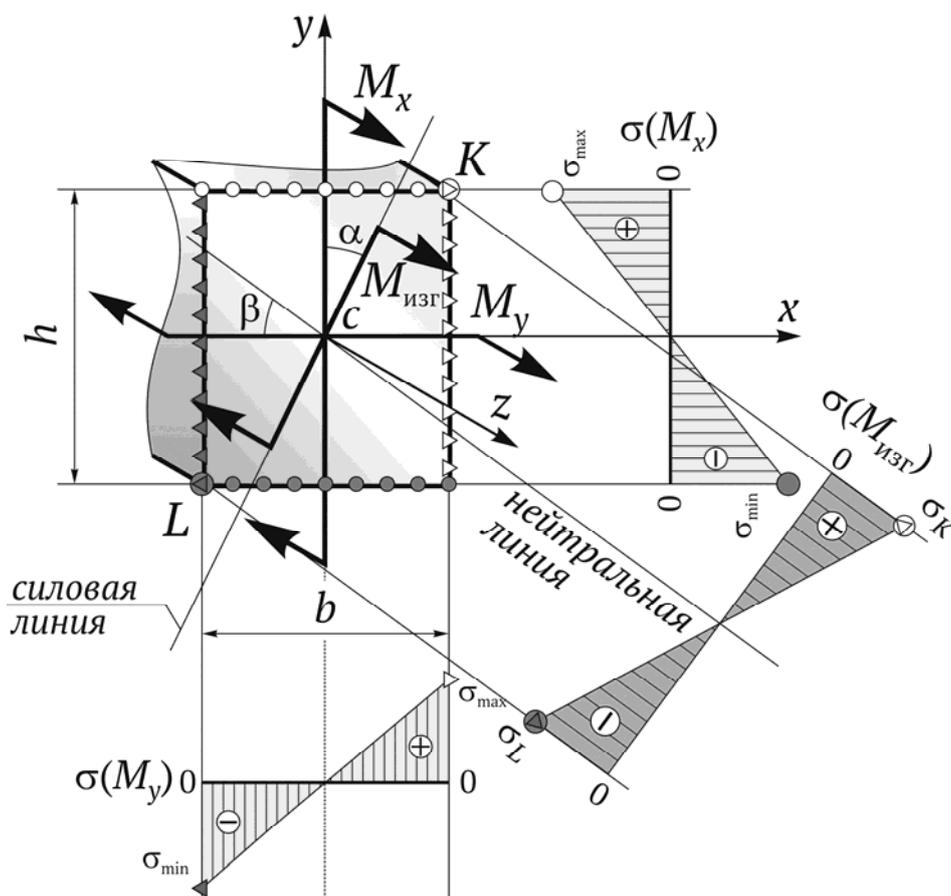


Рис. 2. Поперечное сечение стержня при косом изгибе

Суммарное напряжение от действия двух плоских изгибов в вертикальной и горизонтальной плоскостях определится сложением напряжений в соответствующих точках:

$$\sigma(M_{\text{изг}}) = \sigma(M_x) + \sigma(M_y) = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x.$$

Исходя из уравнения нейтральной линии $\sigma(M_{\text{изг}}) = 0$ определим ее угол наклона к главной оси x :

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{M_y I_x}{M_x I_y} = -\frac{I_x}{I_y} \operatorname{tg} \alpha.$$

Для прямоугольного сечения получим:

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{M_y I_x}{M_x I_y} = -\frac{h^2}{b^2} \operatorname{tg} \alpha.$$

Перемещения при косом изгибе определяются с помощью принципа независимости действия сил в направлениях двух главных осей и будут иметь вид:

$$f_x = \frac{F_x l^3}{3EI_x} = \frac{Fl^3 \sin \alpha}{3EI_x}, f_y = \frac{F_y l^3}{3EI_y} = \frac{Fl^3 \cos \alpha}{3EI_y},$$

где l – длина балки; E – модуль упругости.

Полный прогиб конца балки можно определить геометрическим сложением прогибов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \frac{12Fl^3}{3Eb^3h^3} \sqrt{b^4 \sin^2 \alpha + h^4 \cos^2 \alpha}.$$

Материальное обеспечение эксперимента. Установка для проведения эксперимента. Принципиальная схема установки и процесс нагружения образца прямоугольного поперечного сечения показан на рис. 3.

Порядок проведения эксперимента. Испытуемый образец прямоугольного поперечного сечения консольно закреплен на раме установки (см. ч. II, п. 3.4), имеющей узел поворота образца относительно его продольной оси. Угол поворота образца соответствует углу наклона силовой плоскости, поскольку нагружение производится в вертикальном направлении, под действием силы тяжести на закрепленные на конце образца грузы.

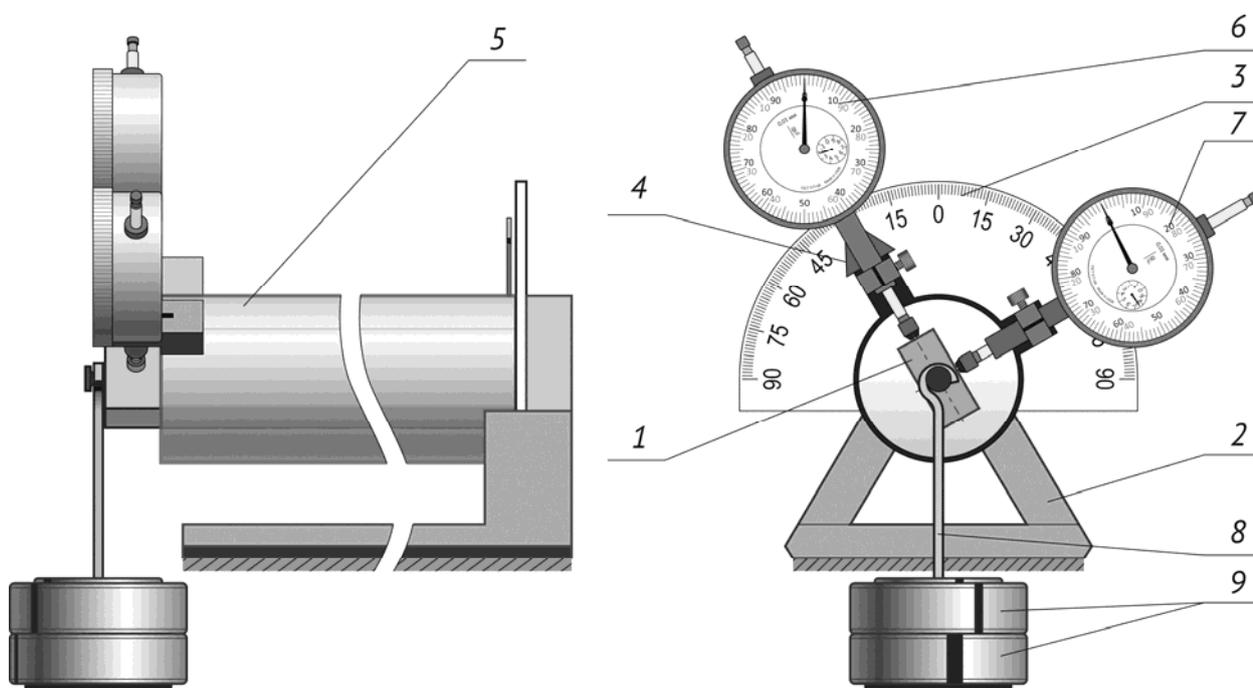


Рис. 3. Принципиальная схема установки: 1 – образец; 2 – рама; 3 – индикатор угла наклона силовой плоскости; 4 – стрелка индикатора угла наклона; 5 – труба-кронштейн для установки средств измерения; 6, 7 – индикаторы для измерения перемещений в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; 8 – узел подвеса груза; 9 – грузы

Поворот образца относительно продольной оси осуществляется путем поворота трубы-кронштейна на заданный угол, который отсчитывается по стрелке индикатора угла наклона силовой плоскости. С помощью индикаторов часового типа, установленных в струбцинах на трубе-кронштейне, производится измерение перемещений образца в направлении главных осей его поперечного сечения. Нагружение образца осуществляется с помощью грузов, устанавливаемых на узле подвеса груза, который шарнирно подвешен на оси образца.

Под действием силы образец получает перемещения в направлениях двух главных осей поперечного сечения. Перемещения в направлении главных осей измеряют с помощью микрометрических индикаторов (см. ч. II, п. 1.2). При этом в направлении главной оси, относительно которой момент инерции имеет максимальное значение, будет возникать большее перемещение, что может привести к ситуации, когда подпружиненная ножка индикатора, измеряющего перемещение вдоль главной оси с наименьшим моментом инерции, может выйти за пределы образца (рис. 4).

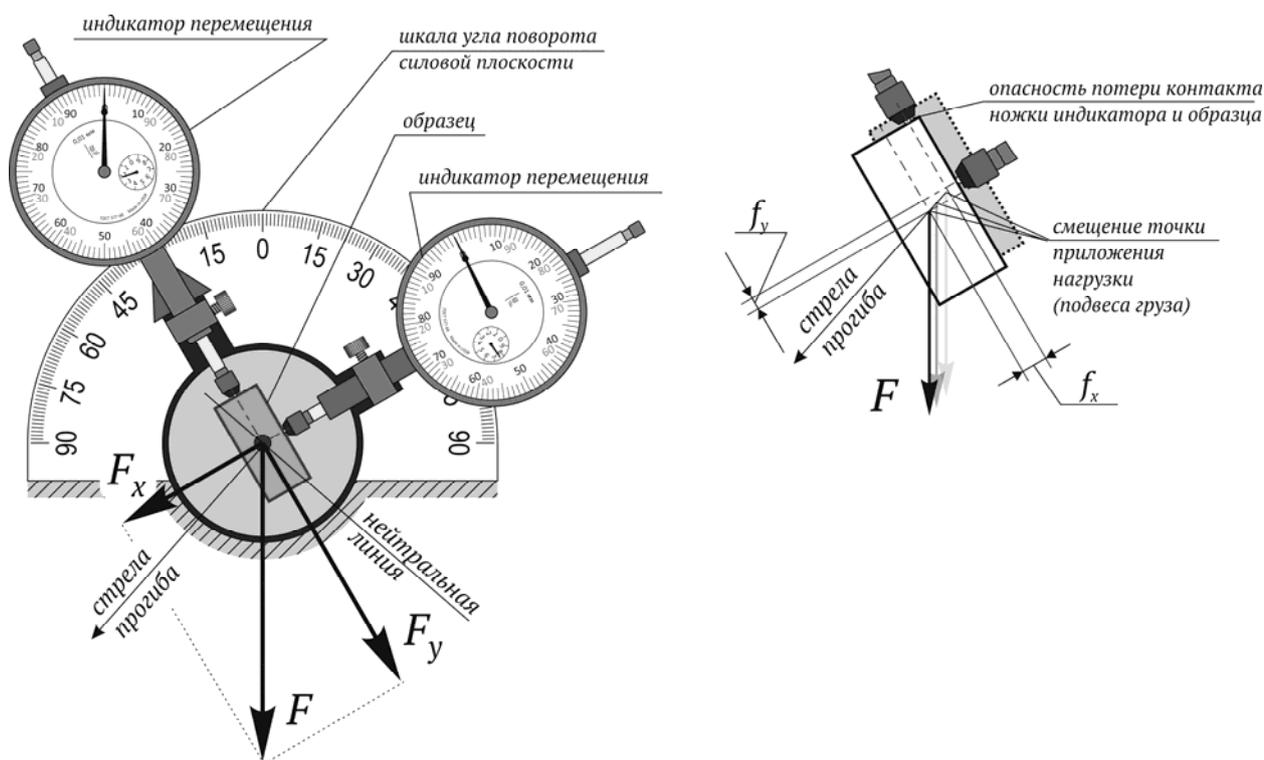


Рис. 4. Схема измерения перемещений во время испытания

Условие возникновения критического перемещения по максимальному прогибу $f_{x\max}$, углу установки силовой плоскости α_{\max} или предельному значению силы нагружения F_{\max} при выбранном угле установки силовой плоскости запишется в виде:

$$f_{x\max} = \frac{F_x l^3}{3EI_Y} = \frac{4F \sin \alpha_{\max} l^3}{Ehb^3} \leq \frac{b}{2};$$

$$\alpha_{\max} \leq \arcsin \frac{Ehb^4}{8Fl^3};$$

$$F_{\max} \leq \frac{Ehb^3 [f]}{4 \sin \alpha l^3} = \frac{Ehb^4}{8 \sin \alpha l^3}.$$

Для стальной балки ($E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $b = 10$ мм, $h = 20$ мм, $l = 610$ мм, масса подвешиваемого груза $m = 3$ кг, $g = 9,807$ м/с²) получим предельный угол установки образца:

$$\alpha_{\max} \leq \arcsin \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 20 \cdot 10^{-3} (10 \cdot 10^{-3})^4}{8(3 \cdot 9,807) 0,61^3} = \arcsin 0,749 = 48^\circ 29'.$$

Для проведения испытания выбирают нагрузку и угол исходя из рекомендаций о предельном допустимом измеряемом угле.

Вычисляют теоретические значения напряжений и прогибов балки под действием заданной нагрузки. Производят нагружение балки. Грузы необходимо подвешивать на узел подвеса груза плавно, избегая динамического приложения силы. Недопустимо, чтобы во время навешивания груза стрелка допускала обратный ход. Чтобы исключить это, необходимо придерживать свободной рукой чашку подвеса груза во время его опускания. На каждом шаге нагружения фиксируют значения приложенной нагрузки и соответствующие ей перемещения. Для более детального анализа получаемых экспериментальных данных фиксируют значения на прямом и обратном ходе нагружения, а также величину «невозврата» в 0 прибора.

Обработка результатов эксперимента. Полученные в результате эксперимента величины перемещений сравнивают с теоретически определенными ранее значениями. Отличие теоретических и экспериментальных данных не должно быть более 5 %.

Составление отчета. В отчете указывается наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год. Эскизируется схема испытаний и параметры испытываемых образцов. Заносят результаты опыта, теоретических расчетов, делают выводы о проведенном эксперименте.

Контрольные вопросы

1. Каковы условия возникновения косоугольного изгиба?
2. Какой принцип вычисления напряжений и перемещений используется при косоугольном изгибе?
3. Назовите случаи, когда при любых углах α прогиб сонаправлен с линией действия силы?
4. Какой из измеряемых прогибов балки имеет наибольшую погрешность и почему?
5. Чем ограничены предельные углы установки образца?
6. Какие конструктивные факторы установки и образца влияют на точность измеряемых величин?

РАБОТА № 10

Косой изгиб

Цель работы. Экспериментальная проверка аналитических зависимостей для определения перемещений стержня при косом изгибе.

1. Организация опыта

1.1. Образец: балка прямоугольного поперечного сечения с консольным закреплением.

Длина балки l _____, мм. Размеры поперечного сечения $b =$ ____, мм, $h =$ ____, мм. $E = 200$ ГПа. Перемещения измеряют с помощью индикаторов часового типа с ценой деления _____ мм.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \text{_____, см}^4. \quad I_y = \frac{hb^3}{12} = \text{_____, см}^4.$$

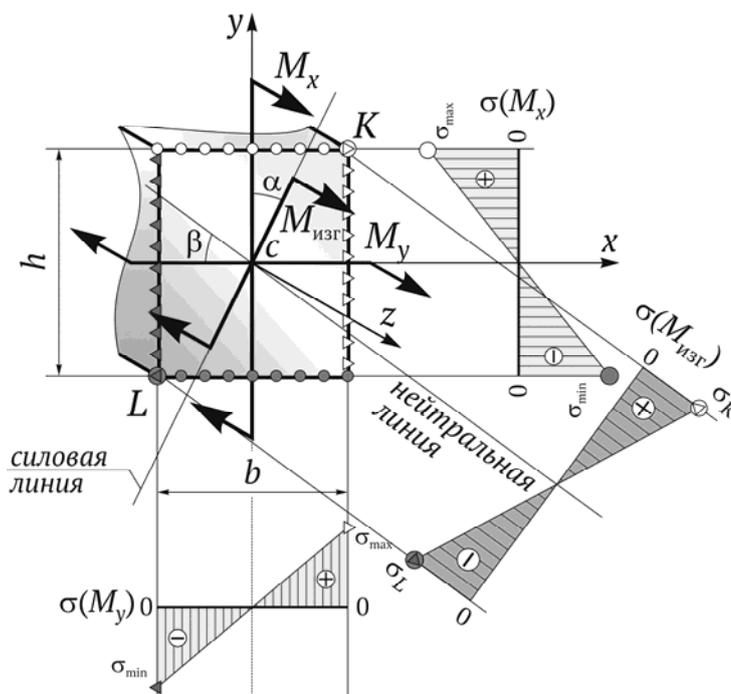
1.2. Схема испытания

1.3. Теоретическое определение перемещений

$$u_T = \frac{Fl^3 \sin \alpha}{3EI_y};$$

$$v_T = \frac{Fl^3 \cos \alpha}{3EI_x};$$

$$f_T = \sqrt{u_T^2 + v_T^2}.$$



2. Результаты опыта

№	F, Н	φ, град	Перемещения, мм						Расхождение, %
			теоретические			экспериментальные			
			u _T	v _T	f _T	u _э	v _э	f _э	
1									
2									
3									

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 11

Внецентренное растяжение

Цель работы. Освоение методики исследования напряженного состояния в поперечном сечении стержня при изгибе с растяжением на примере внецентренного растяжения.

Краткие теоретические сведения. Наиболее просто получить деформацию изгиба с растяжением можно в том случае, когда продольная сила приложена не в центре тяжести поперечного сечения стержня, а с некоторым эксцентриситетом относительно главных осей сечения (рис. 1, а).

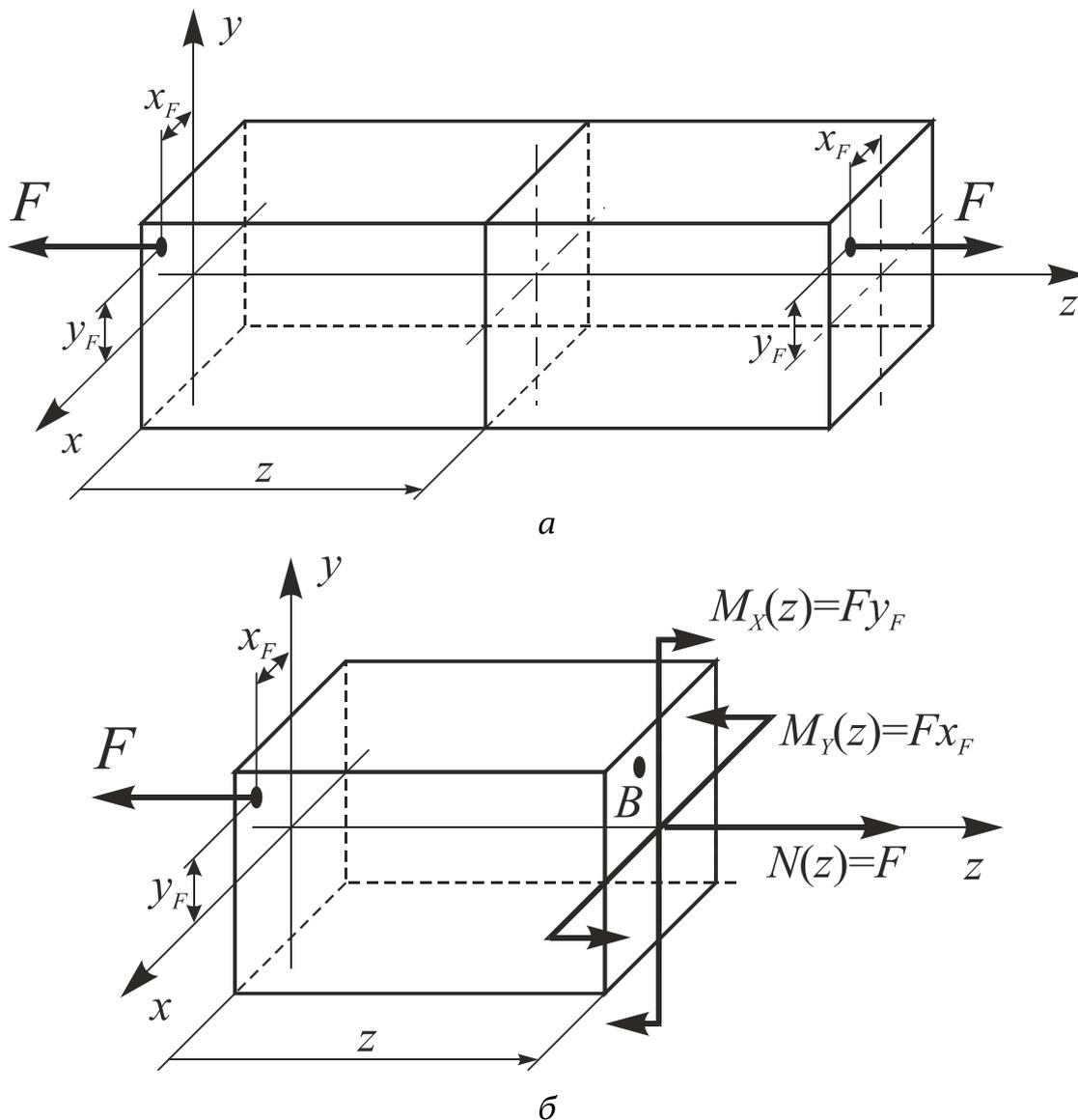


Рис. 1. Внецентренное приложение растягивающей силы:
а – расчетная схема стержня; б – поперечное сечение стержня

Если точка приложения силы имеет координаты x_F и y_F , то относительно главных осей сила F создает моменты $M_X = Fy_F$ и $M_Y = Fx_F$. Таким образом, внецентренное растяжение-сжатие оказывается родственным косому изгибу. В отличие от последнего в поперечном сечении возникают не только изгибающие моменты, но и нормальная сила (рис. 1, б).

В произвольной точке $B(x, y)$ поперечного сечения нормальное напряжение σ вычисляется как алгебраическая сумма нормальных напряжений от каждой компоненты внутренних силовых факторов и определяется:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_X y}{I_X} + \frac{M_Y x}{I_Y} = \frac{F}{A} + \frac{Fy_F y}{I_X} + \frac{Fx_F x}{I_Y}, \quad (1)$$

где A – площадь поперечного сечения стержня, I_X, I_Y – осевые моменты инерции сечения относительно осей X и Y соответственно.

Уравнение нейтральной линии получим, приравняв напряжения к нулю:

$$\sigma = \frac{1}{A} + \frac{y_F y}{I_X} + \frac{x_F x}{I_Y} = 0. \quad (2)$$

Наибольшие напряжения возникают в точках, наиболее удаленных от нейтральной линии:

$$\sigma_{\max} = F \left(\frac{1}{A} + \frac{y_F y_1}{I_X} + \frac{x_F x_1}{I_Y} \right) = 0, \quad (3)$$

где x_1 и y_1 – координаты точки, наиболее удаленной от нейтральной линии.

Материальное обеспечение эксперимента. Механическая разрывная машина Р5 (см. ч. II, п. 2.1), измерительные средства, устройства тензометрирования (см. ч. II, п. 1.5).

Порядок проведения эксперимента. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии, эскизов образца, установки во входные параметры эксперимента и журнал испытаний. Определить значения напряжений при внецентренном растяжении пластины, значения напряжений экспериментальным путем по показаниям тензодатчиков.

Испытание проводится на разрывной машине. Образец представляет собой дюралевую пластину, размеры которой позволяют разместить четыре тензодатчика по ширине образца (рис. 2). Длина

образца должна быть достаточной для того, чтобы влияние способа приложения сил можно было считать исключенным.

Величина эксцентриситета e , а также расстояния от продольной оси пластины до тензодатчиков (y_1, y_2, y_3, y_4) определяется перед экспериментом. Величина наибольшей силы, прикладываемой к образцу определяется его прочностью и не должна превышать 40÷50 % от разрушающей.

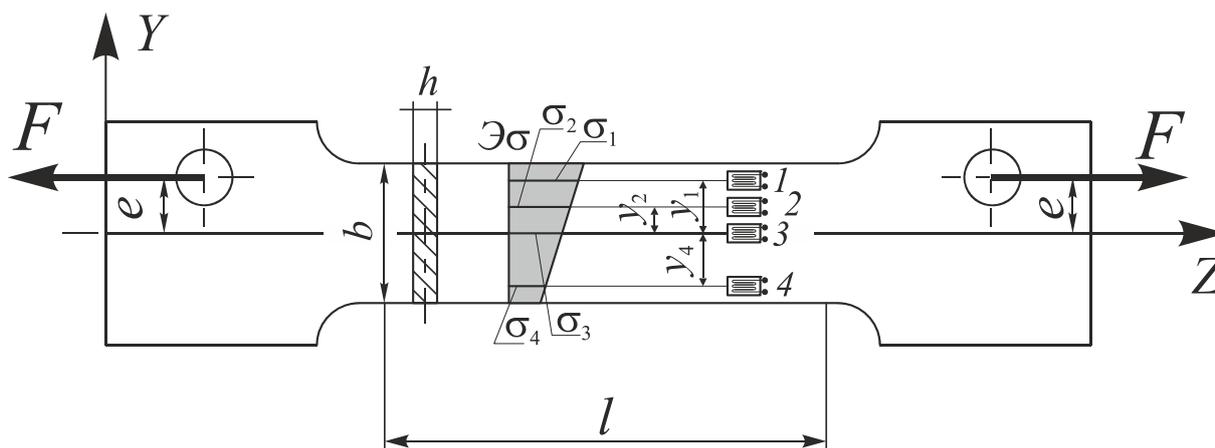


Рис. 2. Испытуемый образец с наклеенными тензодатчиками

После проведения необходимых измерений вычисляют теоретические напряжения в точках 1, 2, 3 и 4 по формуле 1, учитывая, что $y_F = e, x_F = 0, y_1 = -y_4, y_3 = 0$, тогда напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{F}{A} + \frac{Fey_1}{I_x}; \\ \sigma_2 &= \frac{F}{A} + \frac{Fey_2}{I_x}; \\ \sigma_3 &= \frac{F}{A}; \\ \sigma_4 &= \frac{F}{A} + \frac{Fey_4}{I_x},\end{aligned}$$

где $A = bh, I_x = \frac{hb^3}{12}$.

Обработка результатов эксперимента. Измерить напряжения так, как это описано в рекомендациях к лабораторной работе № 8. Для сопоставления результатов расчета и эксперимента эпюры

напряжений строят в одинаковом масштабе на одном рисунке. Погрешность вычисляют для каждой точки, в которой вычислялось и измерялось напряжение.

Составление отчета. На титульном листе отчета указывается наименование образовательного учреждения и его структурного подразделения, наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год.

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Заполняют таблицу полученных в ходе эксперимента данных. В заключении анализируют полученные результаты, сопоставляют справочные данные с экспериментальными результатами, дают заключение о погрешности метода, делают выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какой принцип используется для вычисления напряжений при сложном сопротивлении?
2. От чего зависит вид эпюры распределения нормальных напряжений в поперечном сечении при внецентренном действии сил?
3. Возможно ли появление в стержне напряжений разных знаков на эпюре нормальных напряжений в поперечном сечении при внецентренном растяжении-сжатии?

РАБОТА № 11

Внецентренное растяжение стержня

Цель работы. Освоение методики исследования напряженного состояния в поперечном сечении бруса при изгибе с растяжением на примере внецентренного растяжения.

1. Организация опыта

1.1. Испытательная машина: тип _____, предельное усилие _____ кН, цена деления _____ Н,

1.2. Тарировочная балка:

$E_T =$ _____ ГПа, $F_T =$ _____ Н, $l_T =$ _____ мм, $b_T =$ _____ мм,

$h_T =$ _____ мм, балка $W_T = b_T h_T^2 / 6 =$ _____ мм³,

$M_T = F_T l_T =$ _____ Нм, $\sigma_T = M_T / W_T =$ _____ МПа

1.3. Тарировочный коэффициент

$k_\sigma = (E_B / E_T) \cdot (\sigma_T) =$ _____ МПа.

1.4. Теоретическое определение напряжений

$\sigma_{теор i} = (M_x / I_x) y_i = (0,5 \Delta F a / I_x) y_i$

1.5. Исследуемый образец: материал – дюралюминий

($E_c = 70$ ГПа) $b =$ _____ мм, $h =$ _____ мм, $A = bh$ _____ мм²,

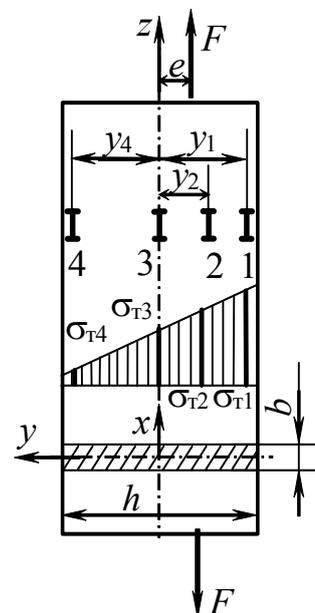
$I_x = bh^3 / 12 =$ _____ мм⁴, $e =$ _____ см,

$y_1 = -y_4 =$ _____ мм, $y_2 =$ _____ мм, $y_3 =$ _____ мм.

1.6. Теоретическое определение напряжений

$$\sigma_{T_i} = \frac{F}{A} + \frac{F e}{I_x} y_i$$

Схема испытания



2. Результаты опыта

Тарировка прибора				Датчики				
F, Н	Показания прибора, мкА				1	2	3	4
	П1	П2	П3	П4	Теоретические напряжения σ_{Ti} , МПа			
Определение напряжений в балке				$\sigma_{опi} = K_{\sigma i} П_{Ci}$, МПа				
Расхождение $\delta\sigma_i = [(\sigma_{Ti} - \sigma_{опi}) / \delta_{Ti}] \cdot 100 \%$								

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 12

Определение критической силы

Цель работы. Освоение методики проведения испытаний на устойчивость стержня при сжатии и получение навыков экспериментального определения критического значения сжимающей силы.

Краткие теоретические сведения. В подавляющем большинстве случаев поперечные размеры стержней определяются из условия прочности. Однако разрушение стержня может произойти не только потому, что будет нарушена прочность, но и оттого, что стержень не сохранит формы, приданной ему конструктором. Наиболее типичным примером является работа стержня, сжатого силами F . Простейшие опыты показывают, что не всегда возможно разрушить стержень путем доведения напряжений сжатия до предела текучести или до предела прочности материала.

Если подвергнуть продольному сжатию тонкую линейку, то она может сломаться, изогнувшись; перед изломом сжимающие силы будут значительно меньше тех, которые вызвали бы разрушение при простом сжатии. Разрушение линейки произойдет потому, что она не сохраняет приданную ей форму прямолинейного, сжатого стержня, а искривится, что вызовет появление изгибающих моментов, а стало быть, добавочные напряжения от изгиба.

Поэтому для надежной работы конструкции мало, чтобы она была прочной; надо, чтобы все ее элементы были устойчивы. Вследствие этого в ряде случаев, в частности для сжатых стержней, помимо проверки на прочность необходима и проверка на устойчивость.

Возьмем достаточно длинный по сравнению с его поперечными размерами стержень, шарнирно прикрепленный к опорам (рис. 1), и нагрузим его постепенно возрастающей центральной силой F . Пока сила сравнительно невелика, стержень сохраняет прямолинейную форму. При попытках отклонить его в сторону, он после ряда колебаний возвращается к прямолинейной форме (рис. 1, а).

Наконец, можно довести силу F до такой величины, при которой стержень после небольшого отклонения его в сторону уже не выпрямится, а останется искривленным. Попытки выпрямить стержень, не снимая силы F , не удаются. При этом значении силы F прямолинейная форма равновесия стержня перестает быть устойчивой, а значение силы, соответствующее этому случаю, называется критическим $F_{кр}$ (рис. 1, б).

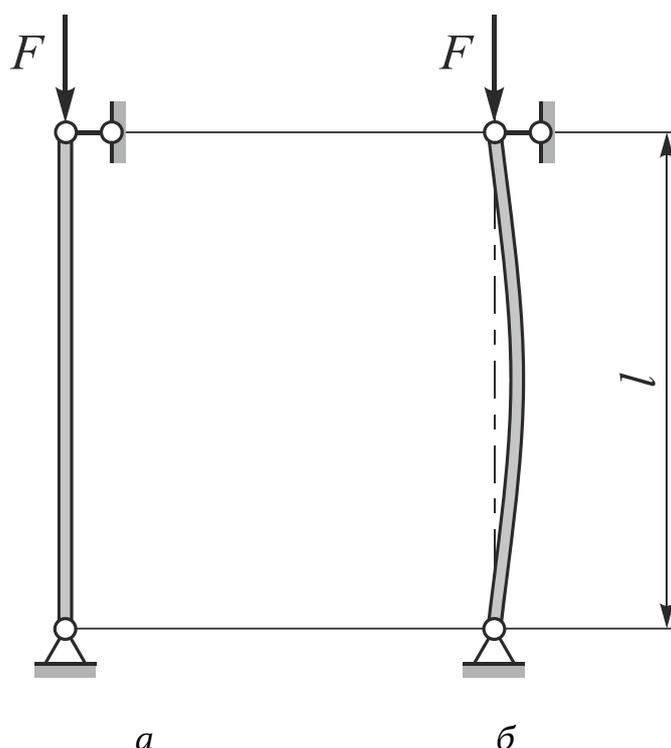


Рис. 1. Потеря устойчивости продольно сжатым стержнем

При небольшом превышении сжимающей силы F ее критического значения прямолинейная форма стержня делается крайне неустойчивой, дальнейшее искривление заканчивается либо новой (устойчивой) формой равновесия, либо разрушением.

Исходя из этого необходимо знать величину критической силы $F_{кр}$, эквивалентной разрушающей нагрузке.

Впервые задачу определения критической силы $F_{кр}$ решил академик Петербургской академии наук Л. Эйлер в 1744 г.

Рассмотрим прямой стержень постоянного поперечного сечения, шарнирно опертый по концам и нагрузкам его центральной продольной силой $F = F_{кр}$. В этом случае стержень получит весьма небольшие искривления в плоскости наименьшей жесткости (рис. 2, а).

Для решения поставленной задачи можно воспользоваться приближенным дифференциальным уравнением изогнутой оси стержня. В сечении на расстоянии z от начала координат изгибающий момент равен

$$M(z) = -Fy. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение принимает вид

$$EI_x y'' = -Fy. \quad (2)$$

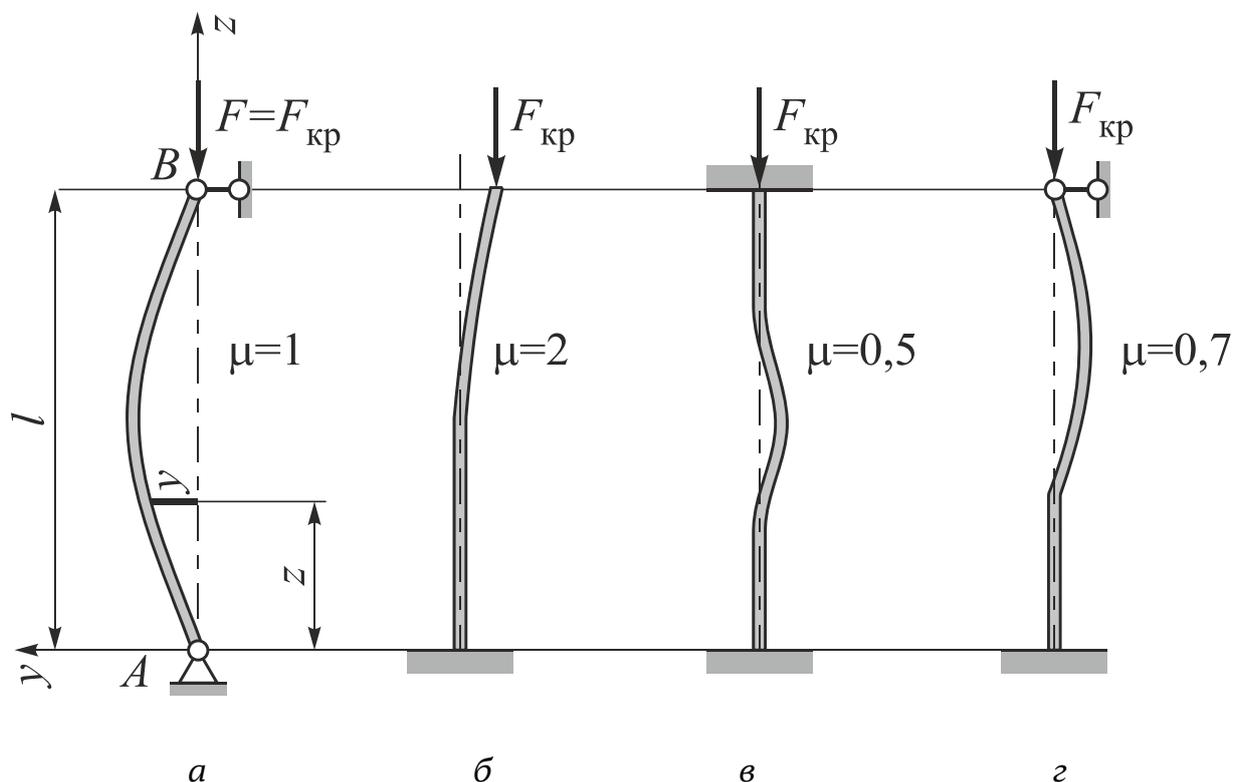


Рис. 2. Варианты закрепления и характер потери устойчивости:
a – шарнирно опертая балка; *б* – консольная балка; *в* – жесткое закрепление с двух концов; *г* – жесткое и шарнирное закрепление

Разделив обе части уравнения на EI_x и обозначая $k^2 = \frac{F}{EI_x}$,

приводим уравнение к виду:

$$y'' + k^2 y = 0.$$

Общий интеграл этого уравнения имеет вид:

$$y = C_1 \sin kz + C_2 \cos kz. \quad (3)$$

Граничные условия на концах стержня AB таковы, что в точке A при $z = 0$ прогиб $y = 0$, и в точке B при $z = l$ прогиб $y = 0$. Из первого условия следует, что $C_2 = 0$. Применяя второе условие, получаем $C_1 \sin kl = 0$, откуда следует, что C_1 или kl равны нулю. Но $C_1 \neq 0$, следовательно, $\sin kl = 0$, что соответствует $kl = n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. Тогда критическая сила принимает ряд значений:

$$F_{кр} = \frac{n\pi^2 EI_x}{l^2}. \quad (4)$$

Наименьшее значение критической силы будет при $n = 1$, тогда (при I_x – минимальном моменте инерции поперечного сечения):

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2}. \quad (5)$$

Полученная зависимость носит название формулы Эйлера для продольно сжатого стержня с шарнирно опертыми концами. Если повторить весь ход рассуждений для стержней, имеющих иные способы закрепления (рис. 2, б, в, г), то значения критической силы будут иные. Можно преобразовать формулу Эйлера, введя в нее коэффициент, учитывающий способ закрепления μ . Тогда можно записать:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI_x}{(\mu l)^2}. \quad (6)$$

Материальное обеспечение эксперимента. Установка для испытаний на продольный изгиб (см. ч. II, п. 3.6), измерительные средства (см. ч. II, п. 1.2); устройства тензометрирования (см. ч. II, п. 1.5).

Порядок проведения эксперимента. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии, эскизов образца, установки в журнал испытаний. Определить значения критической силы, перемещения в местах установки индикаторов часового типа.

Установка для проведения эксперимента состоит из сварной станины, вертикально установленной на основании. В нижней части станины установлена подвижная пиноль с центровым наконечником. Осевое перемещение пиноли осуществляется винтовой парой. В верхней части станины установлен силоизмеритель, представляющий собой стальную скобу, деформации которой регистрируются индикатором часового типа. Величина силы, приложенной к скобе силоизмерителя, пропорциональна показаниям индикатора. Определение нагрузки производится с помощью тарировочного графика. Измеряемое усилие прикладывается к центральному наконечнику.

Образец представляет собой стержень прямоугольного сечения с зацентрованными концами. Размеры образца берутся из паспорта установки. Образец, установленный в центрах, нагружают, вращая штурвал нагружающего устройства. Прогибы стержня измеряют с помощью двух индикаторов.

Нагружение образца нужно вести очень плавно равными ступенями. Контроль ступеней нагрузки ведут по индикатору силоизмерителя. Рекомендуются ступени нагружения – 10 делений шкалы индикатора. Начальное нагружение образца нежелательно. Момент касания образца с наконечниками нагружающего устройства определяют

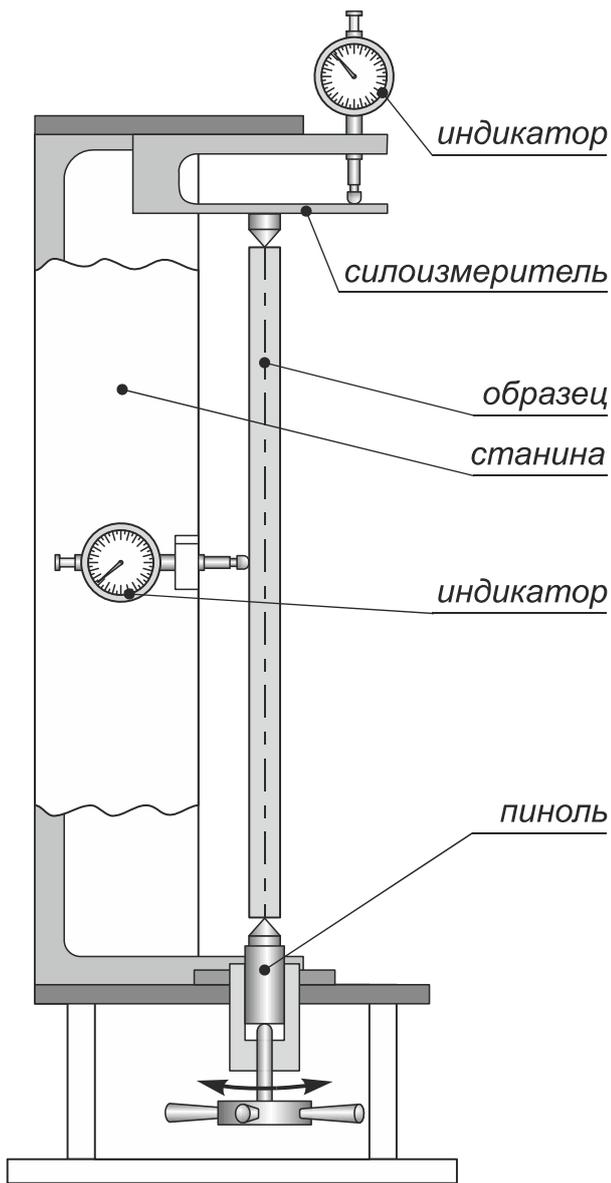


Рис. 3. Схема установки

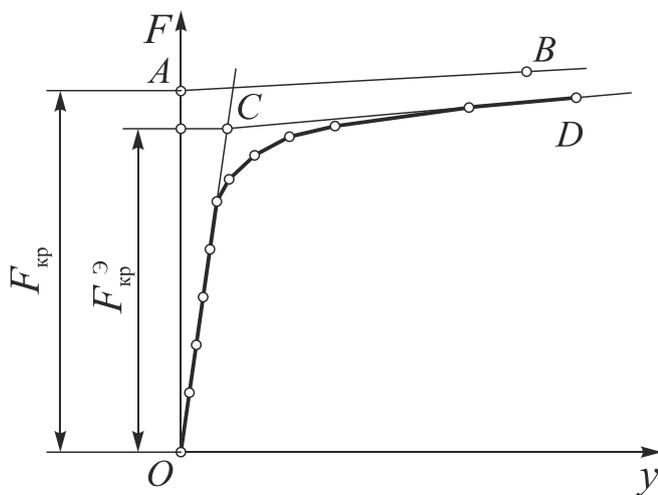


Рис. 4. График зависимости прогиба от осевой силы

легкими поворотами штурвала, при этом смещение стрелки индикатора не должно превышать одного деления.

После этого шкалы всех индикаторов устанавливаются на нулевое деление. Нагружение продолжают до тех пор, пока интенсивному росту прогибов будет соответствовать незначительное приращение нагрузки. Величину прогиба отсчитывают по одному из двух индикаторов.

Применение двух индикаторов обусловлено только необходимостью уравнивания действия пружин индикаторов.

Формулы 1, 2 получены в предположении, что стержень идеально прямой, а сила приложена строго по его оси. Реальные стержни всегда имеют некоторую начальную кривизну, а силу невозможно приложить строго по оси стержня. Поэтому реальный стержень будет незначительно изгибаться уже при малых осевых нагрузках. Величина критической силы будет несколько меньше расчетной.

На рис. 4 показаны зависимости прогиба от величины осевого усилия. Линия OAB соответствует идеальным условиям. В этом случае прогибы стержня до достижения критической силы отсутствуют (отрезок OA). При нагружении выше

критической силы прогибы резко возрастают при несущественном приращении силы (отрезок AB).

Экспериментальная линия OD отличается от теоретической линии OAB тем, что прогибы появляются уже при малых нагрузках, но пропорциональны силе. Затем прогибы увеличиваются при незначительном росте сил, что свидетельствует о потере устойчивости равновесия стержня. Для определения экспериментальной величины критической силы необходимы касательные к полученному в эксперименте графику, пересечение которых даст точку C . Ордината точки C соответствует экспериментальной величине критической силы $F_{кр}^Э$.

Обработка результатов эксперимента. При обработке результатов эксперимента можно построить график не в координатах «сила – прогиб», а непосредственно по наблюдаемым показаниям измерительных приборов. Величину критической силы определить по тарировочному графику. В заключение вычисляют величину отклонения теоретического и экспериментального значения силы в процентах.

Составление отчета. На титульном листе отчета указывается наименование образовательного учреждения и его структурного подразделения, наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год.

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Приводят вычисления критической силы, перемещений. Заполняют таблицу полученных в ходе эксперимента данных. В заключении анализируют полученные результаты, сопоставляют данные, полученные расчетным и экспериментальным путем, дают заключение о погрешности метода, делают выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что характеризует критическая сила?
2. Как теоретически определить величину критической силы в общем случае закрепления концов стержня?
3. Как влияют реальные условия нагружения, эксплуатации на величину критической силы?
4. Какой физический смысл имеет коэффициент μ ?
5. Относительно какой оси сечения происходит изгиб стержня при потере устойчивости?

РАБОТА № 12

Определение критической силы

Цель работы. Освоение методики проведения испытаний на устойчивость стержня при сжатии и получение навыков экспериментального определения критического значения сжимающей силы.

1. Организация опыта

1.1. Установка: тип _____,
 предельное усилие _____ кН,
 цена деления _____ Н

1.2. Испытуемый образец: материал - $E =$ _____ ГПа,;
 $\sigma_{пц} =$ _____ МПа
 размеры: $b =$ _____ мм, $h =$ _____ мм, $l =$ _____ мм

1.3. Теоретическое определение критической силы
 Геометрические характеристики:

$$J_y = I_{\min} = hb^3 / 12 =$$

$$i_y = i_{\min} = \sqrt{I_{\min} / A} = b / \sqrt{12} =$$

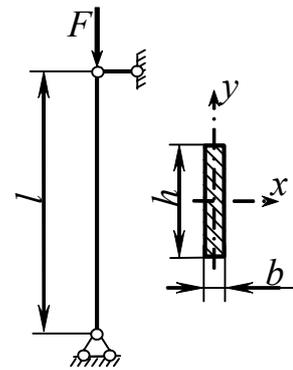
$$\text{Предельная гибкость } \lambda_{пц} = \pi / \sqrt{E / \sigma_{пц}} =$$

$$\text{Фактическая гибкость } \lambda = \mu l / i_{\min} =$$

Теоретическое значение критической силы

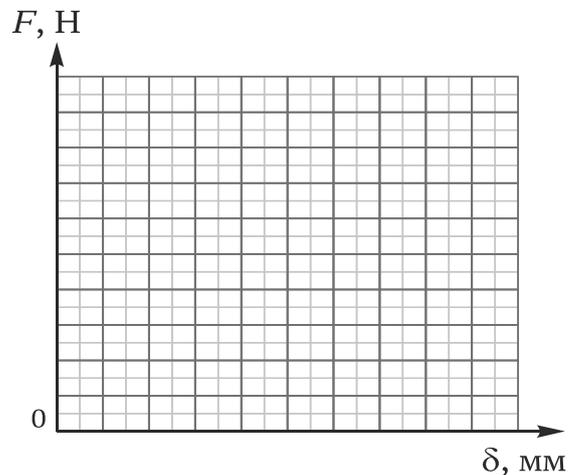
$$F_{крт} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2} =$$

Схема испытания



2. Результаты опыта

Степень нагружения	Нагрузка F , Н	Перемещение, мм
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		



Опытное значение критической силы $F_{кроп} =$

Расхождение $\delta F = [(F_{крт} - F_{кроп}) / F_{крт}] \cdot 100\% =$ _____ %

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 13

Определение «лишней неизвестной» для статически неопределимой балки

Цель работы. Экспериментальная проверка теории расчета многопролетных неразрезных балок и определение в них опорных реакций.

Краткие теоретические сведения. Многопролетные неразрезные балки относятся к статически неопределимым системам. Если балка не закреплена на одной из опор, степень ее статической неопределимости соответствует количеству промежуточных опор.

Для раскрытия статической неопределимости многопролетной неразрезной балки используется метод сил. Обычно в качестве неизвестных принимаются изгибающие моменты в сечениях балки над промежуточными опорами.

Когда ставится вопрос об определении опорных реакций, задача будет решаться значительно проще, если в качестве неизвестных принять опорные реакции в соответствующих опорах.

Для решения задачи по методу сил выбирается основная и соответствующая ей эквивалентная система. Основная система (ОС) получается из заданной системы (Р) путем удаления «лишних» с точки зрения статического равновесия связей (лишних опор). Эквивалентная система (ЭС) получается из основной системы путем приложения к ней заданной нагрузки и внешних сил, соответствующих отброшенным реакциям связей. В соответствии с методом сил внешние силы будут эквивалентны отброшенным связям в том случае, если перемещения, вызываемые ими и внешними силами в их направлении, будут равняться нулю.

Рассмотрим методику определения опорной реакции в опоре С для двухпролетной неразрезной балки, показанной на рис. 1, а. Балка один раз статически неопределима (имеет одну промежуточную опору) и поэтому при выборе основной системы надо удалить одну из опор. Так как поставлен вопрос об определении опорной реакции в опоре С, то удаляется опора в точке С. Основная и эквивалентная системы показаны на рис. 1, б и в соответственно.

Неизвестная X_1 определяется из канонического уравнения метода сил:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1P} = 0, \quad (1)$$

где δ_{11} – единичное перемещение точки приложения неизвестной внешней силы X_1 в ее направлении, вызванное действием единичной силы \bar{X}_1 ; Δ_{1P} – перемещение той же точки от действия внешней нагрузки.

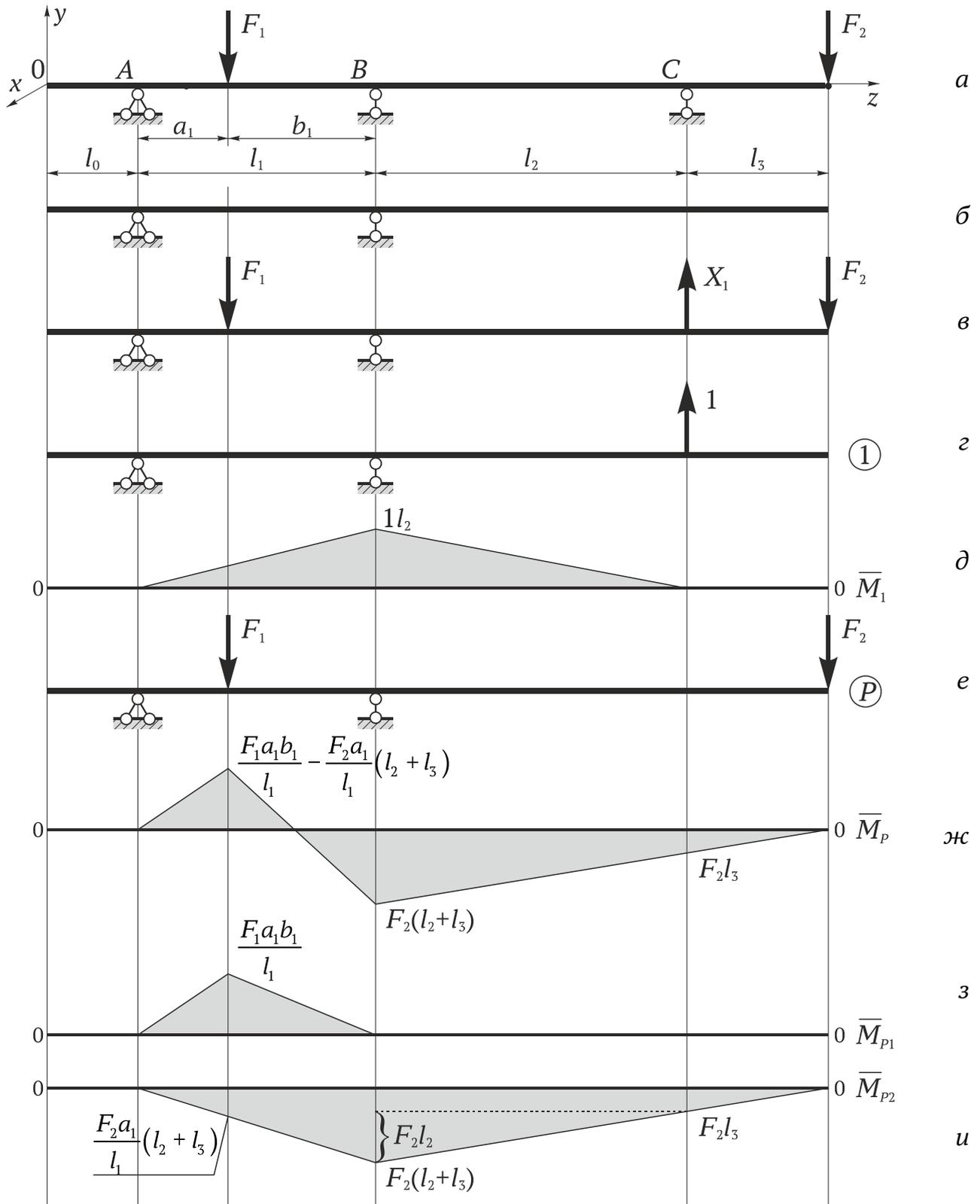


Рис. 1. Расчет многопролетной балки

Для определения коэффициента δ_{11} к основной системе вместо силы X_1 прикладывается сила, равная 1 (рис. 1, з), и строится эпюра изгибающих моментов от этой силы (рис. 1, д). Умножая эту эпюру на саму себя по способу Верещагина, получаем:

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\left[\frac{1l_2l_1}{2} \right] \frac{2}{3}l_2 + \left[\frac{1l_2^2}{2} \right] \frac{2}{3}l_2 \right) = \frac{l_2^2(l_1 + l_2)}{3EI}. \quad (2)$$

В квадратных скобках здесь и далее при определении коэффициентов канонических уравнений метода сил указываются значения площадей грузовых эпюр, а следующие за скобками значения представляют значения ординат единичных эпюр, взятых под центрами тяжести площадей грузовых эпюр.

Для вычисления свободного члена канонического уравнения Δ_{1P} необходимо загрузить основную систему внешними нагрузками F_1 , F_2 (рис. 1, е) и построить для нее эпюру изгибающих моментов. Разбить полученную эпюру на элементарные площади в рамках расчетных участков и перемножить их по способу Верещагина с единичной эпюрой (рис. 1, д). Используя принцип независимости действия сил, эпюру от заданных сил можно представить в виде двух эпюр – от силы F_1 (рис. 1, з) и F_2 (рис. 1, у) в отдельности. При таком представлении эпюры изгибающих моментов от внешних нагрузок удобнее производить ее перемножение с единичной эпюрой:

$$\begin{aligned} \Delta_{1P} &= \frac{1}{EI} \left(- \left[F_2 l_3 l_2 \right] \frac{1l_2}{2} - \left[\frac{F_2 l_2^2}{2} \right] \frac{2}{3} 1l_2 - \left[\frac{F_2 (l_2 + l_3) l_1}{2} \right] \frac{2}{3} 1l_2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{F_1 a_1 b_1}{l_1} \frac{a_1}{2} \right] \frac{l_2}{l_1} \frac{2}{3} a_1 + \left[\frac{F_1 a_1 b_1}{l_1} \frac{b_1}{2} \right] \frac{l_2}{l_1} \left(a_1 + \frac{b_1}{3} \right) \right) = \\ &= - \frac{F_2 l_2}{6EI} (l_3 (3l_3 + 2l_2) + 2l_1 (l_3 + l_2)) + \frac{F_1 a_1 b_1 l_2}{6EI l_1^2} (2a_1^2 + 3a_1 b_1 + b_1^2). \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя найденные значения δ_{11} и Δ_{1P} в каноническое уравнение (1), находим величину опорной реакции в опоре С:

$$X_1 = - \frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}}. \quad (4)$$

Материальное обеспечение эксперимента. Установка для проведения эксперимента (см. ч. II, п. 3.3). Принципиальная схема установки и варианты схемы нагружения образца прямоугольного поперечного сечения показаны на рис. 2.

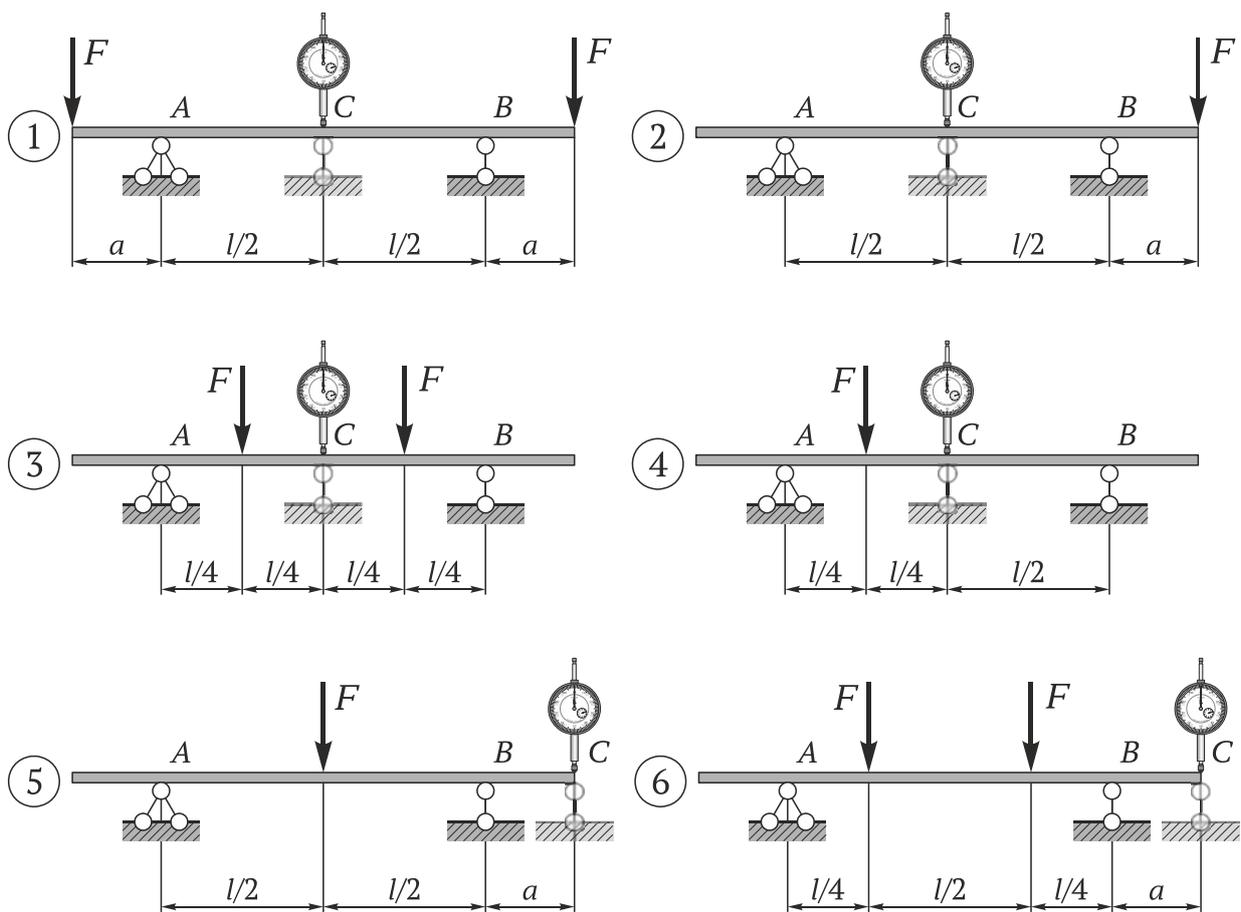


Рис. 2. Варианты расчетных схем по определению «лишней» неизвестной

Порядок проведения эксперимента. Испытуемый образец прямоугольного поперечного сечения устанавливают на рамку основания. Выбирают схему нагружения (рис. 2). Устанавливают на ноль шкалу индикатора в точке C . Нагружают балку, укладывая грузы на платформу подвеса в точке приложения силы. На платформу подвеса в точке, где расположен индикатор укладывают груз такой величины, чтобы стрелка индикатора возвратилась к нулю. Значение приложенной с помощью груза силы, будет соответствовать опорной реакции в данной точке.

Обработка результатов эксперимента. Полученные в результате эксперимента величины перемещений сравнивают с теоретически определенными ранее значениями. Отличие теоретических и экспериментальных данных не должно быть более 5 %.

Составление отчета. В отчете указывается наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю,

учебный год. Эскизируется схема испытаний и параметры испытуемых образцов. Заносят результаты опыта, теоретических расчетов, делают выводы о проведенном эксперименте.

Контрольные вопросы

1. Какая балка называется статически неопределимой?
2. Какие методы используются для раскрытия статической неопределимости?
3. Как определяется степень статической неопределимости многопролетных неразрезных балок?
4. Какую размерность имеют единичное перемещение δ_{11} и перемещение от заданных нагрузок Δ_{1P} ?
5. Какой физический смысл имеет каноническое уравнение метода сил?

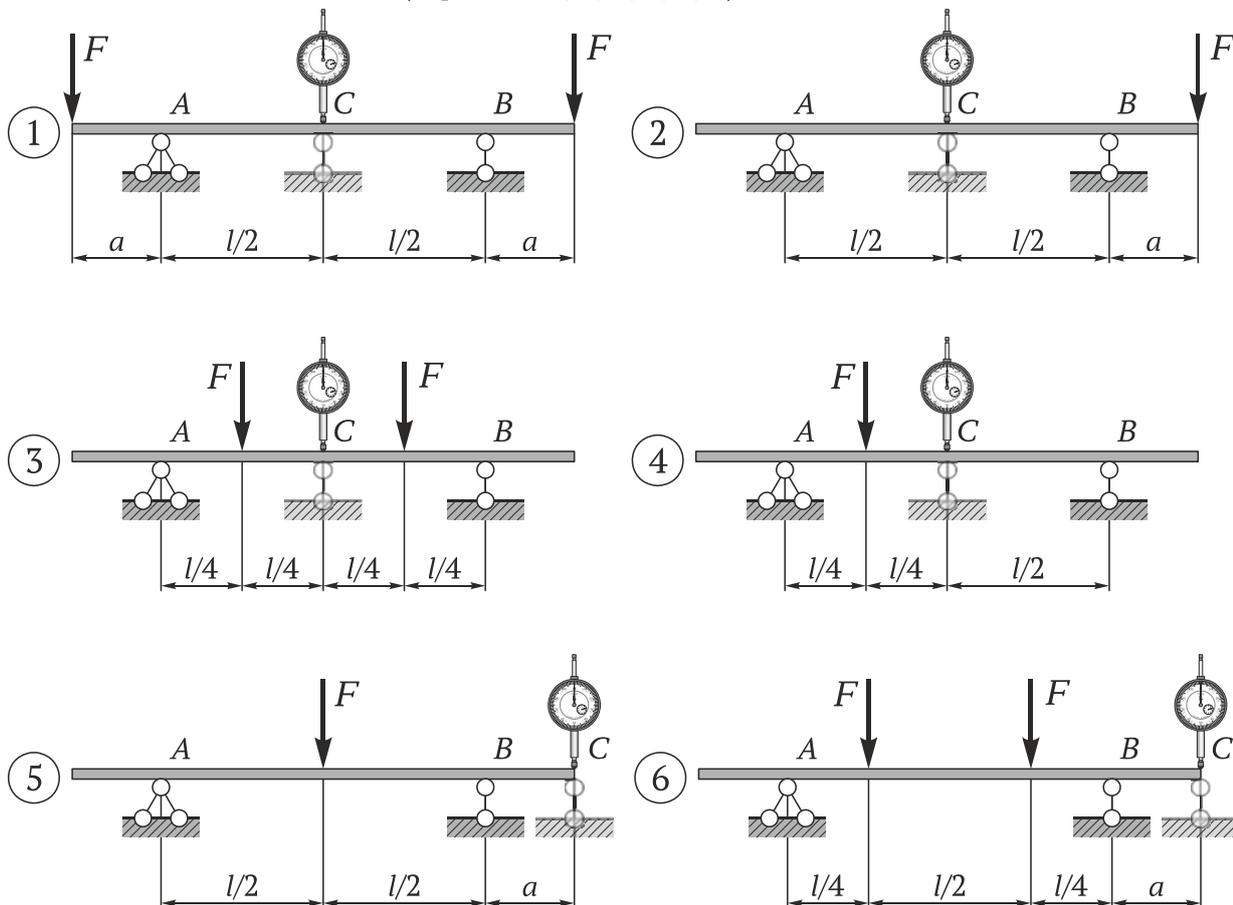
РАБОТА № 13

Определение «лишней неизвестной» для статически неопределимой балки

Цель работы. Экспериментальная проверка теории расчета многопролетных неразрезных балок и определение в них опорных реакций.

1. Организация опыта

1.1. Схема испытания (варианты 1, 2, 3, 4, 5, 6)



1.2. Испытуемая балка: материал – сталь, $E = 200$ ГПа,
 $l = 400$ мм, $a =$ ___ мм

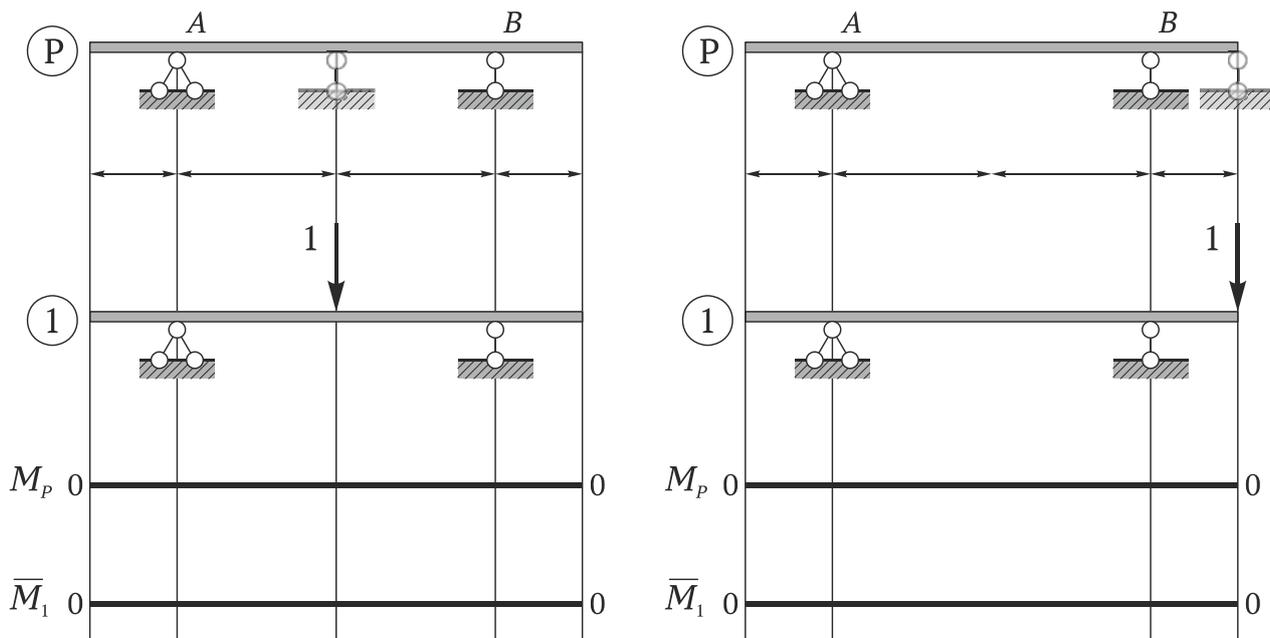
1.3. Измерительный прибор: индикатор часового типа,
 цена деления – 0,01 мм (10 мкм)

1.4. Теоретическое определение реакции дополнительной связи
 Каноническое уравнение $\delta_{11}X_1 + \Delta_{1F} = 0$

$EI\delta_{11} =$

$EI\Delta_{1F} =$

$X_1 = - \Delta_{1F} / \delta_{11} =$



2. Результаты опыта

$F, \text{ Н}$	$V, \text{ мм}$	Значение реакции, Н		Расхожд., %
		$X_{\text{теор}}$	$X_{\text{опыт}}$	

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 14

Статически неопределимые рамы

Цель работы. Освоение методики экспериментальной проверки метода сил и расчетных зависимостей для определения перемещений в плоских статически неопределимых рамах, получение навыков определения перемещений в статически неопределимых системах.

Краткие теоретические сведения. В практике конструирования современных машин и сооружений часто встречаются системы, которые при расчете на прочность и жесткость представляют собой статически неопределимые задачи.

Решение таких задач не поддается возможным только с помощью уравнений равновесия. Необходимо составлять дополнительные уравнения, которые, как правило, основаны на деформационных условиях рассчитываемого объекта. Практические приемы, связанные с составлением дополнительных уравнений, называются методами раскрытия статической неопределимости. В результате раскрытия статической неопределимости удастся найти все внешние и внутренние силы, а также перемещения. Среди многих методов раскрытия статической неопределимости наибольшее распространение получил метод сил.

Рассмотрим применение этого метода на двух примерах статически неопределимых стержневых систем.

На рис. 1, а показана прямоугольная рама, состоящая из стержней постоянной жесткости и нагруженная сосредоточенными силами. Данная рама имеет шесть связей, следовательно, система трижды статически неопределима, причем в качестве «лишних» связей можно принять внутренние связи. Действительно равновесие рамы не нарушится, если разрезать раму в любом сечении, т. е. снять три внутренние связи.

Геометрически схема рамы симметрична. Наличие симметрии может значительно облегчить раскрытие статической неопределимости, так как вследствие симметрии некоторые перемещения из числа входящих в уравнение перемещений оказываются равными нулю. Поэтому в поперечном сечении, расположенном на оси прямой симметрии, заведомо отсутствует поперечная сила. Чтобы использовать это обстоятельство, необходимо, выбирая основную систему, принять за «лишние» связи внутренние связи в сечении на оси симметрии. Схема (рис. 1, а) заданной рамы симметрична геометрически и по

нагрузке. На рис. 1, б показаны основная и эквивалентная системы. Условия перемещений, записанные в канонической форме, следующие:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1F} = 0. \quad (1)$$

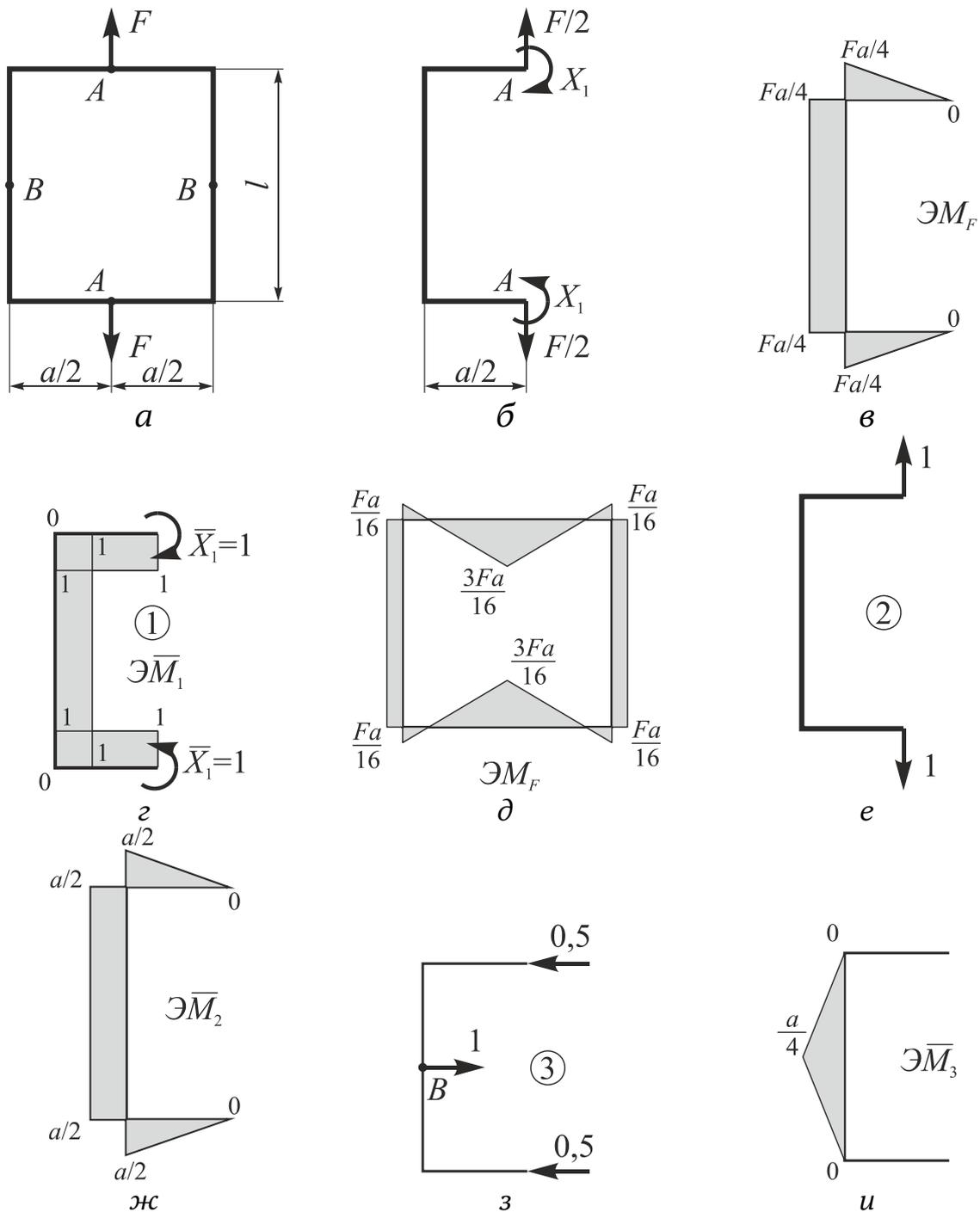


Рис. 1. Расчетные схемы квадратного контура, эпюры

Для вычисления перемещений, входящих в эти уравнения, построены эпюры изгибающих моментов от заданной нагрузки и единичных нагружений (рис. 1, в, г). Применяя правило Верещаги-

на, получим величины перемещений (при $a = l$) $\delta_{11} = \frac{2a}{EI}$,

$\Delta_{1F} = -\frac{3Fa^2}{8EI}$. Тогда $X_1 = \frac{3Fa}{16EI}$. Суммарная эпюра изгибающих моментов показана на рис. 1, д.

Для определения увеличения расстояния между точками приложения сил A приложим к основной системе в этих точках единичные силы (рис. 1, е). Перемножая суммарную эпюру и эпюру от единичной силы (рис. 1, ж), получим искомое перемещение. Практически более удобно перемножить единичную эпюру отдельно на эпюру от заданных сил и от силового фактора X_1 , а затем полученные результаты алгебраически сложить. Тогда искомое увеличение расстояния AA :

$$\Delta_{A-A} = \frac{5Fa^3}{192EI}. \quad (2)$$

Для определения увеличения расстояния по сечению $B-B$ построим единичное состояние (рис. 1, з), приложив в этих точках единичные силы, и построим единичные эпюры (рис. 1, и). Увеличение расстояния между точками B будет:

$$\Delta_{B-B} = \frac{Fa^3}{64EI}. \quad (3)$$

В качестве второго примера рассмотрим кольцевую раму, нагруженную двумя силами F (рис. 2, а). Рама три раза статически неопределима, но условия симметрии позволяют сократить число «лишних» неизвестных до одного. Разрежем раму по сечению AB (рис. 2, б). Рама симметрична относительно линии действия сил. Поэтому $N_A = N_B = \frac{F}{2}$ и $M_A = M_B$. Обозначим неизвестный момент через X_1 . В итоге получаем эквивалентную систему, показанную на рис. 2, в. В сечении с угловой координатой φ момент от заданной силы F будет:

$$M_F = \frac{FR}{2}(1 - \cos \varphi). \quad (4)$$

Момент от единичного силового фактора равен $M_1 = -1$. Определим коэффициенты канонического уравнения:

$$\delta_{11} = \int_0^{\pi/2} \frac{M_1^2 R d\varphi}{EI} = \frac{\pi R}{2EI}; \quad \Delta_{1F} = \int_0^{\pi/2} \frac{M_F M_1 R d\varphi}{EI} = -\frac{FR^2}{2EI} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right).$$

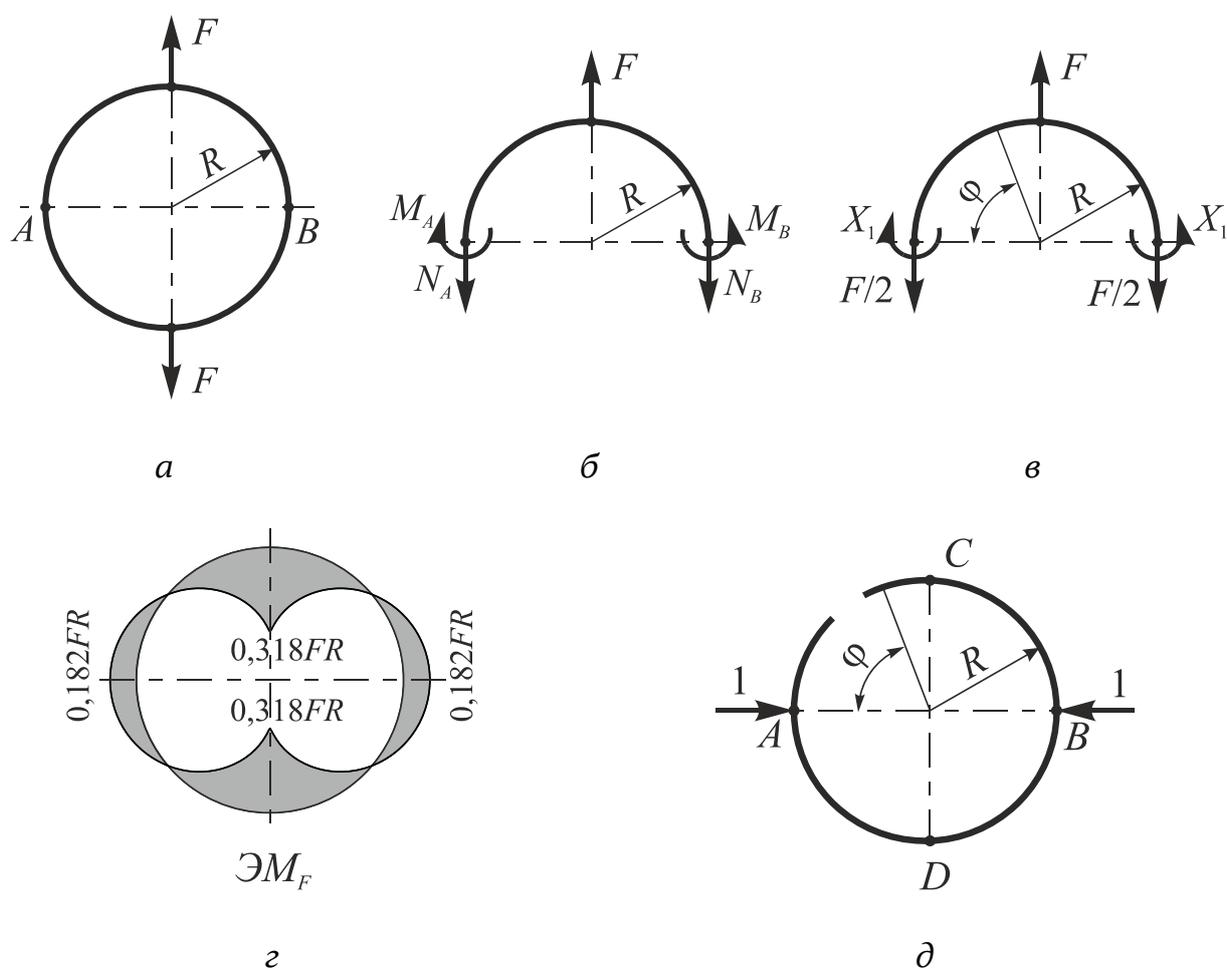


Рис. 2. Расчетные схемы квадратного контура, эпюры

Тогда

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1F}}{\delta_{11}} = FR \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \right).$$

Суммарная эпюра изгибающих моментов показана на рис. 2, *г*. Определим, насколько уменьшится расстояние *AB* рамы при ее нагружении силой *F*. Изгибающий момент в произвольном сечении в зависимости от угла φ :

$$M = FR \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \cos \varphi \right). \quad (5)$$

Разрезаем раму в произвольном сечении и в точках *A* и *B* прикладываем единичные силы противоположного направления (рис. 2, *д*). В сечении с текущим углом φ действует изгибающий момент $M_1 = R \sin \varphi$. Тогда получим уменьшение диаметра *AB*:

$$\Delta_{AB} = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{MM_1 R d\varphi}{EI} = \frac{FR^3}{EI} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \right). \quad (6)$$

Материальное обеспечение эксперимента. Установка для испытаний статически неопределимых контуров (см. ч. II, п. 3.5), измерительные средства (см. ч. II, п. 1.2), устройства тензометрирования.

Порядок проведения эксперимента. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии, эскизов образца в журнал испытаний. Определить перемещения в сечениях, где установлены индикаторы часового типа.

Эксперимент проводится на образцах двух типов рам, показанных на рис. 3. Нагружение кольца осуществляется через шарнирные узлы, хвостовики которых устанавливаются в клиновые захваты специализированного нагрузочного контура. Измерение величины уменьшения горизонтального диаметра производится с помощью индикатора часового типа, закрепленного на стойке параллельно диаметральной плоскости.

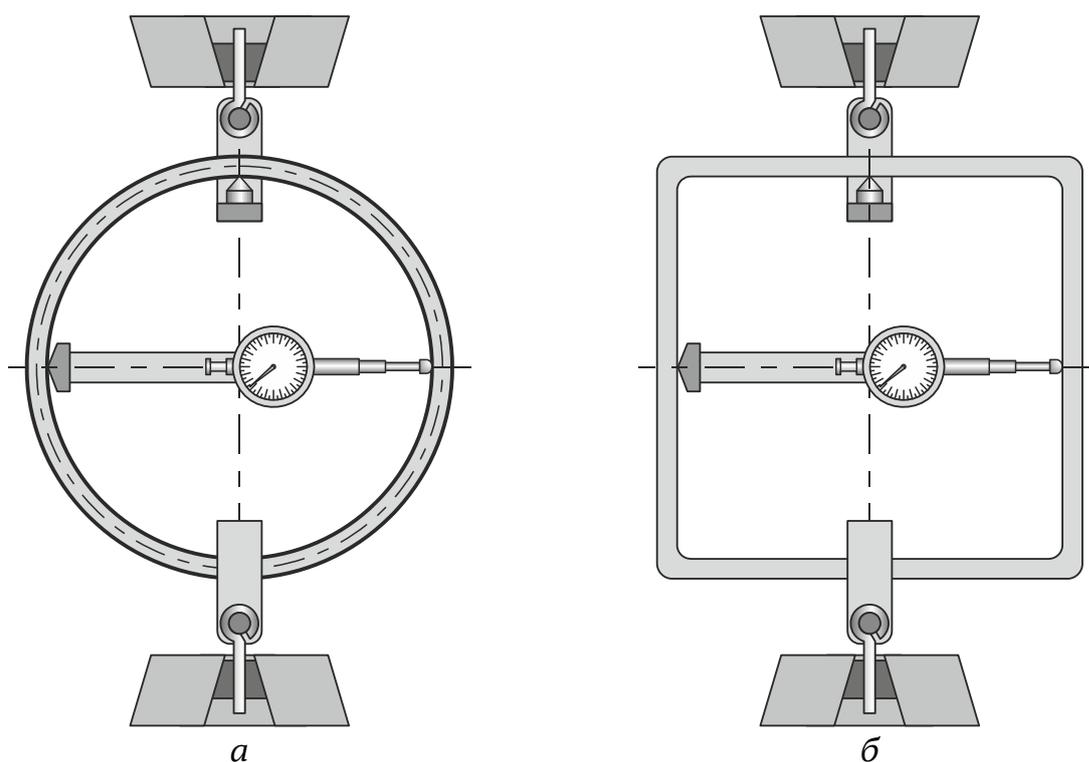


Рис. 3. Схема установки

Обработка результатов эксперимента. Прежде чем начать измерения перемещений, раму нагружают небольшой силой с целью выбора зазоров в сочленениях. Затем устанавливают индикатор

на нулевую отметку и производят ступенчатое нагружение равными интервалами. Величины допускаемых нагрузок должны соответствовать паспорту установки. После каждой ступени нагружения записывают в лабораторный журнал показания индикатора.

Результаты эксперимента сопоставляют с данными расчета, полученными по формулам 3, 6. Затем вычисляют погрешность и дают краткое заключение о проделанной работе.

Составление отчета. На титульном листе отчета указывается наименование образовательного учреждения и его структурного подразделения, наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год.

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Приводят вычисления перемещений в статически неопределимых контурах. Заполняют таблицу полученных в ходе эксперимента данных. В заключении анализируют полученные результаты, сопоставляют данные, полученные расчетным и экспериментальным путем, дают заключение о погрешности метода, делают выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. К каким упрощениям приводит разрез по оси симметрии при выборе основной системы?
2. Каков физический смысл канонических уравнений метода сил?
3. Назовите методы определения перемещений и их содержание.

РАБОТА № 14

Статически неопределимые рамы

Цель работы. Освоение методики экспериментальной проверки метода сил и расчетных зависимостей для определения перемещений в плоских статически неопределимых рамах, получение навыков определения перемещений в статически неопределимых системах.

1. Организация опыта

Прямоугольная рама

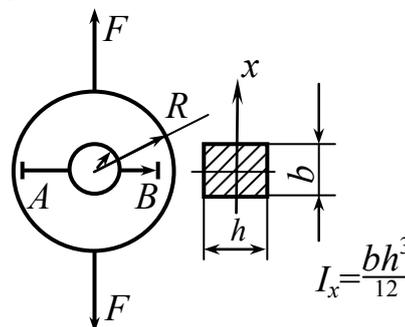
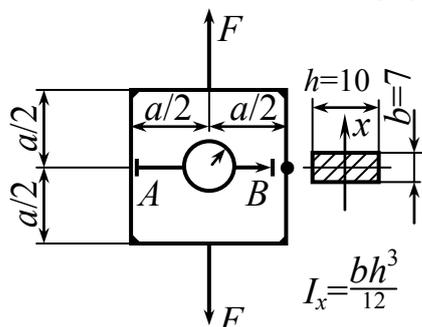
Материал рамы: сталь $E = 200$ ГПа
 $a = 18$ см; $h = 10$ мм; $b = 7$ мм

Кольцевая рама

Материал рамы: дюраль $E = 70$ ГПа
 $R = 174$ мм; $h = 8$ мм; $b = 6$ мм

Измерительный прибор: индикатор часового типа ценой деления 0,01 мм.

Схема опыта и измерений

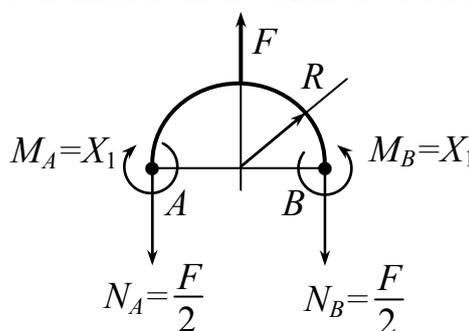
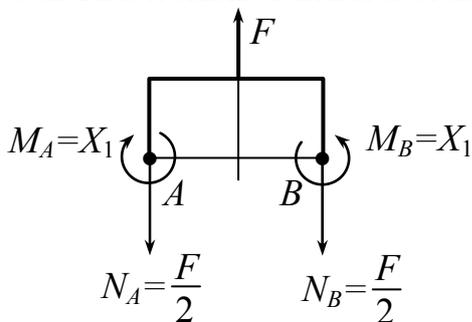


Теоретическое определение перемещений (изменение величины размера AB (δ_{AB})).

Приняв основную и эквивалентную системы, и применяя метод сил, раскрываем статическую неопределимость находим для каждой рамы величину δ_{AB} .

Основная и эквивалентная система

Основная и эквивалентная система



Опуская известные из теоретических расчетов выкладки, получим:

$$\delta_{AB} = \frac{Fa^3}{64EI_x} = \dots,$$

$$\delta_{AB} = 0,137 \frac{FR^3}{EI_x} = \dots.$$

2. Результаты опыта

Рама	Перемещение δ_{AB} , мм		Расхождение, %
	теоретическая	опытная	
Прямоугольная			
Кольцевая			

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 15ф

Изучение резонансных явлений при упругих колебаниях

Цель работы. Освоение методики проведения вибрационных испытаний методом качающейся частоты в области резонансных частот для изделий, резонансные частоты которых находятся в диапазоне частот требований в соответствии с ГОСТ 30630.1.2-99.

Исследование процесса вибрационного возмущающего нагружения образцов для определения опасных с точки зрения прочности резонансных частот.

Приобретение навыков экспериментального определения частот собственных колебаний консольно закрепленных образцов.

Краткие теоретические сведения. Во время испытаний образец закрепляют консольно на столе вибростенда, который сообщает образцу вынужденные колебания по гармоническому закону (рис. 1). Консольно закрепленный образец, представляющий собой стержень с распределенной массой, обладает бесконечным числом степеней свободы, а соответственно и числом форм и частот собственных колебаний (ЧСК). Закономерности упругих колебаний стержней с конечным числом степеней свободы справедливы и для стержней с распределенной массой.

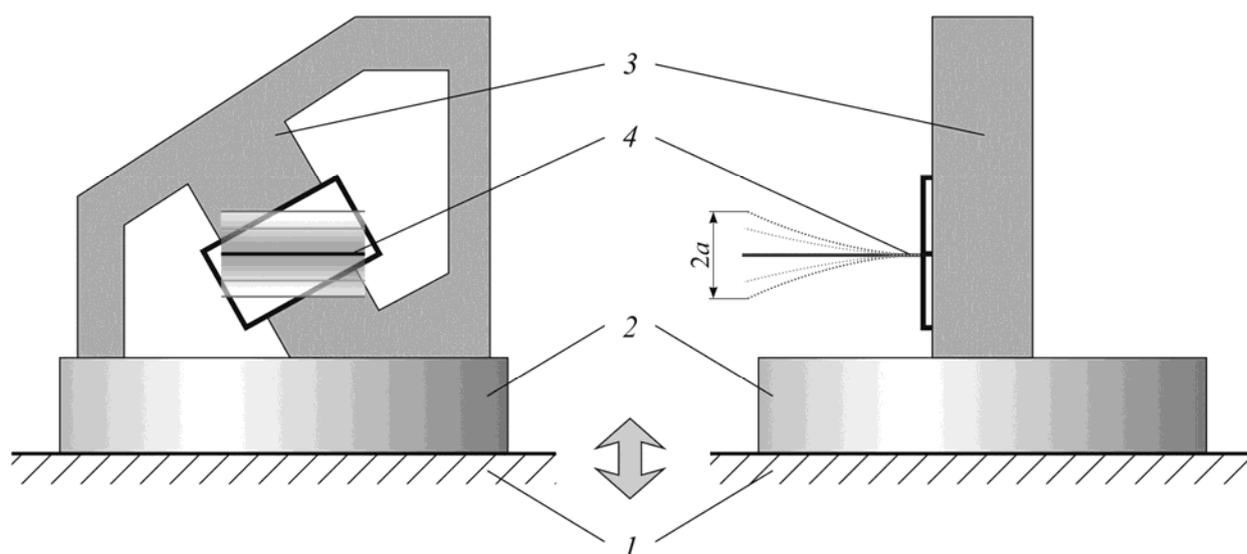


Рис. 1. Оснастка для вибрационных испытаний:
1 – вибростол; 2 – адаптер основания; 3 – рама;
4 – испытываемая лопатка

Усталостные испытания деталей газотурбинных двигателей преимущественно проводятся с использованием вибростендов. Для достижения определенных условиями испытаний напряжений в деталях их испытывают в условиях поддержания резонанса, когда частота собственных колебаний (ЧСК) детали совпадает с ЧСК стола вибростенда (вибростола вибростенда), на котором в оснастке установлена испытываемая деталь. При этом надо учитывать, что вибростол, оснастка и деталь имеют свои собственные частотные характеристики. Следовательно, в случаях совпадения частот, высокой добротности собственных колебаний оснастки и детали, вибростола и детали потребуется подведение к вибростолу значительно большей мощности, чтобы создать в детали соответствующий уровень напряжений.

В ходе усталостных испытаний должна обеспечиваться стабильность возбуждения колебаний, что достигается за счет жесткости зажимных элементов оснастки, равномерного распределения напряжений в месте крепления образца, сбалансированной и фиксированной силы зажима. Масса оснастки должна быть как минимум на порядок больше массы испытываемой детали. Еще один важный параметр – значения частот собственных колебаний детали, которые обычно отличаются на $\pm 4\%$. Кроме того, в результате накопления усталостных повреждений в детали ее ЧСК падает на $5-7\%$.

Аналитический расчет ЧСК оснастки в виде рамы по стержневой модели позволяет определить две низшие собственные частоты колебаний в виде:

$$\nu_1 = \frac{1,763}{l^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{ср}}}{m}}; \nu_2 = \frac{1,837}{l^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{ср}}}{m}},$$

где l – средние расчетные длины стержней рамы; $I_{\text{ср}}$ – средний момент инерции поперечного сечения стержней; m – масса стержней рамы. Определенные экспериментальным путем, с использованием датчиков акселерометров, собственные частоты оснастки демонстрируют хорошее сходство результатов аналитического решения и численного моделирования оснастки с экспериментальными образцами.

Применение тензорезисторов для контроля напряжений в испытываемых деталях и узлах конструкций во время усталостных испытаний с использованием вибростендов выдвигает специфические требования к проведению тарировки. При статическом нагружении тарировочная балка, обычно имеющая форму балки равного сопротивления изгибу, закрепляется консольно и нагружается на свобод-

ном конце грузом установленной массы. Данная схема нагружения позволяет рассчитать величину напряжений в сечении, близком к месту закрепления балки, по которым тарируются показания тензодатчиков. Регистрация изменения электрического напряжения выполняется с помощью вольтметра постоянного тока. Однако в случае, когда нагружение является динамическим, необходимо использовать приборы, измеряющие, как правило, среднеквадратическое значение переменного тока. Следовательно, показания, полученные на различных приборах при статическом и динамическом нагружении на одних и тех же тензодатчиках будут отличаться при одинаковых механических напряжениях в местах их приклейки.

Задача динамической тарировки заключается в том, что тарировочная балка, так же как и испытываемая деталь, должна нагружаться действием переменной во времени нагрузки, а измерение электрических параметров должно происходить на приборе, который контролирует параметры тензодатчиков во время испытаний деталей на усталость.

Для определения среднеквадратического значения переменного напряжения на выходе тензодатчика используется селективный микровольтметр В6-9 с селективными диапазонами частот от 20 Гц до 200 Гц (первая рабочая область частот), от 200 Гц до 2 кГц (нормальная область частот) и от 2 кГц до 100 кГц (вторая рабочая область частот). В рамках решаемых задач испытания деталей проводились в диапазоне от 500 Гц до 1200 Гц, который соответствовал собственным частотам колебаний данных изделий. Соответственно измерения напряжения проводятся в диапазоне нормальной области частот.

Динамическая тарировка осуществляется путем установки тарировочной балки на стол вибростенда (рис. 2), частота колебаний вибростола должна соответствовать первой частоте собственных колебаний балки, что позволяет фиксировать прогиб свободного конца балки с помощью катетометра (оптического прибора для измерения линейных размеров).

Тарировочная балка представляет собой стержень постоянного поперечного сечения. Аналитическое решение задачи по определению частоты собственных колебаний системы может быть получено по формуле Рэлея. В качестве функции, описывающей перемещения стержня при колебаниях, выберем кривую статического изгиба, вызываемого равномерно распределенной нагрузкой:

$$X(x) = \frac{mgl^4}{8EI} \left(1 - \frac{4x}{3l} + \frac{x^4}{3l^4} \right).$$

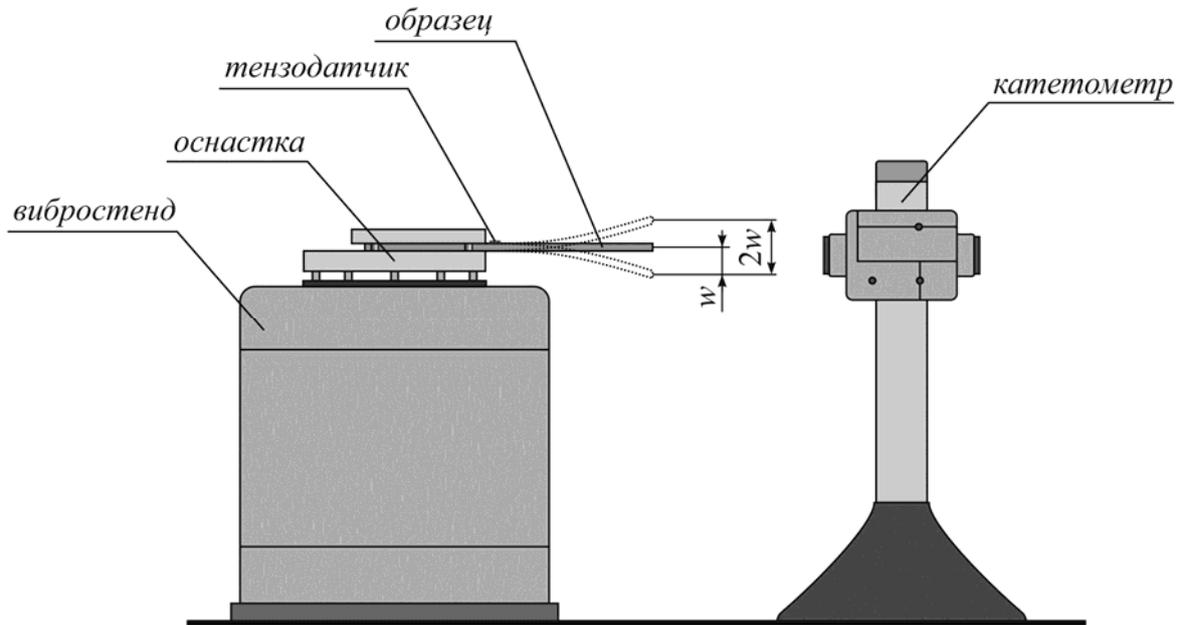


Рис. 2. Схема испытаний для тарировки

При этом учитывая

$$\int_0^l mX dx = \frac{m^2 gl^5}{20EI};$$

$$\int_0^l mX^2 dx = \frac{13m^3 g^2 l^9}{3240(EI)^2}.$$

Получим

$$p^2 = g \frac{\int_0^l mX dx}{\int_0^l mX^2 dx} = \frac{162EI}{13ml^4},$$

т. е. значение первой собственной частоты

$$p = \frac{3,53}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}.$$

Частота собственных колебаний балки должна укладываться в диапазон 200 Гц – 1,5 кГц, что обусловлено взаимным пересечением диапазонов частот испытываемых деталей, диапазона селективного вольтметра и вибростенда.

По полученным соотношениям была подобрана стальная балка длиной 130 мм и поперечным сечением 45×5 мм. Частота собственных колебаний такой балки составляет 243,9 Гц по приведенным ранее аналитическим соотношениям.

На рис. 3 показана тарировочная балка, деформированная по первой изгибной форме, полученная путем анализа трехмерной модели балки с учетом геометрических особенностей реальной балки (наличие фасок и т. д.). Частота собственных колебаний балки составляет 252,13 Гц, что хорошо согласуется с полученными экспериментально с помощью контролирующих датчиков акселерометров результатами – 250,7 Гц и 257,2 Гц на двух идентичных балках.



Рис. 3. Амплитуды перемещений тарировочной балки

Материальное обеспечение эксперимента. Испытуемый образец представляет собой стальную балку длиной 130 мм и поперечным сечением 45×5мм. Измерение перемещений осуществляется с помощью катетометра (см. ч. II, п. 1.8), а измерение напряжений в балке – с помощью тензодатчиков (см. ч. II, п. 1.5). Управление и контроль частот осуществляется с помощью датчиков-акселерометров, установленных на вибростоле (см. ч. II, п. 2.6) и у основания испытуемого образца.

Порядок проведения эксперимента. Рассчитывают с помощью аналитических соотношений величину ЧСК испытуемого образца. Устанавливают образец на вибростол. Вычисляют предельные значения амплитуд таким образом, чтобы при возникновении резонанса наибольшие напряжения в балке не превышали $0,5\sigma_T$ ее материала.

Устанавливают датчики-акселерометры и производят нагружение детали путем сканирования частот в прямом и обратном направлении. Фиксируют значения резонансных частот.

На рис. 4 показан график процесса поддержания резонанса в автоматическом режиме на одном из опытных образцов. Процесс испытаний контролируется с помощью как минимум двух одноосных датчиков акселерометров. Управляющий датчик установлен на вибростоле, а датчик, по которому контролируется резонанс – около испытываемой детали.

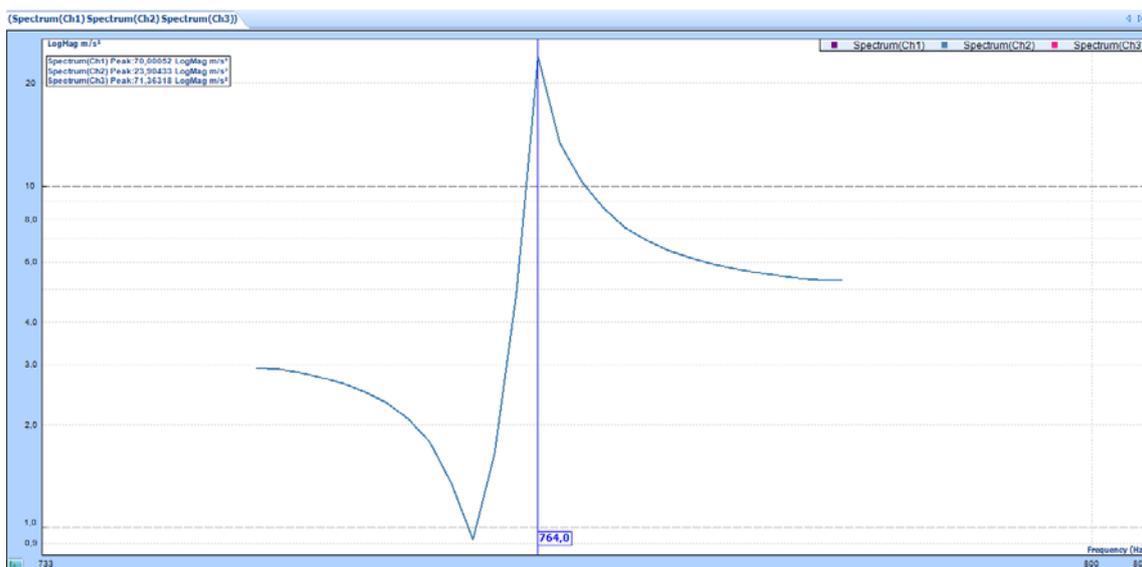


Рис. 4. Процесс автоматического поддержания резонанса при испытании образцов лопаток

Обработка результатов эксперимента. Сравнивают ЧСК, полученные расчетным и экспериментальным путем. Определяют расхождение ЧСК с теоретическими значениями на прямом и обратном сканировании частот.

Составление отчета. В отчете указывается наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год. Эскизируется схема испытаний и параметры испытываемых образцов. Заносят результаты опыта, теоретических расчетов, делают выводы о проведенном эксперименте.

Контрольные вопросы

1. Для чего нужна динамическая тарировка?
2. Почему усталостные испытания деталей производят путем их введения в резонанс?
3. Почему частоты собственных колебаний образца отличаются при их вариации на вибростенде частот с увеличением и уменьшением частоты?

РАБОТА № 15ф

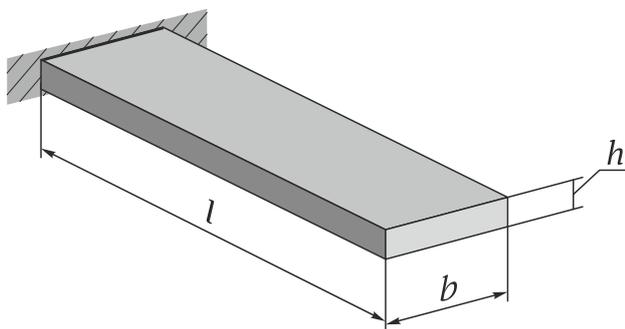
Изучение резонансных явлений при упругих колебаниях

Цель работы. Освоение методики проведения вибрационных испытаний методом качающейся частоты в области резонансных частот для изделий, резонансные частоты которых находятся в диапазоне частот требований в соответствии с ГОСТ 30630.1.2-99.

Исследование процесса вибрационного возмущающего нагружения образцов для определения опасных с точки зрения прочности резонансных частот.

Приобретение навыков экспериментального определения частот собственных колебаний консольно закрепленных образцов.

1. Организация опыта



Испытуемый образец

Размеры образца

<i>l</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>h</i> , мм

Теоретические значения частот собственных колебаний, Гц

ν_{1T}	ν_{2T}	ν_{3T}	ν_{4T}	ν_{5T}	ν_{6T}

2. Результаты опыта

Экспериментальные значения частот собственных колебаний, Гц

Прямой ход с возрастанием частоты					
ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5	ν_6
Обратный ход с убыванием частоты					
ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5	ν_6

Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями, $\delta = \frac{\nu_{1T} - \nu_1}{\nu_{1T}} 100\%$

Прямой ход с возрастанием частоты					
Обратный ход с убыванием частоты					

3. Выводы

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

РАБОТА № 16ф

Испытание материалов при переменных напряжениях

Цель работы. Освоить методику определения количественных характеристик сопротивления усталости. Получение навыков проведения усталостных испытаний материалов при многоцикловом нагружении и использовании машин для создания переменных напряжений. Получить навыки проведения эксперимента по определению долговечности образца.

Краткие теоретические сведения. Многие детали машин в процессе работы испытывают действие переменных во времени напряжений: если эти напряжения превышают определенный уровень, то в материале детали начинают происходить необратимые изменения, которые по мере накопления числа циклов действия переменных напряжений приводят к образованию трещины. Трещина постепенно развивается и, наконец, приводит к внезапному разрушению детали. Причем разрушение детали возможно при напряжениях значительно меньших, чем в случае, когда они неизменны. Это явление называется усталостью металла, а свойство детали выдерживать, не разрушаясь, переменные напряжения называется выносливостью.

На рис. 1, а изображен асимметричный цикл переменных напряжений, где σ_{\max} – наибольшие напряжения цикла; σ_{\min} – наименьшие напряжения цикла; σ_m – средние напряжения цикла; σ_a – амплитудные напряжения цикла.

Отношение $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ называется коэффициентом асимметрии цикла. Любой цикл (рис. 1, б) может быть представлен как результат наложения постоянного напряжения σ_m на изменяющееся напряжение с амплитудой σ_a .

Режим испытания материалов на усталость под действием циклических нагрузок (напряжений) заданной амплитуды называют мягким, режим испытаний, когда постоянной является амплитуда деформации, – жестким.

Механизм процесса усталостного разрушения металлов тесно связан со структурной неоднородностью материала, заключающейся в случайных вариациях размеров и очертаний отдельных зерен, направлении их кристаллографических плоскостей, наличии различных фаз, включений, дефектов кристаллической решетки и т. д. Вследствие данной неоднородности при переменных напряжениях,

даже не превышающих предел пропорциональности, в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах возникает переменная пластическая деформация, которая связана с циклическими деформациями сдвига по определенным кристаллографическим плоскостям. Первые мини-сдвиги появляются в отдельных зернах уже на ранних стадиях нагружения, составляющих по числу циклов 1–10 % от общей долговечности образца до разрушения.

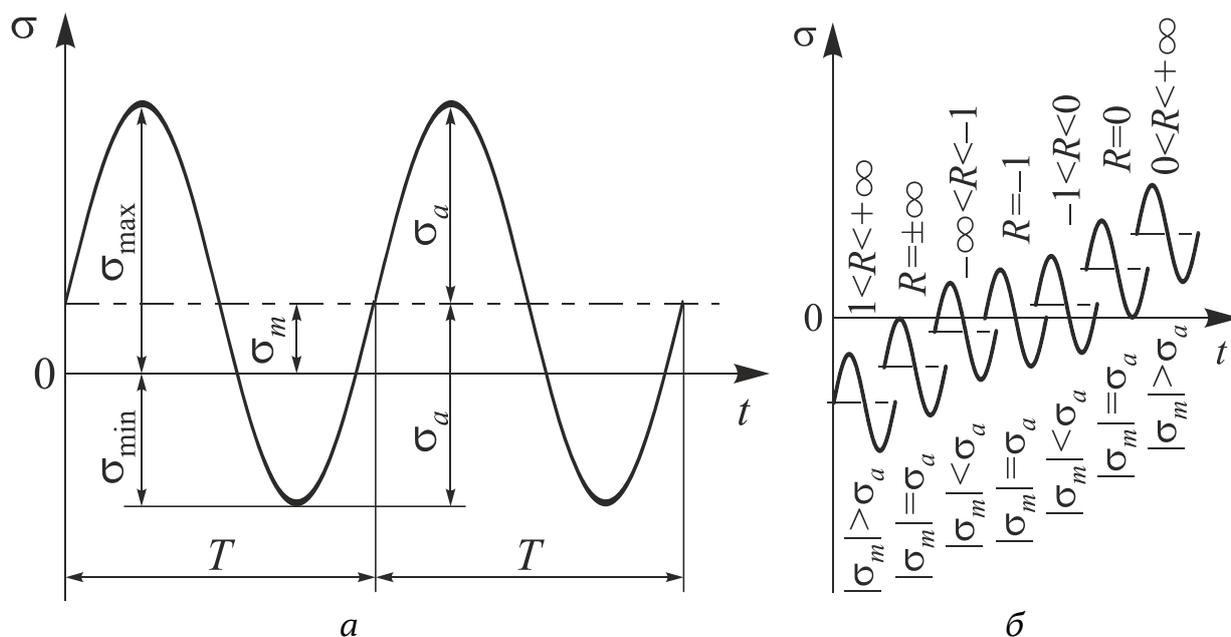


Рис. 1. Циклы переменного нагружения

По мере накопления числа циклов количество линий сдвига увеличивается, они расширяются и переходят на другие зерна. При этом циклическая пластическая деформация и образование линий сдвига происходит почти во всех зернах металла. Из-за устойчивых следов сдвига, а также вследствие других механизмов, как правило, на поверхности образца зарождается начальная макроскопическая трещина усталости. Малую локальную зону, близкую к месту, где образовалась первая трещина и откуда началось ее развитие, называют фокусом усталостного излома.

На рис. 2 приведена схема усталостного излома, на которой показаны основные характерные зоны и признаки, позволяющие отличить усталостный излом от других видов излома (хрупкого, вязкого в условиях статического разрушения и др.). Обычно фокус излома располагается на поверхности в местах концентрации напряжений или поверхностных дефектов в виде царапин, трещин и т. п. При

наличии внутренних дефектов и при поверхностном упрочнении фокус излома может располагаться и на некоторой глубине от поверхности.

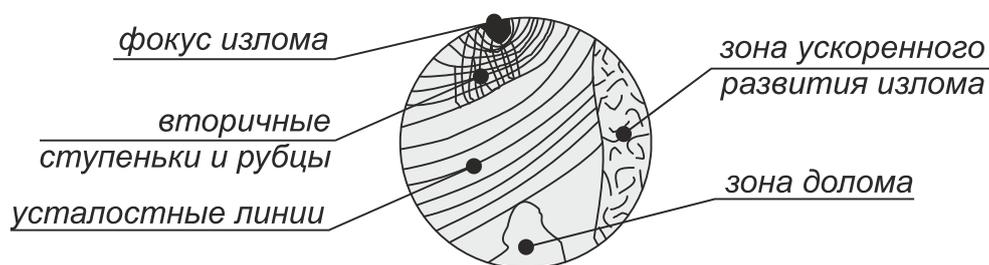


Рис. 2. Схема усталостного излома

Многоцикловая усталость. Для определения характеристик сопротивления усталости лабораторных образцов или деталей из данного материала проводят их усталостные испытания. Основные понятия, определения и методика усталостных испытаний регламентированы ГОСТ 25.502-79.

Характер изменения напряжений во времени при стандартных испытаниях близок к гармоническому. Напряжения являются суммой постоянного (среднего) напряжения и напряжения, меняющегося по синусоиде с амплитудой σ_a (рис. 1, а). Циклом напряжений называют совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения.

Для каждого материала и вида напряженного состояния существует такое наибольшее напряжение цикла, которое материал выдерживает, не разрушаясь, сколь угодно большое (или достаточно большое наперед заданное) число циклов нагружений. Это напряжение называется пределом усталости или пределом выносливости и обозначается σ_R .

Для проведения усталостных испытаний используются специальные усталостные машины. По способу возбуждения нагрузок в испытуемом объекте усталостные машины можно разделить на механические, гидравлические, электромеханические, пневматические, по виду нагружения образца – машины для испытаний при изгибе, кручении, растяжении-сжатии, сложном напряженном состоянии, а также универсальные.

Чтобы получить характеристики сопротивления усталости согласно ГОСТ 25.502-79 необходимо провести испытания не менее

10 одинаковых образцов. На рис. 3 представлена схема машины для испытаний при консольном изгибе с вращением.

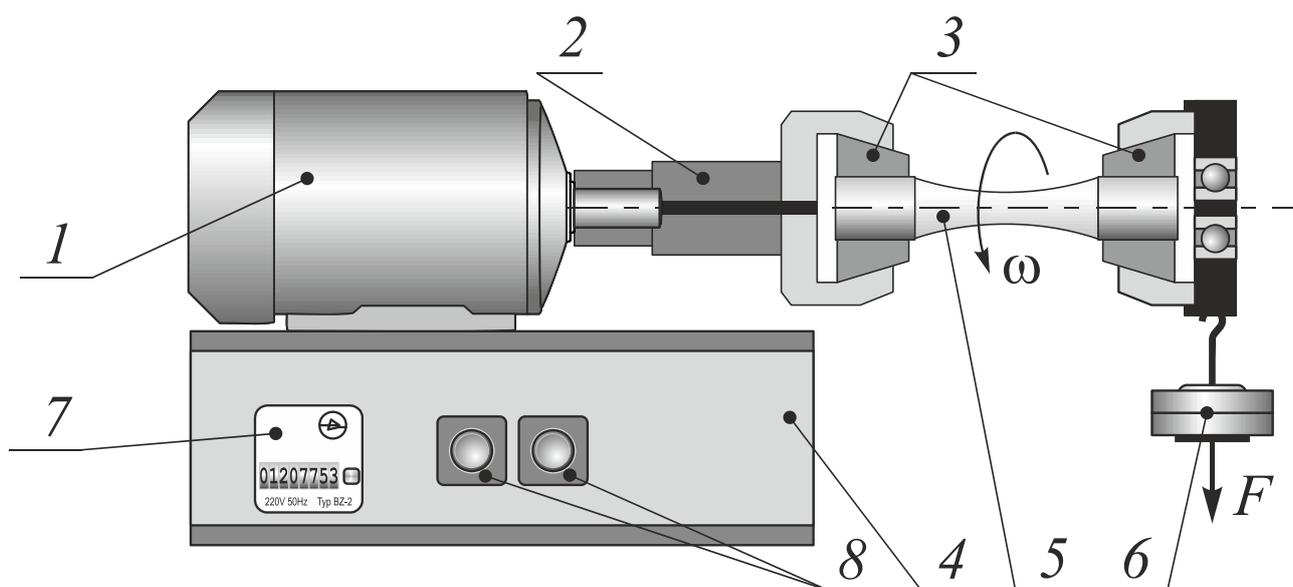


Рис. 3. Схема установки для консольного изгиба с вращением:

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – цанговые захваты;
- 4 – станина; 5 – испытуемый образец; 6 – грузы;
- 7 – счетчик циклов; 8 – кнопки «пуск» и «останов»

Первый образец испытывают обычно при амплитуде напряжений σ_a , составляющей (0,65–0,75) $\sigma_{пч}$, и при этом фиксируют число циклов до его разрушения. Постепенное снижение амплитуды напряжений приводит к повышению долговечности образца, под которой понимается число циклов до разрушения (или до появления трещины определенных размеров).

На рис. 4, а представлена кривая усталости (кривая Веллера), на рис. 4, б – кривая усталости лабораторных образцов из легированной стали при изгибе с вращением.

Образец № 6 (рис. 4, б) при $\sigma_a = 350$ МПа проработал без разрушения 10^7 циклов (чему соответствует непрерывная работа усталостной машины в течение 56 часов при частоте вращения шпинделя $n = 3000$ об/мин). В процессе более длительных испытаний было установлено, что в условиях нормальных температур и отсутствия коррозии образцы из сталей малой и средней прочности ($\sigma_{пч} < 1000 \div 1200$ МПа), титановые сплавы не разрушаются при $N = 10^7$, не разрушаются и далее. Поэтому испытания этих образцов можно прекратить при $N = 10^7$ циклов в том случае, если они не раз-

рушились. Соответствующая точка на графике в этом случае снабжается стрелкой.

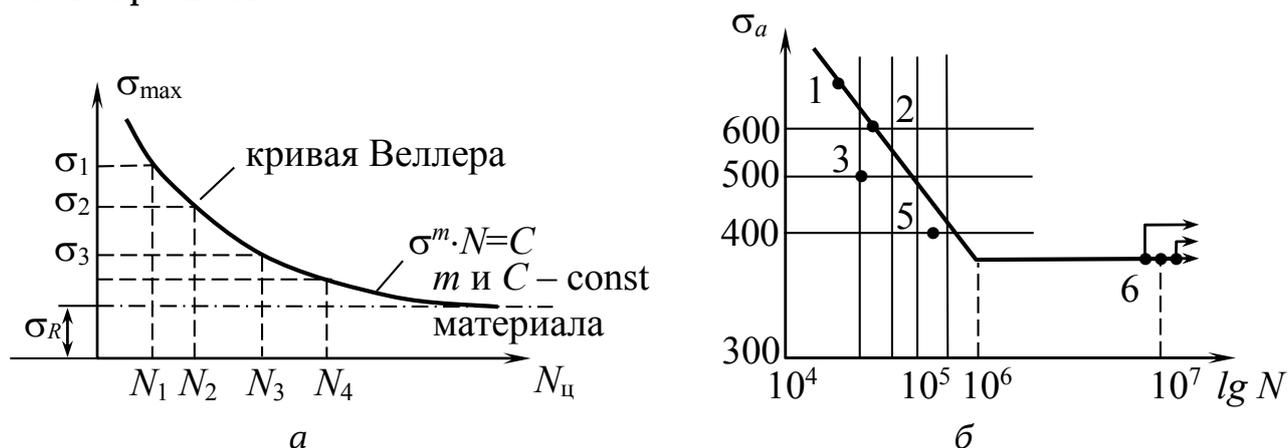


Рис. 4. Кривые усталости

Предварительно задаваемое число циклов напряжений, до которого образцы испытывают на усталость, называют базой испытания и обозначают N_6 . В данном случае $N_6 = 10^7$ циклов.

Не для всякого материала и не при всяком напряженном состоянии кривая выносливости имеет горизонтальный участок (цветные сплавы, высоколегированные стали) в условиях контактных напряжений, высоких температур, коррозионной среды и т. д. В этом случае для определения предела усталости принимается определенное базовое число циклов, для цветных сплавов $N = (50 \div 100) \cdot 10^6$ циклов.

Материальное обеспечение эксперимента. Сервогидравлическая разрывная машина Instron 8801 (см. ч. II, п. 2.5), установки для консольного изгиба с вращением (см. ч. II, п. 3.7), измерительные средства (см. ч. II, пп. 1.2, 1.6), устройства тензометрирования (см. ч. II, п. 1.5), персональный компьютер, программное обеспечение Instron Bluehill, Instron DAX, Fasttrack Console.

Порядок проведения эксперимента. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в журнал испытаний. Установить характер разрушения образцов при многоцикловом нагружении. Определить характеристики сопротивления усталости.

Для многоцикловых испытаний на изгиб с вращением спроектирована установка. Принципиальная схема функционирования и составных элементов данной установки показана на рис. 5. Образец устанавливают в цанговые захваты машины, после чего его центрируют. Для измерения радиального биения на станине смонти-

рована штанга с индикатором часового типа. Установленный образец проворачивают и измеряют величину отклонения, выбирая радиальные отклонения компенсирующими пластинками.

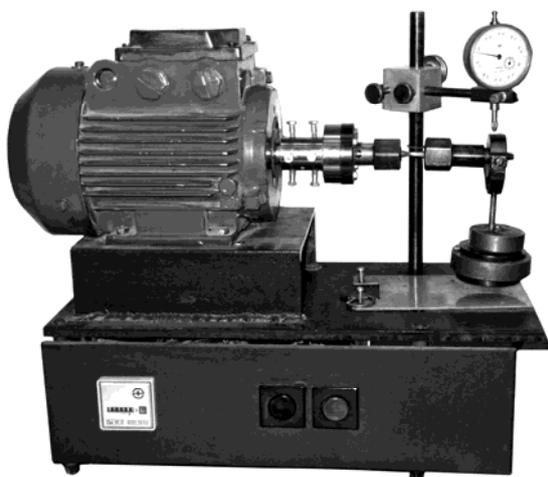


Рис. 5. Установка для усталостных испытаний

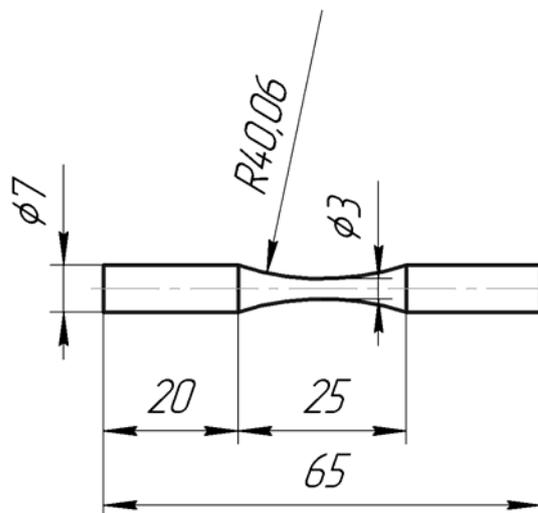


Рис. 6. Гладкие образцы для усталостных испытаний

Испытания образцов проводятся в условиях изгиба с вращением с частотой $f = 50$ Гц, при симметричном цикле нагружения и базе испытаний $N_6 = 10^7$ в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Вид гладких образцов представлен на рис. 6. Рабочую поверхность цилиндрических гладких образцов для усталостных испытаний подвергают шлифовке и механической полировке с обеспечением шероховатости $Ra = 0,63$ мкм.

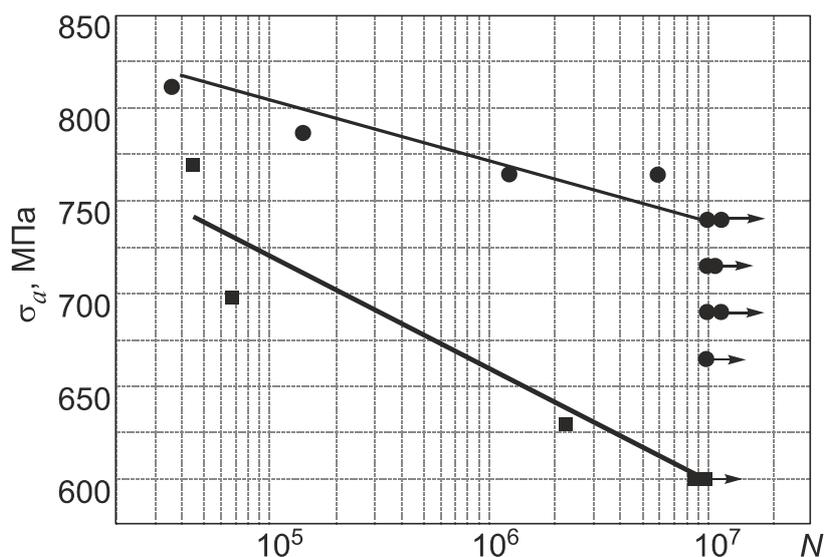


Рис. 7. Результаты усталостных испытаний гладких образцов:
 ● - УМЗ Ti-6Al-4V ELI; ■ - крупнозернистый титан

Обработка результатов эксперимента. По результатам испытаний строятся кривые усталости. Пример усталостных испытаний ультрамелкозернистого сплава и его крупнозернистого состояния после горячей прокатки приведен на рис. 7. Усталостные испытания гладких образцов из УМЗ Ti-6AL-4V были проведены на прутках, полученных по отработанной для этого сплава технологии, включающей равноканальное угловое прессование, теплую экструзию и отжиг при 500 °С, 2 часа. Образцы достигли предела выносливости 740 МПа после 10^7 циклов испытаний.

Составление отчета. На титульном листе отчета указывается наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы.

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. По полученным экспериментальным данным строятся кривые усталости. Характер разрушения материала показывают в виде эскизной зарисовки либо в виде фотографического изображения. В заключении анализируют результаты, проводят сравнение предела выносливости материала с данными, полученными в исследованиях других авторов либо приведенными в справочной литературе, делают выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под усталостью материала?
2. Что понимается под выносливостью материала?
3. Какие характеристики применяются для оценки сопротивления усталости?
4. Что представляет собой предел выносливости?
5. В чем разница между мягким и жестким нагружением?
6. Как выбирается база испытаний?
7. В каких случаях кривая усталости не имеет выраженного горизонтального участка?
8. Каковы основные параметры цикла нагружения?
9. Понятие кривой усталости, ее параметры.
10. Каковы основные схемы нагружения образцов при усталостных испытаниях? Виды образцов?
11. Методика определения предела выносливости.

РАБОТА № 17ф

Исследование усталостной прочности материалов при малоцикловом нагружении

Цель работы. Освоение методики малоцикловых усталостных испытаний при мягком и жестком нагружении и получение навыков определения усталостной прочности элементов конструкций. Приобретение навыков определения количественных характеристик сопротивления малоциклового усталости.

Краткие теоретические сведения. Если многоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании, то малоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упруго-пластическом деформировании.

Сопротивление малоциклового усталости еще называют статической выносливостью, так как малоцикловая усталость реализуется в технике, как правило, при статическом или квазистатическом циклическом нагружениях. В книге Н. И. Марина «Статическая выносливость элементов авиационных конструкций» малоцикловая усталость описывается как процесс накопления знакопеременных локальных пластических деформаций и изучено влияние на статическую выносливость условий нагружения и конструктивно-технологических факторов, характерных для самолетостроения, а также рассмотрен ряд методических вопросов.

Жесткое нагружение реализуется в конструкциях не только в виде циклов температурных напряжений. Условия жесткого нагружения характерны для работы материала в зоне концентрации напряжений подавляющего большинства элементов авиаконструкций. В этих зонах предел упругости часто превышает, результатом чего являются пластическая деформация и внутренние остаточные напряжения, образующиеся при разгрузке из-за действия упругодеформированных материалов элемента на небольшие участки пластически деформированного металла. Эти остаточные напряжения имеют знак, обратный напряжениям от внешней нагрузки. Поэтому и при мягком циклическом нагружении элемента конструкции реализуется жесткое нагружение небольших наиболее напряженных участков материала в зонах концентрации напряжений. Так работает большинство потен-

циально опасных (в отношении усталости) элементов планера самолета.

В машиностроении малоцикловая усталость часто определяет ресурс (долговечность) изделий в связи с повторением циклов «запуск – работа – останов». Характерный пример – диски авиационных двигателей, испытывающих $(5-10) \times 10^3$ выходов на максимальную частоту вращения, при которой напряжения приближаются к пределу текучести материала.

Обычно разрушения малоцикловой усталости происходят при числе циклов повторения нагрузки $N < 10^5$.

Малоцикловая усталость имеет много общего с обычной усталостью, но отличается от нее наличием макропластических деформаций в зоне излома. Как и при многоциклового усталости, разрушение начинается в местах концентрации напряжений в результате развития первоначально образовавшейся трещины. Однако механизм малоциклового разрушения значительно отличается от многоциклового разрушения, так как пластические деформации возникают и в значительно больших объемах материала.

В частности, различие сказывается в том, что сопротивление материалов малоциклового усталости существенно зависит от их пластичности, тогда как подобная зависимость для обычной усталости проявляется слабо.

Для многих деталей машин, таких как котлы под давлением, механизм шасси самолета и силовые части оружия, долговечность составляет всего несколько сотен или тысяч циклов. Механизм разрушения при этих условиях отличается от усталостного разрушения для больших долговечностей.

Процессы образования и развития трещин малоциклового нагружения в общем случае протекают на фоне накопления однонаправленных и циклических пластических деформаций, причем описание ведется на основе соответствующих критериев малоциклового разрушения. Нестационарность упругопластических деформаций при малоцикловом нагружении определяет условия достижения предельных состояний элементов конструкций и соответственно их несущую способность.

При обычной усталости в качестве характеристики нагруженности используются переменные напряжения цикла. Переменные

деформации, возникающие при действии переменных напряжений в упругой области, однозначно определяются соотношением

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \sigma_a, \quad (1)$$

где ε_a – амплитуда переменных деформаций; E – модуль упругости; σ_a – амплитуда переменных напряжений.

Для описания поведения в малоцикловой области необходимо установить связь между напряжением и деформацией. Эксперименты показали, что за пределом упругости эта связь при циклическом нагружении отличается от диаграммы деформирования при однократном нагружении.

Закономерности циклического упругопластического деформирования и разрушения устанавливаются по результатам испытаний образцов при однородном напряженном состоянии – растяжении-сжатии или кручении тонкостенных трубок.

При малоцикловой усталости, наблюдающейся в упругопластической области при процессах нагружения и разгрузки, зависимость

$$\varepsilon_a = f(\sigma_a) \quad (2)$$

имеет значительно более сложный характер, а для материалов с отсутствующим или очень малым упрочнением она практически не является однозначной. На рис. 1, а показаны два цикла деформаций с переменным напряжением

$$\sigma_{a1} = \sigma_{a2} = \sigma_T. \quad (3)$$

Для материала с пластическим упрочнением (рис. 1, б) наибольшие изменения амплитуды переменных напряжений (от σ_{a1} до σ_{a2}) приводят к значительным изменениям амплитуды переменных пластических деформаций (циклы $0BB_1A_1AB$ и $0CC_10_10C$). Указанные соотношения обосновывают целесообразность использования при анализе малоцикловой усталости переменных деформаций в качестве характеристик нагруженности. Для пластически упрочняющихся материалов возможно описание малоцикловой усталости с помощью переменных напряжений.

Разработано несколько подходов к определению диаграмм циклического деформирования: одна из них предложена Д. Морроу. При упругопластическом деформировании наблюдается петля гистерезиса, которая после некоторого числа циклов (от нескольких единиц до нескольких сотен) стабилизируется.

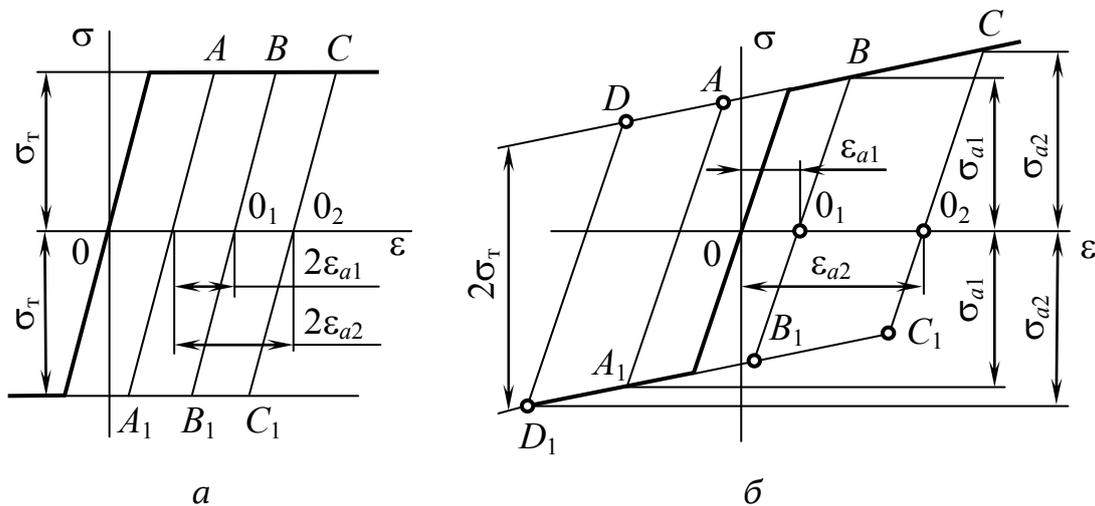


Рис. 1. Циклы напряжений и деформаций на диаграммах деформирования

Если получить серию таких стабилизированных петель гистерезиса, соответствующих разным размахам деформации цикла, можно построить диаграмму циклического деформирования, представляющую собой геометрическое место вершин петель гистерезиса (рис. 2).

Кривые циклического деформирования в зависимости от состава сплава могут располагаться выше и ниже диаграммы циклического деформирования при однократном растяжении.

Диаграммы циклического деформирования некоторых материалов сохраняются стабильными в течение всего циклического нагружения. Такие материалы называют циклически стабильными. Для многих материалов эти диаграммы могут изменяться с изменением числа циклов. Если кривые деформирования становятся по мере наработки круче, материал принято считать упрочняющимся, если отложе – разупрочняющимся. Это свойство сплава в сильной степени определяется химическим составом, структурой, текстурой, степенью нагартовки и т. п., а также температурными условиями циклического нагружения.

Для циклически упрочняющегося материала характерно уменьшение ширины петли гистерезиса и увеличение циклического напряжения (рис. 3, а) для циклически разупрочняющегося материала

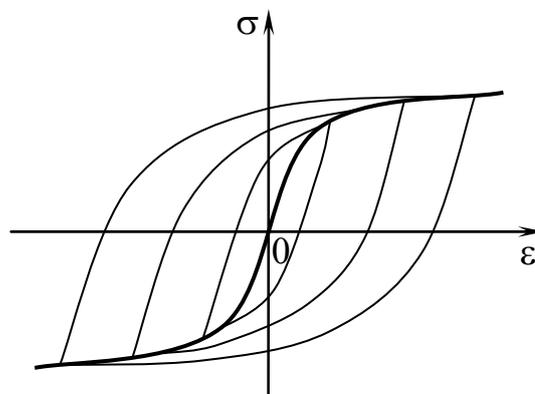


Рис. 2. Диаграмма циклического деформирования

характерно расширение петли гистерезиса и снижение циклического напряжения (рис. 3, б).

Эти изменения обычно происходят на первых циклах деформирования. Затем петли гистерезиса стабилизируются.

При мягком нагружении может происходить одностороннее накопление деформации от цикла к циклу. При жестком – это исключено. Накопление повреждений и характер разрушения связаны с указанными особенностями процесса деформации.

Одностороннее накопление деформации растяжения приводит к так называемому квазистатическому разрушению, когда образуется шейка, и деформация достигает критического значения $\varepsilon_{кр}$, соответствующего истинному удлинению при разрыве.

Циклическое изменение деформации, характеризуемое шириной петли гистерезиса, определяет усталостное повреждение и разрушение.

Циклическое деформирование ведет к проявлению давно известного эффекта Баушингера, заключающегося в изменении величин пределов упругости и текучести после деформирования металла за предел текучести. Превышение предела текучести при растяжении имеет следствием снижение пределов упругости и текучести при сжатии, и наоборот, пластическое сжатие снижает сопротивление пластической деформации при растяжении. Поэтому технологические операции, сопровождающиеся значительной пластической деформацией, например правка, могут очень сильно изменить величины предела упругости и текучести материала. Отметим в этой связи, что для разупрочняющихся материалов циклический предел текучести может быть заметно ниже, чем при однократном нагружении.

При экспериментальном определении малоциклового прочностного режима используются режимы жесткого и мягкого нагружения. При жестком нагружении задается амплитуда переменных деформаций ε_a или размах деформаций

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min} = 2\varepsilon_a. \quad (4)$$

Жесткое нагружение встречается в элементах конструкций при «принудительной» деформации (например циклический нагрев стержня при жесткой заделке его концов). Жесткое нагружение характерно для работы материала в зонах концентрации напряжений, где приближенно можно считать, что деформация задается смещением границ упругой области.

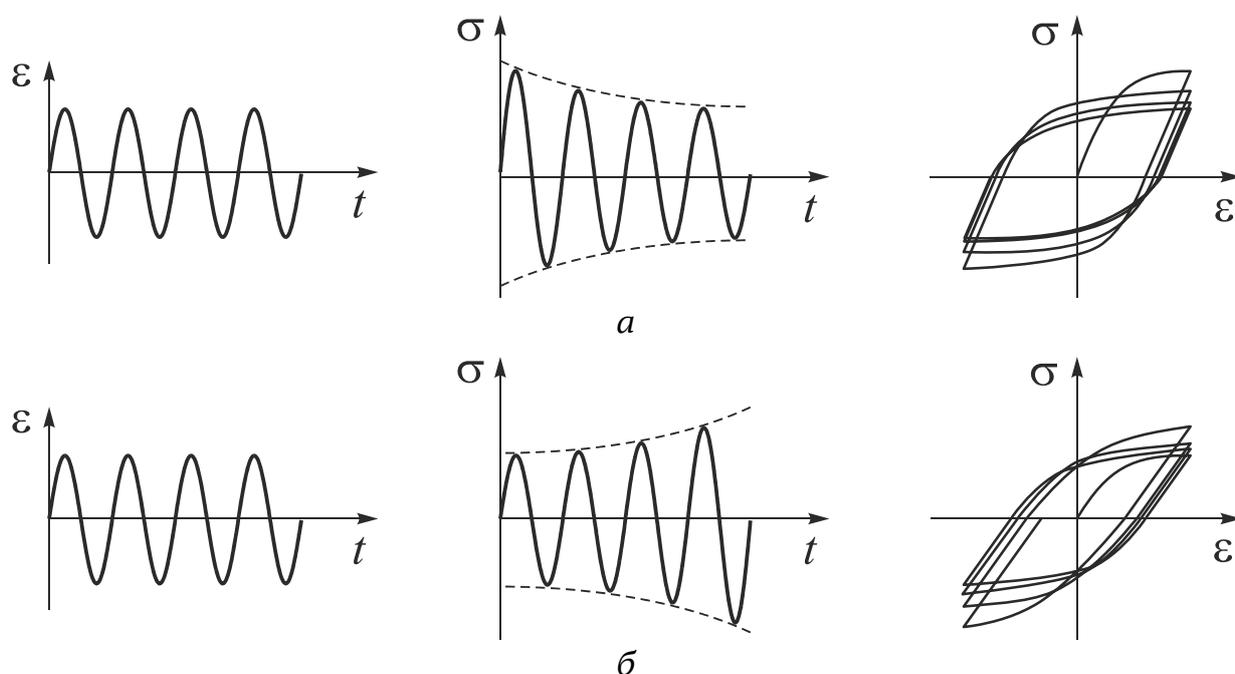


Рис. 3. Диаграмма циклического деформирования: *а* – циклически упрочняющийся материал; *б* – циклически разупрочняющийся материал

При испытаниях в условиях жесткого нагружения измеряется деформация образца. При мягком нагружении происходит циклическое изменение внешней силы, действующей на образец.

Обычно результаты испытаний на малоцикловую усталость графически изображаются в виде зависимости логарифма амплитуды деформации или размаха деформации от логарифма числа циклов до разрушения. Причем было показано, что долговечность в большей степени определяется полной деформацией, а не пластической, особенно в области больших значений долговечности из диапазона малоцикловой усталости.

Малоцикловая усталость зависит от частоты нагружения и формы цикла, поскольку пластическая деформация развивается во времени, что особенно заметно при повышенных температурах.

Материальное обеспечение эксперимента. Сервогидравлическая разрывная машина Instron 8801 (рис. 4) (см. ч. II, п. 2.5), измерительные средства, устройства тензометрирования, персональный компьютер, программное обеспечение Instron Bluehill, Instron DAX, Fasttrack Console.

Порядок проведения эксперимента. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в журнал испытаний. Установить характер разрушения

образцов при малоцикловом жестком и мягком нагружении. Определить характеристики сопротивления малоциклового усталости.

Экспериментальное определение характеристик сопротивления малоциклового усталости проводят на разрывной гидравлической машине Instron 8802 с максимальной нагрузочной способностью 100 кН (рис. 4).

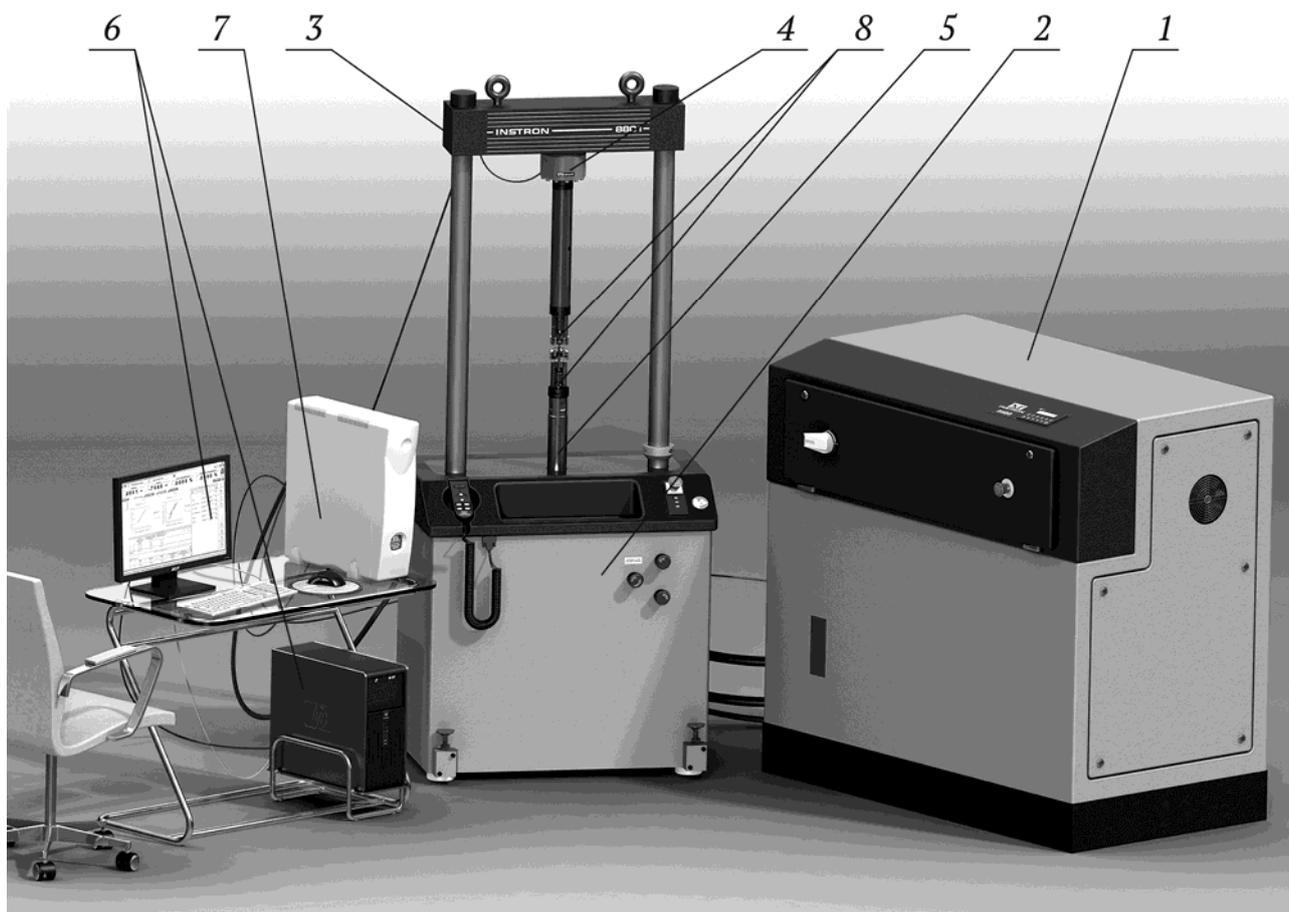


Рис. 4. Испытательная машина Instron 8802: 1 – маслостанция; 2 – нагрузочная рама, неподвижная траверса; 3 – неподвижная (перемещаемая) траверса; 4 – датчик силы; 5 – подвижная траверса; 6 – персональный компьютер с программным обеспечением для управления испытаниями; 7 – контроллер рамы и маслостанции; 8 – захваты

Образцы в соответствии с ГОСТ 25.505-85 в условиях испытаний на растяжение–сжатие выполняют гладкими с рабочей частью круглого сечения. Диаметр рабочей части образца на растяжение–сжатие должен быть не менее 5 мм.

Форма и размеры головок образцов зависят от способа их крепления в захватах испытательных машин. Переходную часть образца

выбирают с учетом достижения минимальной концентрации напряжений и деформаций в переходных зонах.

При склонности цилиндрических образцов к потере устойчивости, изменению формы или разрушению в переходных зонах рекомендуется использовать корсетные образцы. Допускается также применять цилиндрические образцы с укороченной рабочей частью (рис. 5, а).

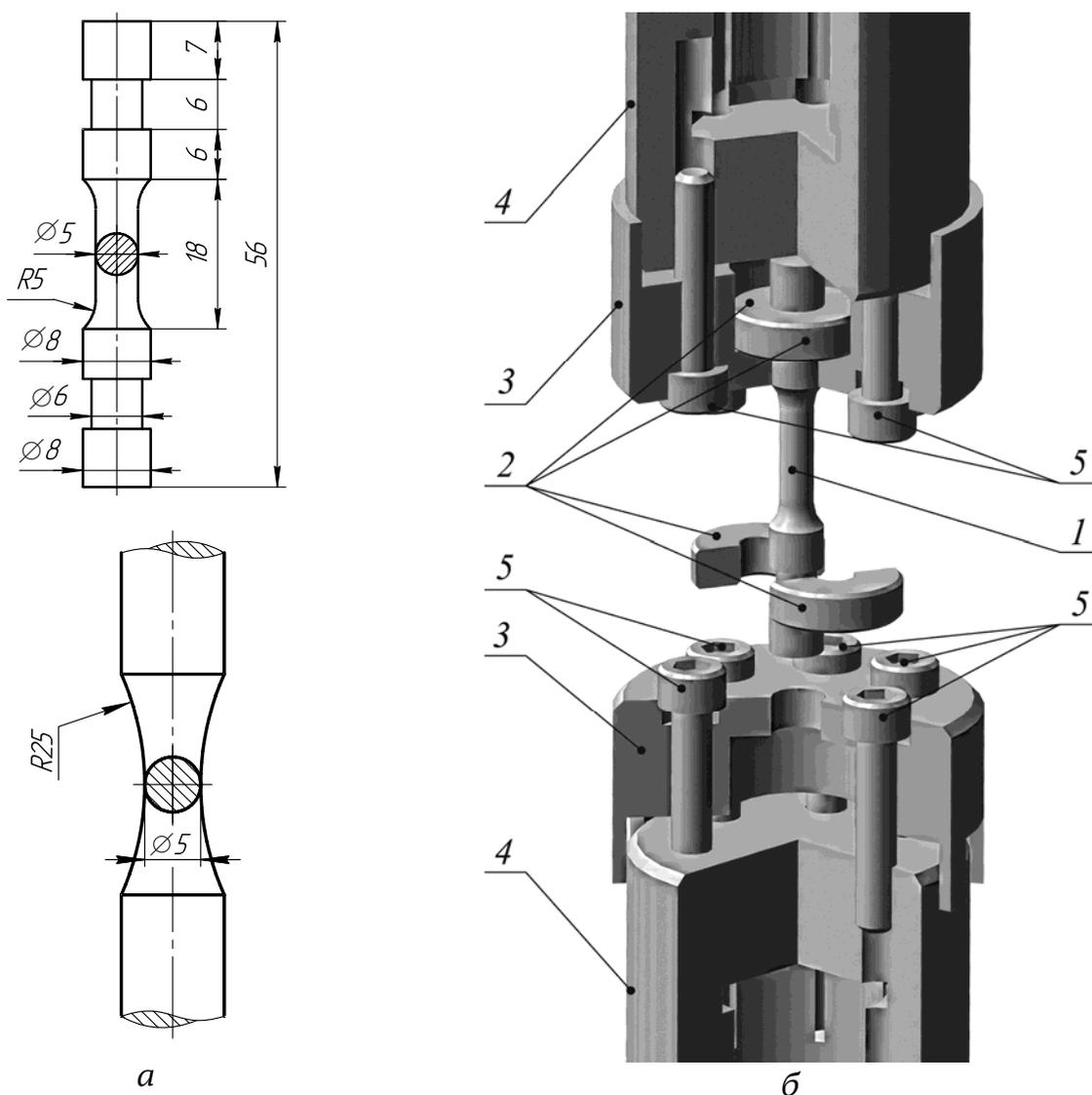


Рис. 5. Образцы для малоцикловых испытаний (а) и оснастка (б) для закрепления образцов в захватах испытательной машины:

1 – образец; 2 – сухарики; 3 – крышки; 4 – переходники; 5 – винты

Основным видом испытаний на малоцикловую усталость является растяжение-сжатие, основным типом нагружения – жесткое нагружение. Испытания проводят до момента образования поверхностной трещины размером 5–10 % от диаметра образца, определяе-

мой с помощью оптического метода или другими способами. Допускается проводить испытания до окончательного разрушения без фиксации появления трещины, когда стадия распространения трещины на заданном режиме не превышает 10 % общей долговечности. Конструктивное оформление узла испытаний для жесткого нагружения показано на рис. 5, б.

При проведении испытаний в жестком режиме нагружения в качестве приближенной оценки допускается принимать число циклов до появления макротрещины, равное числу циклов, соответствующему падению напряжений (нагрузки) в цикле на 50 % по сравнению с установившимся значением.

Обработка результатов эксперимента. По результатам проведения эксперимента строят кривые усталости.

Количество образцов, подлежащих испытанию, определяется в зависимости от дисперсии результатов. Для построения кривой усталости используется 10–12 зачетных результатов не менее чем на четырех разных уровнях.

Результаты испытаний при жестком нагружении образцов из наноструктурного титана показаны на рис. 6, а. Испытания проводились в условиях симметричного цикла растяжения-сжатия. На рис. 6, б приведены результаты испытаний шпилек из наноструктурного чистого титана в сравнении со сплавом ВТ-6 при мягком нагружении, в условиях пульсирующего цикла нагружения.

Составление отчета. На титульном листе отчета указывается наименование образовательного учреждения и его структурного подразделения, наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы обучающегося и шифр группы, фамилия и инициалы преподавателя, дата сдачи преподавателю, учебный год.

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. По полученным данным строят диаграммы малоциклового усталости при мягком и жестком нагружении. Характер разрушения материала показывают в виде эскизной зарисовки либо в виде фотографического изображения. В заключении анализируют результаты, проводят сравнение полученных величин с данными, отраженными в исследованиях других авторов либо приведенными в справочной литературе, делают выводы по работе.

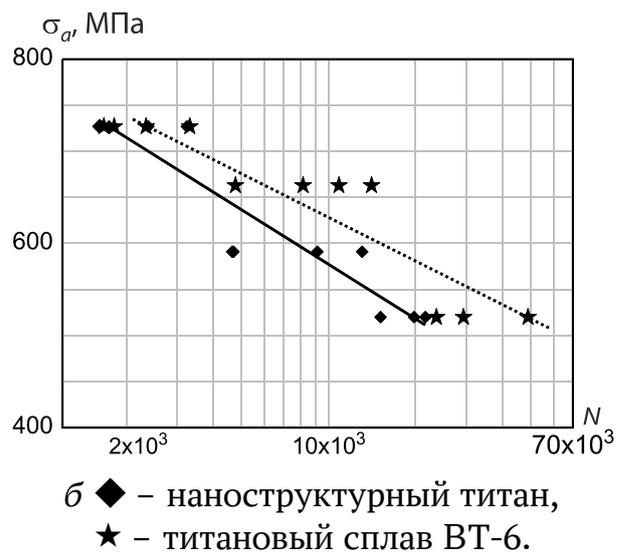
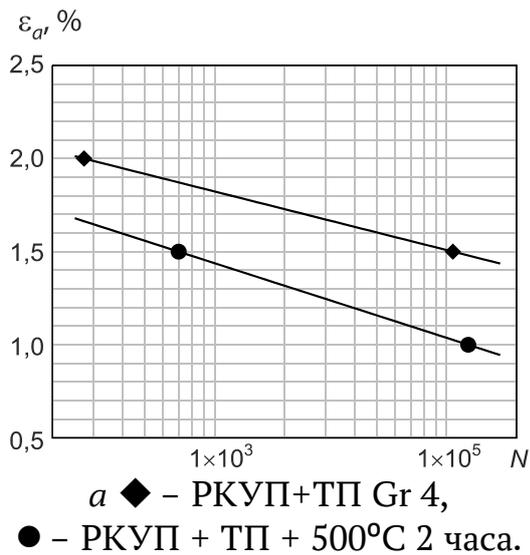


Рис. 6. Результаты малоцикловых испытаний при жестком и мягком нагружении

Контрольные вопросы

1. В чем разница между мягким и жестким нагружением?
2. Почему материалы способны упрочняться, разупрочняться и быть нейтральными к действию переменных нагрузок?
3. В чем разница между малоцикловым и многоцикловым нагружением?
4. Какие конструктивные особенности присущи образцам, используемым для малоцикловых испытаний при симметричном цикле нагружения при растяжении-сжатии?
5. Какова база испытаний при малоцикловом нагружении?
6. Почему малоцикловое нагружение называют статической выносливостью?
7. Каковы основные параметры цикла нагружения?

РАБОТА № 18ф

Экспериментальное определение напряжений и перемещений при ударном нагружении

Цель работы. Экспериментальное определение напряжений и перемещений в балке равного сопротивления изгибу при ударном нагружении. Сопоставление полученных результатов с расчетными по теории энергетического баланса.

Краткие теоретические сведения. Методы расчета элементов конструкций при ударном нагружении представляют собой сложную, многофакторную задачу. Поэтому инженерные методы расчета основываются на приближенных методах, одним из которых является энергетический метод, позволяющий оценить наибольшие значения напряжений и перемещений при действии ударной нагрузки.

Рассмотрим основные положения этого метода на примере падающего на упругий стержень груза, масса которого по сравнению с массой падающего груза в несколько раз меньше (рис. 1).

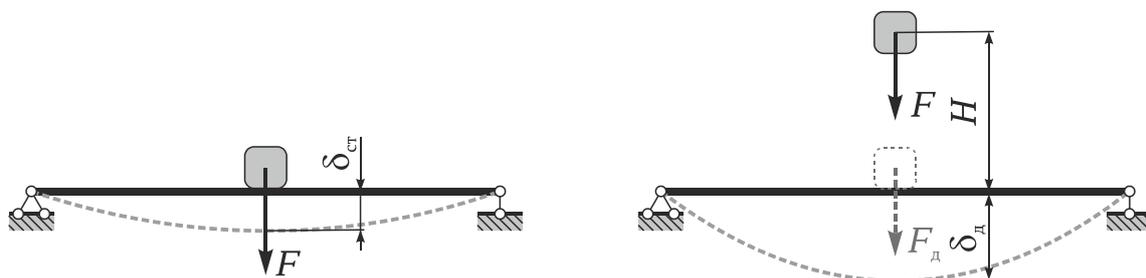


Рис. 1. Деформации балки от статической и динамической нагрузки

Пусть кинетическая энергия падающего груза:

$$T = \frac{mv^2}{2},$$

где m – масса падающего груза; v – скорость падения груза.

Потенциальная энергия, накопленная в ударяемом теле за счет его упругих деформаций:

$$U = \frac{1}{2} F_d \delta_d,$$

где F_d – сила в момент удара; δ_d – перемещение точки приложения динамической силы.

Предполагая, что удар неупругий, то есть вся кинетическая энергия падающего груза переходит в потенциальную энергию упругой деформации получим уравнение энергетического баланса:

$$T = U,$$

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} F_d \delta_d.$$

Поскольку падающий груз проходит до полной остановки путь $H + \delta_d$, получим:

$$v^2 = 2g(H + \delta_d).$$

Подставляем полученное выражение для скорости падения груза в уравнение энергетического баланса:

$$\frac{2mg(H + \delta_d)}{2} = \frac{1}{2} F_d \delta_d.$$

Если процесс ударного нагружения происходит в области упругих деформаций, то статическое и динамическое нагружение оказываются подобны (рис. 2).

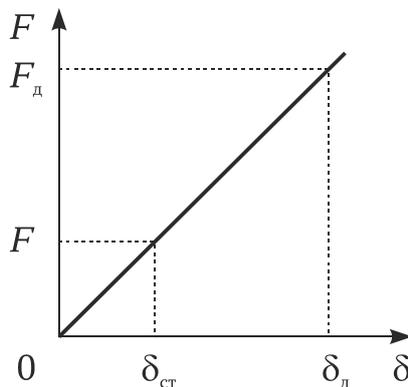


Рис. 2. Подобие динамической и статической деформации

Получаем пропорциональное соотношение между динамическими и статическими силами и перемещениями:

$$\frac{F_d}{F_{ст}} = \frac{\delta_d}{\delta_{ст}}, \quad F_d = F_{ст} \frac{\delta_d}{\delta_{ст}},$$

где $F_{ст} = mg$ – статическая сила от веса приложенного груза; $\delta_{ст}$ – перемещение в точке удара от статически приложенной силы ударяющего груза.

Подставляя полученное соотношение в (2), получим

$$\delta_d^2 - 2\delta_{ст} \delta_d - 2H\delta_{ст} = 0.$$

Откуда

$$\delta_d^2 - 2\delta_{ст} \delta_d - 2H\delta_{ст} = 0.$$

$$\delta_d = \delta_{ст} \pm \sqrt{\delta_{ст}^2 + 2H\delta_{ст}} = \delta_{ст} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}} \right).$$

Величину в скобках принято обозначать коэффициентом динамичности:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g\delta_{ст}}}.$$

Коэффициент динамичности с учетом массы ударяемого тела определяется по формуле

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\alpha\delta_{ст}}}, \quad (1)$$

где

$$\alpha = 1 + \beta \frac{G_{бал}}{F}, \quad (2)$$

где $G_{бал}$ – вес ударяемой балки; F – вес ударяющего груза;

$\beta = \frac{1}{G_{бал}} \int_Q \left(\frac{v_{зст}}{v_l} \right) dG_{бал} = \frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{v_{зст}}{v_l} \right) dz$ – редуцированный коэффициент;

$v_{зст}$ – функция прогиба от статического действия нагрузки;

v_l – значение статического прогиба в точке приложения нагрузки.

Определим значение поправочных коэффициентов, учитывающих вес ударяемой балки, для балки равного сопротивления изгибу. Дифференциальное уравнение упругой линии балки имеет вид:

$$EI_x(z)v'' = M_x(z) = F(z-l).$$

Поскольку балка имеет равное сопротивление изгибу момент инерции меняется по закону $I_x(z) = I_{x0}(z-l)$, тогда дифференциальное уравнение примет вид

$$EI_{x0}v'' = Fl;$$

$$EI_{x0}v = Fl \frac{z^2}{2}.$$

Прогиб балки на ее конце будет составлять:

$$v_l = \frac{Fl^3}{2EI_{x0}} = \delta_{ст}. \quad (3)$$

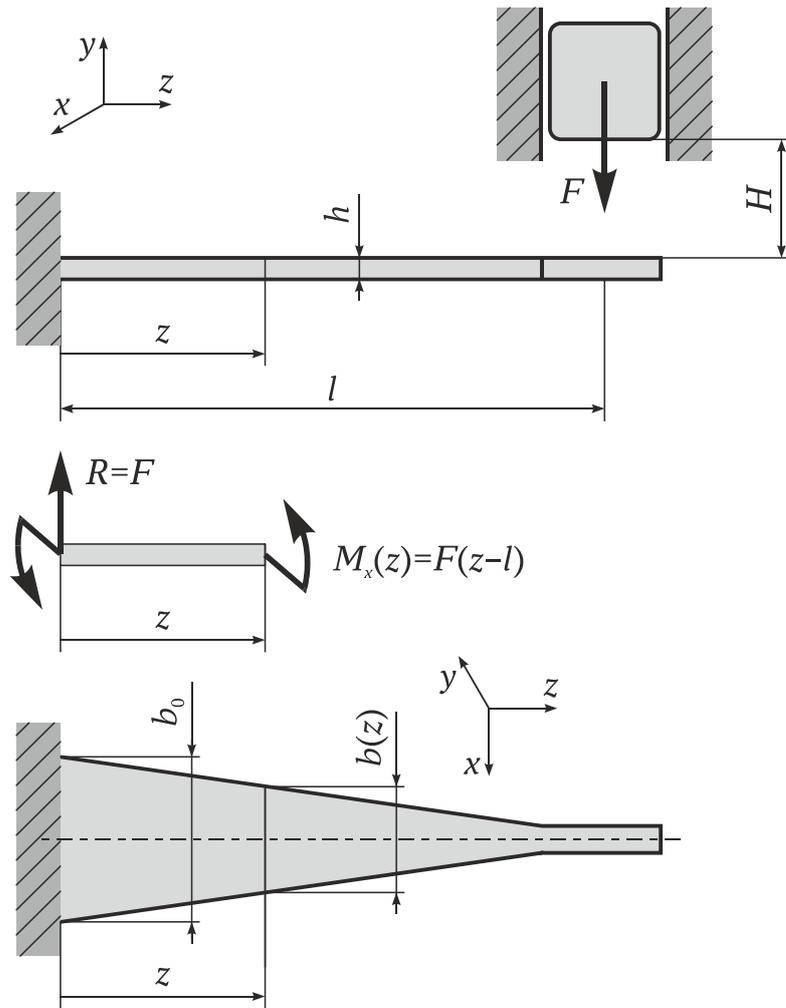


Рис. 3. Консольная балка равного сопротивления изгибу

Отношение функции статического прогиба к статическому прогибу в точке приложения нагрузки

$$\frac{v_z^{\text{ст}}}{v^{\text{ст}}} = \frac{EI_{x0} v_{z\text{ст}}}{EI_{x0} v_l} = \frac{z^2}{l^2}.$$

Определим коэффициент β :

$$\beta = \frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{z^2}{l^2} \right)^2 dz = \frac{1}{l} \frac{z^5}{5l^4} \Big|_0^l = \frac{1}{5}.$$

Динамическое перемещение определяют по формуле:

$$\delta_{\text{д}} = k_{\text{д}} \delta_{\text{ст}}. \quad (4)$$

Динамическую силу определяют по формуле:

$$F_{\text{д}} = k_{\text{д}} F_{\text{ст}}. \quad (5)$$

Нормальные напряжения от изгиба в корневом сечении балки равного сопротивления определяются по формулам для статического и динамического действия силы:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{M_{x0}}{W_{x0}} = \frac{Fl}{\frac{b_0 h^2}{6}} = \frac{6Fl}{b_0 h^2}. \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{д}} = k_{\text{д}} \sigma_{\text{ст}} = k_{\text{д}} \frac{6Fl}{b_0 h^2}. \quad (7)$$

Материальное обеспечение эксперимента. Образец. В качестве объекта исследования принята консольная балка равного сопротивления изгибу, на свободный конец которой вертикально падает груз F с высоты H (рис. 4).

Балка 1 установлена на испытательной установке 2 в массивном узле крепления 3. Нагружающее устройство представляет собой направляющую трубу 4, по которой перемещается падающий груз 5. Удержание груза на заданной высоте происходит с помощью подпружиненных держателей груза 6. Подъем груза осуществляется с помощью лески с кольцом 7. Испытуемая балка, основание, микрометр 11, контакт 10 собраны в единую электрическую цепочку. При подаче питания $\pm 12\text{В}$ на контакты 8 и переводе тумблера питания 9 в положение включено цепь оказывается под напряжением. Замыкание цепи происходит при соприкосновении контакта 10 и балки 1, о чем будет свидетельствовать загорание сигнальной лампы 12.

Порядок проведения эксперимента. Перед испытаниями устанавливают необходимый зазор δ_0 между ножкой микрометра и балкой. Зазор должен быть на несколько миллиметров больше рассчитанного динамического перемещения. Зазор обеспечивают вращением микрометрического винта микрометра. После выставления зазора, подвигают подвижный контакт до соприкосновения с балкой, при этом загорается сигнальная лампа.

Теоретическое определение перемещений. Перемещение в точке приложения силы, соответствующее ее статическому действию на балку, определяют по формуле (3).

При длине балки $l = 410$ мм, ширине балки в месте закрепления $b_0 = 60$ мм, толщине балки $h = 4,8$ мм, модуль упругости балки 210ГПа масса m ударяющего груза $146,5$ г. Определим статический прогиб:

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{Fl^3}{2EI_{x0}} = \frac{mgl^3}{2E \frac{b_0 h^3}{12}} = \frac{6mgl^3}{Eb_0 h^3} =$$

$$= \frac{6 \cdot 146,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (410 \cdot 10^{-3})^3}{210 \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot (4,8 \cdot 10^{-3})^3} = 0,43 \text{ мм.}$$

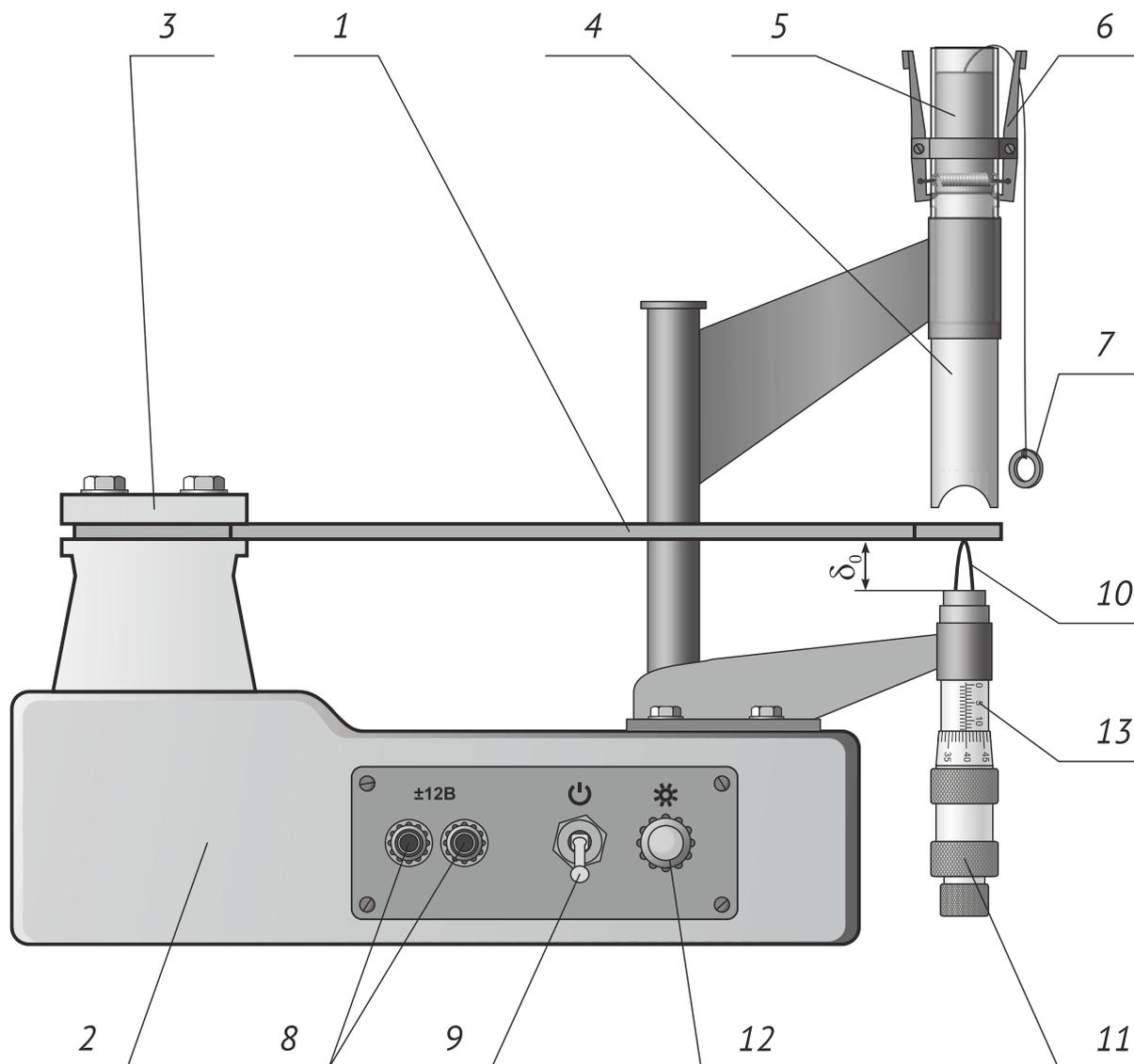


Рис. 4. Принципиальная схема определения перемещений при ударном нагружении: 1 – балка; 2 – корпус установки; 3 – крепление балки; 4 – направляющая трубка; 5 – груз; 6 – держатели груза; 7 – приспособление для возвращения груза; 8 – контакты питания установки; 9 – тумблер включения установки; 10 – контакт; 11 – микрометр; 12 – сигнальная лампа; 13 – шкала микрометра

Масса ударяемой балки $m_{\text{бал}} = 484,5$ г. Коэффициент α определим по формуле (2):

$$\alpha = 1 + \beta \frac{G_{\text{бал}}}{F} = 1 + \beta \frac{m_{\text{бал}} g}{mg} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \frac{484,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81}{146,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} = 1,66.$$

При падении груза с высоты $H = 205$ мм коэффициент динамичности по формуле (1) составит:

$$k_{\text{д}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\alpha \delta_{\text{ст}}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 205}{1,66 \cdot 0,43}} = 24,9.$$

Динамическое перемещение при ударном нагружении:

$$\delta_{\text{д}} = k_{\text{д}} \delta_{\text{ст}} = 24,9 \cdot 0,43 = 10,7 \text{ мм}.$$

Измерение статического перемещения. Для измерения статического перемещения конца балки от ударяющего груза необходимо удерживая груз на весу с помощью приспособления для возвращения груза раскрыть губки держателя груза и плавно опустить груз до соприкосновения с балкой (рис. 5, а), чтобы он подействовал на нее всем своим весом, и балка испытала прогиб от его статического воздействия. Поднять груз и зафиксировать его в держателе. После разгрузки балка вернется в свое первоначальное положение, а между подвижным контактом и балкой образуется зазор (рис. 5, б). Фиксируют расстояние Δ_0 , отображаемое микрометром по шкале микрометра 13, и нимбу на винте. Это расстояние соответствует начальному зазору δ_0 . Затем вращают винт микрометра и доводят подвижный контакт до касания с балкой. При приближении контакта к балке вращение винта замедляют. Момент касания устанавливают по загоранию сигнальной лампы, после чего фиксируют значения расстояния, отображаемые микрометром $\Delta_{\text{ст}}$. По разнице между измеренными расстояниями определяют статический прогиб:

$$\delta_{\text{ст}} = \Delta_0 - \Delta_{\text{ст}}.$$

Измерение динамического перемещения. Измерение динамического перемещения производят после измерения статического. Поэтому вначале необходимо вернуть винт микрометра в исходное положение до обеспечения исходного зазора Δ_0 . После этого возвращают подвижный контакт до соприкосновения с балкой и загорания сигнальной лампы. Разжимают удерживающее устройство, груз падает на балку и перемещает подвижный контакт. Возвращают груз в исходное положение, закрепляя его в удерживающем устройстве

(рис. 5, в). Вращают винт микрометра и доводят подвижный контакт до касания с балкой и загорания сигнальной лампы. Фиксируют значения расстояния, отображаемые микрометром Δ_d . По разнице между измеренными расстояниями определяют динамический прогиб:

$$\delta_d = \Delta_0 - \Delta_d.$$

Обработка результатов эксперимента. По результатам эксперимента вычисляют расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями статических и динамических прогибов:

$$\Delta_\delta = \frac{\delta_{\text{эксп}} - \delta_{\text{теор}}}{\delta_{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

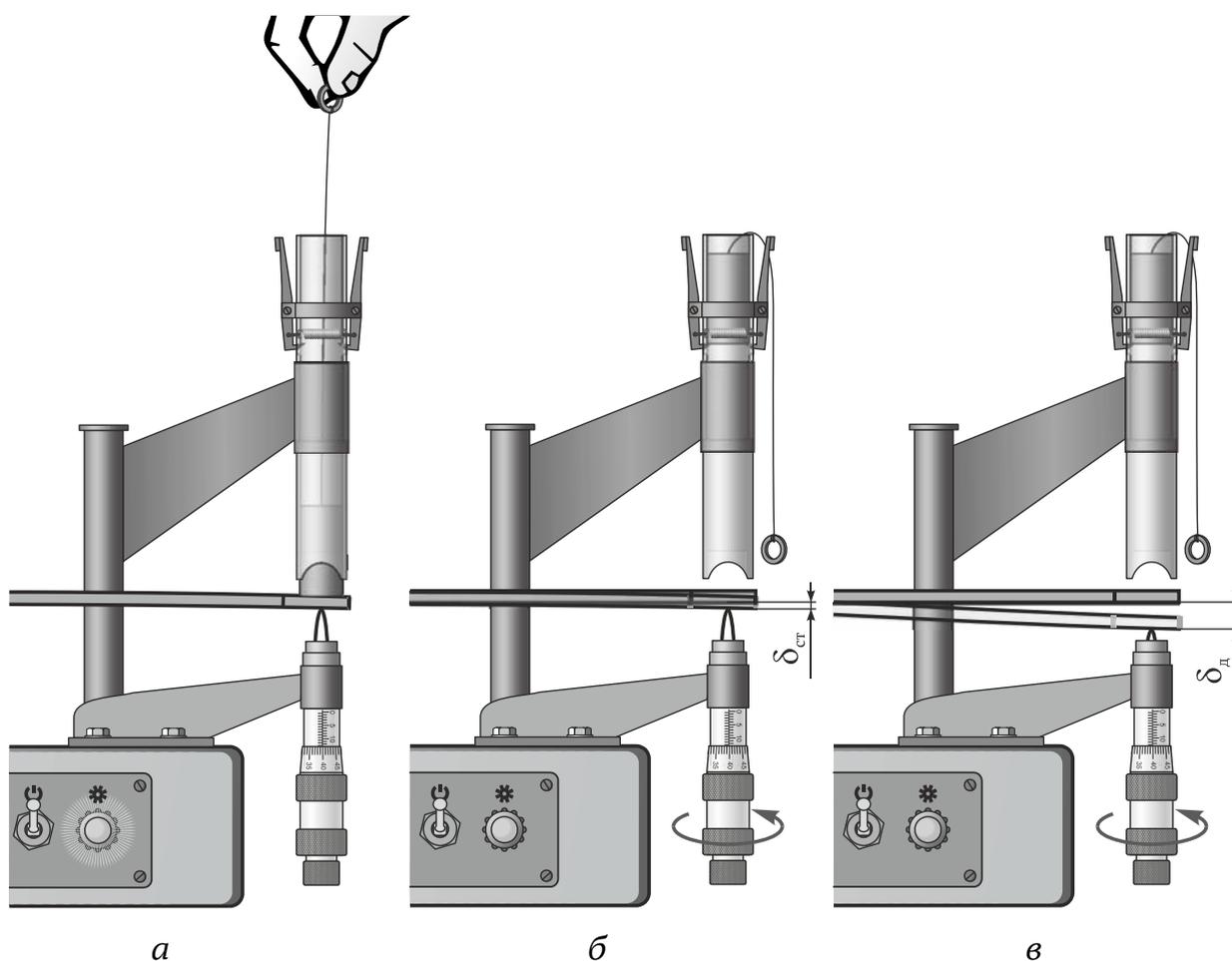


Рис. 5. Экспериментальное определение перемещений в балке:
 а – статическое приложение нагрузки; б – перемещение контакта от статического прогиба балки; в – перемещение контакта от ударного приложения нагрузки

Анализируют причины расхождения теоретических и экспериментальных значений. В случае существенного расхождения опытных и теоретических значений рекомендуется повторить эксперимент с учетом и корректировкой предполагаемых причин, повлиявших на эксперимент.

Вычисляют теоретическое значение динамической силы по (5), статическое и динамическое значение напряжений по (6) и (7).

Определяют экспериментальное значение коэффициента динамичности:

$$k_{\text{дэксп}} = \frac{\delta_{\text{дэксп}}}{\delta_{\text{стэксп}}}.$$

Вычислить экспериментальное значение статических напряжений возможно с помощью (3) и (6):

$$\sigma_{\text{стэксп}} = \frac{\delta_{\text{стэксп}} E h}{l^2}.$$

Экспериментальное значение динамических напряжений:

$$\sigma_{\text{дэксп}} = k_{\text{дэксп}} \sigma_{\text{стэксп}}.$$

Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями статических и динамических параметров определяют аналогично расхождению перемещений.

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит схему установки, данные об испытуемой балке и грузе, таблицу с результатами измерений, вычисление расхождений между экспериментальными и теоретическими значениями прогибов, выводы.

Контрольные вопросы

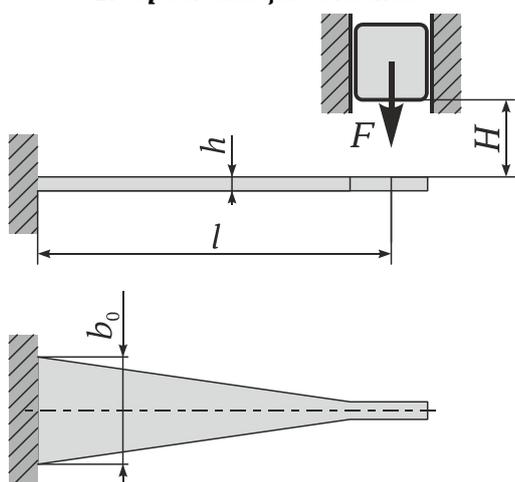
1. Что характеризует коэффициент динамичности?
2. Каким – упругим или неупругим – и почему считают удар в рамках выполнения лабораторной работы?
3. Во сколько раз будет отличаться коэффициент динамичности, если не учитывать вес ударяемой балки?
4. Какие конструктивные особенности установки и в какой степени могут влиять на точность задающих и измеряемых параметров?
5. Какова величина перегрузки в момент соударения груза с балкой?

РАБОТА №18ф

Экспериментальное определение напряжений и перемещений при ударном нагружении

Цель работы. Экспериментальное определение напряжений и перемещений в балке равного сопротивления изгибу при ударном нагружении. Сопоставление полученных результатов с расчетными по теории энергетического баланса.

1. Организация опыта



Балка равного сопротивления изгибу:
 $E = 210$ ГПа; $m_б = 484,5$ г; $G_{бал} = 4,75$ Н.
 Ударяющий груз $m_г = 146,5$ г; $F = 1,44$ Н.

Геометрические параметры образца

b_0 , мм	h , мм	l , мм	H , мм

Измерительный прибор:
 Микrometer, цена деления _____

Схема испытания

2. Теоретические значения

$\delta_{ст}$, мм	k_d	δ_d , мм	$\sigma_{ст}$, МПа	σ_d , МПа	$F_{ст}$, Н

3. Экспериментальные значения

$\delta_{ст\ эксп}$, мм	$k_{д\ эксп}$	$\delta_{д\ эксп}$, мм	$\sigma_{ст\ эксп}$, МПа	$\sigma_{д\ эксп}$, МПа	$F_{д}$, Н

4. Расхождение опытных и теоретических значений

$\Delta\delta_{ст}$	Δk_d	$\Delta\delta_d$	$\Delta\sigma_{ст}$	$\Delta\sigma_d$

5. Выводы.

Работу выполнил _____ Дата _____ Отчет принял _____

Работа № 19ф

Испытание материалов при ударной нагрузке

Цель работы. Определение ударной вязкости пластичных материалов.

Краткие теоретические сведения. Действующие на детали машин и сооружений нагрузки могут быть статическими и динамическими. Ударные нагрузки появляются в результате наличия зазоров в сочленениях сопряженных вращающихся деталей, при возвратно-поступательном движении деталей, при резком изменении скоростей, импульсном действии внешних сил. Например, кривошипно-шатунная группа двигателя внутреннего сгорания, шасси самолетов, подвеска автомобиля, детали пневматических отбойных молотков, перфораторы, железнодорожные вагоны во время сцепки, устройства крепления грузов на железнодорожных платформах, детали ракетных установок испытывают значительные ударные нагрузки в ходе эксплуатации, в том числе и при повышенных и экстремально низких температурах.

Сопrotивляемость материалов деформированию и разрушению существенно зависит от скоростей приложения нагрузки. Так, эксперименты с ударным растяжением образцов показывают, что диаграмма растяжения значительно отличается от диаграммы, полученной при статическом действии сил (рис. 1).

Во многих случаях материал, обладающий хорошими пластическими свойствами при статическом нагружении, ударном нагружении обнаруживает склонность к хрупкому разрушению. Наиболее сильное охрупчивание материала при ударе наблюдается при пониженной температуре. Например, результаты испытания стальных образцов от +40 до -100 °С показывают, что энергия, поглощенная образцом при разрушении, снижается с 80 до 10 Дж.

Таким образом, при проектировании различных машин и сооружений необходимо принимать во внимание зависимость механических свойств материалов от характера рабочих нагрузок.

В связи с этим при выборе материала для деталей, подвергающихся динамическим воздействиям, руководствуются так называемой ударной пробой. Сущность метода заключается в разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра в условиях. Надрез на образце имеет заданную геометрию и располагается посе-

редине между двумя опорами, напротив положения, по которому наносят удар. Определяют энергию, поглощенную образцом при испытании. Для металлов оценивается поглощенная энергия удара в Дж, а для пластмасс — ударная вязкость (энергия, отнесенная к площади поперечного сечения в месте удара) в Дж/м². Поскольку значения энергии удара для разных материалов зависят от температуры, то испытания проводят при заданных температурах.

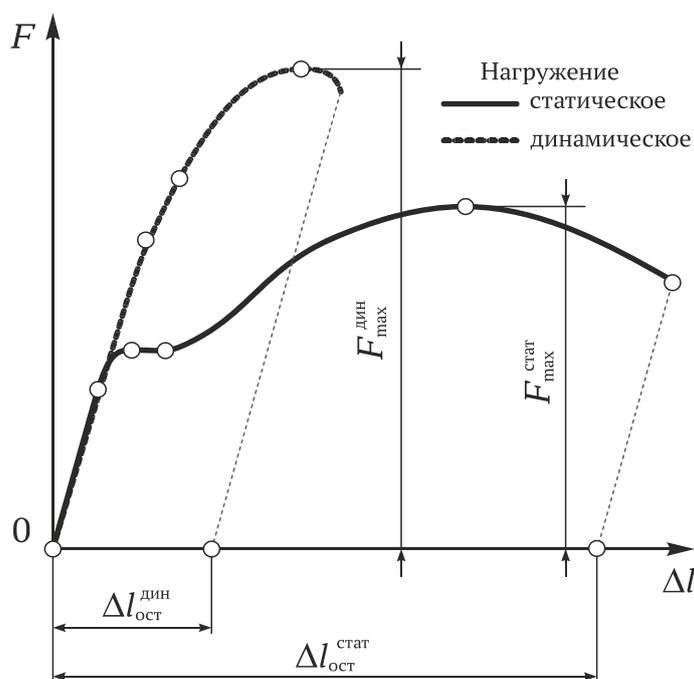


Рис. 1. Диаграммы растяжения при статическом и динамическом нагружении

Оценкой прочности при ударных нагрузках является ударная вязкость:

$$KС = \frac{K}{S_i}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}.$$

где K – количество энергии, затраченное на излом образца; S_i – площадь поперечного сечения в месте излома.

Материальное обеспечение эксперимента. Испытательная установка представляет собой маятниковый копер, который устанавливается на определенной высоте над образцом. Удар по образцу совершается при помощи падения копра. Поглощенная энергия удара пропорциональна разнице высот копра до и после удара. Надрез образца влияет на результаты испытаний, поэтому его форма и размеры строго регламентированы в различных стандартах. Размеры образца также могут повлиять на результаты испытаний.

Одним из недостатков традиционного метода испытания на удар является то, что в результате определяется лишь суммарная энергия разрушения. Иногда применяют инструментальные методы контроля испытания, суть которых заключается в непрерывном измерении усилия нагружения в процессе разрушения. Это дает возможность для оценки помимо энергии разрушения еще и максимального усилия при разрушении, что позволяет оценить переход от хрупкого к пластичному механизму разрушения при понижении температуры.

В соответствии со стандартами испытаний на изгиб образец имеет квадратное поперечное сечение 10×10 мм, длиной 55 мм с U-, V-образным вырезом либо с трещиной. Стандарт определяет также форму опор, бойка маятника и устанавливает допуски на размеры образцов (рис. 2).

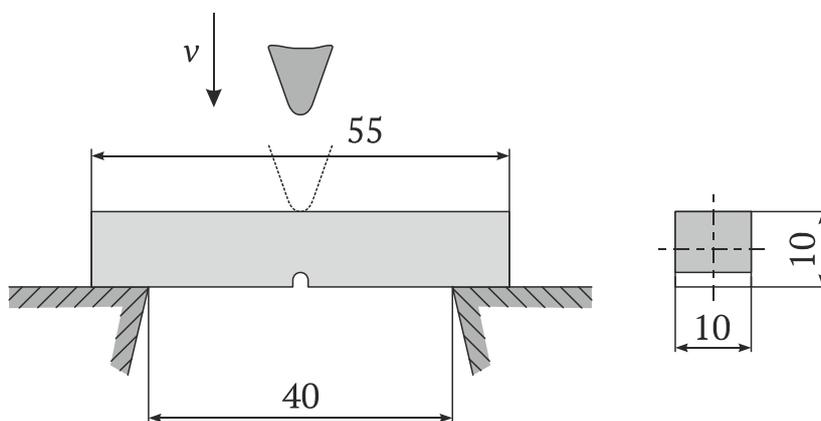


Рис. 2. Испытания образца с U-образным надрезом

Надрез в образцах предназначен для создания в зоне разрушения концентрации напряжений. На дне разреза возникает объемное напряженное состояние с положительными максимальными главными напряжениями. В связи с этим разрушение материалов, обладающих хорошими свойствами пластичности, становится хрупким.

Для определения ударной вязкости материалов наибольшее распространение получили маятниковые копры (рис. 3). Груз маятника 1, поднятый на высоту h_1 имеет запас потенциальной энергии mgh_1 и удерживается от падения фиксатором 2. При освобождении фиксатора маятник падает и встречает на своем пути образец 3. После разрушения образца маятник продолжает движение и поднимается на высоту h_2 . Неизрасходованная часть энергии маятника равна mgh_2 .

Энергия, затраченная на разрушение образца, определяется разностью полной и оставшейся энергии:

$$K = mg(h_1 - h_2).$$

Устройство копра позволяет производить измерение не высоты подъема маятника до и после удара, а соответствующих углов отклонения маятника. При падении и последующем подъеме маятника упор толкает стрелку 5 и оставляет ее на делении шкалы 4, соответствующем величине израсходованной энергии. Качающийся после удара маятник затормаживают натяжением ремня 6 с помощью рукоятки 7.

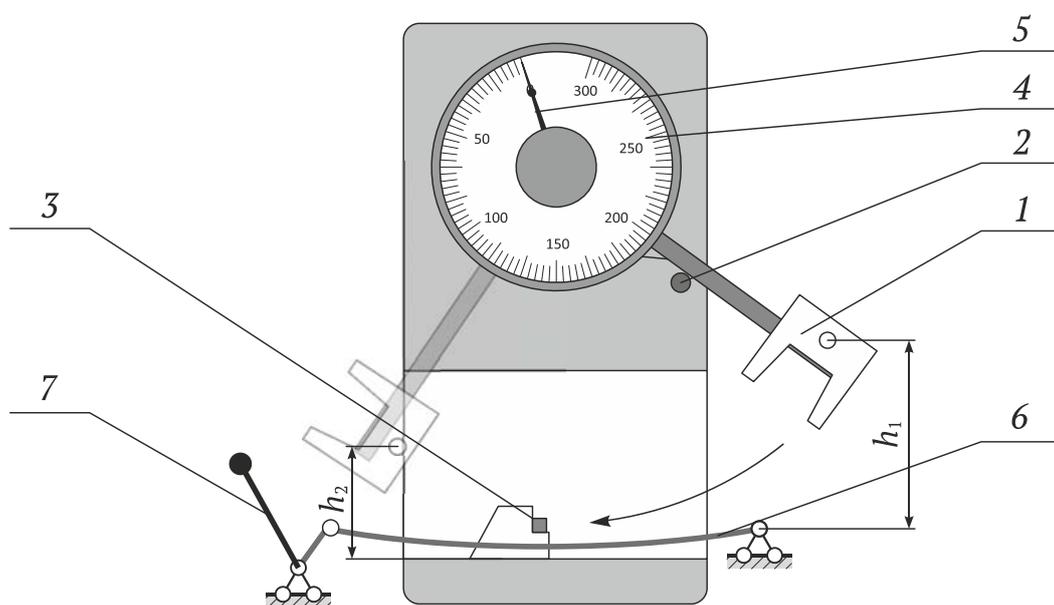


Рис. 3. Испытания образца на маятниковом копре

Порядок проведения эксперимента. Ознакомиться с описанием и конструкцией копра. Произвести измерения образца. Рукояткой освободить ленточный тормоз. Слегка отклонив маятник, установить образец, как показано на рис. 2.

Поднять маятник в верхнее положение и зафиксировать его в этом положении. Установить стрелку измерителя угла отклонения маятника в нулевое положение.

Внимание! При поднятом маятнике запрещается находиться в зоне траектории движения маятника и выполнять любые действия по обслуживанию копра. Перед проведением испытания предупредить окружающих о начале испытания.

Вытянуть стопорный стержень фиксатора и нажать на щеколду. Качающийся маятник после разрушения образца остановить ручным тормозом, отжимая рукоятку тормоза.

По шкале измерителя угла отклонения сделать отсчет работы, затраченной на разрушение образца.

Результат испытаний занести в отчет и повторить испытание для всех образцов в выборке.

Обработка результатов эксперимента. По величине энергии, израсходованной на разрушение образца, вычисляют ударную вязкость каждого образца.

По результатам испытаний нескольких однотипных образцов определяют среднее значение ударной вязкости:

$$KС_{\text{сред}} = \frac{\sum_i KС_i}{i},$$

где i – количество образцов/номер испытания.

В отчет об испытаниях включить эскизы образцов до и после испытания с указанием размеров, принципиальную схему маятникового копра и установки образца.

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит схему установки, данные об испытываемом образце и параметрах нагружения, характер разрушения образца, таблицу с результатами измерений, выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется ударной вязкостью?
2. Каково назначение надреза на образце?
3. Как форма надреза влияет на ударную вязкость?
4. С какой целью определяется ударная вязкость?

РАБОТА № 20и

Автоматизированные испытания на растяжения

Цель работы. Освоение методики проведения статических испытаний на растяжение материалов на примере испытаний металлов по методике ISO 6892-1:2009(E) и ГОСТ 1497-84. Исследование процесса растяжения металлических образцов вплоть до их разрушения.

Приобретение навыков обработки экспериментальных данных, диаграмм растяжения, определения механических характеристик металлов с различными механическими свойствами.

Краткие теоретические сведения. Во время испытаний на осевое (центральное) растяжение образец подвергается воздействию растягивающей силы при заданных условиях нагружения. К условиям относятся скорость деформирования, температура испытаний (20_{-10}^{+15} °С), форма образцов.

Данные предварительных измерений геометрии образца вносятся в отчет испытаний, что в совокупности с получаемыми в реальном времени данными от датчиков силы и перемещения позволяют отображать в реальном времени диаграммы растяжения (в координатах сила F – абсолютное удлинение Δl). Основой для определения механических характеристик материалов служат расчеты, выполняемые на базе условной диаграммы деформирования материала.

Типы и размеры образцов. Размеры образца определяются соотношением базовой длины l_0 и площади поперечного сечения образца A_0 , выраженных через соотношение $l_0 = k\sqrt{A_0}$, где k – коэффициент пропорциональности образцов. Принято классифицировать образцы как короткие $k = 5,65$, длинные $k = 11,3$ и непропорциональные (k имеет любое значение). Базовая длина пропорциональных образцов круглого поперечного сечения с базовым диаметром d_0 будет составлять $10d_0$ для длинных образцов и $5d_0$ – для коротких.

Определение базовой площади поперечного сечения A_0 и маркировка образца. Базовая площадь поперечного сечения рассчитывается на основании измерения поперечных размеров образца до испытания, выполненных не менее чем в трех местах базовой длины l_0 : в средней части и на границах рабочей длины. Одно из сечений должно быть расположено посередине базовой длины. В итоге принимают *среднее* значение площади поперечного сечения,

вычисленное по результатам измерений поперечных размеров. Начальную расчетную длину l_0 с погрешностью до 1 % ограничивают на рабочей длине образца рисками, реперными точками (нанесение маркером, краской и иным способом) и измеряют штангенциркулем с погрешностью измерения не более 0,1 мм. Проставляемые метки, например глубокие риски, не должны влиять на прочность образца и приводить к его преждевременному разрушению, вызванному смещением фокуса разрушения в точку разметки.

Размеры пропорциональных цилиндрических и плоских выбираются в соответствии с ISO 6892-1:2009(E) и ГОСТ 1497-84. На рис. 1, а показан эскиз образца круглого поперечного сечения, полученного точением, а на рис. 1, б – плоский образец. При изготовлении образцов принимают меры (охлаждение, соответствующие режимы обработки), исключающие возможность изменения механических свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки.

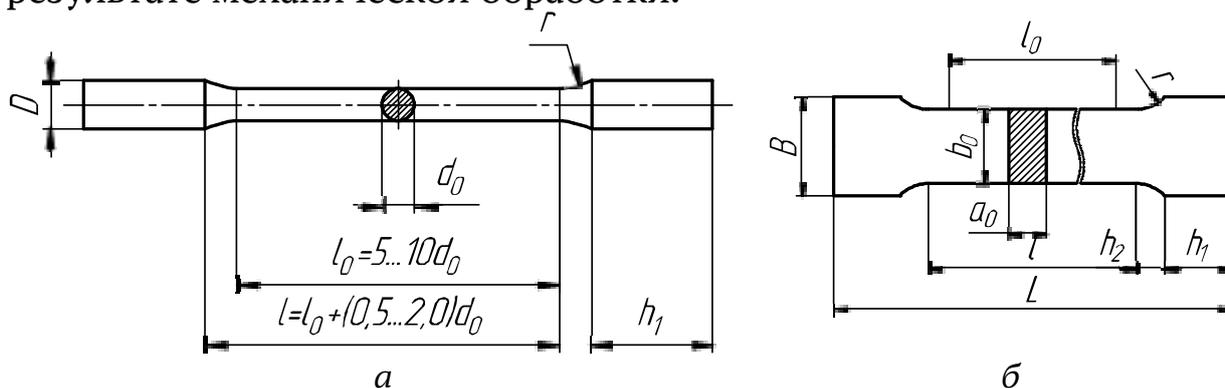


Рис. 1. Эскизы образцов для испытаний на растяжение:
а – цилиндрический; б – плоский

Базовыми геометрическими характеристиками образца являются рабочая l длина образца (расстояние, измеренное между уширениями образца под захваты испытательной машины), расчетная базовая длина образца – l_0 , первоначальная площадь поперечного сечения – A_0 .

Преимущественно нагружение производят с фиксированной скоростью деформирования, составляющей $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (0,006 мм/мин). При определении физического предела текучести скорость деформирования должна составлять $2,5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (0,0015–0,015 мм/мин). Поэтому в ряде случаев нагружение проводят с меньшей скоростью до превышения предела текучести, после чего увеличивают скорость нагружения.

В ходе проведения эксперимента *испытательная машина сообщает образцу принудительное удлинение* и регистрирует силу сопротивления образца деформации. Полученные данные о силе деформирования и деформациях позволяют построить диаграмму растяжения, в которой по оси ординат откладываются сила, а по оси абсцисс – соответствующие ей удлинения образца. Характер диаграммы растяжения в большой степени зависит от механических свойств испытуемого материала. На основе данных диаграммы растяжения вычисляют напряжения и относительные деформации образца в ходе испытания, строят диаграмму деформирования в координатах «напряжение – относительная деформация».

По результатам испытаний на одноосное растяжение *металлы принято делить на пластичные и хрупкие*. К пластичным относятся материалы, разрушению которых предшествуют большие остаточные деформации, хрупкими называют материалы, разрушающиеся при малых остаточных деформациях. Характерными представителями пластичных материалов являются малоуглеродистая сталь, алюминий, титан, а хрупких – чугун, инструментальная сталь, стекло и т. д.

Пластичные и хрупкие материалы отличаются также характером разрушения при растяжении. Типовая диаграмма растяжения пластичного материала (малоуглеродистой стали) представлена на рис. 2. Пластичные материалы проявляют большее сопротивление отрыву частиц, чем сдвигу их друг относительно друга и разрушаются, главным образом, от сдвига частиц в плоскостях действия наибольших касательных напряжений. Именно вследствие сдвига частиц увеличивается длина образца из пластичного материала при его растяжении, а место разрушения в шейке имеет вид кратера, стенки которого наклонены к оси образца под углом 45° . Дном этого кратера является поверхность первоначальной внутренней трещины, возникающей после образования шейки.

Хрупкие материалы, наоборот, обладают большим сопротивлением сдвигу, чем отрыву, и разрушаются при растяжении внезапно от отрыва частиц материала по плоскости поперечного сечения. Явления текучести, упрочнения и образования шейки на образцах из таких материалов перед разрывом не наблюдаются.

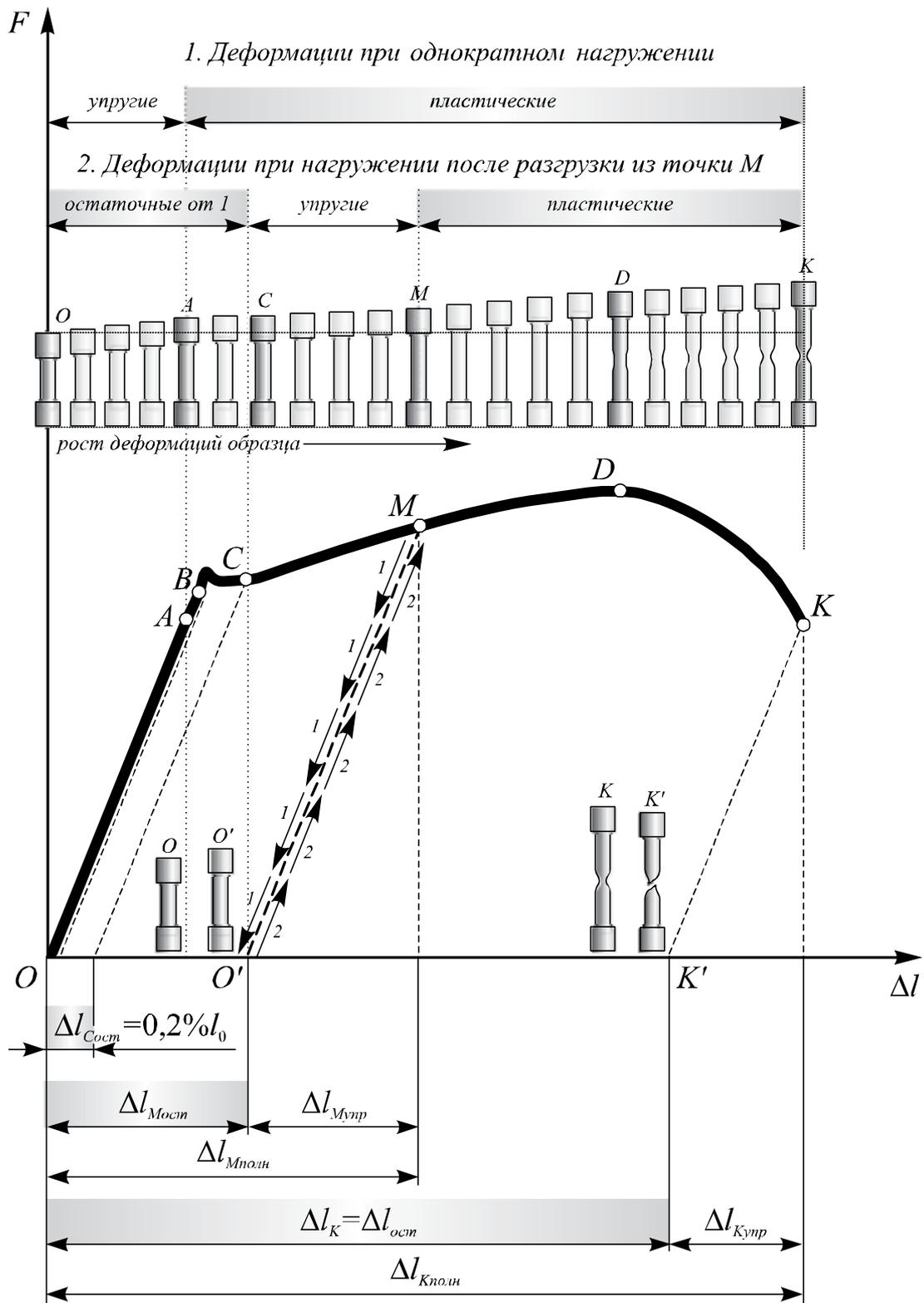


Рис. 2. Диаграмма растяжения для мягкой углеродистой стали: маршрут $OACDK$ – непрерывное нагружение материала до разрушения; 1 – маршрут $OACMO'$ – нагружение до точки M с разгрузкой в точку O' ; 2 – маршрут $O'MDK$ – повторное нагружение образца после разгрузки. Условные обозначения: «ост» – остаточная; «упр» – упругая; «полн» – полная

Деление материалов на *хрупкие* и *пластичные* является условным, так как свойства материалов зависят от температуры, скорости деформирования и вида нагружения. Один и тот же материал в одних условиях ведет себя как хрупкий, в других – как пластичный. Например, мрамор при одноосном растяжении разрушается как хрупкий материал, а при всестороннем сжатии проявляет пластические свойства. Поэтому правильнее говорить о пластичном и хрупком *характере разрушения материала*. Первое происходит при больших, а второе при сравнительно малых остаточных деформациях.

Рассмотрим характерные точки и участки диаграммы растяжения данного образца. От начала нагружения в точке *O* до определенного значения силы в точке *A* на диаграмме имеет место прямая пропорциональная зависимость между силой и удлинением, соответствующая отрезку *OA*. На данной стадии растяжения справедлив закон Гука:

$$\Delta l = \frac{l_0}{EA_0} F = \frac{\sigma}{E} l_0. \quad (1)$$

Напряжение, вызываемое действием силы $F_{\text{пл}}$ (точка *A* диаграммы), называется *пределом пропорциональности* – ему соответствуют прекращение выполнения закона Гука, нарушение пропорциональной зависимости между напряжением и деформацией:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{F_{\text{пл}}}{A_0}. \quad (2)$$

При последующем увеличении силы до точки *B* – F_y образец демонстрирует упругое поведение, т. е. отсутствие остаточной деформации после разгрузки. На практике пределу упругости сопоставляют незначительные остаточные деформации после разгрузки образца 0,001–0,003 %. Поэтому наибольшее напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторого значения, характеризуемого определенным допуском, устанавливаемым техническими условиями, называется пределом упругости:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}. \quad (3)$$

Последующее деформирование образца сопровождается существенным ростом пластических деформаций и отклонением от пропорциональной зависимости между силой и деформацией. При этом деформирование происходит под действием практически постоянной

силы, точка C диаграммы соответствует силе F_T , а вызываемые ей напряжения называются *физическим пределом текучести*:

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}. \quad (4)$$

У малоуглеродистой стали перед площадкой текучести наблюдается некоторый заброс напряжения, так называемый «зуб текучести». Это явление вызвано дислокационным механизмом деформации. На начальном участке плотность дислокаций является недостаточной для обеспечения более высокой степени деформации. После достижения точки верхнего предела текучести σ_{Tb} начинается интенсивное образование новых дислокаций, что приводит к падению напряжения. Дальнейшая деформация в зоне текучести происходит практически без роста напряжения.

Данная диаграмма является типичной для материалов с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК) с низкой исходной плотностью дислокаций. Для многих материалов, например с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК), а также для материалов с высокой исходной плотностью дефектов на диаграмме отсутствует явно выраженный предел текучести. В качестве предела текучести выбирается значение напряжения при остаточной деформации $\epsilon_{ост} = 0,2 \%$ или иным значением допуска. В таком случае определяется *условный предел текучести*:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}, \quad (5)$$

где $F_{0,2}$ – сила, соответствующая остаточной деформации 0,2 %.

После завершения стадии текучести материал вновь приобретает способность увеличивать сопротивление дальнейшей деформации, начинается *стадия деформационного упрочнения*. Данная стадия сопровождается ростом напряжений и деформаций и носит название *стадии упрочнения (ABCD)*.

Если на данной стадии нагружения произвести разгрузку образца из некоторой точки M , то линия разгрузки пойдет в точку O' по маршруту 1 (рис. 2). Кривая разгрузки проходит параллельно пропорциональному участку OA диаграммы, так как при разгрузке снимается только упругая составляющая деформации. Повторное нагружение разгруженного образца пойдет уже по маршруту 2 из точки O' в точку M диаграммы.

С точки зрения деформационного поведения образца после разгрузки полное удлинение $\Delta l_{\text{Мполн}}$, полученное образцом до начала разгрузки, полностью не исчезает. Исчезнувшая часть удлинения на диаграмме отобразится отрезком $\Delta l_{\text{Муупр}}$, а оставшаяся – $\Delta l_{\text{Мост}}$. Поэтому полное удлинение образца за пределом пропорциональности состоит из двух частей – упругой и пластической:

$$\Delta l_{\text{Мполн}} = \Delta l_{\text{Муупр}} + \Delta l_{\text{Мост}}. \quad (6)$$

Поэтому предварительное пластическое деформирование увеличивает пропорциональный участок диаграммы, повышается предел пропорциональности и условный предел текучести.

Такое упрочнение металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазового состава в процессе пластической деформации, при температуре ниже температуры рекристаллизации называется *наклепом*. Наклеп сопровождается выходом на поверхность образца дефектов кристаллической решетки, увеличением прочности и твердости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера).

Точка D диаграммы соответствует максимальной силе F_{max} , после которой начинается местное сужение образца в виде шейки, т. е. появляется область сосредоточенной деформации. Величина напряжения, отвечающая наибольшей силе, предшествующей разрушению образца, называется *пределом прочности* или временным сопротивлением разрыву:

$$\sigma_{\text{Пч}} = \sigma_{\text{В}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0}. \quad (7)$$

Расположение шейки зависит от однородности геометрических размеров образца и качества его поверхности. Как правило, шейка и, в конечном счете, место разрушения расположено в наиболее слабом сечении. Кроме того, важное значение имеет одноосность напряженного состояния, на которую влияют: перекосы образца в испытательной машине, неравномерность физико-механических свойств по сечению образца, остаточные деформации. Для пластичных материалов одноосное напряженное состояние сохраняется лишь до образования шейки.

Из-за образования шейки и локального уменьшения площади поперечного сечения образца происходит уменьшение силы, необхо-

димой для дальнейшего деформирования. Участок DK диаграммы представляет собой стадию локального упрочнения материала, являющийся зоной местной текучести, так как пластические деформации продолжают интенсивно развиваться только в области шейки. В точке K диаграммы происходит разрушение образца, сила F_K вызывает напряжения в момент разрушения:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0}. \quad (8)$$

Определенное таким образом напряжение при разрыве образца является условным и не может быть использовано в качестве механической характеристики материала.

Истинное напряжение в момент разрушения получают путем деления силы в момент разрыва на действительную площадь поперечного сечения образца в момент разрушения:

$$s_K = \frac{F_K}{A_1}, \quad (9)$$

где $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ – площадь поперечного сечения шейки; d_1 – наименьший диаметр шейки. Диаметр шейки измеряют штангенциркулем в наименьшем сечении, предварительно плотно прижав по линии разрушения обе половинки образца.

Диаграмма деформирования, полученная в результате данного расчета напряжений и деформаций, называется условной, поскольку расчет напряжений ведется в отношении силы к начальной площади недеформированного поперечного сечения, а относительная деформация как отношение удлинения к базовой длине образца. На самом деле при растяжении у большинства материалов уменьшаются поперечные размеры, а соответственно меняется площадь поперечного сечения. Также после образования области шейки продольные деформации образца концентрируются в ней, становясь существенно неравномерными, при этом в остальной части образца их рост прекращается. Истинную диаграмму деформирования строят в координатах истинных напряжений (отношение силы к фактической площади поперечного сечения) и истинных деформаций.

После разрушения упругая составляющая полного удлинения в обеих частях образца исчезает (отрезок $\Delta l_{\text{Купр}}$), разгрузка идет в точку K' . Оставшееся удлинение изображается отрезком $\Delta l_{\text{Кост}}$.

Для пластичных материалов характерно разрушение в шейке в плоскости скольжения (рис. 3), ориентированной приблизительно под углом 45° к продольной оси образца. В данной плоскости действуют максимальные касательные напряжения. В зависимости от пластичности материала данные площадки могут быть расположены либо по всей поверхности разрушения образца, либо локализованы ближе ко внешней поверхности, в последнем случае в средней части сечения имеет место хрупкий отрыв.

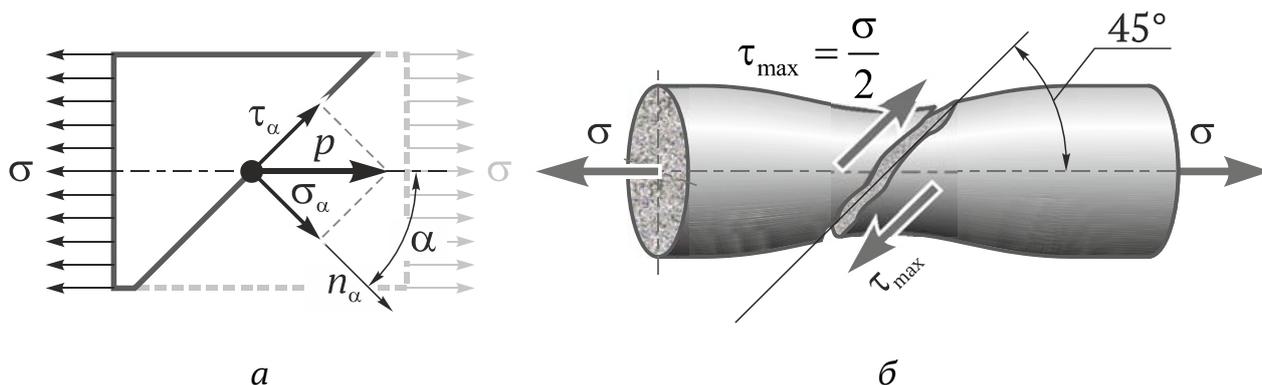


Рис. 3. Распределение напряжений в зоне разрушения:

а – распределение напряжений на наклонной под углом α к оси площадке (σ – напряжения на площадке соответствующей поперечному сечению; p , σ_α , τ_α – полное, нормальное и касательное напряжения на площадке с нормалью n_α); *б* – разрушение образца в зоне шейки

Полное удлинение, полученное образцом перед разрушением, уменьшится после разрыва, так как в частях образца исчезнут упругие деформации. Относительным удлинением после разрыва δ называют отношение в процентах приращения расчетной длины образца после разрыва к его первоначальной длине:

$$\delta = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l_{\text{к}} - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $l_{\text{к}}$ – конечная длина образца после разрушения, измеренная по реперным точкам, нанесенным до испытания на длине l_0 .

Относительное остаточное удлинение после разрыва характеризует пластичность материала. В зависимости от величины этого удлинения материалы делят на пластичные и хрупкие.

К пластичным относят материалы с $\delta \geq 10\%$, к малопластичным (или условно-пластичным) – $5\% < \delta < 10\%$, хрупким – $\delta \leq 5\%$.

Относительное сужение образца после разрыва ψ определяется делением абсолютного уменьшения площади поперечного сечения

в шейке на первоначальную площадь и выражается в процентах от начальной площади поперечного сечения:

$$\psi = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Материальное обеспечение эксперимента. Эксперимент проводится на универсальной разрывной машине Instron 3382, оснащенной видеоэкстензометром Instron AVE. Управление процессами испытаний и сохранение электронного отчета по испытаниям осуществляется в программном обеспечении Instron Bluehill.

Порядок проведения эксперимента. Маркировка и измерение образца. Маркировку образца производят маркером, краской или нанесением микроскопических рисок алмазным надфилем в местах, ограничивающих базовую длину образца.

Производят измерение и маркировку образцов в соответствии с рекомендациями.

Создают новую выборку испытаний на основе метода испытаний на растяжение с использованием видеоэкстензометра в Instron Bluehill и проводят испытание.

Выполняют обработку диаграммы растяжения, результатов испытания и оформляют отчет.

Обработка результатов эксперимента. *Определение предела пропорциональности.* Определение предела пропорциональности графическим способом проводится по начальному участку диаграммы растяжения. Для этого проводят прямую из начала координат (рис. 4, а), совпадающую с начальным линейным участком диаграммы растяжения. Затем на произвольном уровне проводят прямую АВ, параллельную оси абсцисс, и на ней откладывают отрезок Кп, равный половине отрезка тК. Через точку п и начало координат проводят прямую Оп и параллельно ей проводят касательную CD к диаграмме растяжения. Точка касания определяет искомую силу F_{пц}.

Определение предела упругости можно также выполнить по данным, полученным на испытательных машинах с цифровой обработкой сигнала. В этом случае первоначально определяется модуль упругости, строится прямая, соответствующая пропорциональному участку диаграммы, последующее определение силы осуществляется смещением данной прямой в допусках 0,001-0,003 % остаточной деформации.

Определение модуля упругости. Модуль упругости может быть определен графическим способом по начальному участку диаграммы растяжения. При наличии цифровой обработки сигнала наиболее распространенными методами в программном пакете, используемом с Instron 3382, являются *Автоматический модуль* и *Автоматическое определение модуля Юнга*.

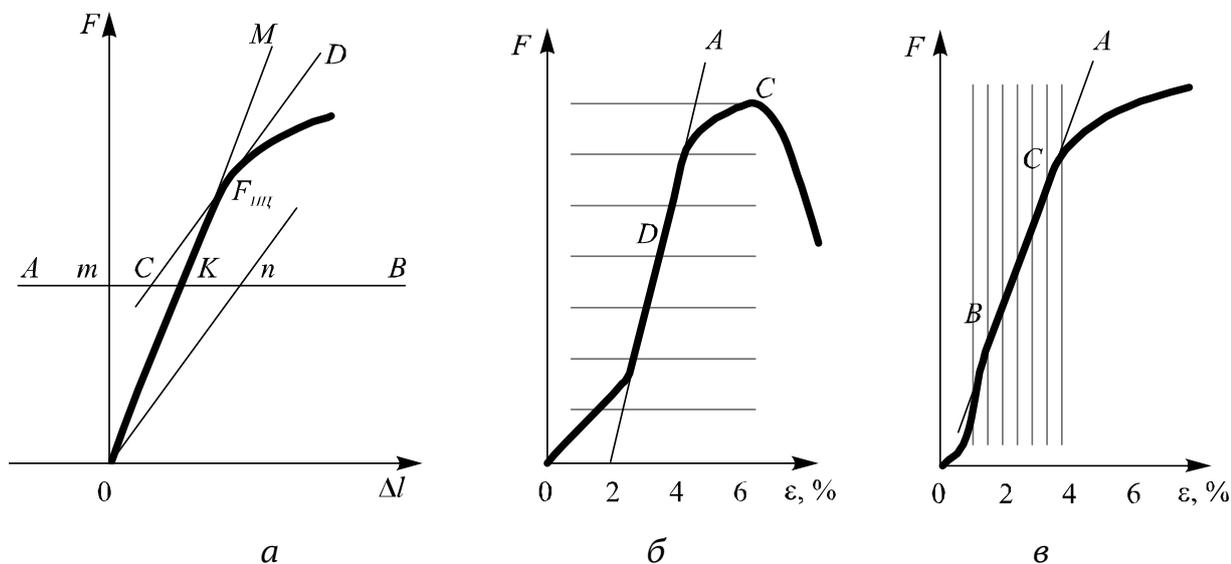


Рис. 4. Методы определения предела пропорциональности и модуля упругости

В первом случае (рис. 4, б) система исследует данные между первой точкой данных, которая больше или равна 2 % от максимальной нагрузки, и значением максимальной нагрузки, разбивая данные по оси напряжения между начальным и конечным значениями на 6 равных областей. Во втором случае (рис. 4, в) система разбивает данные по оси деформации между начальным и конечным значениями на 6 равных областей. Далее в обоих случаях применяется алгоритм подбора методом наименьших квадратов по всем точкам в каждой области для определения угла наклона в каждой области и устанавливается пара последовательных областей, в которых имеется наивысшая сумма углов наклона, из которых выбирается наибольший угол наклона, и по этому значению рассчитывается модуль упругости.

Определение предела текучести. Физический предел текучести определяется по точкам на диаграмме (рис. 5, а), в которых угол наклона кривой уменьшается до нуля или становится отрицательным. Анализируя диаграмму, система определяет верхний (точка А) и нижний (точка В) пределы текучести.

Условный предел текучести (рис. 5, б) устанавливается смещением линии, определенной для модуля упругости, на заданное значение допуска остаточной пластической деформации (0,2 %) и определяет интерполированную точку пересечения с диаграммой.

Определение предела прочности. Расчетный программный метод позволяет определить абсолютный пик на диаграмме растяжения (рис. 5, в). По полученному значению силы на всем интервале зарегистрированных значений силы на образце система ищет наибольшее значение силы и рассчитывает предел прочности.

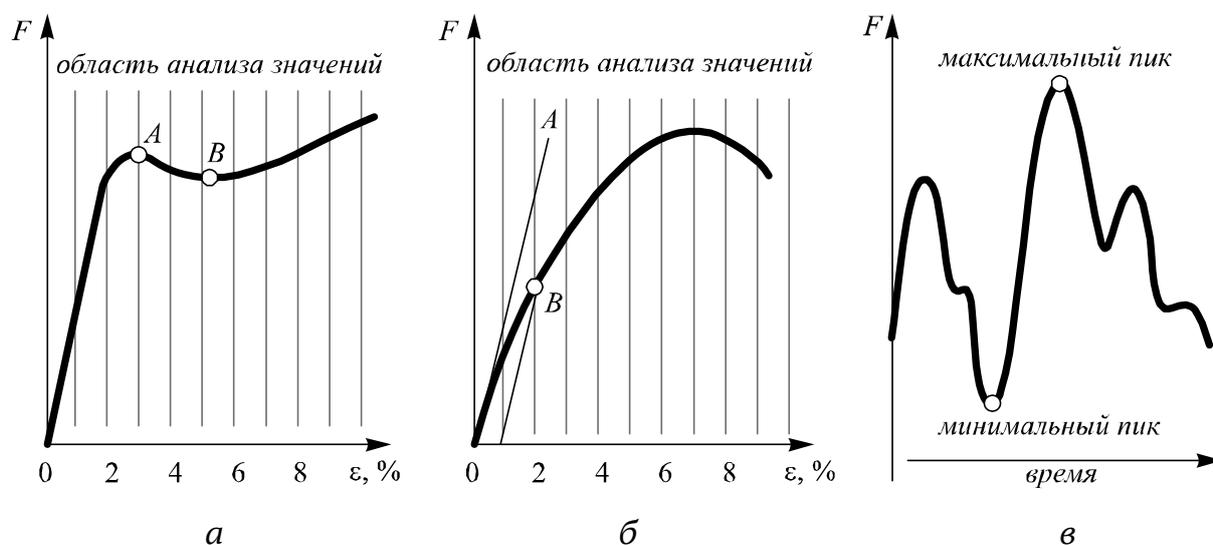


Рис. 5. Методы определения предела текучести и прочности

Определение относительного остаточного удлинения. С помощью штангенциркуля измеряется рабочая длина образца после разрушения, расчет производят по формуле (9). В случае использования оптического видеокстензометра фиксируется значение базы образца по маркерным точкам до испытания. После разрушения образца перемещают подвижную траверсу с помощью кнопок шагового перемещения до момента касания половинок образцов (первые признаки появления незначительной сжимающей силы в показаниях канала датчика силы), с помощью видеокстензометра измеряется базовая длина после разрушения, данные заносятся в форму входных величин.

Определение относительного остаточного сужения. С помощью штангенциркуля измеряется диаметр образца в шейке и вычисляется площадь шейки, расчет производят по формуле (10).

Методика проведения испытания на растяжение. В настоящей работе используется двухколонная испытательная машина Instron 3382 с максимальной нагрузочной способностью 100 кН. На рис. 6 показан вид разрывной машины и ее основные узлы. Для управления испытаниями используется персональный компьютер, подключенный к блоку управления машины через сетевой контроллер по LAN-интерфейсу.

Испытательная машина оснащена датчиком измерения силы Instron 2530-440 и механическими клиновыми захватами с V-образными и плоскими клиньями Instron 2716-002 с предельной нагрузочной способностью 100 кН. Для контактного измерения продольных деформаций образца используется дополнительное оборудование – навесной экстензометр, для бесконтактного измерения продольных и поперечных деформаций – видеоэкстензометр Instron AVE.

Основными узлами рамы испытательной машины являются стол, двигатель привода, две направляющие колонны и два вертикальных винта с шаровыми опорами. Верхняя подвижная траверса установлена на колоннах и винтах с шаровыми опорами. Датчик нагрузки установлен на подвижной траверсе. Узел привода сообщает крутящий момент от двигателя к винту с шаровыми опорами и перемещает траверсу вверх или вниз относительно стоек.

После установки образца в захватах, траверсе сообщаются перемещения с заданной скоростью, что вызывает в образце растягивающую или сжимающую силу. Датчик нагрузки преобразует механическое воздействие силы в электрический сигнал, который передается системе управления для контроля и визуального отображения на дисплее.

Механическая цепь привода траверсы расположена внутри основания. Она содержит два винта с шаровыми опорами (по одному внутри каждой стойки), которые установлены в смазываемые подшипники на жесткой базовой балке внутри основания рамы. Два приводных шкива находятся внизу под балкой основания и установлены на конце каждого винта с шаровыми опорами. Серводвигатель постоянного тока приводит в движение винты с шаровыми опорами посредством ряда шкивов и зубчатых ремней. Зубчатые ремни между шкивами синхронизируют приводное усилие к винтам с шаровыми опорами и обеспечивают горизонтальное выравнивание подвижной траверсы. Шифратор, установленный на приводном двигателе, формирует информацию о положении траверсы для компьютера.

Система контролируется замкнутым контуром сервоуправления. Скорость и направление движения траверсы определяются параметрами, задаваемыми на компьютере. При запуске испытания контроллер генерирует стартовый сигнал, который управляет движением траверсы в соответствии с установленными параметрами.

Внутри основания рамы имеется панель интерфейса рамы, которая обеспечивает сигнальный интерфейс между контроллером и компонентами рамы с регистрацией данных с минимальным интервалом до 50 мс. Микрочип контроллера содержит уникальный цифровой код для каждого типа рамы, что позволяет компьютеру распознать ее тип. Эта идентификация позволяет программе управления задать в электронном виде установки для пределов изменения нагрузок системы и значений автоматической калибровки.

Компьютер содержит плату цифровой связи, которая обеспечивает связь компьютера с нагрузочной рамой. Связь происходит через контроллер, встроенный в основание рамы. Контроллер получает сообщения от компьютера и посылает сообщение в нагрузочную раму для выполнения требуемой операции. При испытаниях контроллер получает данные от датчиков и посылает данные назад компьютеру, обеспечивая обратную связь.

Испытания на растяжение могут быть проведены двумя способами – с контролем по силе или деформации. Преимущественно испытания проводят с заданной скоростью нагружения, при этом нагрузочной раме задается скорость деформирования. Проведение испытаний на растяжение на разрывной машине Instron возможно реализовать в трех вариантах: по скорости перемещения активной траверсы, с помощью навесного экстензометра и по оптическому видеоекстензометру (интерфейс программы – рис. 6).

В случае когда деформации на диаграмме растяжения получают на основании показаний датчика хода траверсы, ошибка измерений будет наибольшей. В данном случае удлинение образца измеряется по числу оборотов шагового двигателя. На итоговую величину деформаций, определенных таким способом, будет влиять жесткость привода, траверсы и захватов. Поэтому данный способ не рекомендуется для испытаний, если в ходе эксперимента требуется определить характеристики пластичности, модуль упругости.

При использовании навесного экстензометра ошибка измерения деформации не превышает 0,2 % от измеряемой величины. На итогов-

вую ошибку получаемой величины деформаций могут влиять неточности позиционирования навесного тензометра, проскальзывание ножей относительно поверхности образца. Однако одним из самых главных недостатков данного способа является неполное измерение деформаций с помощью навесного тензодатчика до разрушения образца, так как деформации в зоне упрочнения и локального упрочнения измеряются по датчику оборотов шагового двигателя. Соответственно с помощью навесного тензометра достаточно точно определяется только упругий участок диаграммы деформирования, ее наклон в упругой области.

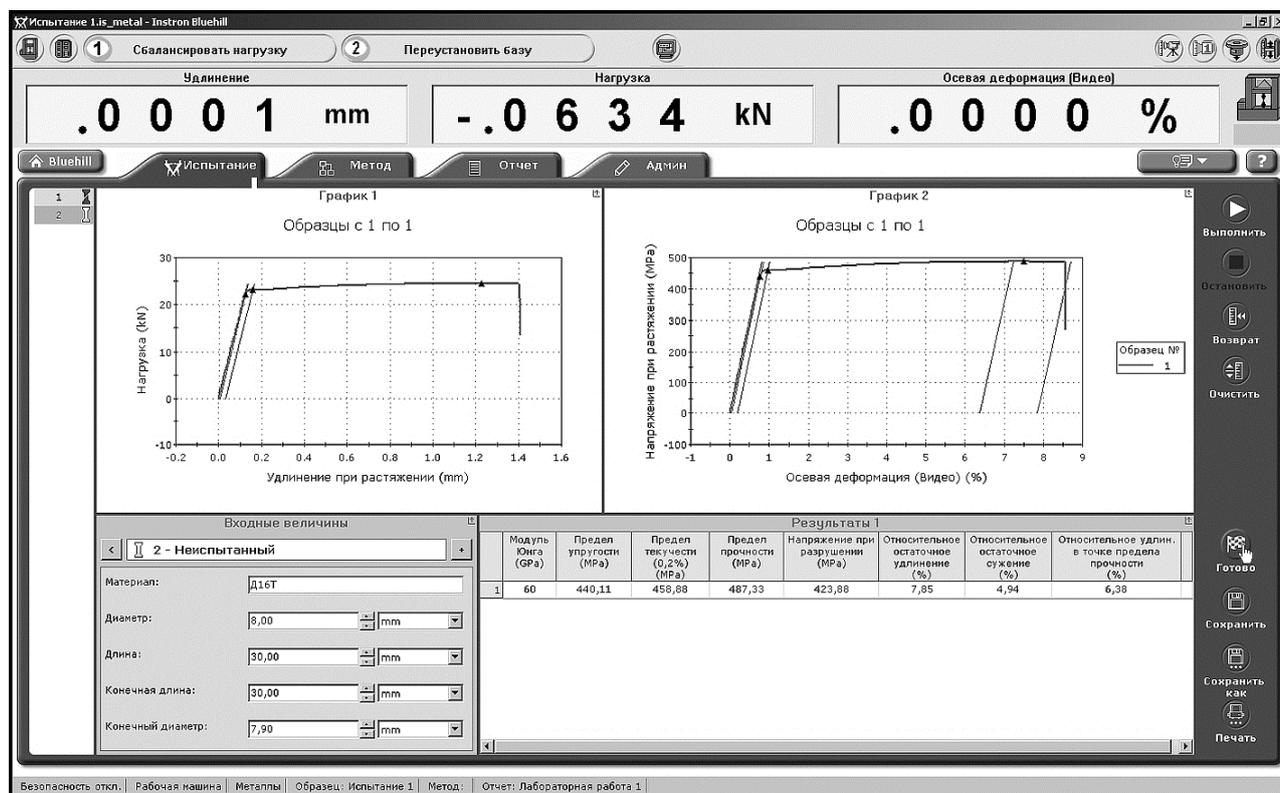


Рис. 6. Интерфейс программного обеспечения Bluehill для Instron

Наиболее совершенным методом является бесконтактное измерение деформаций с использованием оптического видеоэкстензометра. Деформации фиксируются по маркерным точкам, нанесенным на образец вплоть до разрушения образца. Погрешность измерений составляет $\pm 2,5$ мкм или 0,5 % от измеряемой величины. Измерение деформаций с помощью видеоэкстензометра является наиболее предпочтительным, так как суммарная ошибка регистрации деформаций будет в данном случае наименьшей.

Составление отчета. Отчет о проделанной работе содержит схему установки, данные об испытуемом образце и параметрах нагружения, характер разрушения образца, таблицу с результатами измерений, выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные преимущества автоматизированной обработки диаграммы растяжения?
2. Каков принцип определения предела пропорциональности?
3. Каков принцип определения предела текучести?
4. Каков принцип определения предела прочности?
5. Как правильно размаркировать образец перед испытанием?
6. Какими преимуществами обладает видеоэкстензометр в сравнении с традиционными средствами контактного измерения?
7. Какие причины получения некорректных результатов обработки экспериментальных данных?
8. Как рекомендуется маркировать образец перед испытанием?

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Измерительные приборы необходимы для измерения и регистрации значений физических величин, характеризующих процессы, происходящие с объектами экспериментальных исследований.

Основными действующими факторами в механических испытаниях являются: время; силы (нагрузки); координаты и геометрические размеры тел; температурные, электромагнитные, радиационные и другие внешние поля; влияние внешней среды. Наиболее часто при проведении механических испытаний возникает необходимость измерения сил, времени их действия, отслеживание изменения геометрических размеров тел.

Для измерения геометрических размеров тел применяют масштабные линейки, штангенциркули и микрометры. Линейные и угловые перемещения определяются с помощью механических индикаторов, триангуляционных лазерных датчиков и т. д.

Напряжения, возникающие в теле под действием приложенных нагрузок, определяются косвенно путем измерения деформации тела.

Деформация тела – изменение его формы и размеров, характеризуется перемещением точек относительно друг друга. Они могут быть зафиксированы непосредственно по перемещению точек тела – в этом случае определяется абсолютная деформация; в случае если измерение осуществляется по изменению расстояния между исследуемыми точками в отношении к некоторой фиксированной измерительной базе прибора, на которой происходит их регистрация, то измеряемая деформация является относительной.

Измерение деформации тела осуществляют бесконтактными и контактными способами. Бесконтактные измерения производят с использованием лазерных датчиков, высокоскоростных видеокамер с нейросетевым подходом по распознаванию изображения, оптическими приборами с высоким разрешением и др. Контактные измерения осуществляются различными типами тензометров, которые воспринимают изменение расстояния между точками на поверхности тела при его нагружении.

Базой прибора называют расстояние между точками тела, изменение которого фиксируется тензодатчиком. Приборы с малой базой (до 20 мм) выбирают для увеличения точности измерения при неоднородной деформации объекта. При однородной деформации следует применять приборы с большой базой.

По принципу действия различают три основных вида тензодатчиков: механические, оптико-механические и электрические.

1.1. Штангенциркули

Штангенциркуль – один из наиболее распространенных высокоточных инструментов для точных измерений линейных размеров. Наибольшие массовые модели штангенциркуля имеют шкалу измерения от 15 до 40 см. Самые маленькие штангенциркули имеют шкалу в 7 см, а самый большой в мире штангенциркуль имеет шкалу в 10 м при точности измерения, не уступающей обычным штангенциркулям.

Штангенциркуль состоит из измерительной штанги с основной шкалой и подвижной рамки, оснащенной дополнительной шкалой отсчета – нониусом. Штанга и рамка обычно имеют губки для проведения внешних и внутренних измерений. Также ряд моделей оснащается линейкой глубинометра. На рис. 1 показан штангенциркуль выполняющий измерение внешнего и внутреннего диаметров подшипника.



Рис. 1. Измерение внешних и внутренних размеров с помощью штангенциркуля

По способу снятия показаний штангенциркули делятся на нониусные, циферблатные (оснащены микрометрической головкой), цифровые (с индикацией показаний на жидкокристаллическом дисплее).

Нониусные штангенциркули. Порядок отсчета показаний штангенциркуля по шкалам штанги и нониуса:

– считают число целых миллиметров, для этого находят на шкале штанги штрих, ближайший слева к нулевому штриху нониуса, и запоминают его числовое значение;

– считают доли миллиметра, для этого на шкале нониуса находят штрих, ближайший к нулевому делению и совпадающий со штрихом шкалы штанги, и плюсуяют его порядковый номер и цену деления нониуса (цена деления нониуса рассчитывается по формуле: цену деления основной шкалы разделить на количество штрихов нониуса), у наиболее распространенных штангенциркулей ШЦ-1 цена деления нониуса 0,1 мм.

– подсчитывают полную величину показания штангенциркуля, для этого складывают отсчет по основной шкале (число целых миллиметров) и отсчет по шкале нониуса (долей миллиметра).

Циферблатные штангенциркули. Отсчет производят по показаниям индикаторной головки. Основная шкала ведет отсчет долей миллиметра, а вспомогательная – количество полных оборотов основной шкалы. Подсчет полной величины показания штангенциркуля осуществляют путем умножения полного значения количества делений основной шкалы на цену деления и на количество полных оборотов, зафиксированное на вспомогательной шкале, к полученному значению прибавляют количество делений основной шкалы, умноженное на цену деления, оставшуюся от последнего неполного оборота.

Цифровые штангенциркули. Цифровые штангенциркули преимущественно оснащены индуктивными датчиками перемещения – дифференциальным трансформатором для измерения линейных перемещений (LVDT-датчиком).

Разрешающая способность. В нониусных штангенциркулях на штанге имеется шкала с делениями через один миллиметр, а на рамке нанесены 10 делений нониуса, позволяющего делать отсчеты с точностью до 0,02 мм.

1.2. Измерительные головки

Наиболее распространенной измерительной головкой для определения перемещений является индикатор часового типа (рис. 2). Этот измерительный прибор предназначен для абсолютных и относительных измерений, а также контроля отклонений от заданной геометрической формы детали и взаимного расположения поверхностей.

В цилиндрическом корпусе размещена реечно-зубчатая и шестеренчатые передачи, преобразующие возвратно-поступательное движение измерительного стержня (щупа) во вращательное движение стрелки прибора.

В конструкцию индикатора входит пружина, исключая люфты шестереночных передач, то есть зацепление зубчатых колес происходит всегда с одной стороны профиля зубьев. Обычно шкала прибора выполнена поворачивающейся, это удобно для установки нуля показаний при выполнении относительных измерений.

Стрелка индикатора чаще всего многооборотная, обычно один оборот стрелки соответствует перемещению щупа на 1 мм. В некоторых моделях на приборе имеется вторая стрелка и малый циферблат, который показывает количество полных оборотов большой стрелки.

Наиболее распространены индикаторы с ценой деления 0,01 мм, поскольку большую точность трудно обеспечить реечно-зубчатой передачей. Большая стрелка такого прибора делает один оборот при смещении измерительного стержня на 1 мм, малая стрелка – при смещении на 10 мм.

На рабочем конце измерительного стержня большинства моделей находится твердосплавный шарик в сменной оправе, которым при измерении касаются измеряемой детали. Механизм индикатора имеет возвратную пружину, закрепленную между корпусом индикатора и стержнем. Эта пружина создает измерительное усилие на стержне.

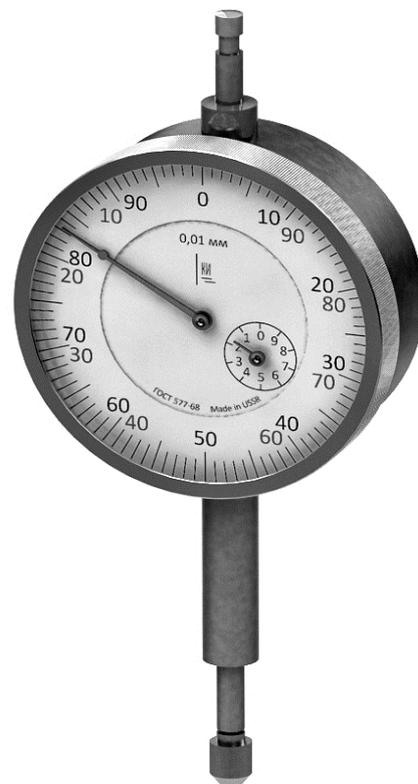


Рис. 2. Индикатор часового типа

1.3. Рычажный тензометр Гуггенбергера

Тензометр системы Гуггенбергера относится к одним из наиболее точных механических экстензометров рычажного типа. Внешний вид тензометра показан на рис. 3.

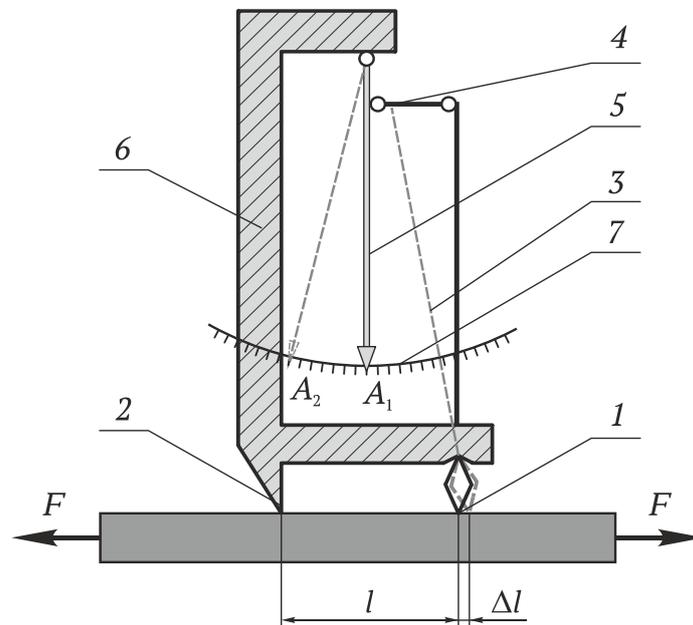


Рис. 3. Рычажный тензометр: 1 – подвижный нож; 2 – неподвижный нож; 3 – рычаг; 4 – тяга; 5 – индикаторная стрелка; 6 – рамка; 7 – шкала индикатора

Для измерения деформации тензометр прижимают к испытуемому образцу двумя ножами. Расстояние l между ножами является базой тензометра (обычно 20 мм). При деформации образца расстояние между ножами изменяется. Подвижный нож в виде призмы 1 повернется и отклонит жестко связанный с ним рычаг 3. Отклонение рычага через тягу 4 передается на стрелку 5, которая повернется вокруг оси, закрепленной на рамке 6. Значение перемещения будет отображаться на шкале 7.

Жесткая рамка вместе с призмой составляют часть прибора, воспринимающую деформацию. Частью прибора, увеличивающей деформацию, являются рычаг и стрелка. Перемещение стрелки по шкале пропорционально изменению расстояния между ножами Δl , но значительно больше, в зависимости от соотношения плеч рычагов.

Шкала тензометра проградуирована в миллиметрах. Отношение отсчета по шкале Δn к изменению расстояния между ножами Δl называют коэффициентом увеличения тензометра $K = \Delta n / \Delta l$, который как правило равен 1000.

1.4. Рычажно-винтовой тензометр системы Н. Н. Аистова

Общий вид прибора показан на рис. 4. База прибора переменна и меняется от 20 до 50 мм.

Частью прибора, воспринимающей деформацию является рамка вместе с призмой, прижимаемая струбциной к испытуемому образцу. Расстояние между острием ножа и нижним ребром призмы является базой прибора s . При изменении этого расстояния на величину Δs призма повернется на некоторый угол. Вместе с призмой повернется жестко связанный с ней рычаг. Отношение высоты призмы к длине рычага равно 1:5. Следовательно, перемещение верхнего конца рычага равно замеренной деформации, увеличенной в пять раз. Это перемещение определяется при помощи микрометрического винта по разности отсчетов на лимбе Δn (до и после деформации).

Отсчеты на лимбе берут по неподвижному указателю. Поворачивая рукой лимб доводят заостренный конец винта до соприкосновения с рычагом. Момент контакта определяется замыканием электрической цепи (при этом стрелка амперметра отклоняется). Ток с напряжением 4–6 В подается к микрометрическому винту, а отводится через рычаг.

Отсчеты на лимбе берут по неподвижному указателю. Поворачивая рукой лимб доводят заостренный конец винта до соприкосновения с рычагом. Момент контакта определяется замыканием электрической цепи (при этом стрелка амперметра отклоняется). Ток с напряжением 4–6 В подается к микрометрическому винту, а отводится через рычаг.

Шаг микрометрического винта равен 0,5 мм. Лимб разделен на 100 делений. Следовательно, поворот лимба на одно деление вызывает перемещение винта вдоль оси на 5 мкм, что соответствует деформации образца в 5 раз меньше. Таким образом, цена деления шкалы тензометра Аистова равна 1 мкм.

1.5. Электрические тензометры

К электрическим тензометрам относятся приборы, в которых используются зависимости между деформацией и какой-либо величиной, измеряемой электрическими приборами: омическим сопротивлением, силой тока, емкостью, индуктивностью и т. д.



Рис. 4. Тензометр системы Н. Н. Аистова

В электрических тензометрах различают две основные части. Одна из них, называемая датчиком, закрепляется на испытуемом образце и испытывает его деформацию в месте прикрепления. Вторая часть, обычно удаленная от датчика, но соединенная с ним проводами, предназначена отмечать изменение той или иной электрической величины, обусловленное деформацией датчика. Эта часть называется регистрирующим устройством.

Наибольшее распространение на практике ввиду надежности, удобства, простоты и универсальности получили проволочные датчики сопротивления, именуемые тензорезисторами.

1.5.1. Основы работы тензорезистора. Принцип работы тензорезистора основан на изменении сопротивления проводника при его деформировании. Это свойство называется тензочувствительностью.

Простейшим тензорезистором может служить линейный проводник, по всей длине закрепленный на исследуемом образце. Его сопротивление R определяется следующим выражением $R = \rho l / A$.

При деформации проводника происходит относительное изменение его длины dl/l , удельного сопротивления $d\rho/\rho$ и площади поперечного сечения $dA/A = -2\nu dl/l$. Связь между этими величинами может быть получена путем логарифмического дифференцирования:

$$\ln R = \ln l - \ln A + \ln \rho,$$

$$dR/R = dl/l - dA/A + d\rho/\rho = dl/l + 2\nu dl/l + d\rho/\rho.$$

Важнейшей характеристикой тензорезистора является коэффициент тензочувствительности, равный

$$\gamma = (dR/R)/(dl/l) = 1 + 2\nu + (d\rho/\rho)/(dl/l).$$

Деформация тензорезистора и изменение его сопротивления связаны линейной зависимостью

$$\varepsilon = (\Delta R / R) / \gamma.$$

Идеальный проводник для тензорезистора должен обладать высокой тензочувствительностью и высоким удельным сопротивлением. На практике широко применяют такие материалы, как константан (сплав меди с никелем) и нихром (сплав никеля и хрома). Тензочувствительность этих сплавов лежит в пределах от 1,7 до 2,2.

1.5.2. Конструктивное исполнение. Наиболее широко распространенный тензорезистор представляет собой несколько близко расположенных петель константановой проволоки (диаметром от 15 до 30 мкм), уложенных в одной плоскости и приклеенных к бумажной или пленочной подложке (рис. 5, а).

Длина петли s является базой датчика. Обычно применяют датчики с базой 5, 10, 20 мм. К концам проволоки припаиваются медные токовыводы (диаметром 0,1–0,2 мм) для подключения к проводам, ведущим к измерительному устройству.

Более высокими метрологическими характеристиками обладают фольговые тензорезисторы (рис. 5, б), решетки которых изготавливают фотолиграфическим способом, широко применяемом в полиграфии. Для обычных тензорезисторов используется константановая фольга толщиной, не превышающей 4–6 мкм.

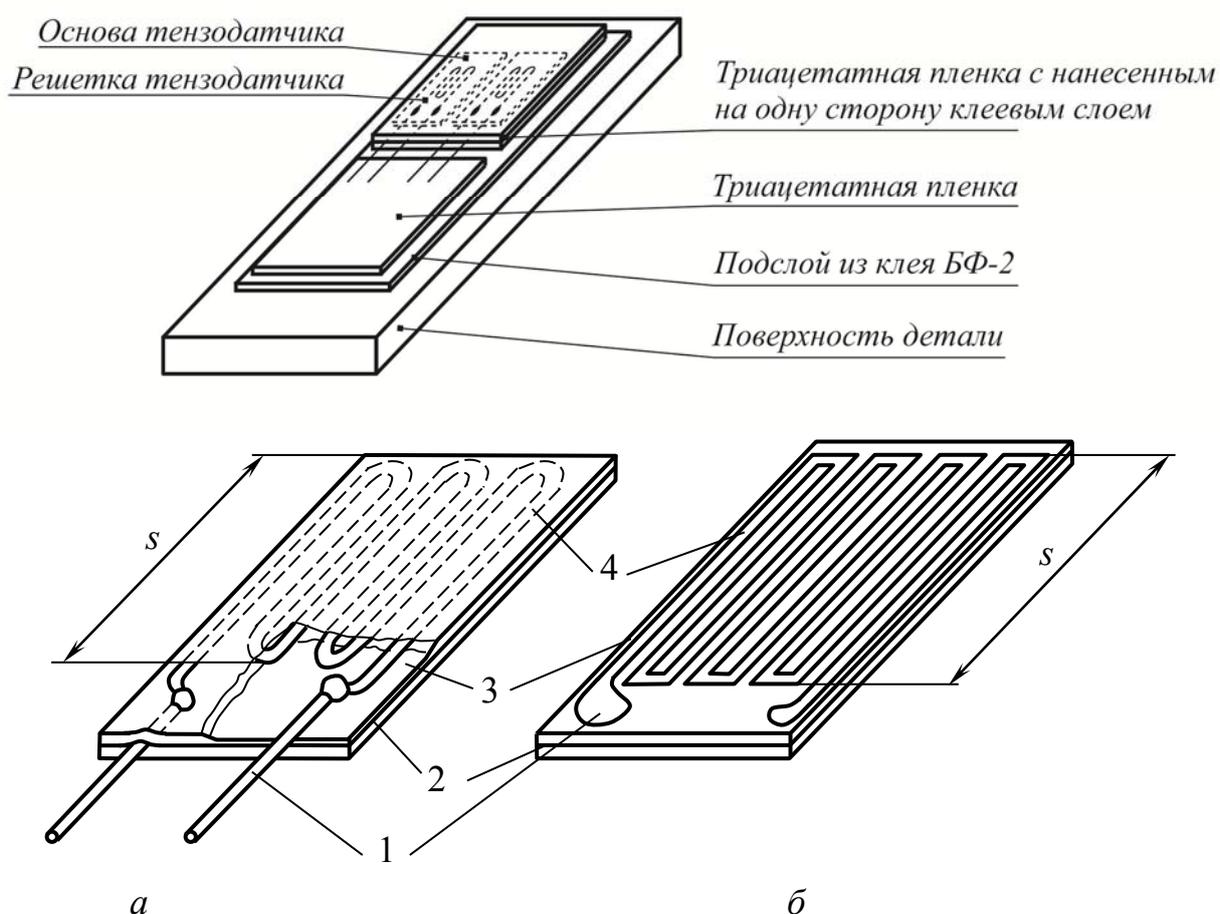


Рис. 5. Конструкция тензодатчиков: а – проволочного; б – фольгового

1.5.3. Регистрирующее устройство. Изменение сопротивления обычных проволочных тензорезисторов (сопротивлением от 100 до 200 Ом) составляет сотые доли Ома. Сопротивление такого порядка можно измерить с высокой точностью лишь электрическими цепями мостового типа. Для тензометрических измерений чаще всего используют мост Уитстона, который состоит из источника питания электрическим током, четырех плеч с омическими сопротивлениями $R_1(R_p)$, $R_2(R_k)$, R_3 , R_4 и прибора для регистрации тока, проходящего через

диагональ AB (рис. 6). Датчик, прикрепленный к поверхности испытуемого образца, является одним из плеч моста. Он называется рабочим или активным.

При колебаниях температуры заметно меняется сопротивление датчика. Чтобы исключить это влияние в другое плечо моста подключается компенсационный датчик R_K , аналогичный рабочему ($R_K = R_p$). Он помещается поверх рабочего без наклейки. Температура обоих датчиков оказывается при этом одинаковой.

Сопротивления R_3 и R_4 обычно выбирают равными, т. е. $R_3 = R_4 = R$.

Замер величины изменения омического сопротивления рабочего датчика ΔR_p производится двумя методами: методом отклонения, который рассматривается в дальнейшем, и нулевым методом. В обоих случаях в начале опыта с помощью реостата производится балансировка моста. При этом в диагонали моста ток не протекает.

При деформации рабочего датчика, вызванной деформацией испытуемого образца его сопротивление изменяется на величину ΔR_p и баланс моста нарушается. По диагонали будет протекать ток

$$I_\Gamma = [V / 2R_p(R + R_p)] \cdot (\Delta R_p / R_p)$$

Тарировка прибора. Между деформацией датчика и отклонением стрелки гальванометра существует линейная зависимость $\varepsilon = sn$, где s – цена деления прибора, выраженная в единицах деформации; n – число делений, на которые отклонилась стрелка.

Для определения цены деления используется тарировочная балка, на которую наклеивается датчик, идентичный рабочему (рис. 7). Нагружая балку с помощью груза G , мы создаем деформацию в месте наклейки датчика $\varepsilon_T = \sigma_T / E_T = (M_T / W_T) / E_T$, $M_T = Gl$. С другой стороны, $\varepsilon_T = sn_T$. Следовательно, $s = (M_T / W_T) / (E_T n_T)$.

Зная s , можно определить деформацию в данной точке балки $\varepsilon_B = sn_B$, а по ней и напряжение в случае одноосного напряженного состояния

$$\sigma_B = E_B \varepsilon_B = E_B sn_B.$$

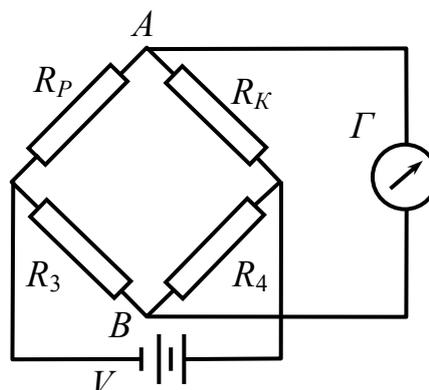


Рис. 6. Мост Уитстона

Этой формуле можно придать более удобный вид $\sigma_B = k_\sigma n_B$, где k_σ – тарировочный коэффициент (цена деления шкалы гальванометра, выраженная в единицах напряжения), равный

$$k_\sigma = (E_B/E_T) \cdot (Gl/W_T) \cdot (1/n_T)$$

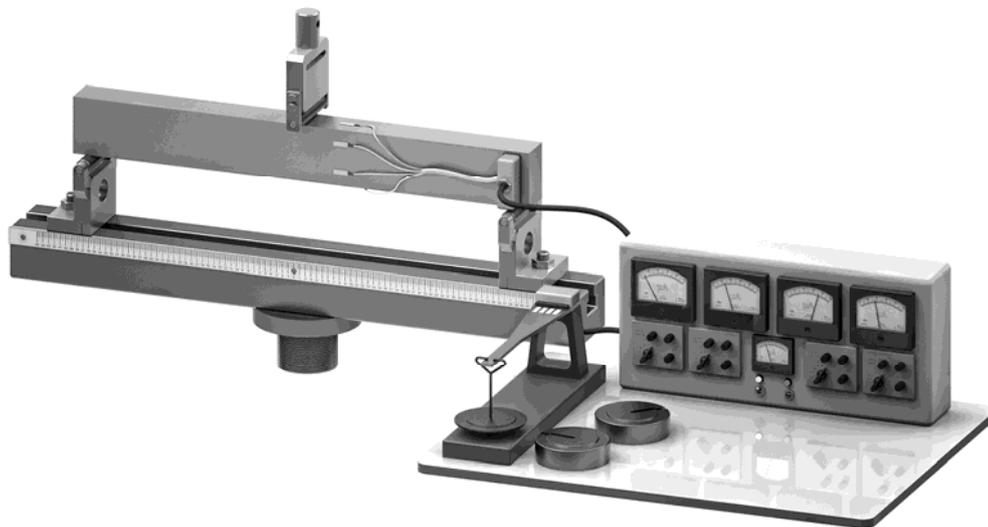


Рис. 7. Установка для тензометрирования балки при трехточечном изгибе

1.5.4. Выбор тензодатчиков. Тензорезистор наилучшим образом удовлетворяет критерию стоимость – эффективность, обладая оптимальным сочетанием характеристик, традиционно применяемых для оценки тензометрической системы. Такими характеристиками являются: 1) градуировочная константа датчика, которая должна обладать температурной и временной стабильностью; 2) погрешность измерения деформаций, которая не должна превышать 1 мкм/м в диапазоне деформаций $\pm 5\%$ ($\pm 50\,000$ мкм/м); 3) длина и ширина датчика, которые должны быть достаточно малы для адекватного измерения деформации в точке; 4) инерционность датчика, которая должна быть достаточно мала для регистрации высокочастотных динамических процессов; 5) линейность отклика датчика в пределах всего диапазона измерений; 6) экономичность датчика и сопряженных с ним устройств; 7) минимальные требования к квалификации обслуживающего персонала, необходимой для установки и проведения измерений.

Тензорезистор основан на принципах:

– проводников, подвергнутых нагрузке и (или) деформации: изменяется электрическое сопротивление;

– проводников, изготовленных из различных материалов: обнаруживают различную чувствительность к деформациям; изменение сопротивления проводников, вызванное деформацией, мало, однако может быть точно измерено с помощью моста Уинстона.

Технология фотолитографии, включающая фотографическое изготовление эталонного изображения сетки датчика с последующим травлением, применяемая для изготовления фольговых тензорезисторов, обеспечила возможность миниатюризации и разнообразие конфигурации сетки, экономичность и повышение качества изготовления датчиков.

Сплавы, используемые для изготовления фольговых тензорезисторов, характеризуются предельной деформацией около $\pm 5\%$.

Перечень сплавов, широко используемых в производстве тензодатчиков, представлен в табл. 1, где содержатся также характерные величины тензочувствительности сплавов K_A в диапазоне упругих деформаций.

Таблица 1

Тензочувствительность K_A и состав сплавов, используемых для изготовления тензодатчиков

Материал	Состав	K_A
Константан	45 Ni, 55 Cu	2,1
Карма	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2,0
Изоэластик	36 Ni, 8 Cr, 0,5 Mo, 55,5 Fe	3,6
Нихром V	80 Ni, 20 Cr	2,1
Платиновольфрам	92 Pt, 8 W	4,0
Армюр Д	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2,0

Значения чувствительности для конкретного состава материала зависят от содержания в сплаве примесей, режима холодной обработки, примененной при изготовлении тонкой фольги, и диапазона деформаций, в котором определялась величина чувствительности K_A .

В большинстве тензодатчиков используется константан благодаря постоянству тензочувствительности в весьма широком диапазоне деформаций и отсутствию существенных изменений при переходе от упругого деформирования к пластическому. Константан обладает, кроме того, высокими удельным сопротивлением ($\rho = 0,49$ мкОм·м) и температурной стабильностью. Величина K_A константана практически постоянна в диапазоне деформаций от 0 до 8 %. В отожженном состоянии константан может быть ис-

пользован при измерении деформаций до 20 %; однако в этом случае у константана обнаруживается изменение начального сопротивления, свидетельствующее о систематическом изменении сопротивления при каждом цикле нагружения. Другое преимущество константана – возможность создания температурно-компенсированных тензодатчиков путем согласования коэффициента температурного расширения датчика с аналогичным параметром технического материала (в диапазоне от 0 до $100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Сплав карма также широко применяется, причем по сравнению с константаном он обладает тремя преимуществами. Во-первых, он может быть температурно компенсирован в более широком диапазоне температур. Во-вторых, никельхромовая основа сплава карма обеспечивает тензодатчикам более высокие усталостные характеристики. В-третьих, сплав проявляет высокую временную стабильность и поэтому предпочтителен при измерении статических деформаций на протяжении длительных периодов времени – от нескольких месяцев до нескольких лет. Главный недостаток сплава карма – трудность пайки выводных проводников к контактными площадкам датчика.

Приклеиваемые тензодатчики в их современной форме состоят из элемента, чувствительного к деформации, тонкой пленки, которая является изолятором и несущей основой для чувствительного элемента, и контактных площадок для подсоединения выводных проводов.

Элемент, чувствительный к деформации, представляет собой решетку, которая отштампована или вытравлена способом фотолитографии из очень тонкого листа металлической фольги.

Конфигурация решетки тензодатчика выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимое электрическое сопротивление ($\approx 100 \text{ Ом}$) чувствительного элемента при достаточно малых размерах датчика – длине l_0 и ширине w_0 . Размер решетки варьируется фирмой-изготовителем в соответствии с практическими приложениями. Выпускаются датчики, длина которых изменяется в диапазоне от 0,2 до 150 мм. Размер чувствительного элемента определяется экспериментатором так, чтобы обеспечить минимальную погрешность, связанную с неоднородностью поля деформаций. Материал чувствительного элемента выбирается в соответствии с условиями эксперимента, включающими температуру, продолжительность измерений, динамический или циклический характер изменения нагрузки.

Фольга, чувствительная к деформациям, чрезвычайно тонка (около 0,0025 мм) и легко повреждается. По этой причине до начала фотографического процесса и травления фольгу наносят на тонкую пленку, которая служит несущей основой в процессе производства и контроля перед упаковкой, а также для манипулирования чувствительным элементом перед монтажом. После монтажа несущая основа функционирует как изолятор.

В большинстве датчиков общего назначения в качестве материала несущей основы применяется полиимидная пленка, отличающаяся гибкостью, прочностью и совместимостью с большинством связующих. В датчиках, используемых в качестве преобразователей, применяется очень тонкая пленка из эпоксидной смолы. Линейно-упругое поведение этого материала удовлетворяет жестким требованиям линейности и отсутствия гистерезиса, обычно предъявляемым к преобразователям. Полимеры, армированные стекловолокном, применяются в датчиках, предназначенных для работы в условиях больших циклических деформаций. Упрочнение, создаваемое материалом основы и покрытием (герметизированные датчики), увеличивает ресурс датчика. Изготовители тензодатчиков поставляют несколько различных клеев, которые специально предназначены для конкретных условий измерения. Комбинация датчика, его несущей основы и клея создает преобразователь для измерения деформаций. Целостность данной системы, требующая самого серьезного внимания, обеспечивается применением апробированных клеев, а также соответствующих процедур нанесения и сушки.

В качестве клеев наиболее широко используются эпоксидная смола, метил-2-цианоакрилат, полиимид и некоторые виды керамики.

Клеи на основе цианоакрилата не требуют ни нагревания, ни отвердителя для инициирования полимеризации, в отечественной практике – это клей «циакрин». При разбрызгивании такого клея в виде тонкой пленки между тензодатчиком и образцом и воздействии на него незначительного давления для начала полимеризации оказывается достаточным присутствие на поверхностях небольших следов влаги и (или) окислов. Для ускорения полимеризации на одну из поверхностей может быть нанесен катализатор. Благодаря чрезвычайно быстрой полимеризации клей на базе цианоакрилата является идеальным компонентом для тензодатчиков общего назначения. Минутного нажатия большим пальцем и двухминутной паузы перед

удалением ленты оказывается достаточным для последующей полимеризации во время подключения сигнальных проводов. Цианоакрилат может использоваться в диапазоне температур от -32 до 65 °С. Он обеспечивает правильное измерение деформаций не выше 6 %. Поскольку прочность клея снижается с течением времени и в результате поглощения влаги, необходимо защищать датчик от влаги при его длительной эксплуатации.

Решетка тензодатчика содержит контакты, которые упрощают подключение сигнальных проводов. Большие контакты облегчают подключение и снижают чувствительность части датчика, выходящей за пределы области измерения. Выпускаемые в настоящее время датчики характеризуются большим разнообразием конфигураций контактов и сигнальных проводов. В случаях, когда контакты обладают малым размером (миниатюрные датчики), сигнальные провода должны подключаться к датчику изготовителем до установки.

1.5.5. Характеристики фольговых тензорезисторов. Фольговые тензодатчики представляют собой малогабаритные точные резисторы, смонтированные на гибкой несущей основе, прикрепляемой к исследуемой конструкции. Сопротивление датчика измеряется с погрешностью в пределах $\pm 0,4$ %, тогда как допустимая погрешность тензочувствительности, K_g , основанной на градуировочных данных партии датчиков, составляет $\pm 1,5$ %. В соответствии с этими данными фольговый тензодатчик позволяет производить достаточно точные измерения деформаций. Вместе с тем на результаты измерений влияют процедура установки, уровень измеряемых деформаций и условия окружающей среды при проведении испытаний. Как правило, погрешность получаемых результатов существенно превышает теоретическую погрешность, соответствующую паспортным данным датчика.

1.5.6. Циклическое деформирование. Оценка функционирования тензоизмерительной системы (под «системой» подразумеваются датчик, клей и средства измерения) включает рассмотрение линейности, гистерезиса и изменения начального сопротивления (дрейф нуля).

На рис. 8 изображена зависимость выходного сигнала датчика, представленного в единицах измеряемой деформации, от циклически изменяющейся деформации. Как правило, на практике наблюдаются небольшие отклонения от линейности, причем кривая разгрузки располагается ниже кривой нагружения, образуя петлю гистерезиса.

Кроме того, выходной сигнал датчика после разгрузки свидетельствует о наличии малой отрицательной деформации, называемой смещением нуля. Величина отклонения от линейности, гистерезис и смещение нуля зависят от уровня деформации, качества приклейки датчика, режима холодной обработки фольги и материала основы.

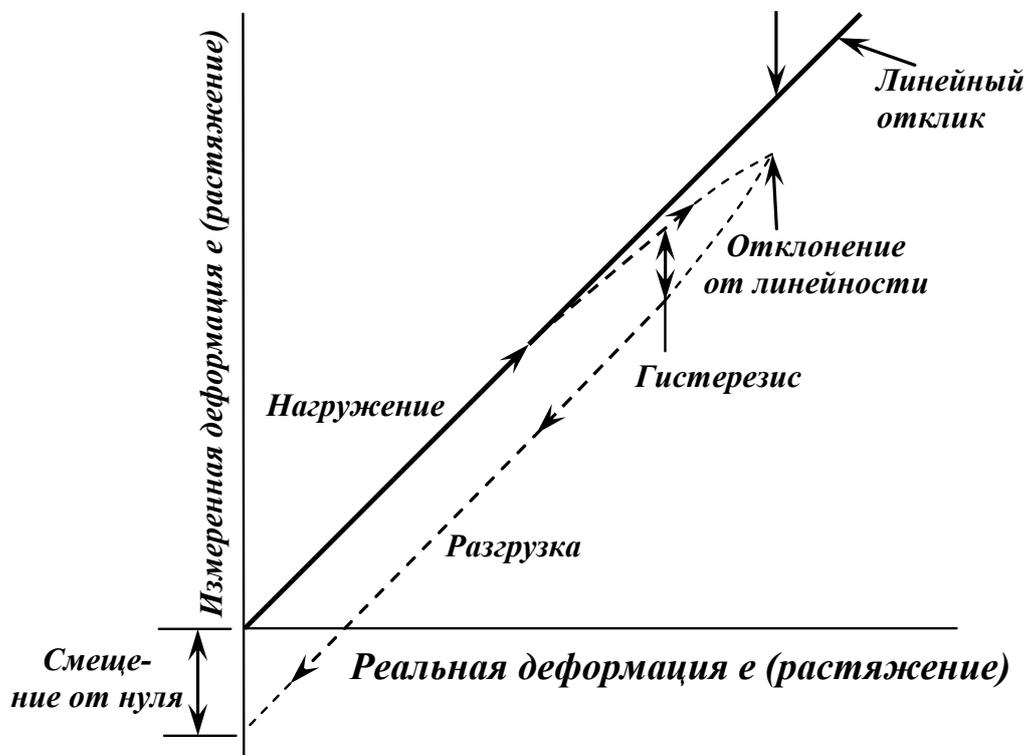


Рис. 8. Характеристика циклического деформирования тензодатчика, включающая нелинейность, гистерезис и смещение нуля (масштаб условный)

Для правильно установленных датчиков отклонения от линейности должны составлять около 0,1 % максимальной деформации при использовании основы из полиимида и 0,05 % для основы из эпоксидной смолы. Наибольшую трудность представляет оценка гистерезиса и смещения нуля в нулевом цикле нагружения. В большинстве практических приложений смещение нуля составляет около 1 % максимальной деформации. Рекомендуется (если это возможно) предварительное циклическое нагружение при уровне 125 % максимальной нагрузки в эксперименте, что позволяет снизить гистерезис и смещение нуля после начальных четырех-пяти циклов нагружения до уровня, не превышающего 0,2 % максимальной деформации.

1.5.7. Температура. Воздействие на конструкцию тензодатчика колебаний температуры во многих практических задачах является наряду с воздействием нагрузки важным фактором, изменяющим сопротивление тензорезистора.

При измерении температуры окружающей среды возникают четыре эффекта, способных изменить функциональные характеристики датчика:

- 1) изменение тензочувствительности металлического сплава K_A ;
- 2) удлинение или сокращение решетки датчика ($\Delta L/L = \alpha \Delta T$);
- 3) удлинение или сокращение образца ($\Delta L/L = \beta \Delta T$);
- 4) изменение сопротивления датчика ($\Delta R/R = \gamma \Delta T$).

Тензочувствительность K_A двух наиболее широко используемых сплавов (константан и карма) – линейная функция температуры (рис. 9). Как свидетельствуют приведенные графики, величины $\Delta K_A/\Delta T$ составляют 0,00735 и $-0,00975$ % на 1°C для сплавов константан и карма соответственно. В связи с тем, что изменения K_A достаточно малы (менее 1 % для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$), эти изменения при обычном анализе напряжений не учитываются. К сожалению, датчики не являются полностью компенсированными в широком диапазоне температур. Типичные датчики обнаруживают присутствие кажущейся деформации, изменяющейся с температурой так, как показано на рис. 10. Кажущаяся деформация, вызванная изменением температуры в несколько градусов в окрестности 24°C , достаточно мала [менее $0,5 \text{ мкм/м} \times ^\circ\text{C}$].

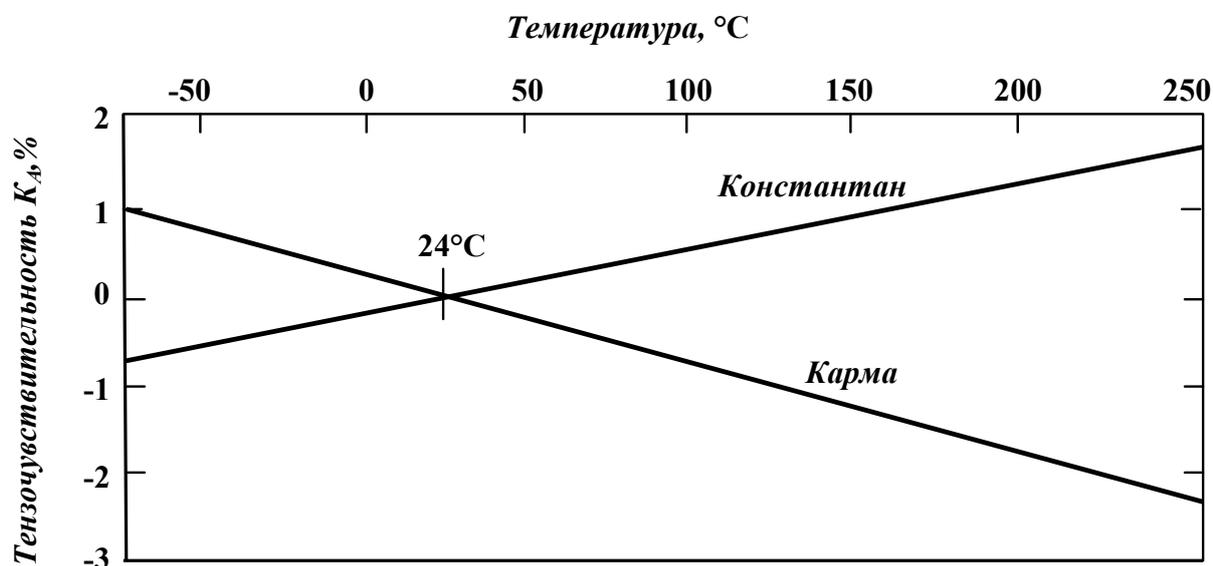


Рис. 9. Зависимость тензочувствительности сплавов константан и карма от температуры

1.5.8. Максимальная деформация. Максимальная деформация, измеряемая фольговым датчиком, определяется базой датчика, материалом фольги, материалом несущей подложки и связующим.

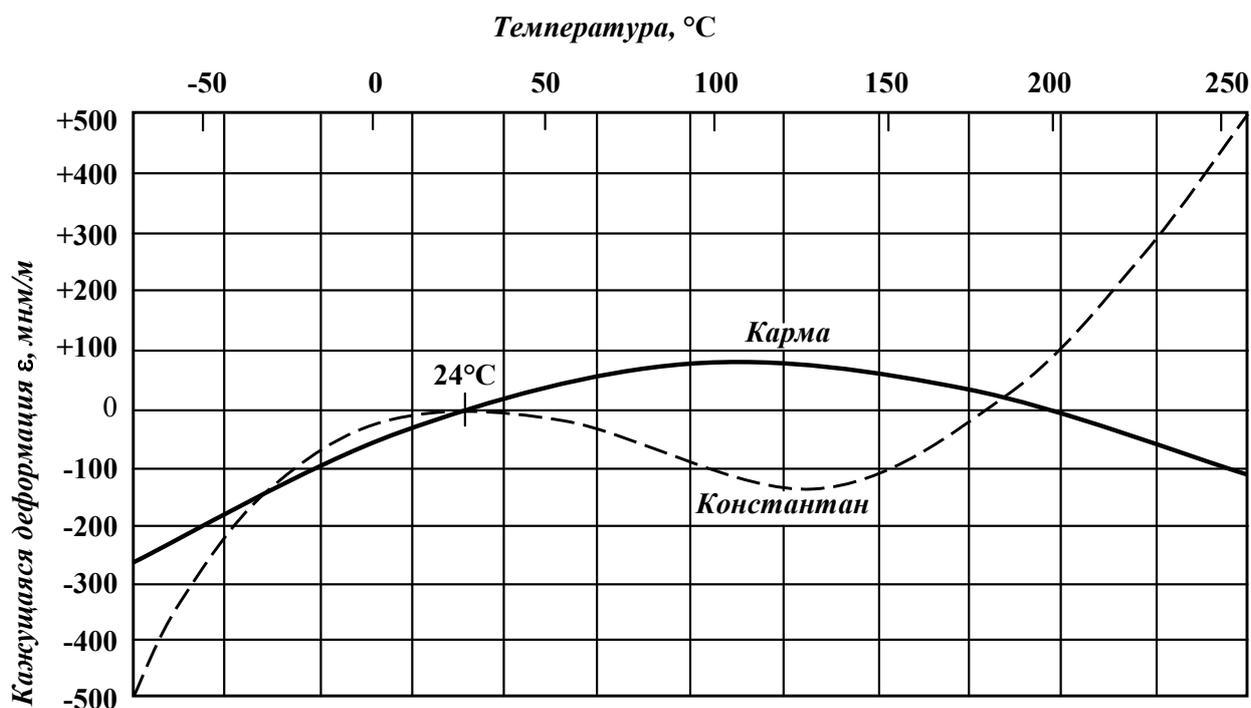


Рис. 10. Зависимость кажущейся деформации от температуры для сплавов константан и карма

Сплавы константан и карма на несущей основе из полиимида, используемые в тензодатчиках общего назначения, могут применяться для измерения деформации в пределах ± 5 и $\pm 1,5$ % соответственно. Эти пределы деформирования соответствуют диапазону упругого деформирования металлических и керамических элементов конструкций, в которых деформации текучести или разрушения обычно не превышают 1 %. Указанные пределы, однако, легко могут быть превышены при исследовании пластических деформаций, существенно превышающих предел текучести конструкционного материала. В таких случаях обычно используются датчики больших деформаций, которые содержат решетку из дважды отпущенной константановой фольги с основой из полиимида, способной к значительному удлинению. Для крепления датчиков к конструкции используют эпоксидные смолы, модифицированные уретаном. Соблюдение необходимых мер предосторожности при подготовке поверхности конструкции, зачистке обратной стороны датчика, составлении пластифицированного высокоэластичного клея и фиксации подводящих проводов (не вносящей существенной концентрации напряжений) позволяет достичь деформации около 20 % до возникновения трещин в паяных контактах или на концах решетки датчика.

1.5.9. Усталость. Во многих случаях тензодатчики устанавливаются на элементах конструкции, подверженных циклическому нагружению, причем ресурс конструкции, в течение которого используется тензодатчик, составляет несколько миллионов циклов. Для данного класса практических задач представляют интерес три параметра – смещение нуля, изменение чувствительности датчика и повреждение датчика в связи с усталостью.

По мере того как тензодатчик подвергается повторяющемуся циклическому деформированию, его решетка уплотняется и ее сопротивление изменяется, что вызывает смещение нуля, зависящее от величины деформации, числа циклов, материала (сплав) решетки, режима холодной обработки сплава и вида основы датчика. Наихудшим для рассматриваемых задач является константовый датчик с открытой поверхностью (ЕА), у которого начинается заметное смещение нуля после 10^3 циклов. Капсулирование решетки при помощи эпоксидно-фенольной смолы, армированной стекловолокном (тип WA), увеличивает ресурс таким образом, что смещение нуля становится ощутимым после 10^5 циклов с амплитудой 2100 мкм/м.

Дальнейшее улучшение параметров может быть обеспечено применением решеток из сплавов карма и изоэластик, которые полностью герметизированы эпоксидно-фенольной смолой основы, усиленной стекловолокном, и снабжены соединительными проводами, установленными на заводе-изготовителе. Изменения чувствительности датчика при циклическом деформировании чрезвычайно малы и, как правило, могут не приниматься во внимание до тех пор, пока смещение нуля не превысит $\sim 10^2$ мкм/м.

Весьма существенный фактор, требующий учета при использовании тензодатчиков в условиях циклического нагружения, – увеличение тензочувствительности, обусловленное распространением трещины в решетке датчика. Трещина, как правило, развивается в решетке вблизи соединения сигнального провода с контактной площадкой. Наличие трещины вызывает небольшое увеличение сопротивления датчика, которое воспринимается как кажущаяся деформация. Таким образом, кажущаяся тензочувствительность датчика возрастает в результате возникновения и последующего развития усталостной трещины.

На основании выше изложенного для проведения усталостных испытаний были выбраны тензорезисторы типа КФ5П1-1-100

и ТКФ-5-100 базой 5 мм, коэффициент тензочувствительности $K_A = 2,14$, номинальное сопротивление $R_H = 100,1 \pm 0,1$ Ом, клей на основе цианакрилата, материал гидроизоляции тензорезистора – герметик кремний органический белый ВГО-1, провод ПЛШЭО площадью $0,07$ мм².

1.5.10. Наклейка тензодатчиков. Работу выполняют в чистом помещении при температуре не ниже $+20$ °С и влажности до 80 %.

Подготовка поверхности.

1. Очистить поверхность детали, предназначенной для наклейки, от пыли, грязи, ржавчины и с помощью толуола или ацетона от жиров, масел и краски. Чистота обработки поверхностей в месте наклейки тензодатчика должна быть $\nabla 6$. Шлифовальные и полированные поверхности зарубить до чистоты $\nabla 6$ шлифовальной шкуркой №№ 5 и 6, нанося штрих перпендикулярно линиям решетки.

2. Для ориентации тензодатчиков на поверхности детали произвести разметку осевых линий согласно схемы наклейки.

3. С помощью ватного тампона поверхность детали, предназначенной для наклейки, промыть ацетоном (ГОС Т 2603 -63), а затем спиртом (этиловым ректифицированным ГОСТ 5962-51) или этиловым гидролизным высшей очистки С ТУ 57227-69), вату менять до тех пор, пока она не будет оставаться совершенно чистой.

4. Просушить промытую поверхность 5–10 минут.

5. Нанести на подготовленную поверхность кисточкой равномерный тонкий ($0,015$ - $0,020$ мм) слой клея БФ-2.

6. Просушить клей на воздухе не менее 2 часов, а затем по режиму: нагрев до 70 °С, выдержка 1 час, нагрев до 120 °С, выдержка 2 часа, охлаждение вместе с печью.

7. Нанести второй слой клея БФ-2 по п. 5 и просушить по п 6.

Подготовка тензодатчиков.

8. Осмотреть тензодатчики. У тензодатчиков, предназначенных для наклейки, недопустимо наличие заломов на площади, занятой решеткой, повреждение выводов и основы.

9. Замерить сопротивление тензодатчиков с помощью моста постоянного тока (класс точности не ниже 0,1).

10. Сгруппировать тензодатчики с требуемым разбросом. Учесть, что после полимеризации наклеенных тензодатчиков их сопротивление может измениться на $0,1$ - $0,3$ Ом.

Примечание: Не допускается прикосновение руками к основе тензодатчика.

Наклейка тензодатчиков и термообработка.

11. Нижнюю сторону основы каждого тензодатчика протереть спиртом, а место пайки с нижней стороны тензодатчика смазать клеем БФ-2 и наложить на поверхность так, чтобы осевые линии тензодатчика совпали с линиями разметки, и через наложенную сверху целлофановую прокладку прикатать резиновым валиком.

12. С помощью омметра проверить наклеенные тензодатчики на целостность цепи и отсутствие короткого замыкания на корпус детали.

13. Накрыть тензодатчики и участок поверхности детали, покрытый клеем, триацетатной пленкой, предварительно покрытой клеем БФ-2 и просушенной на воздухе не менее 2 часов, клеевой стороной к тензодатчику (рис. 11). Для закрепления триацетатной пленки на детали ее уголки смазать клеем БФ-2 в количестве, исключающем попадание его на решетку тензодатчика.

14. Во избежание приклейки выводных проводников подложить под них слои чистой триацетатной пленки (рис. 11).

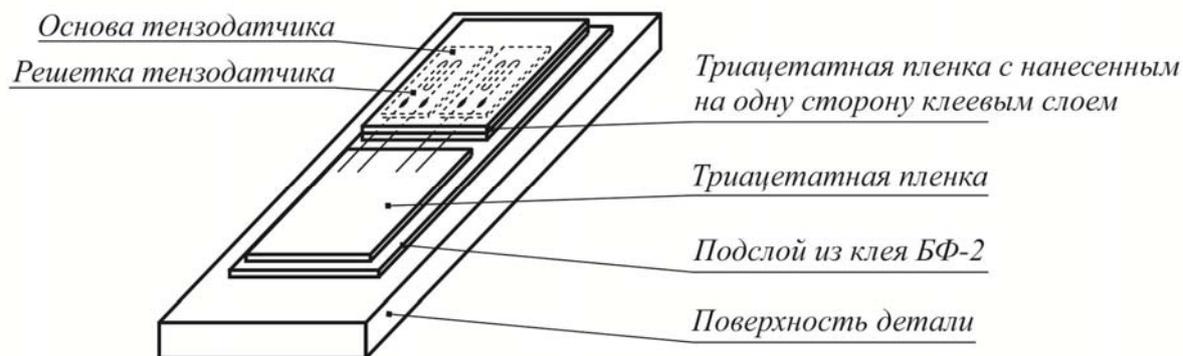


Рис. 11. Схема установки тензодатчика

15. Наложить на тензодатчики слой чистой триацетатной пленки, слой чертежной бумаги, слой войлока и металлическую накладку.

16. Накладку прижать с усилием 8-10 кГ/см² и подвергнуть тепловой обработке по режиму:

нагрев до 70 °С, выдержка 1 час;

нагрев до 140 °С, выдержка 2 часа;

нагрев до 180 °С, выдержка 5 часов, охлаждение вместе с печью.

Примечание: Скорость подъема температуры при всех тепловых обработках 1-1,5 ° в мин.

Указанные в инструкции режимы выдержать на поверхности детали.

17. Снять накладку, войлок, чертежную бумагу и триацетатную пленку.

18. Повторить п. 12. (С помощью омметра проверить наклеенные тензодатчики на целостность цепи и отсутствие короткого замыкания по корпус детали.)

19. Осмотреть наклеенные тензодатчики: поверхность наклейки тензодатчиков должна быть темно-вишневого цвета; не должно быть искажения решетки, которое выражается в сдвиге петель и расширении концевых участков; недопустимы темные пятна, коробление клея, пузыри и вздутия.

20. Повторить п. 9. Замерить сопротивление тензодатчиков с помощью моста постоянного тока (класс точности не ниже 0,1).

21. Проверить сопротивление изоляции. Оно должно быть не менее 100000 мгом, напряжение не более 200 В.

22. Составить паспорт на наклеенные тензодатчики.

1.5.11. Средства тензоизмерений. Изменение сопротивления, возникающее при деформировании тензодатчика, чрезвычайно мало. По этой причине чрезвычайно малы разбалансировка моста Уитстона и соответствующее изменение напряжения, которое должно быть выделено, усилено и зарегистрировано. Некоторые электронные устройства (усилители, фильтры, аналого-цифровые преобразователи и др.), используемые в современных измерительных системах в связи с решением указанных вопросов, приводятся ниже.

Усилители. Усилитель повышает уровень слабого сигнала датчика до уровня, требуемого для устройства регистрации напряжения. Усилитель описывается следующими характеристиками.

1. Коэффициент усиления G , представляющий собой отношение выходного напряжения E_o к входному E_i в линейном диапазоне усилителя. Имеем

$$E_o = GE_i.$$

Все усилители имеют ограниченный диапазон, в котором обеспечивается линейность.

2. Входное сопротивление Z_i , определяющее величину тока, потребляемого усилителем от источника входного напряжения. В связи с тем что усилитель с низким входным сопротивлением потребляет значительный ток от датчика, предпочтительно высокое входное сопротивление.

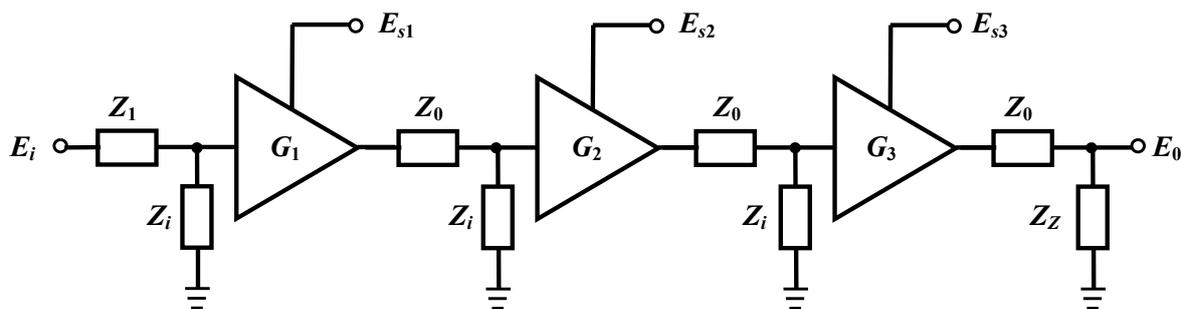


Рис. 12. Система усилителей с высоким общим коэффициентом усиления

3. Выходное сопротивление Z_o , определяющее падение напряжения на усилителе при заданном выходном токе. Предпочтительно низкое выходное сопротивление.

4. Передаточная функция $H(\omega)$ (называемая также частотной характеристикой), характеризующая изменение коэффициента усиления в зависимости от частоты входного сигнала.

5. Постоянная времени τ , характеризующая реакцию усилителя на ступенчатый входной сигнал.

Взаимосвязь между сопротивлениями и коэффициентами усиления системы усилителей с высоким общим коэффициентом усиления, представленной на рис. 12, может быть выражена в виде

$$E_o = G_1 G_2 G_3 \frac{Z_i}{Z_i + Z_1} \left(\frac{Z_i}{Z_i + Z_o} \right)^2 \frac{Z_2}{Z_o + Z_2} E_i,$$

где Z_i – входное сопротивление системы; Z_o – выходное сопротивление системы; Z_1 – внутреннее сопротивление датчика; Z_2 – входное сопротивление устройства регистрации напряжения.

В усилителях напряжения величина Z_i должна быть много больше величин Z_1 и Z_o . Поэтому соотношение между сопротивлениями и коэффициентами усиления системы приводится к виду

$$E_o = G_1 G_2 G_3 \frac{Z_2}{Z_o + Z_2} E_i,$$

где член $Z_2/(Z_o + Z_2)$ описывает снижение напряжения вследствие потребления тока регистрирующим устройством. При высоком входном сопротивлении такого устройства по отношению к выходному сопротивлению усилителя, общее усиление системы усилителей равно произведению коэффициентов усиления отдельных усилителей:

$$E_o = G_1 G_2 G_3 E_i,$$

Частотная характеристика усилителя в любой измерительной системе нуждается в тщательном анализе. Как показано на рис. 13, эта характеристика является плоской в интервале между нижней и верхней граничными частотами f_l и f_u .

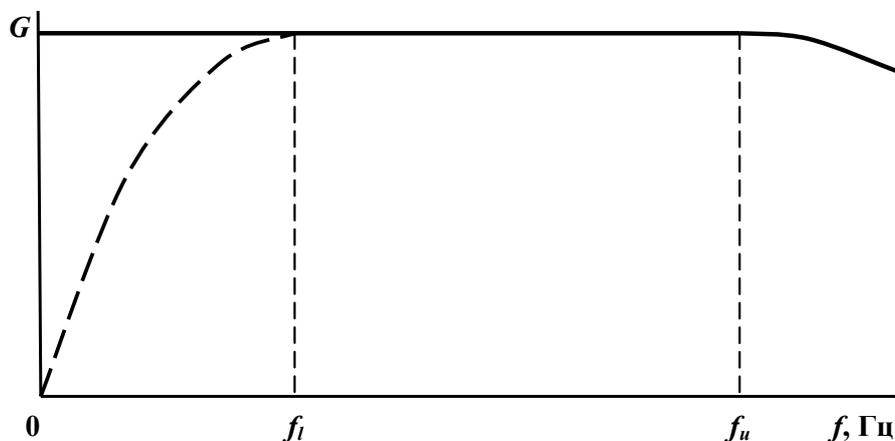


Рис. 13. Частотная характеристика системы усилитель – регистрирующее устройство

В усилителях постоянного тока коэффициент усиления постоянен вплоть до нулевой частоты. В усилителях переменного тока коэффициент усиления падает до нуля по мере приближения к нулю частоты входного сигнала. Начиная с верхней граничной частоты, дальнейшее увеличение частоты входного сигнала приводит к снижению коэффициента усиления до нуля. Таким образом, как низко-, так и высокочастотные сигналы могут существенно искажаться усилителем и по фазе, и по амплитуде.

Один из методов определения частотной характеристики усилителя заключается в анализе его реакции на ступенчатое входное напряжение (рис. 14). Эта реакция часто хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$E_o = G(1 - e^{-t/\tau})E_i,$$

где τ – постоянная времени усилителя.

Операционные усилители. Операционный усилитель представляет собой полную схему усилителя с высоким (как правило $G > 10^5$) коэффициентом усиления, которая комбинируется с разнообразными внешними пассивными резистивными и емкостными элементами. Высокое усиление в сочетании с высоким входным ($Z_i > 10 \text{ МОм}$) и низким выходным ($Z_o < 100 \text{ Ом}$) сопротивлениями делает операци-

онный усилитель идеальным элементом схем формирования сигналов по напряжению.

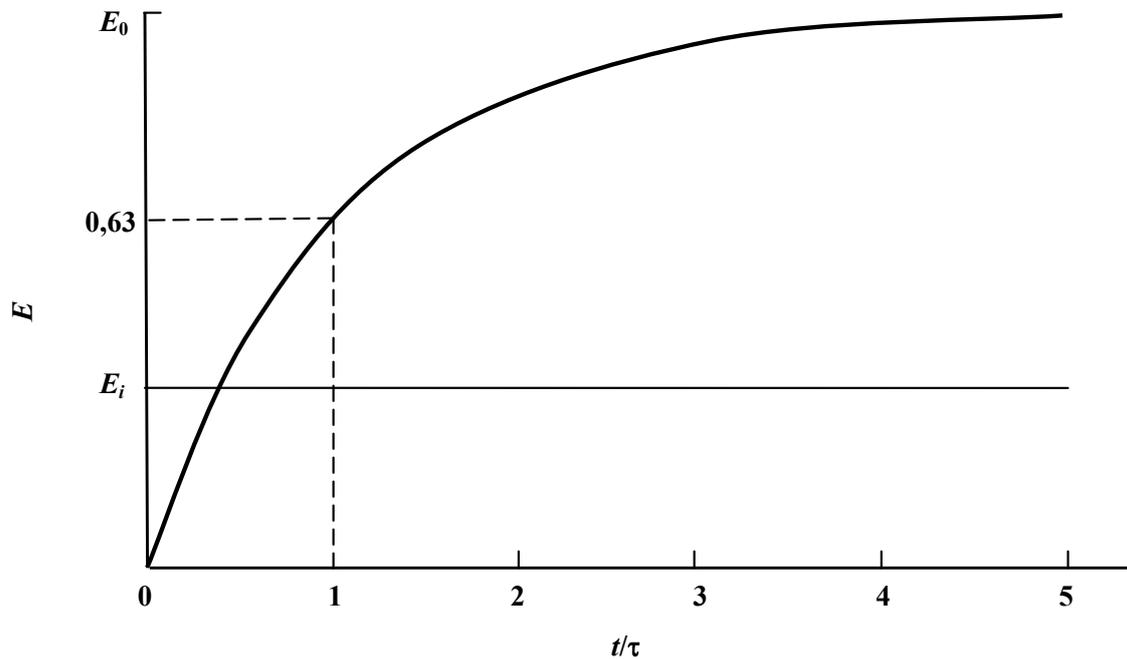


Рис. 14. Отклик усилителя на ступенчатое входное воздействие

Традиционно используемое схематическое обозначение операционного усилителя показано на рис. 15.

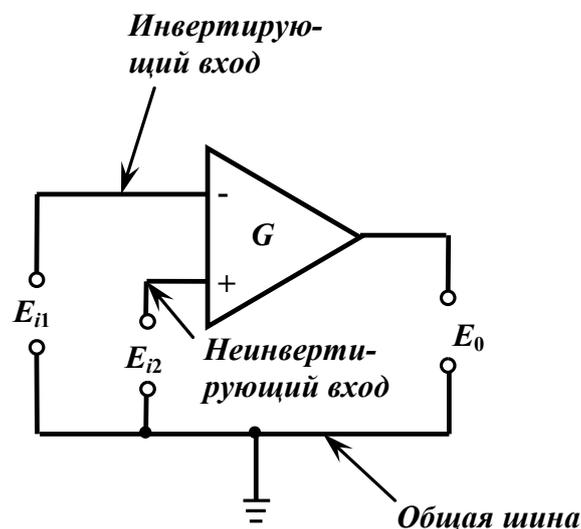


Рис. 15. Схема операционного усилителя

Два входных контакта называют инвертирующим (-) и неинвертирующим (+) входами усилителя. Выходное напряжение E_o усилителя описывается выражением

$$E_o = G(E_{i2} - E_{i1}),$$

из которого следует, что, поскольку выходное напряжение определяется разностью входных напряжений, операционный усилитель является дифференциальным усилителем. Операционный усилитель находит различные применения. Их типичные примеры – повторители напряжения, а также инвертирующие, суммирующие, интегрирующие и дифференцирующие усилители.

Повторители напряжения. В схеме повторителя напряжения (рис. 16) используется операционный усилитель для обеспечения высокого входного сопротивления с целью уменьшения потребления датчиком тока (мощности) и обеспечения низкого выходного сопротивления, чтобы минимизировать нагружение датчика устройством регистрации.

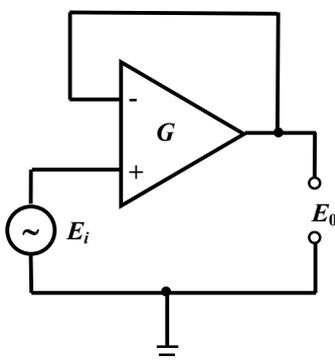


Рис. 16. Схема повторителя напряжения

Повторитель напряжения служит промежуточным звеном между датчиком и устройством регистрации. Коэффициент усиления повторителя напряжения имеет вид

$$G_c = \frac{E_o}{E_i} = \frac{G}{1+G} \sim 1.$$

Эффективное входное сопротивление описывается зависимостью

$$R_{ci} = E_i R_i / (E_i - E_o) = (1+G) R_i,$$

где R_i – входное сопротивление усилителя. Эффективное выходное сопротивление имеет вид

$$R_{co} = R_o / (1+G),$$

где R_o – выходное сопротивление усилителя.

Принципиальная схема суммирующего усилителя показана на рис. 17. Принципиальные схемы инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей показаны на рис. 18.

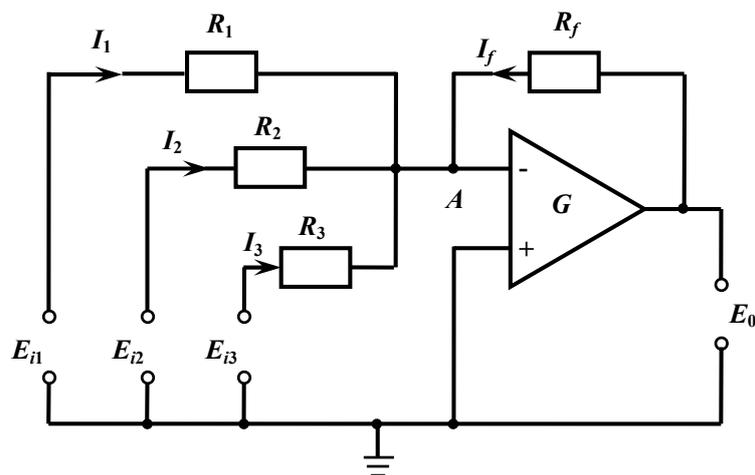
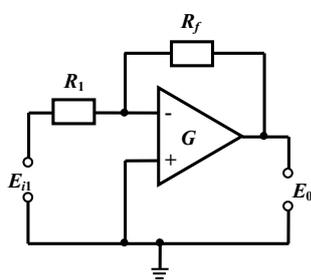
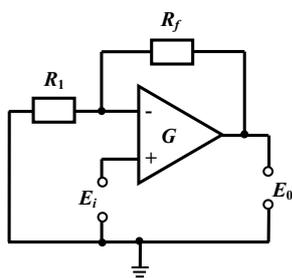


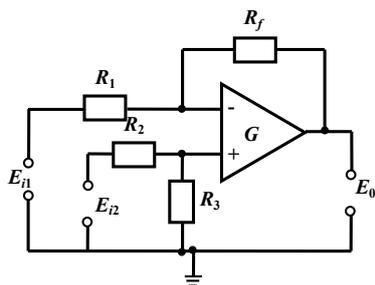
Рис. 17. Схема суммирующего усилителя



а



б



в

Рис. 18. Некоторые простые приборные усилители на основе операционного усилителя: а – инвертирующий; б – неинвертирующий; в – дифференциальный

1.5.12. Интегрирующие усилители. В цепи обратной связи интегрирующего усилителя используется емкость вместо резистора (рис. 19).

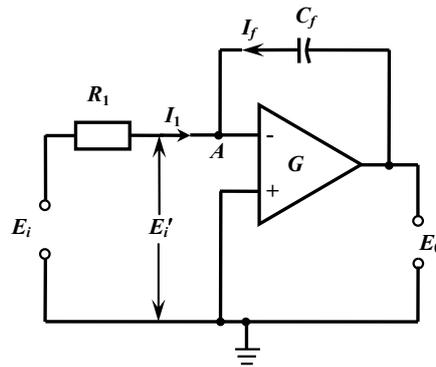


Рис. 19. Схема интегрирующего усилителя

Рассмотренные схемы свидетельствуют о том, что операционный усилитель – весьма полезный элемент измерительных систем.

1.5.13. Фильтры. Часто сигналы датчиков бывают искажены воздействием шумов различного физического происхождения. При значительной разнице диапазонов частот шумов и информационного сигнала датчика для удаления или существенного снижения уровня нежелательных компонент сигнала могут быть использованы фильтры. Среди фильтров, используемых в схемах формирования сигнала, следует также указать высокочастотный и низкочастотный RC -фильтры, а также RC -фильтр второго порядка. Эти фильтры могут быть построены на базе как пассивных, так и активных (включая операционные усилители) элементов схемы. На рис. 20 изображены схемы каждого из перечисленных фильтров.

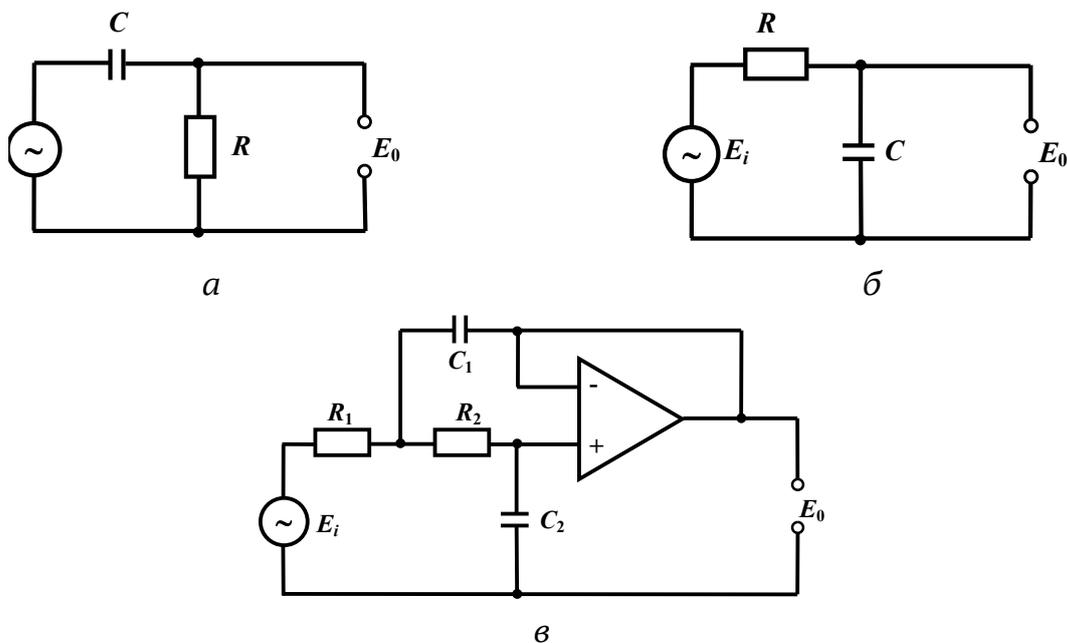


Рис. 20. RC -фильтры, используемые для формирования сигнала: а – высокочастотный; б – низкочастотный; в – низкочастотный второго порядка

1.5.14. Тензометрическая регистрирующая аппаратура. Для регистрации изменения сопротивления тензорезисторов используются разнообразные приборы. Выбор конкретного типа прибора обычно зависит от характера проводимых измерений (статические или динамические) и от количества используемых датчиков и каналов измерения. При регистрации переменных деформаций, как правило, возникают проблемы, связанные с устранением шумов и реализацией соответствующей частотной характеристики тензометрической аппаратуры.

Изменения сопротивления тензодатчика чрезвычайно малы и составляют для 120 Ом датчика около 0,00024 Ом на деформацию 1 мкм/м. Таким образом, деформация 1000 мкм/м изменяет сопротивление 120-Ом датчика на 0,240 Ом. Для преобразования столь малых изменений сопротивления в выходные сигналы напряжения, которые могут регистрироваться, в измерительных приборах широко используются потенциометрические и мостовые схемы. В обоих типах схем используются как источники постоянного напряжения, так и источники постоянного тока.

1.5.15. Мост Уитстона. Схемы с источником постоянного напряжения. Мост Уитстона с питанием от источника постоянного напряжения состоит из трех частей (рис. 21).

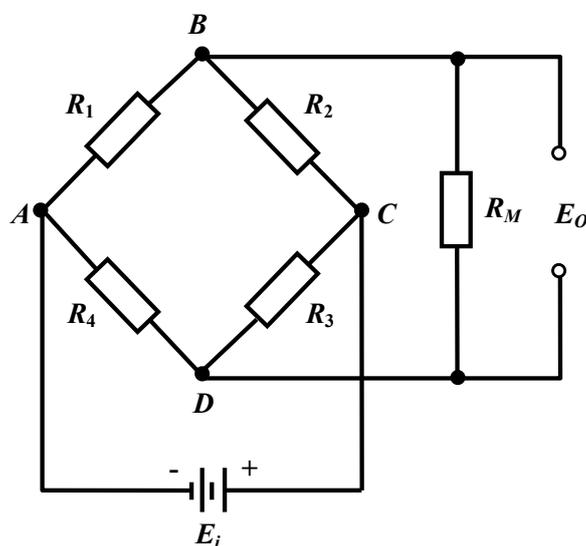


Рис. 21. Схема моста Уитстона с источником постоянного напряжения

Это источник напряжения E_i , четыре резистора (R_1 , R_2 , R_3 и R_4), образующие мост, и регистрирующая схема, включающая резистор нагрузки R_M . В приведенных ниже уравнениях полагается $R_M = \infty$, так что ток, протекающий через мост, не ответвляется в нагрузку.

На рис. 22 показаны четыре обычно используемых варианта включения тензодатчиков в схеме моста Уитстона. Достоинства и ограничения каждого варианта рассматриваются ниже.

Вариант 1. Одиночный активный тензодатчик установлен в позиции R_1 (рис. 22, а). Данная схема используется как для статических, так и для динамических измерений, когда температурная компенсация не имеет существенного значения. Резисторы R_2 , R_3 и R_4 обычно подбираются таким образом, чтобы обеспечить начальную балансировку моста и максимальную чувствительность схемы. В данном варианте функционирование моста характеризуется наибольшей нелинейностью, в связи с чем для обеспечения погрешности в пределах 1 % величина $\Delta R_g/R_g$ не должна превышать 0,02, где R_g – сопротивление тензорезистора. Чувствительность системы на базе моста Уитстона с тензодатчиком характеризуется изменением напряжения ΔE_o на единицу деформации, которое также равно произведению чувствительности тензодатчика S_g на чувствительность моста S_{cv} .

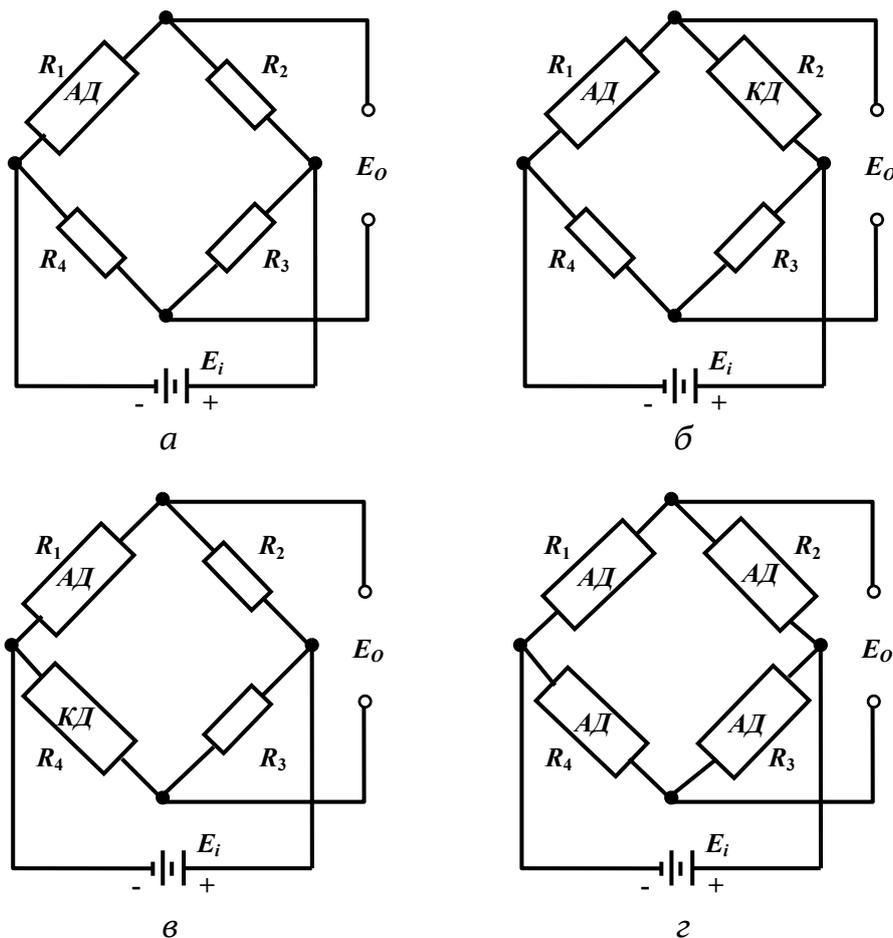


Рис. 22. Варианты включения тензодатчиков в схему моста Уитстона:
 АД – активный датчик; КД – компенсационный датчик

Вариант 2. Схема моста Уитстона с двумя активными плечами R_1 и R_2 показана на рис. 22, б (R_3 и R_4 – постоянные сопротивления). Есть два способа использования данной схемы.

Первый из них обеспечивает температурную компенсацию для одного активного датчика в положении R_1 , когда компенсационный датчик в положении R_2 имеет ту же температуру, что и активный.

Единственное преимущество перед вариантом 1 – снижение температурной чувствительности схемы.

Второй способ применения рассматриваемой тензометрической схемы позволяет получить повышенную чувствительность при сохранении температурной компенсации и подавлении или ослаблении нелинейности.

Вариант 3. Два активных датчика установлены в плечах R_1 и R_4 схемы, изображенной на рис. 22, в. Плечо R_4 может использоваться подобно плечу R_2 в варианте 2 как для обеспечения температурной компенсации, так и повышения чувствительности, поскольку и $\Delta R_2/R_2$ и $\Delta R_4/R_4$ имеют тот же знак, что и $\Delta R_1/R_1$. Принципиальное преимущество варианта 3 перед вариантом 2 состоит в возможности увеличения эффективности. Кроме того, если отношения $\Delta R/R$ имеют одинаковую величину и противоположные знаки, то при любом значении r нелинейность равна нулю. Для варианта конфигурации, в котором плечо R_1 является активным, а плечо R_4 – термокомпенсирующим, нелинейный член имеет такой же вид, как в схеме с одним активным датчиком. Чувствительность схемы приближается к чувствительности моста с четырьмя плечами, описанного ниже.

Вариант 4. В данном случае (рис. 22, г) используются четыре активных тензодатчика. В данной схеме достигается полная температурная компенсация при условии, что одинаковые датчики установлены на поверхностях одного и того же материала и испытывают идентичные температурные воздействия.

Основные преимущества моста с четырьмя плечами – температурная компенсация, линейность (если все приращения ΔR одинаковы по величине) и возможность конструирования измерительных схем, лишенных нежелательной чувствительности к изгибающему или осевому нагружению.

1.5.16. Схемы с источником постоянного тока. Для питания в схеме моста Уитстона может быть использован источник тока (рис. 23). Ток источника делится в точке C моста на две составляющие I_1 и I_2 .

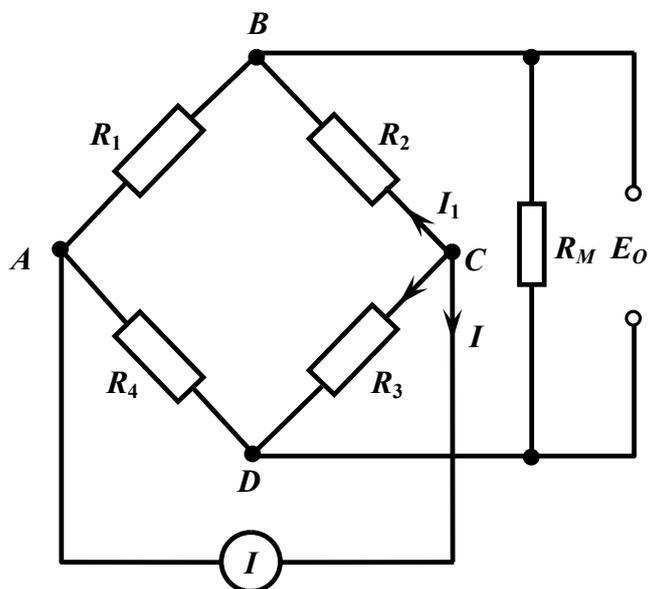


Рис. 23. Схема моста Уитстона с источником постоянного тока

1.5.17. Электрический шум. Наводимый на мосту и линиях передачи сигнала магнитными полями от линии энергоснабжения электрический шум (рис. 24) может представлять серьезную проблему.

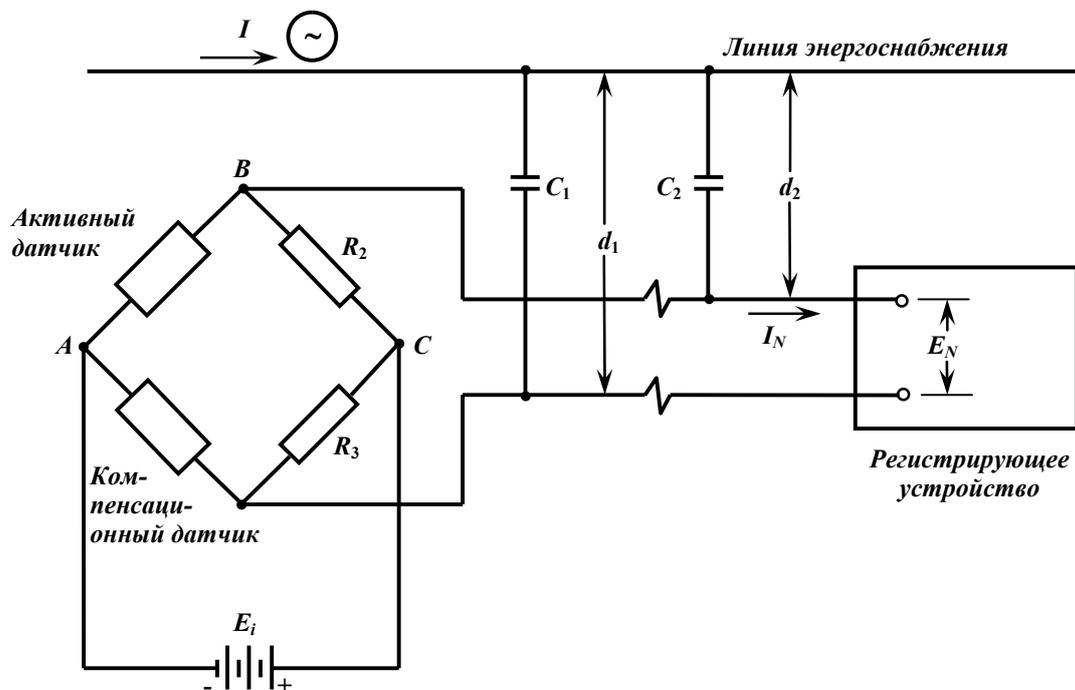


Рис. 24. Схема, иллюстрирующая создание электрического шума

Величина напряжения, наведенного в линиях передачи сигнала током, протекающим в линии энергоснабжения, пропорциональна площади витка, образованного линиями, и обратно пропорциональна расстояниям (d_1 и d_2) между линиями. Для уменьшения шума необходимо принимать следующие меры предосторожности.

1. Для уменьшения площади витка надо применять только скрученные проводники. Длина проводников должна быть сокращена до минимума. Проводники с избыточной длиной не должны образовывать витков во избежание появления индуктивности.

2. Следует использовать только экранированные кабели. Экран должен быть подключен к отрицательному полюсу источника питания. В этом случае не возникают токи, протекающие от «земли», и экран сохраняет потенциал, близкий к нулю. Источник питания не должен соединяться с «землей» устройства (третий провод в сетевом кабеле) во избежание возникновения витков заземления в источнике питания.

3. Надо применять только дифференциальные усилители с эффективным подавлением помех общего вида. В скрученных соединительных проводах наводимый шум практически одинаков в обоих проводах, что ведет к существенному ослаблению синфазного шума.

1.5.18. Решение проблемы длинных линий и шума. Один из способов устранения шума, обусловленного длинными соединительными линиями, – размещение дифференциального усилителя вблизи моста тензодатчиков (рис. 25).

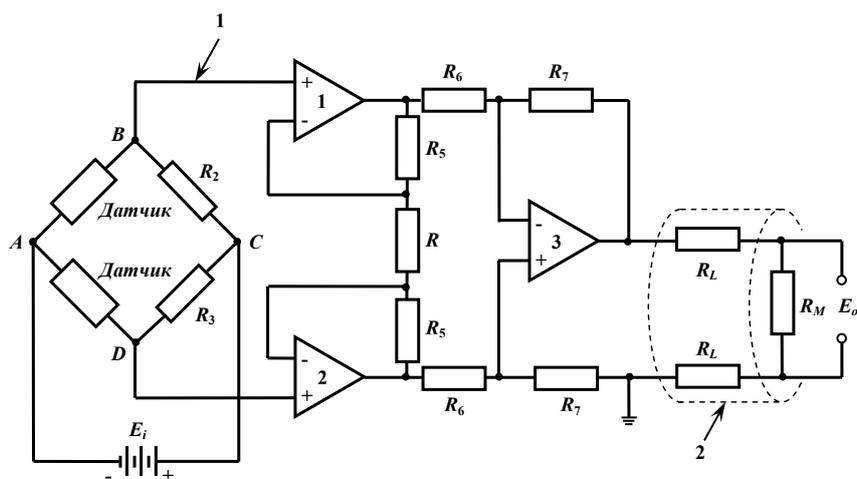


Рис. 25. Усилительная схема с подавлением шума для моста тензодатчиков:

1 – короткие соединительные провода для передачи слабых сигналов; 2 – длинные экранированные соединительные провода для передачи мощных сигналов

Шум, наводимый на входе усилителя при коротких сигнальных проводах, имеет минимальный уровень. Для обоих усилителей (1 и 2) дифференциальный сигнал обладает коэффициентом усиления R_5/R_6 , в то время как шум одинаков и имеет коэффициент усиления, равный единице. Это означает, что отношение сигнал/шум улучшается до устранения помехи общего вида в усилителе 3. R_5/R_6 желательно выбирать намного большим, чем R_7/R_6 , для того чтобы свести к минимуму шумы двух усилителей и повысить эффективность подавления синфазного шума третьим операционным усилителем. Выходной усилитель подключается к регистрирующему устройству с сопротивлением в несколько сотен омов длинными скрученными экранированными проводами. Сигналы, вызванные магнитными наводками, в длинных соединительных проводах обычно имеют малую мощность. Поэтому они не создают на малом сопротивлении R_M значительное напряжение, сравнимое с сигналом высокого уровня, формируемым усилителем 3.

Шум в кабеле (создаваемый обычными схемами с длинными соединительными линиями при низких уровнях сигнала) существенно снижается дифференциальным усилителем, составленным из трех операционных усилителей, а также низкоомной нагрузкой.

1.6. Механический рычажный экстензометр Instron

Контактный навесной экстензометр (рис. 26) предназначен для непосредственного измерения деформаций на измерительной базе образца. Экстензометр состоит из блока с тензодатчиком, устанавливаемым с помощью специализированных креплений (рис. 26) на образец и блок контроллера, осуществляющего связь, интерпретацию и передачу измеренных величин через контроллер нагрузочной рамы к ПК. Измерительная база экстензометра (расстояние между ножами в нулевом положении) составляет 50 мм. Ход нижней подвижной ножки в направлении растяжения – 25 мм, в направлении сжатия – 2,5 мм.

Навесной тензодатчик может быть максимально использован только до достижения предела прочности пластичного материала, когда деформации распределяются по длине образца равномерно. После достижения определенной величины силы или напряжений тензометр необходимо снять и продолжить сбор информации по ка-

налу перемещения траверсы нагрузочной рамы. На практике с целью предохранения навесного экстензометра от поломки снятие производят на стадии выхода за пропорциональный участок диаграммы деформирования.

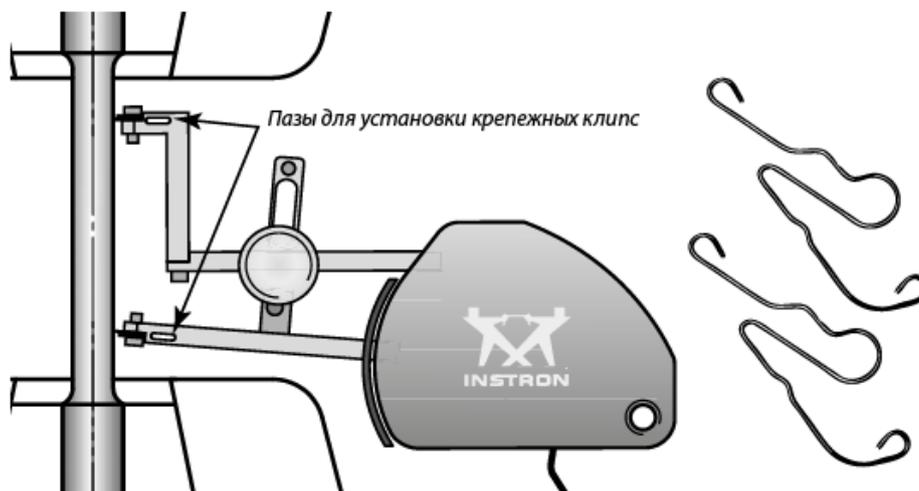


Рис. 26. Схема крепления навесного экстензометра на образце и прижимные клипсы

Для различных конфигураций образцов в комплекте экстензометра предусмотрены пружинные клипсы для крепления ножей (рис. 26). Экстензометр должен устанавливаться так, чтобы его ножки не задевали головки и клинья захватов. Во время проведения испытаний недопустимо прикасаться к датчику, так как это может вызвать резкое перемещение траверсы и разрушение образца.

1.7. Видеоэкстензометр Instron AVE

Оптический видеоэкстензометр Advanced Video Extensometr (AVE) фирмы Instron позволяет фиксировать относительные деформации образца в ходе испытаний. Основными элементами видеоэкстензометра являются (рис. 27) камера, светодиодный блок и контроллер. Изображение образца передается на цифровую камеру с ПЗС-матрицей высокого разрешения. В ходе эксперимента камера фиксирует изображение тестируемого образца, регистрация видеосигнала происходит каждые 20 мкс. Объектив камеры установлен на конце воздушной трубы постоянной плотности, которая представляет собой кожух с вентиляторами, установленными перед сотовыми рассеивателями воздушного потока. Данное устройство создает воздушную завесу, минимизирующую оптические искажения, создаваем-

мые воздушными потоками перед камерой, и, таким образом, снижает влияние шумов на измерения.

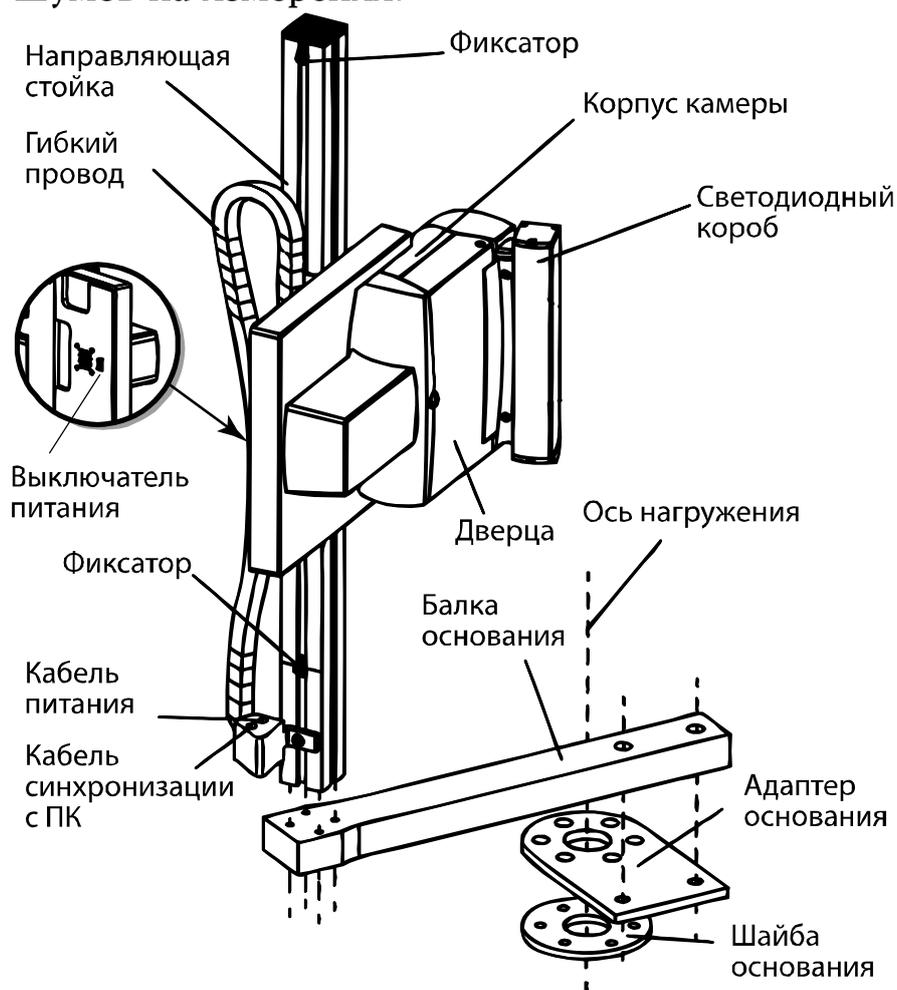


Рис. 27. Оптический видеоэкстензометр

После программной активации видеоэкстензометра образец освещается красными светодиодами, пульсирующими с высокой интенсивностью. Зажигание светодиодов совпадает со временем съемки кадра камерой. Светодиоды устройства подсветки испускают красный свет с длиной волны около 650 нм, а за ними установлен поляризационный фильтр, обеспечивающий поляризацию всего испускаемого света в одной плоскости. Пульсирование подсветки способствует гашению фонового освещения.

Электронная схема видеоэкстензометра содержит трехступенчатый контур подавления мерцания, который добавляет дополнительные вспышки светодиодов на случай, если частота съемки камеры окажется ниже установленного уровня. Устройство подсветки прикреплено к каретке камеры и направлено на центральную линию нагрузочной цепи силовой рамы.

Поляризационный фильтр камеры установлен под углом 90° к поляризационному фильтру устройства подсветки, что позволяет устранить эффект насыщения на блестящих поверхностях. Среднее значение полосового фильтра камеры равно 650 нм; поэтому он пропускает только свет, длина волны которого равна длине волны света, испускаемого светодиодами. За счет этого свет всех других цветов обрезается, и уровень фонового освещения в зоне тестирования не оказывает влияния на испытания.

Перед началом испытаний программа обнаружения меток при помощи нейронной сети ищет в изображении метки, совместимые с образами, имеющимися в библиотеке используемых меток. Обнаруженные программой метки отмечаются на активном дисплее красными прямоугольниками. Программа определяет положение идентифицированных меток и использует координаты метки в качестве координат центра области рассмотрения. Перед проведением тестирования производятся проверки допустимости уровня освещения образца и достаточной контрастности меток на фоне образца.

Тестирование проводится программным обеспечением Instron Bluehill 2. После начала тестирования обрабатываются только пиксели, находящиеся в непосредственной близости от меток. Изменения длины измерительной базы между метками отслеживаются с частотой съемки камеры. Величина деформации вычисляется по точным значениям исходной и текущей длины измерительной базы и фиксируется в виде цифровых данных.

При некоторых условиях захват в процессе тестирования может заслонять отметку. Это может случиться в начале тестирования на растяжение или в конце тестирования на сжатие (рис. 28, а). Ситуаций, при которых может возникать затенение, следует избегать. При испытании на растяжение, если метки будут затенены, программный алгоритм не сможет определить положение заслоненной отметки, и процедура испытания не запустится. Важно, чтобы в начале испытания на растяжение и в конце испытания на сжатие камера «видела» маркерные отметки целиком (т. е. между отметкой и захватом или между отметкой и тенью должно оставаться пустое пространство).

Для нанесения меток на образец в комплекте с видеоэкстензометром поставляется универсальный маркировочный трафарет, упрощающий корректное нанесение маркировки (рис. 28, б).

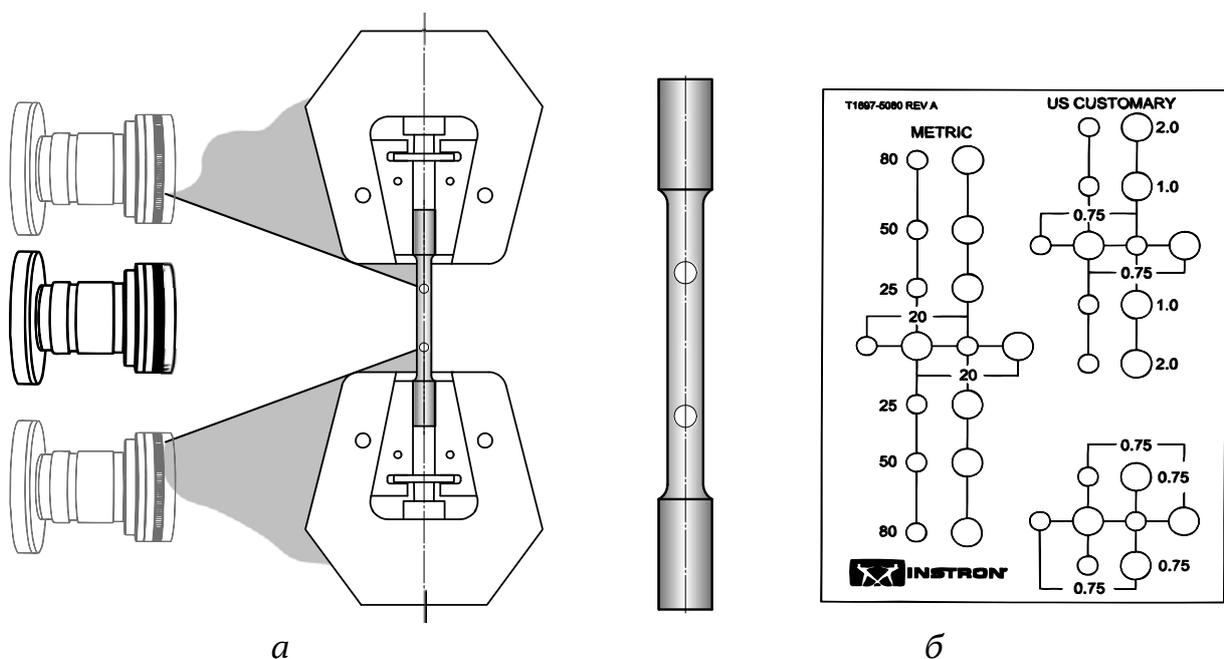


Рис. 28. Схема расположения видеоэкстензометра относительно образца, установленного в захваты; маркированный образец и трафарет

Экстензометр измеряет деформацию, «отслеживая» положение двух контрастных меток, нанесенных на поверхность образца. Поскольку в свете подсветки поверхность образца обычно выглядит темной, рекомендуется использовать белые метки. Для использования функции автоматического обнаружения следует использовать закрасенные круглые (точечные) метки или метки в форме линий (в данном случае следует использовать функцию ручной установки области поля зрения, а метки могут быть нарисованы или изготовлены из клейкой ленты и наклеены). Для нанесения точечных меток можно использовать устройство для нанесения точечных меток (рис. 28, б). Экстензометр вычисляет величину деформации по положениям центров меток. Центр каждой метки определяется как точка посередине между ее краями (усредненная по области, определенной метками области поиска) или как геометрический центр круглой метки. Экстензометр отслеживает положение двух меток для каждого направления и вычисляет величину деформации по положению центров меток.

Рекомендуется использовать метки в форме круглых точек. Минимальный диаметр точечной метки – 2 мм, рекомендуемый диаметр точечной метки – 4 мм. Чем крупнее или меньше метки, тем больше времени требуется для обработки данных, что может привести к возникновению ошибок. Для меток в форме линий минимальная толщина должна составлять не менее 1 мм, рекомендуемая – 2 мм.

При испытаниях при повышенных температурах нанесение точек с помощью красочного маркера остается возможным. При температурах 180-220 °С краска не изменяет цвет и контрастность точек остается неизменной, как при комнатной температуре. Во время испытаний при температуре 380-450 °С начинает происходить медленное выгорание краски, однако контраст точек сохраняется достаточным для видеоэкстензометра при экспозиции в 30-50 минут.

1.8. Катетометр

Катетометр предназначен для измерения расстояний между двумя точками, расположенными на одной вертикали на недоступных для непосредственного измерения объектов (рис. 29).

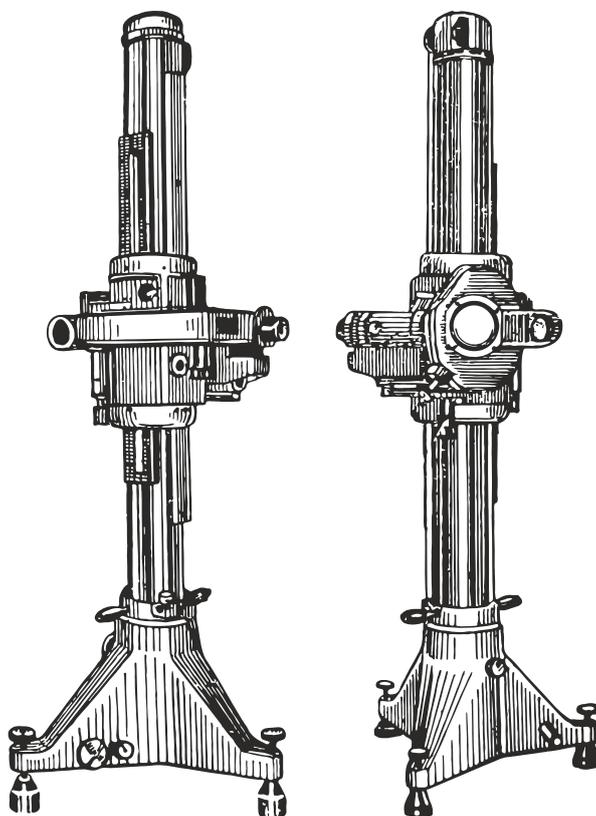


Рис. 29. Внешний вид катетометра КМ-8

Принцип работы прибора основан на сравнении измеряемой длины (расстояния между двумя точками объекта) с миллиметровой шкалой прибора путем последовательного визирования зрительной трубы на начало и конец измеряемого отрезка.

Оптическую систему прибора составляет зрительная труба, отсчетный микроскоп и система блока уровня. В поле зрения окуляра

наблюдают изображения миллиметровой шкалы и масштабной сетки, а также изображение пузырька уровня. Таким образом, в поле зрения окуляра видны одновременно изображения измеряемого объекта, шкалы с масштабной сеткой и концов пузырька уровня.

Зрительная труба и отсчетный микроскоп смонтированы на одной каретке. Визирование на выбранные точки измеряемого объекта осуществляется перемещением каретки по колонке вдоль миллиметровой шкалы, а также вращением колонки вокруг вертикальной оси.

Отсчеты снимаются по шкале и масштабной сетке, наблюдаемым в окуляр. Длина измеряемого вертикального отрезка определяется как разность отсчетов по шкале и масштабной сетке при визировании на начало и конец отрезка.

Масштабная сетка разделена в вертикальном и горизонтальном направлении на десять частей. Отсчетный микроскоп установлен так, что десять горизонтальных биссекторов сетки укладываются между двумя штрихами миллиметровой шкалы; следовательно, в вертикальном направлении каждому биссектору соответствует одна десятая миллиметра. В горизонтальном направлении десятая часть биссектора равна одной сотой миллиметра. Тысячные доли миллиметра (микроны) оцениваются на глаз в долях делений.

При наводке зрительной трубы, выбранная точка объекта должна располагаться точно посередине углового биссектора на уровне горизонтального штриха. При точной наводке необходимо следить за тем, чтобы концы пузырька уровня образовали дугу.

Снимают первый отсчет по шкале и масштабной сетке. Затем, перемещая каретку по колонке, наводят зрительную трубу на вторую точку измеряемого объекта и, проверив установку трубы по цилиндрическому уровню снимают второй отсчет. Разность между двумя отсчетами даст величину измеряемого отрезка.

В поле зрения окуляра одновременно видны изображения двух штрихов миллиметровой шкалы, обозначенных крупными цифрами, и масштабная сетка.

Индексом для отсчета целых миллиметров служит нулевой биссектор десятых долей миллиметра. На рис. 30 162-й штрих шкалы прошел нулевой биссектор, а ближайший большой штрих еще не дошел до него. Отсчет равен 162 мм плюс отрезок от 162-го штриха до нулевого биссектора. В этом отрезке число десятых долей миллимет-

ра обозначено цифрой последнего пройденного биссектора десятых долей миллиметра, в данном случае цифрой 2.

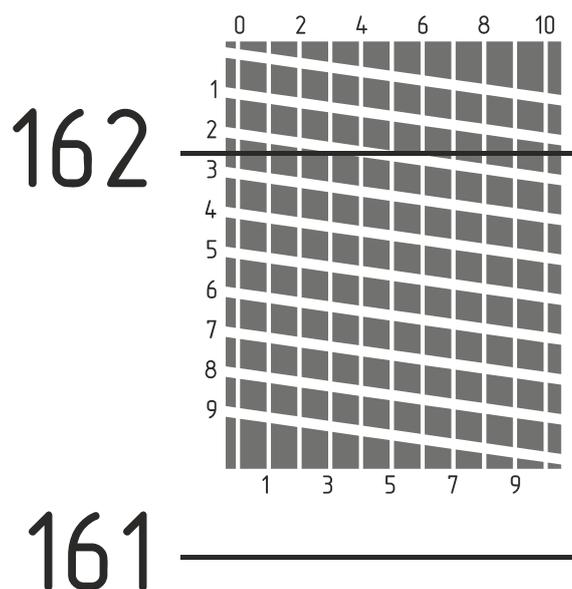


Рис. 30. Шкала катетометра

Отсчет сотых и тысячных долей миллиметра производится в горизонтальном направлении сетки там, где миллиметровый штрих шкалы расположен точно посередине биссектора. На рис. 30 миллиметровый штрих находится между четвертым и пятым делениями масштабной сетки, что соответствует 0,044 мм. Окончательный отсчет равен 162,244 мм.

2. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Испытательные машины предназначены для того, чтобы создавать определенную нагрузку на образец и регистрировать как величину этой нагрузки, так и величину возникшей деформации. Они состоят из следующих основных частей:

- нагружающего или силовозбудительного механизма;
- силоизмерительного устройства;
- захватно-опорных приспособлений для установки испытуемых образцов;
- управляющего и регистрирующего модулей, осуществляющих управление и запись параметров испытания.

Станина и все основные части должны быть жесткими, чтобы при определении свойств материала образца влияние упругой деформации частей самой машины было минимальным.

По способу нагружения различают два основных типа испытательных машин: *машины с механическим приводом*, в которых приложение нагрузки осуществляется винтовым механизмом, и *машины с гидравлическим приводом*, в которых приложение нагрузки реализуется перемещением штока поршня гидравлического цилиндра.

2.1. Разрывные машины Р-0,5, Р-5

Машины Р-0,5, Р-5 предназначены для статических испытаний на растяжение и сжатие. При помощи специальных приспособлений можно производить испытания на изгиб и срез.

Принцип действия разрывной машины Р-5. На рис. 1 представлена принципиальная схема разрывной машины Р-5.

Испытуемый образец (рис 1, 1) установлен в клиновых захватах разрывной машины (рис 1, 2, 3). Нижний захват (рис 1, 3), установлен на подвижной траверсе (рис 1, 5) перемещается в вертикальном направлении с помощью ходовых винтов (рис 1, 7). Синхронное вращение ходовых винтов осуществляется с помощью электродвигателя (рис 3.1, 9), червячного редуктора (рис 1, 8) и зубчатых колес z_1 , z_2 и z_3 , расположенных в блоке редуктора (рис 1, 6). В зависимости от направления вращения ходовых винтов (рис 1, 7) подвижная траверса (рис 1, 5) и нижний захват (рис 1, 3) перемещаются вверх или вниз. Скорость перемещения захвата, соответствующая скорости деформи-

рования образца, может плавно изменяться путем бесступенчатого регулирования вращения ротора электродвигателя.

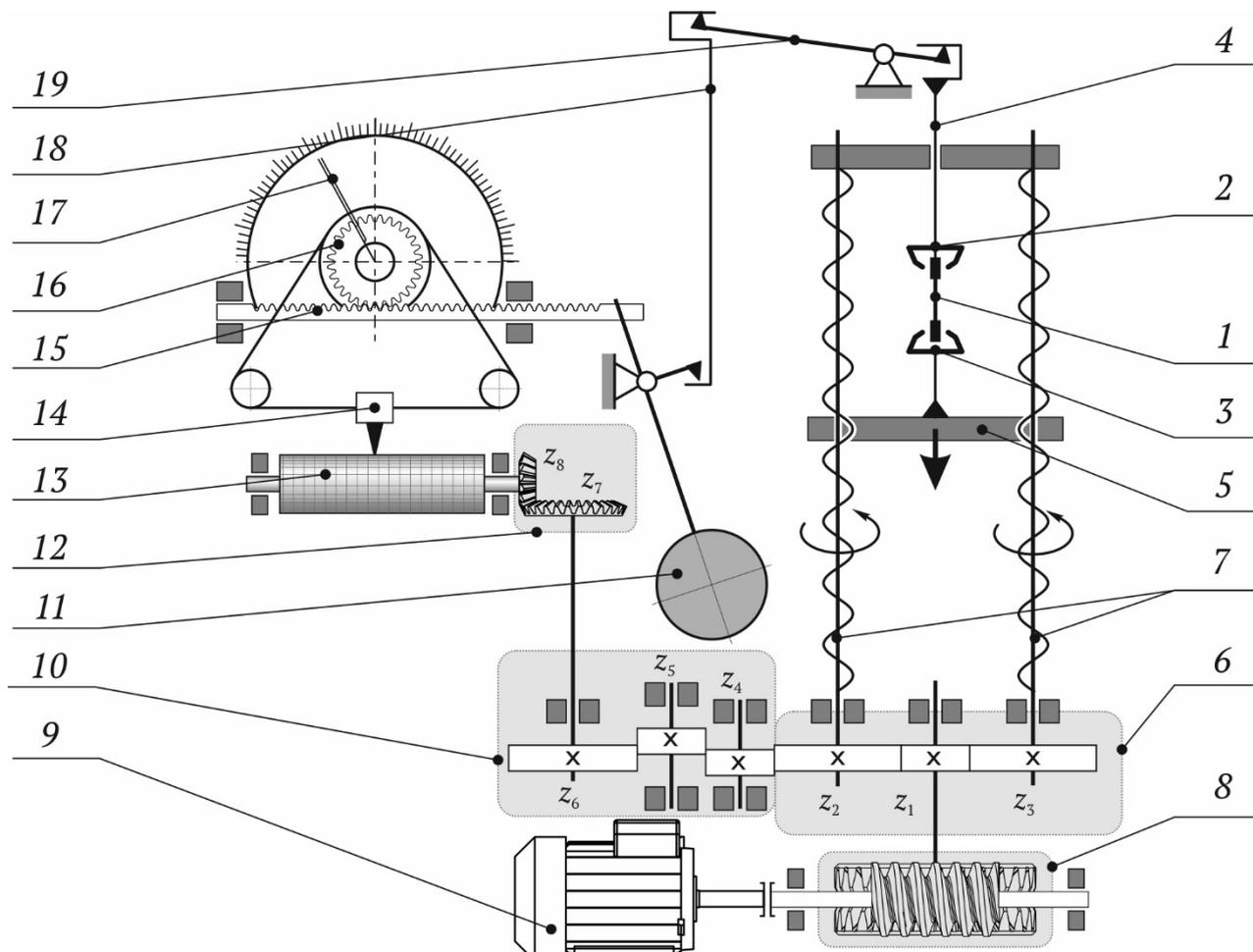


Рис. 1. Принципиальная схема разрывной машины Р-5

При движении нижнего захвата (рис 1, 3) вниз на установленный в захваты образец действует растягивающая сила, передаваемая посредством тяги (рис 1, 4) на рычаг-коромысло (рис 1, 19). Поворачиваясь по часовой стрелке рычаг-коромысло воздействует на Г-образную тягу (рис 1, 18) и отклоняет груз-противовес (рис 1, 11) маятника на угол, пропорциональный величине растягивающей силы, действующей на образец. Верхний конец маятника вызывает поступательное перемещение зубчатой рейки (рис 1, 15), вращающей зубчатое колесо (рис 1, 16). На одной оси с зубчатым колесом (рис 1, 16) установлена стрелка-индикатор силы (рис 1, 17), которая по шкале указывает величину силы, приложенной к образцу. В зависимости от массы установленного груза-противовеса будет выбираться шкала измерения силы.

Запись результатов испытаний в виде диаграммы растяжения производится в автоматическом режиме самописцем на диаграммную бумагу, установленную на его барабан (рис 1, 13). Вращение барабана синхронизировано через блок зубчатых колес z_7 , z_8 (рис 1, 12) с вращением ходовых винтов и, соответственно, перемещением нижнего захвата через блок зубчатых колес z_4 , z_5 и z_6 селектора скоростей барабана самописца (рис 1, 10). Скорость вращения барабана регулируется выбором соответствующих пар зацепления зубчатых колес z_4 , z_5 и z_6 . Разрыв зацепления отключает синхронизацию вращения барабана, что позволяет беспрепятственно перемещать в нужное положение подвижную траверсу во время установки образца, не вращая барабан самописца. Каретка самописца (рис 1, 14) с помощью тросиков перемещается вдоль оси барабана пропорционально силе.

При одновременном перемещении каретки и вращении барабана самописца на диаграммной бумаге вычерчивается диаграмма растяжения. Вдоль оси барабана вычерчивается значение силы, а вдоль направления вращения барабана – перемещение подвижной траверсы, отражающее удлинение образца.

Органы управления разрывной машиной Р-5. На рис. 2 показан внешний вид и указаны основные органы управления электромеханической разрывной машины Р-5.

Образец (рис. 2, 16) устанавливается в клиновые захваты (рис. 2, 15) машины. Верхний захват закреплен на рычажной системе противовеса и измерителя силы (рис. 2, 3). Нижний захват установлен на подвижной траверсе (рис. 2, 14), перемещение которой обеспечивают синхронно вращающиеся ходовые винты (рис. 2, 13) с трапецеидальной резьбой. Привод винтов осуществляется от электродвигателя. Зона испытаний закрыта от наблюдателя защитным стеклом (рис. 2, 12).

Перемещения подвижной траверсы и стрелки измерителя силы синхронизированы с барабаном самописцем, на который устанавливается диаграммная бумага (рис. 2, 5). Скорость вращения барабана устанавливается селектором скоростей (рис. 2, 6). Ручное вращение барабана осуществляется при нейтральном положении селектора скоростей вращением рукоятки барабана (рис. 2, 7).

Включение питания осуществляется поворотом выключателя (рис. 2, 11). Направление хода перемещения траверсы выбирают кнопками управления хода «вверх» и «вниз» (рис. 2, 9), предвари-

тельно выставив «на ноль» в крайне левое положение реостаты «грубо» и «точно» (рис. 2, 10), регулирующие скорость перемещения траверсы. Для немедленной остановки перемещения подвижной траверсы служит красная кнопка «стоп» (рис. 2, 8).

Скорость деформации контролируется по прибору (рис. 2, 2). Масштаб и отображение скорости деформации регулируется переключателями (рис. 2, 1). Перемещение траверсы, сопоставляемое деформации образца может быть зафиксировано по счетчику деформации (рис. 2, 4).

Следует отметить, что на показания удлинения образца в существенной мере будут влиять выборки зазоров в зубчатых зацеплениях, упругие деформации рычажной системы разрывной машины, внедрение клиновых захватов в образец, выборка зазоров в клиньях и т. д. Все эти деформации и перемещения стоят непосредственно в измерительной цепочке между образцом и самописцем, регистрирующем удлинение. Поэтому удлинение, измеренное данным способом, является неточным и не может быть использовано при определении упругих характеристик материала.

Порядок проведения испытания на растяжение на разрывной машине Р-5.

1. Убедиться в исправности узлов и агрегатов машины, включить питание разрывной машины (рис. 2, 11).

2. Выбрать направление перемещения кнопками управления хода (рис. 2, 9) вверх или вниз так, чтобы между захватами было достаточно места для установки образца. Переместить подвижную траверсу, нажав кнопку «вверх» или «вниз», регулируя скорость перемещения траверсы регулятором скорости хода траверсы «грубо». Перед нажатием кнопок управления перемещением убедиться, что регуляторы скорости перемещения траверсы «грубо» и «точно» стоят в крайнем левом положении «на нуле».

3. Раскрыть нижний захват на необходимую для установки образца величину, вращая его штурвал. Плечики уширения образца должны быть полностью помещены в зазор между клиньями для исключения вырывания образца из захвата. Зафиксировать образец в захвате минимально достаточным поворотом штурвала. Окончательную затяжку образца проводить только после полной установки и центровки образца в верхнем и нижнем захватах машины.

4. Вращая штурвал верхнего захвата, обеспечить гарантированный зазор между клиньями для беспрепятственной установки образца в захват.

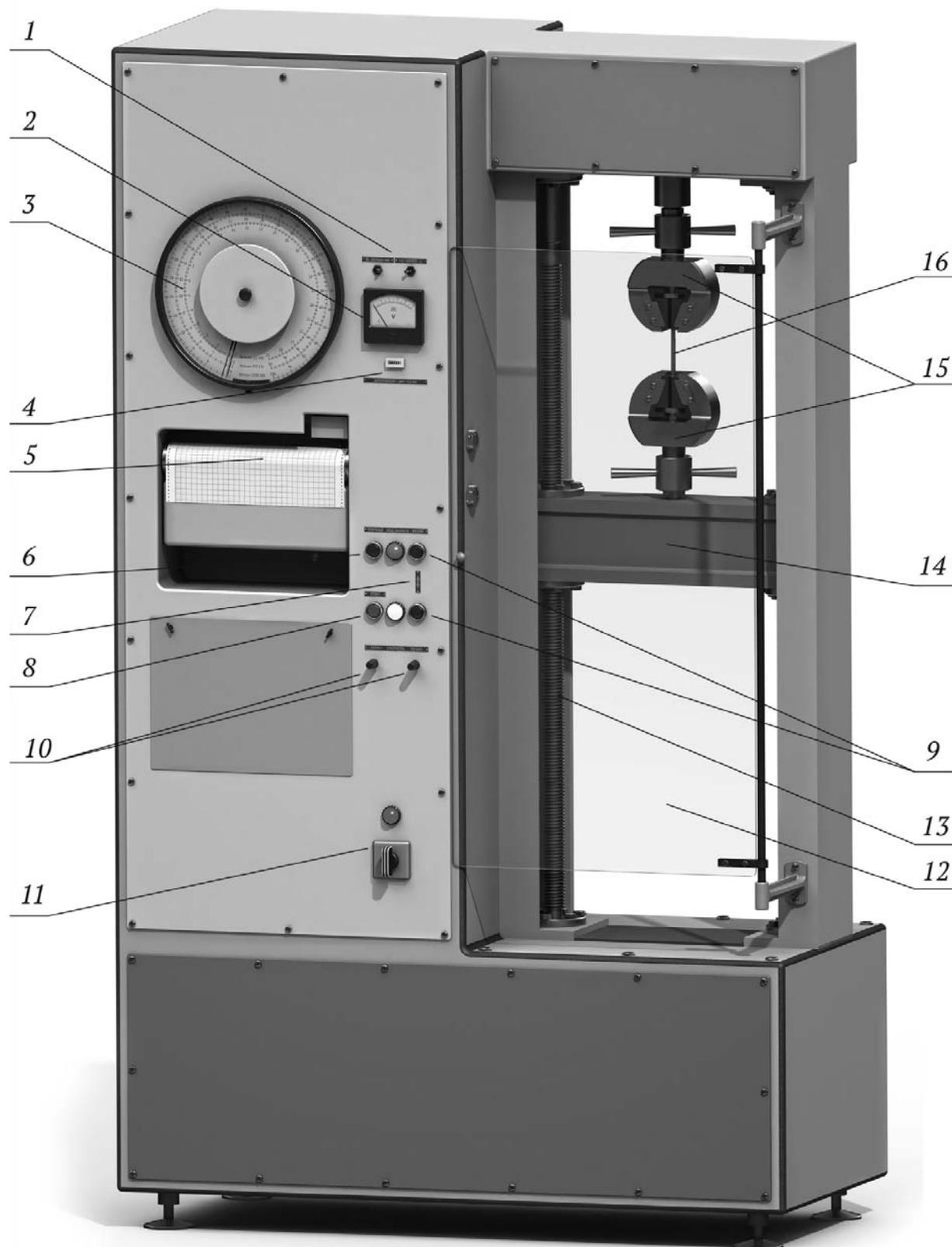


Рис. 2. Внешний вид и органы управления разрывной машины Р-5

5. Нажать кнопку управления хода «вверх» и, регулируя скорость перемещения траверсы «грубо», подвести образец в зазор между клиньями верхнего захвата. Плечики уширения образца должны полностью поместиться в зазор между клиньями для исключения вырывания образца из захвата. В момент входа образца в зазор между клиньями необходимо направлять верхний захват, придерживая его в безопасном для рук месте за основное тело. Верхний захват имеет шарнирное закрепление. Резкое соприкосновение торца подводимого образца с клиньями или телом захвата ввиду несовпадения оси образца с зазором между клиньями или недостаточным зазором между клиньями может привести к нарушению кинематической схемы машины и ее повреждению. Убедившись в отсутствии перекосов в установке образца провести его окончательную затяжку в захватах.

7. Установить диаграммную бумагу в самописец и настроить масштаб записи деформации на диаграммной бумаге переключателем (рис. 2, 17).

8. Произвести рабочее нагружение образца. Нажать кнопку «вниз» перемещения траверсы и плавно вращая регуляторы «точно» и при необходимости «грубо» выйти на необходимую скорость нагружения образца. Скорость нагружения отсчитывается по индикатору (2).

9. После разрушения образца повернуть регуляторы скорости хода «точно» и «грубо» в крайнее левое положение «на ноль» и нажать красную кнопку «стоп». Ведомая стрелка силоизмерителя останется в положении, соответствующем максимальной приложенной к образцу силе. Установить рукоятку переключения масштаба записи деформации в нейтральное положение. Повернуть барабан самописца с помощью рукоятки ручного перемещения и извлечь лист с построенной диаграммой растяжения.

10. Извлечь из захватов разрушенный образец и выключить машину либо подготовить к следующему испытанию.

Технические характеристики разрывной машины Р-5.

1. Тип силоизмерителя: маятниковый.

2. Предельное значение силы нагружения: 5 тс (5000 кгс).

3. Диапазоны предельного значения силы на силоизмерителе и цена деления:

диапазон I – 1 тс (1000 кгс) / 2 кгс;

диапазон II – 2,5 тс (2500 кгс) / 5 кгс;

диапазон III – 5 тс (5000 кгс) / 10 кгс.

4. Относительная погрешность силоизмерителя при прямом ходе: не более ± 1 % от измеряемой нагрузки соответствующего диапазона.

5. Масштаб записи диаграммного аппарата в координатах «нагрузка – перемещение активного захвата»:

– по нагрузке 1 мм – 1/320 верхнего предела диапазона измерения нагрузки;

– по перемещению 10:1, 50:1, 100:1.

6. Относительная погрешность диаграммного аппарата при записи нагрузки ± 2 %.

7. Погрешности диаграммного аппарата при записи перемещения активного захвата в соответствующем масштабе не более:

$\pm 0,5$ мм при длине записи до 15 мм;

± 3 % при длине записи свыше 15 мм.

8. Скорость движения активного захвата при рабочем ходе без нагрузки: от 1 до 100 мм/мин.

9. Высота рабочего пространства при испытании на растяжение, включая рабочий ход активного захвата, не менее 700 мм.

2.2. Универсальная гидравлическая машина Р-20

Универсальная гидравлическая машина типа Р-20 (рис. 3) предназначена для статических испытаний образцов различных материалов, а также деталей или целых изделий на растяжение, сжатие, изгиб и срез.

При испытании на сжатие образец устанавливают на подвижную траверсу между опорными плитами, а при испытании на растяжение образец закрепляют в захватах.

При нагнетании масла в рабочий цилиндр поршень перемещает подвижную траверсу всегда вверх, а образец, установленный между опорными плитами в верхней части машины, подвергается сжатию; если же он закреплен в захватах нижней части машины, то подвергается растяжению.

Нагружающее устройство. Электродвигатель приводит в движение насос, который нагнетает масло в рабочий цилиндр. Поршень выдвигается из цилиндра и поднимает подвижную траверсу, создавая нагрузку образца.



Рис. 3. Универсальная гидравлическая машина типа Р-20

Силоизмерительное устройство. Масло из рабочего цилиндра поступает в цилиндр силоизмерительного устройства, поршень которого, перемещаясь, через рычажную систему отклоняет маятник от вертикального положения. Отклонение маятника пропорционально нагрузке на образец и передается на стрелку шкалы нагрузок. В зависимости от груза на маятнике испытания можно производить с максимальными нагрузками 50, 100, 200 кН. Отсчеты берут по соответствующей шкале указателя нагрузок.

Для автоматической записи зависимости деформации образца от нагрузки машина снабжена диаграммным аппаратом. Силоизмерительное устройство, диаграммный аппарат, насос с регулировочными приспособлениями и пусковая аппаратура размещены отдельно от машины в пульте управления.

2.3. Машина для испытания на кручение КМ-50

Машина КМ-50 (рис. 4–5) служит для испытания на кручение образцов кругового, прямоугольного и кольцевого поперечных сечений. Длина испытываемых образцов от 130 до 300 мм. Наибольший момент 500 Нм.



Рис. 4. Внешний вид машины КМ-50

Нагружающее устройство. Скручивание образца производится поворотом нижнего захвата, вращение которого обеспечивается от электродвигателя через систему передач. Скорость вращения нижнего захвата 0,3 или 1 об/мин.

Силоизмерительное устройство. Для измерения момента, скручивающего образец, служит маятниковый силоизмеритель, связанный с верхним захватом. Вращение нижнего захвата через образец передается верхнему захвату, а от него через гибкую тягу на маятник.

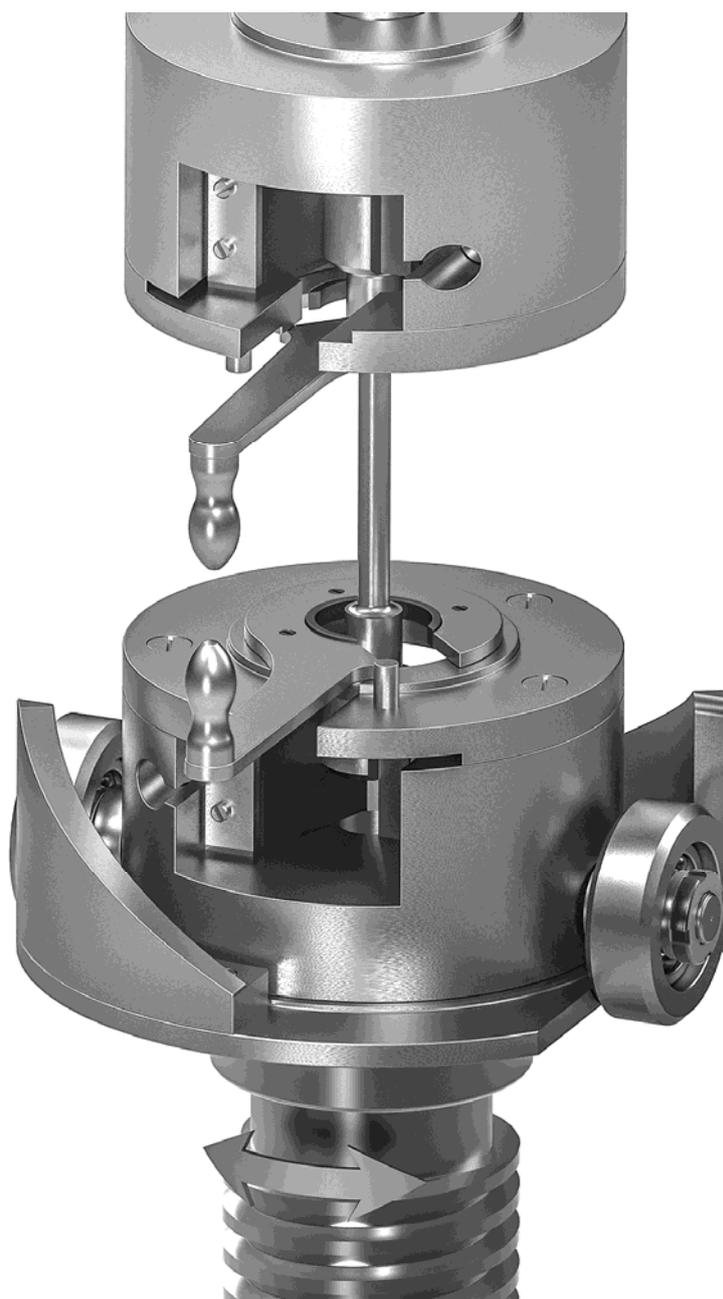


Рис. 5. Образец установлен в захваты машины КМ-50

Величина момента определяется отклонением маятника от вертикального положения, которое передается на стрелку круговой шкалы моментов. На маятнике могут быть установлены три различных груза, в зависимости от которых машину можно настроить на наибольшую величину скручивающего момента 100, 200 и 500 Нм. Исходя из этого измерения производятся по соответствующей шкале.

Диаграммный аппарат. Для автоматической записи деформации образца машина снабжена барабаном и пишущим устройством. Вращение нижнего захвата при помощи гибкой передачи передается на барабан, а отклонение маятника, пропорциональное скручивающему моменту, перемещает карандаш вдоль оси барабана. На бумаге, закрепленной на барабане, вычерчивается кривая зависимости скручивающего момента от угла поворота нижнего захвата.

2.4. Электромеханическая разрывная машина Instron 3382

Двухколонная испытательная машина Instron 3382 с максимальной нагрузочной способностью 100 кН. На рис. 6 показан вид разрывной машины и ее основные узлы. Для управления испытаниями используется персональный компьютер, подключенный к блоку управления машины через сетевой контроллер по LAN-интерфейсу.

Испытательная машина оснащена датчиком измерения силы Instron 2530-440 и механическими клиновыми захватами Instron 2716-002 с предельной нагрузочной способностью 100 кН. Для измерения продольных деформаций образца используется дополнительное оборудование – навесной экстензометр и бесконтактный видеоэкстензометр Instron AVE.

Основными узлами рамы испытательной машины являются стол, двигатель привода, две направляющие колонны и два вертикальных винта с шаровыми опорами. Верхняя подвижная траверса установлена на колоннах и винтах с шаровыми опорами. Датчик нагрузки установлен на подвижной траверсе. Узел привода сообщает крутящий момент от двигателя винту с шаровыми опорами и перемещает траверсу вверх или вниз относительно стоек.

После установки образца в захватах траверсе сообщаются перемещения с заданной скоростью, что вызывает в образце растягивающую или сжимающую силу. Датчик нагрузки преобразует механическое воздействие силы в электрический сигнал, который передается системе управления для контроля и визуального отображения на дисплее.

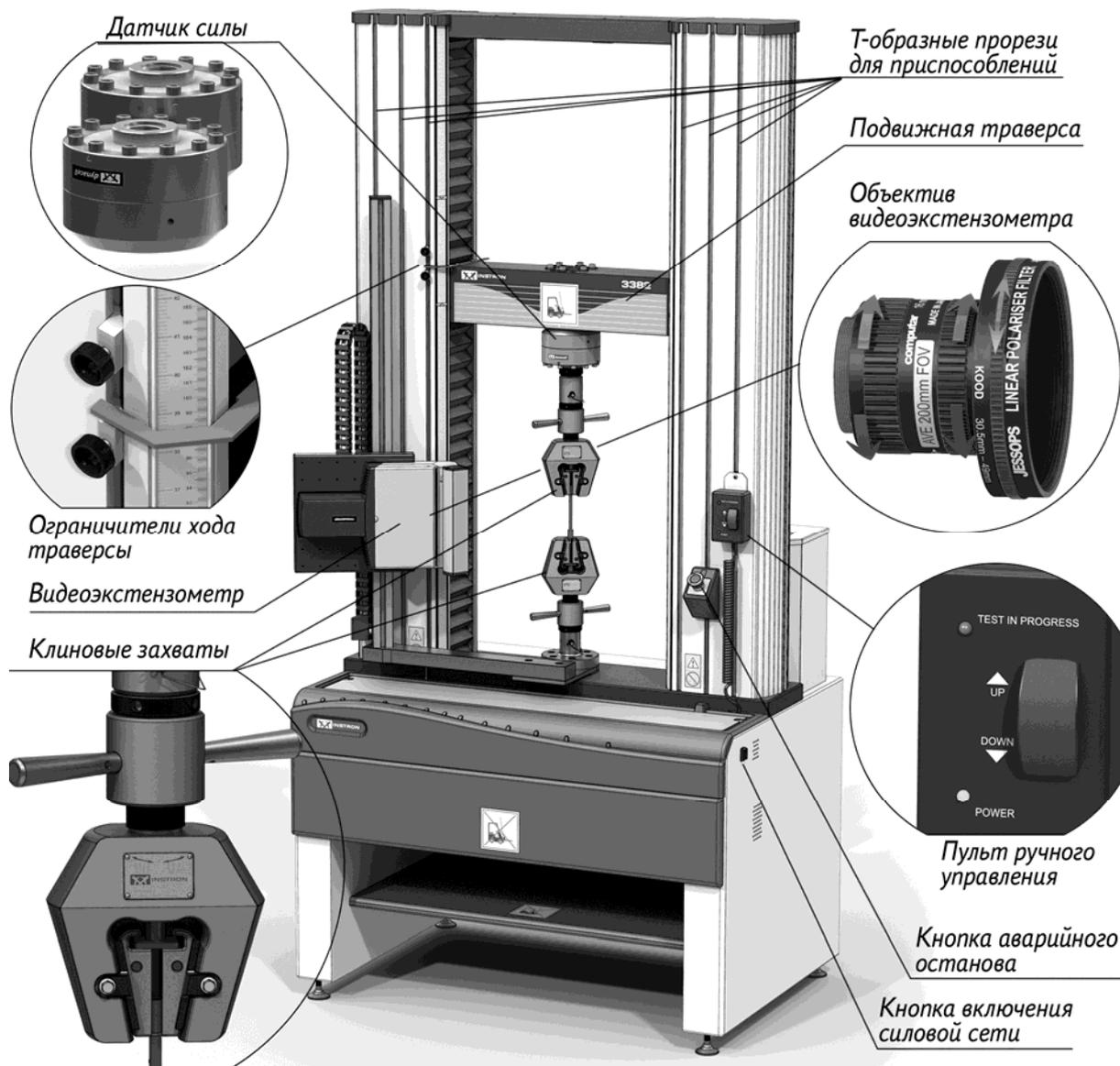


Рис. 6. Испытательная разрывная машина Instron 3382

Механическая цепь привода траверсы расположена внутри основания. Она содержит два винта с шаровыми опорами (по одному внутри каждой стойки), которые установлены в смазываемые подшипники на жесткой базовой балке внутри основания рамы. Два приводных шкива находятся внизу под балкой основания и установлены на конце каждого винта с шаровыми опорами. Серводвигатель постоянного тока приводит в движение винты с шаровыми опорами посредством ряда шкивов и зубчатых ремней. Зубчатые ремни между шкивами синхронизируют приводное усилие к винтам с шаровыми опорами и обеспечивают горизонтальное выравнивание подвижной траверсы. Шифратор, установленный на приводном двигателе, формирует информацию о положении траверсы для компьютера.

Система контролируется замкнутым контуром сервоуправления. Скорость и направление движения траверсы определяются параметрами, задаваемыми на компьютере. При запуске испытания контроллер генерирует стартовый сигнал, который управляет движением траверсы в соответствии с установленными параметрами.

Внутри основания рамы имеется панель интерфейса рамы, которая обеспечивает сигнальный интерфейс между контроллером и компонентами рамы с регистрацией данных с минимальным интервалом до 50 мс. Микрочип контроллера содержит уникальный цифровой код для каждого типа рамы, что позволяет компьютеру распознать ее тип. Эта идентификация позволяет программе управления задать в электронном виде установки для пределов изменения нагрузок системы и значений автоматической калибровки. Компьютер содержит плату цифровой связи, которая обеспечивает связь компьютера с нагрузочной рамой. Связь происходит через контроллер, встроенный в основание рамы. Контроллер получает сообщения от компьютера и посылает сообщение в нагрузочную раму для выполнения требуемой операции. При испытаниях контроллер получает данные от датчиков и посылает данные назад компьютеру, обеспечивая обратную связь.

Испытания на растяжение могут быть проведены двумя способами – с контролем по силе или деформации. Преимущественно испытания проводят с заданной скоростью нагружения, при этом нагрузочной рамой задается скорость деформирования. Проведение испытаний на растяжение на разрывной машине Instron возможно реализовать в трех вариантах: по скорости перемещения активной траверсы, с помощью навесного экстензометра и по оптическому видеоэкстензометру (интерфейс программы – рис. 7).

В случае когда деформации на диаграмме растяжения получают на основании показаний датчика хода траверсы, ошибка измерений будет наибольшей. В данном случае удлинение образца измеряется по числу оборотов шагового двигателя. На итоговую величину деформаций, определенных таким способом, будет влиять жесткость привода, траверсы и захватов. Поэтому данный способ не рекомендуется для испытаний, если в ходе эксперимента требуется определить характеристики пластичности, модуль упругости.

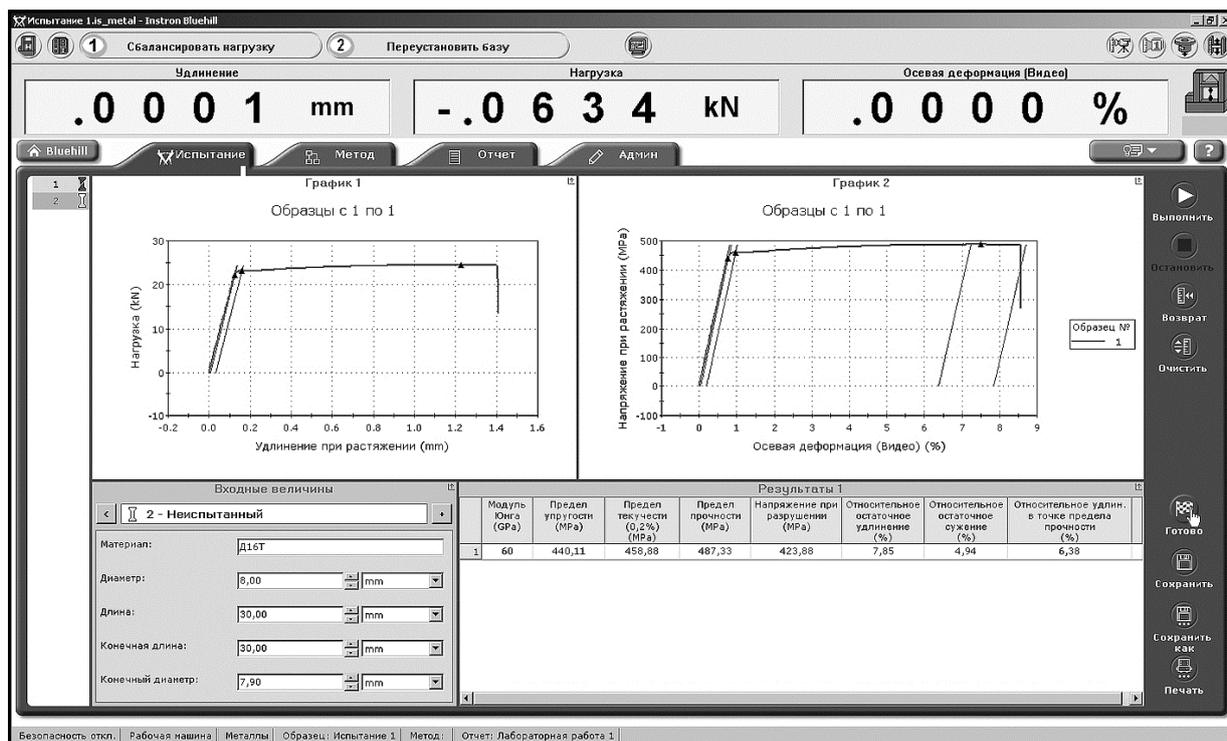


Рис. 7. Интерфейс программного обеспечения Bluehill для Instron

При использовании навесного экстензометра ошибка измерения деформации не превышает 0,2 % от измеряемой величины. На итоговую ошибку получаемой величины деформаций могут влиять неточности позиционирования навесного тензометра, проскальзывание ножей относительно поверхности образца. Однако одним из самых главных недостатков данного способа является неполное измерение деформаций с помощью навесного тензодатчика до разрушения образца, т. к. деформации в зоне упрочнения и локального упрочнения измеряются по датчику оборотов шагового двигателя. Соответственно с помощью навесного тензометра достаточно точно определяется только упругий участок диаграммы деформирования, ее наклон в упругой области.

Наиболее совершенным методом является бесконтактное измерение деформаций с использованием оптического видеоэкстензометра. Деформации фиксируются по маркерным точкам, нанесенным на образец вплоть до разрушения образца. Погрешность измерений составляет $\pm 2,5$ мкм или 0,5 % от измеряемой величины. Измерение деформаций с помощью видеоэкстензометра является наиболее предпочтительным, так как суммарная ошибка регистрации деформаций будет в данном случае наименьшей.

2.5. Сервогидравлическая машина Instron 8801

Экспериментальное исследование сопротивления малоцикловой и многоцикловой усталости, термомеханические усталостные испытания проводят на сервогидравлической машине Instron 8801 с максимальной нагрузочной способностью 100 кН (рис. 8). Сервогидравлическая испытательная система отвечает взыскательным требованиям, предъявляемым как к динамическим, так и к статическим испытаниям.

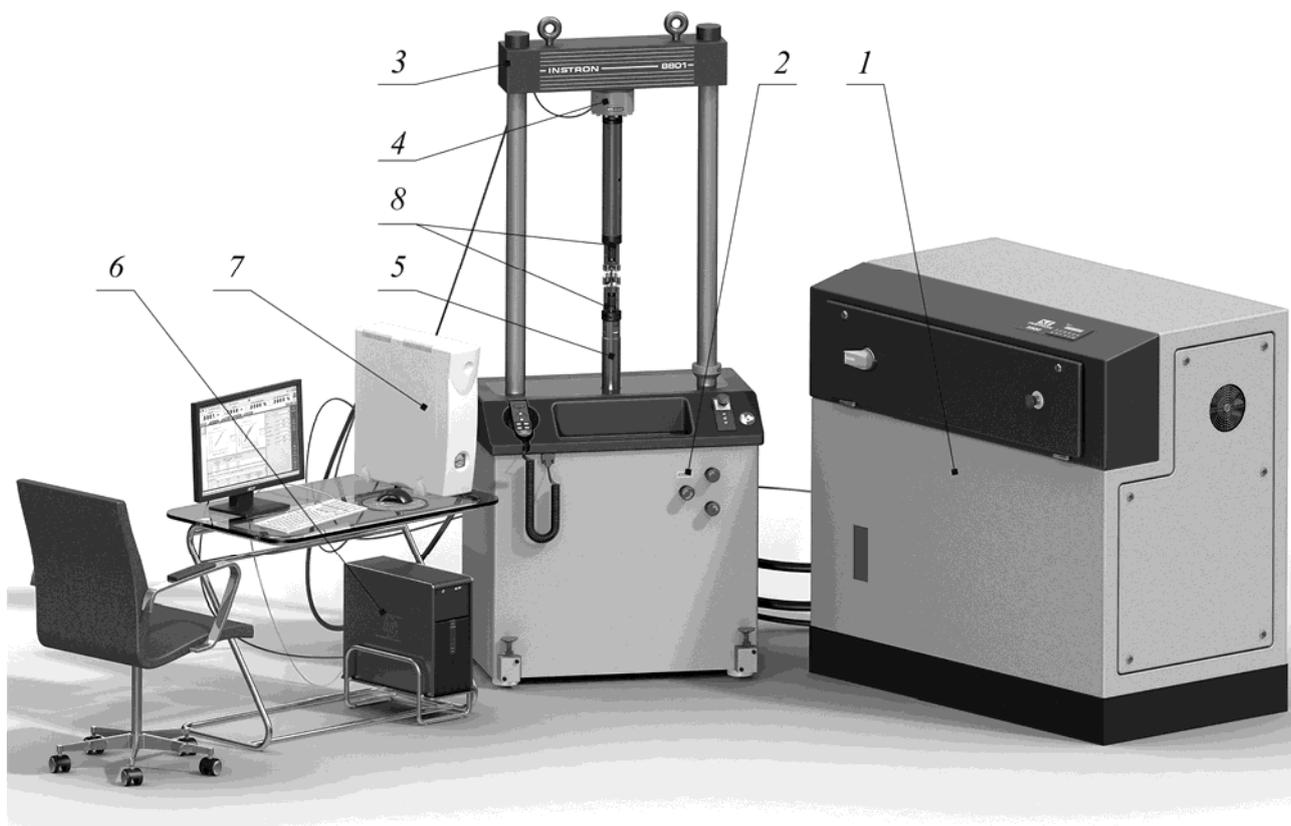


Рис. 8. Испытательная машина Instron 8801: 1 – маслостанция; 2 – нагрузочная рама, неподвижная траверса; 3 – неподвижная (перемещаемая) траверса; 4 – датчик силы; 5 – шток актуатора (подвижная траверса); 6 – персональный компьютер с программным обеспечением для управления испытаниями; 7 – контроллер рамы и маслостанции; 8 – захваты

Ход штока актуатора составляет 150 мм. Частота нагружения при динамических испытаниях достигает 50 Гц. Точность приложения нагрузки составляет $\pm 0,5$ % от отображаемой нагрузки, но не более 0,005 % от максимальной нагрузочной способности датчика силы.

Программное обеспечение Instron Console обеспечивает полный контроль над системой от ПК, включая создание формы сигнала, калибровку, установку ограничений и отслеживание статуса. Добавьте программное обеспечение для блочной загрузки WaveMatrix для простых и более сложных циклических испытаний или программное обеспечение Bluehill для статических испытаний.

2.6. Вибростенд ВЭДС-400

Стенд вибрационный электродинамический ВЭДС-400А модернизированный (рис. 9) предназначен для испытания изделий на вибрационную прочность и устойчивость в лабораторных и производственных условиях.

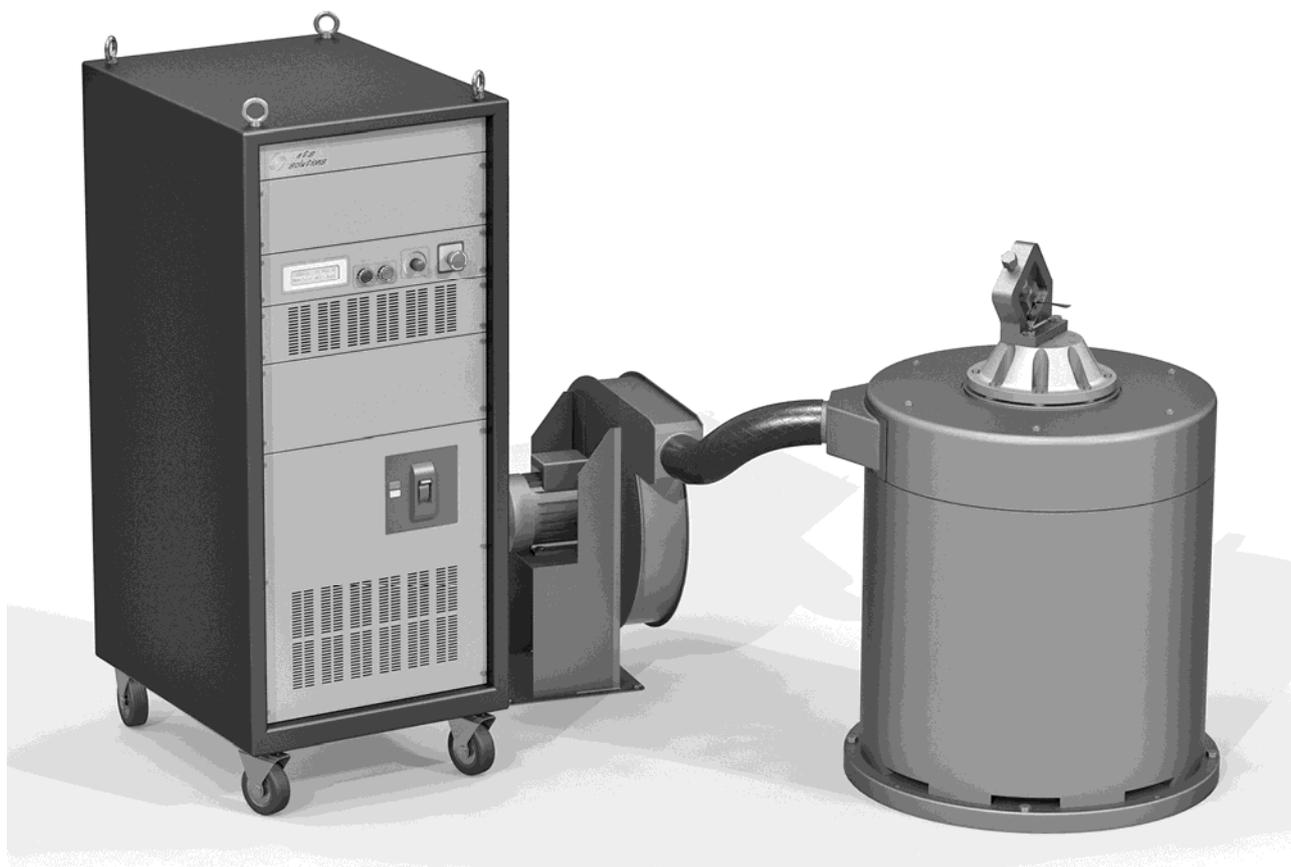


Рис. 9. Модернизированный вибростенд ВЭДС-400

Рабочий диапазон частот стенда:

– номинальный от 20 до 1500 Гц при нулевой ($P_n = 0$ кг) и от 20 до 900 Гц при номинальной ($P_n = 90$ кг) нагрузке на столе вибратора;

– расширенный от 5 до 20 Гц и свыше 1500 до 5000 Гц при нулевой и от 5 до 20 Гц и свыше 900 до 5000 Гц при номинальной нагрузке на столе вибратора.

Верхний предел номинального диапазона, воспроизводимого стендом виброускорения не менее:

– 400 м/с^2 амплитудного значения в диапазоне частот от 45 60 до 1500 Гц при нулевой нагрузке на столе вибратора;

– 40 м/с^2 амплитудного значения в диапазоне частот от 45 60 до 900 Гц при номинальной нагрузке на столе вибратора.

Нижний предел номинального диапазона, воспроизводимого стендом ускорения, не более 5 м/с^2 .

Вынуждающая сила стенда, номинальная, не менее 4000 Н.

Масса номинальной нагрузки на столе вибратора не более 90 кг.

3. НАСТОЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

3.1. Установка для определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона

Установка для определения модуля упругости (модуля Юнга) (рис. 1) представляет собой образец с установленными на него с помощью струбцин тензOMETрами Аистова, закрепленный в захватах разрывной машины. С помощью тензOMETров измеряют продольную и поперечную деформации образца.

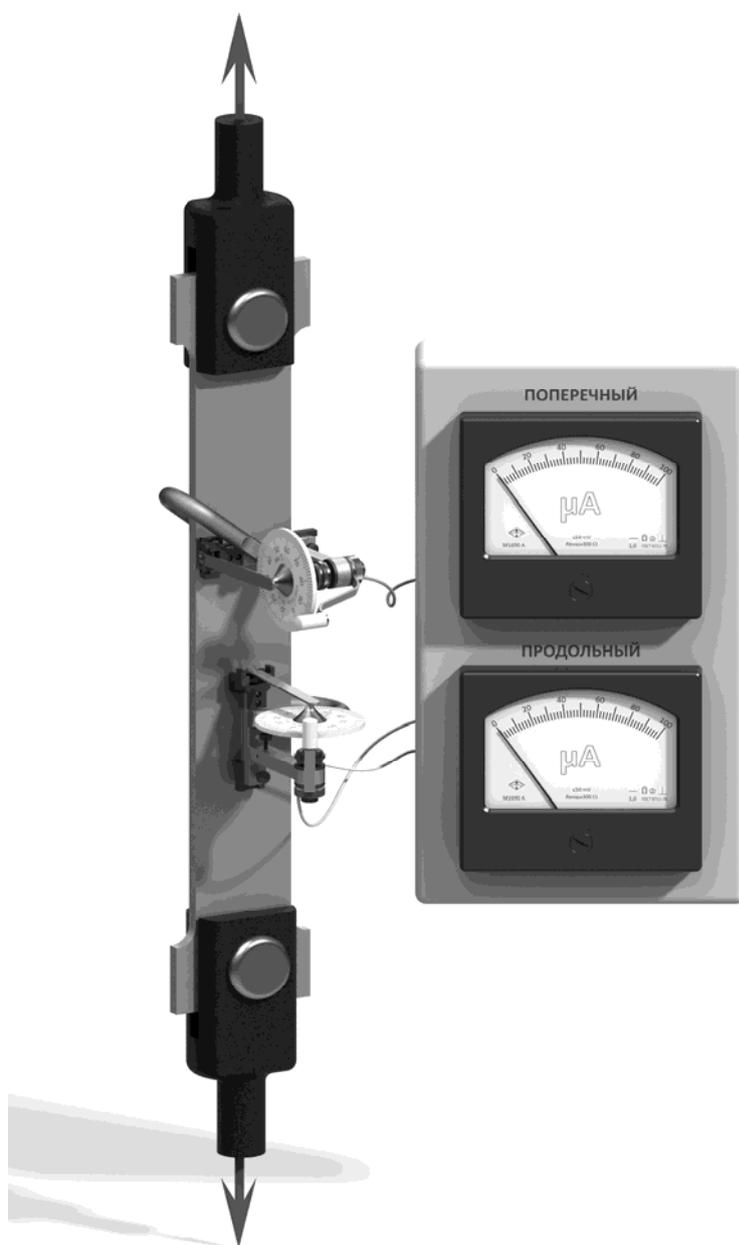


Рис. 1. Установка для определения коэффициента Пуассона

3.2. Установка для определения модуля сдвига

Установка для определения модуля сдвига (модуля Юнга при сдвиге) (рис. 2) выполнена в виде рамы, на которой смонтированы два кронштейна. В одном кронштейне смонтирован подвижный подшипниковый узел крепления образца, в другом – неподвижный. На подвижной стороне на образце смонтирован кронштейн для подвеса микрометра. С помощью микрометра производят измерение деформации образца.

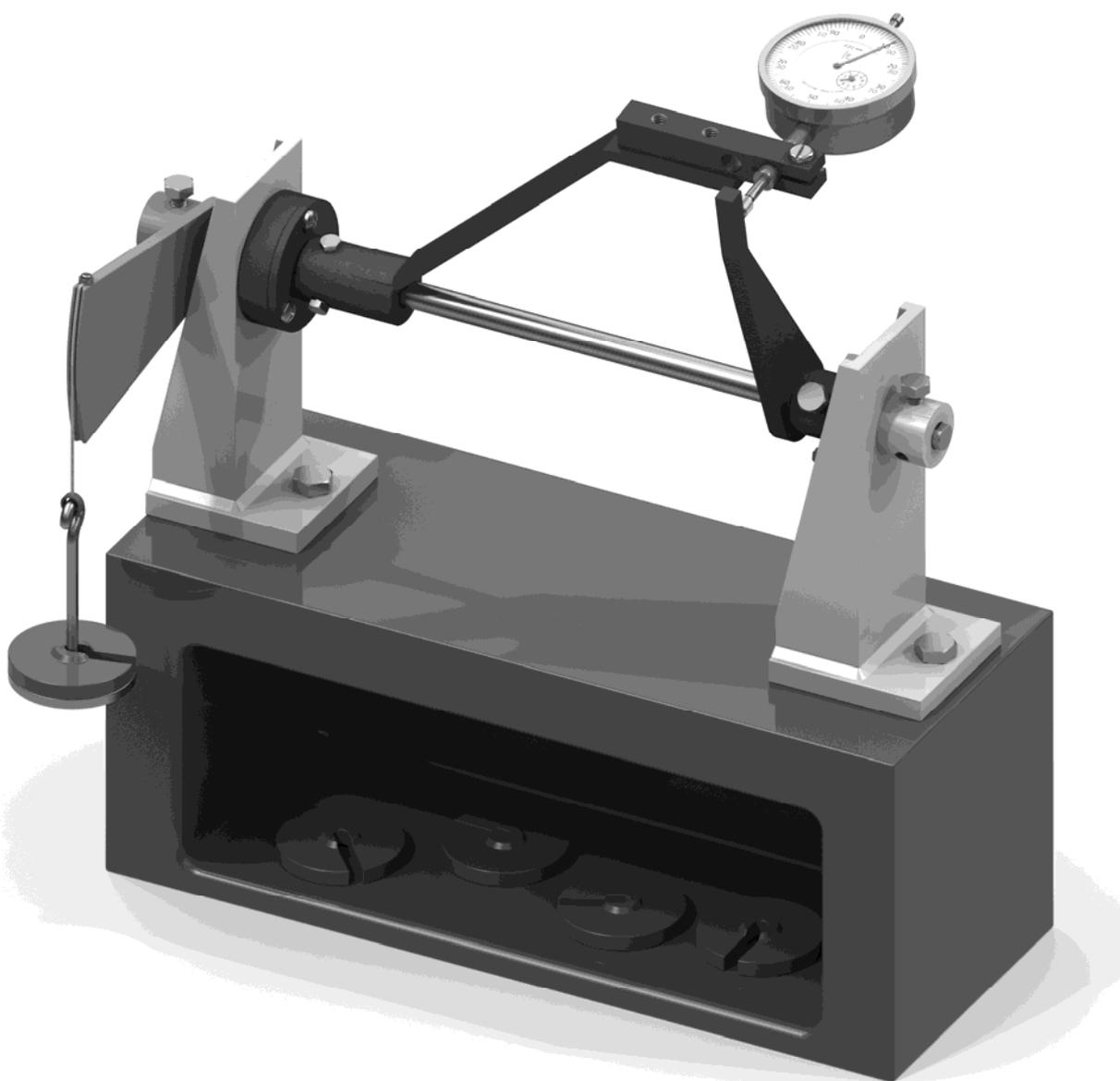


Рис. 2. Установка для определения модуля сдвига

3.3. Установка для испытаний на плоский прямой изгиб

Стальная балка прямоугольного сечения расположена на опорах, установленных на станине (рис. 3). В заданных точках балки с помощью подвесок прикладываются нагрузки путем подвешивания грузов заданной массы. В этих же точках установлены индикаторы часового типа. Установка применяется для проверки теоремы о взаимности перемещений и определения реакций в многопролетной неразрезной балке.

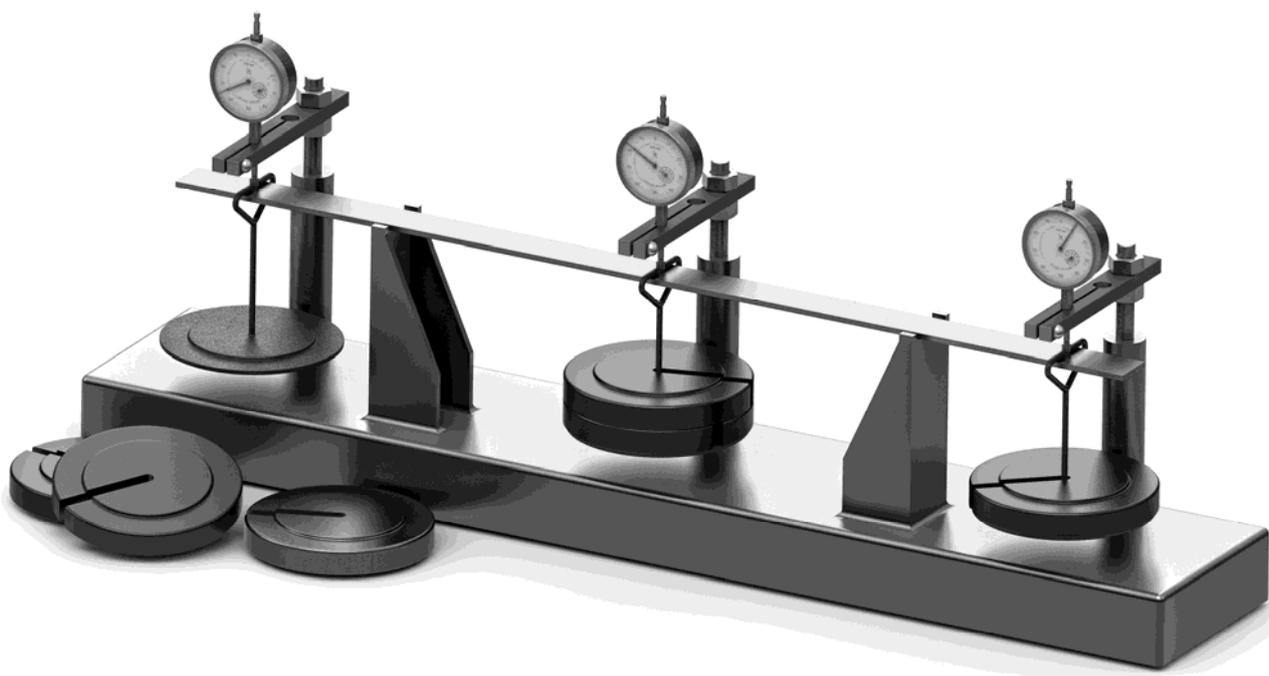


Рис. 3. Установка для испытаний на плоский изгиб

3.4. Установка для испытаний на косо́й изгиб

Испытуемый образец прямоугольного поперечного сечения консольно закреплен на раме установки, имеющей узел поворота образца относительно его продольной оси. Угол поворота образца соответствует углу наклона силовой плоскости, поскольку нагружение производится в вертикальном направлении, под действием силы тяжести на закрепленные на конце образца грузы. Поворот образца относительно продольной оси осуществляется путем поворота трубы-кронштейна на заданный угол, который отсчитывается по стрелке индикатора угла наклона силовой плоскости. С помощью индикато-

ров часового типа, установленных в струбцинах на трубе-кронштейне, производится измерение перемещений образца в направлении главных осей его поперечного сечения. Нагружение образца осуществляется с помощью грузов, устанавливаемых на узле подвеса груза, который шарнирно подвешен на оси образца (рис. 4).



Рис. 4. Установка для испытаний на косо́й изгиб

3.5. Установка для определения перемещений в статически неопределимой раме

Эксперимент по определению перемещений в статически неопределимой раме проводится на образцах двух типов рам. На рис. 5. показана установка с рамой вида кольцо. Нагружение кольца осуществляется через шарнирные узлы, хвостовики которых устанавливаются в клиновые захваты настольной разрывной машины. Измерение величины уменьшения горизонтального диаметра производится с помощью индикатора часового типа, закрепленного на стойке параллельно диаметральной плоскости. Измерение силы нагружения образца осуществляется с помощью динамометра, установленного на равном с рамой плече.



Рис. 5. Кольцевая статически неопределимая рама

3.6. Установка для испытаний на продольный изгиб

Установка для проведения эксперимента состоит из сварной станины, вертикально установленной на основании (рис. 6). В нижней части станины установлена подвижная пиноль с центровым наконечником. Осевое перемещение пиноли осуществляется винтовой парой. В верхней части станины установлен силоизмеритель, представляющий собой стальную скобу, деформации которой регистрируются индикатором часового типа. Величина силы, приложенной к скобе силоизмерителя, пропорциональна показаниям индикатора. Определение нагрузки производится с помощью тарировочного графика. Измеряемое усилие прикладывается к центральному наконечнику.



Рис. 6. Установка для испытаний материала на устойчивость

3.7. Установка для испытаний на выносливость

Для многоцикловых испытаний на изгиб с вращением спроектирована установка. Принципиальная схема функционирования и составных элементов данной установки показана на рис. 7. Образец устанавливают в цанговые захваты машины, после чего его центрируют. Для измерения радиального биения на станине смонтирована

штанга с индикатором часового типа. Установленный образец проворачивают и измеряют величину отклонения, выбирая радиальные отклонения компенсирующими пластинками.

Испытания образцов проводятся в условиях изгиба с вращением с частотой $f = 50$ Гц, при симметричном цикле нагружения и базе испытаний $N_6 = 10^7$ в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Рабочую поверхность цилиндрических гладких образцов для усталостных испытаний подвергают шлифовке и механической полировке с обеспечением шероховатости $Ra 0,63$ мкм.

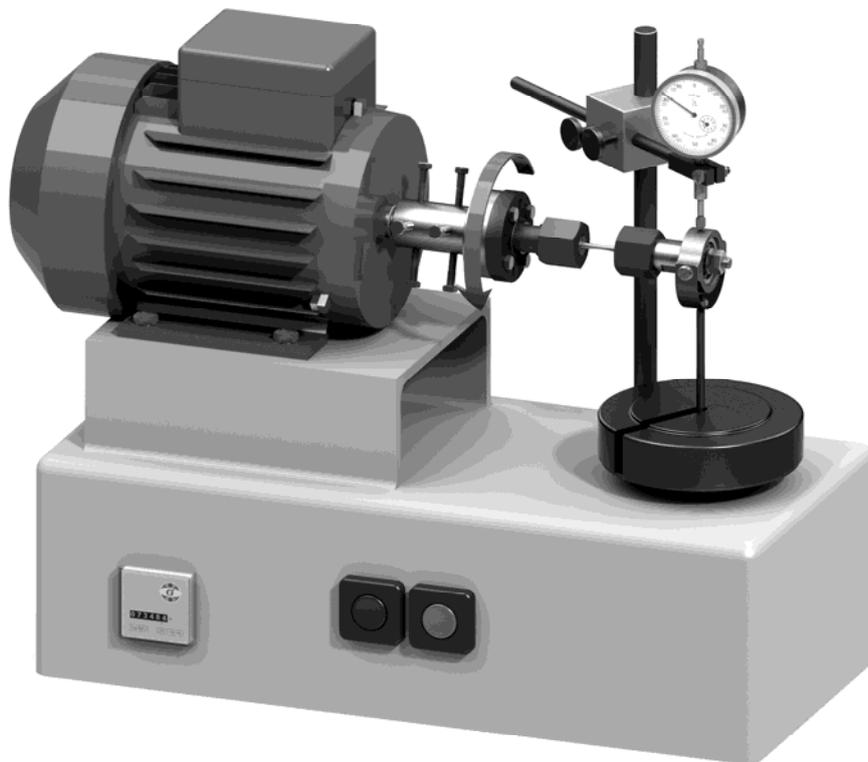


Рис. 7. Установка для определения предела выносливости материала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М. Л. Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. М.: «Металлургия», 1979. 495 с.
2. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов: в 2 частях. Изд. 3. М.: «Машиностроение», 1974. 840 с.
3. Греков Ф. Ф. Структурная кристаллография / Ф. Ф. Греков, Г. Б. Рябенко, Ю. П. Смирнов. Л.: изд-во ЛГПИ, 1988. 774 с.
4. Instron AVE Усовершенствованный видеоэкстензометр. Справочное руководство – оборудование. RU-M26-14058. 2004. 209 с.
5. Instron AVE Усовершенствованный видеоэкстензометр. Справочное руководство – указания по применению. RU-M26-14059. 2004. 48 с.
6. Справочное руководство по вычислениям к программному обеспечению Bluehill Lite компании Instron. M12-14366-RU. Редакция А (Help V 2.4). 2006. 144 с.
7. Instron Bluehill Lite. M12-14367-RU, Ред. А (Справочная система V 2.4) Руководство по программному обеспечению. 2003. 234 с.
8. Справочник по программе Instron Bluehill, версия 1.0. 2006. 177 с.
9. Настольные двухколонные испытательные машины Instron модель 3380. Справочное руководство M10-14135-RU. Издание А. 2002. 105 с.
10. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
11. Афанасьев А. М. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: учебное пособие / А. М. Афанасьев, В. А. Марьин. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. 288 с.
12. Сопротивление усталости элементов конструкций / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебнев и др. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.
13. Лабораторный практикум по механике материалов и конструкций / под ред. проф. А. К. Любимова. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2003. 360 с.
14. Мавлютов Р. Р. Концентрация напряжений в элементах конструкций. М.: Наука, 1996. 240 с.
15. Иориш Ю. И. Виброметрия. М.: Гос. науч.-техн. изд. машиностроит. лит., 1963.
16. Прочность, устойчивость, колебания. Том 3 / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М.: «Машиностроение», 1968.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Механические характеристики материалов

Марка стали	σ_T , МПа	$\sigma_{пч}$, МПа	δ , %	Марка стали	σ_T , МПа	$\sigma_{пч}$, МПа	δ , %
Углеродистые стали обыкновенного качества (по ГОСТ 380-2005)							
Ст1	180	320÷400	28	Ст4	240÷260	420÷520	21
Ст2	190÷220	320÷400	26	Ст5	260÷280	500÷620	17
Ст3	210÷240	380÷470	23	Ст6	300÷310	600÷720	15
Углеродистые качественные конструкционные стали (ГОСТ 1050-88)							
08	196	320	33	35	315	530	20
10	205	330	31	40	335	570	19
15	225	370	27	45	355	600	16
20	245	410	25	50	375	630	14
25	275	450	23	55	380	650	13
30	295	490	21	60	400	680	12
Легированные конструкционные стали хромистые (ГОСТ 4543-71)							
15Х	490	690	12	35Х	735	910	11
20Х	635	780	11	40Х	785	980	10
30Х	685	880	12	45Х	835	1030	9
30ХРА	1275	1570	9	50Х	885	1080	9
Легированные конструкционные стали марганцовистые (ГОСТ 4543-71)							
15Г	245	410	26	50Г	390	650	13
20Г	275	450	24	10Г2	245	420	22
25Г	295	490	22	30Г2	345	590	15
30Г	315	540	20	35Г2	365	620	13
35Г	335	560	18	40Г2	380	660	12
40Г, 40ГР	355	590	17	45Г2	400	690	11
45Г	375	620	15	50Г2	420	740	11
Легированные конструкционные стали хромомарганцовые (ГОСТ 4543-71)							
18ХГ	735	880	10	30ХГТ	1275	1470	9
18ХГТ	885	980	9	40ХГТР	785	980	11
20ХГР	785	980	9	25ХГМ	1080	1180	10
27ХГР	1175	1370	8	38ХГМ	785	930	11
25ХГТ	980	1270	10				
Легированные конструкционные стали хромокремнистые (ГОСТ 4543-71)							
33ХС	685	880	13	40ХС	1080	1230	12
38ХС	735	930	12				
Легированные конструкционные стали хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые (ГОСТ 4543-71)							
15ХМ	275	440	21	35ХМ	835	930	12
20ХМ	590	780	12	38ХМ	885	980	11
30ХМ	735	930	11	30Х3МФ	835	980	12
30ХМА	735	930	12	40ХМФА	930	1030	13

Легированные конструкционные стали хромованадиевые (ГОСТ 4543-71)

15ХФ	540	740	13	40ХФА	735	880	10
Легированные конструкционные стали никельмолибденовые (ГОСТ 4543-71)							
15Н2М (15НМ)	635	830	11	20Н2М (20НМ)	685	880	10
Легированные конструкционные стали хромоникелевые и хромоникелевые с бором (ГОСТ 4543-71)							
12ХН	440	640	10	12ХН2	590	780	12
20ХН	590	780	14	12ХН3А	685	930	11
40ХН	785	980	11	20ХН3А	735	930	12
45ХН	835	1030	10	12Х2Н4А	930	1130	10
50ХН	885	1080	9	20Х2Н4А	1080	1270	9
20ХНР	980	1180	10	30ХН3А	785	980	10
Легированные конструкционные стали хромокремнемарганцовые и хромокремнемарганцовоникелевые (ГОСТ 4543-71)							
20ХГСА	635	780	12	35ХГСА	1275	1620	9
25ХГСА	835	1080	10	30ХГСН2А	1375	1620	9
30ХГСА	835	1080	10	(30ХГСНА)			
Легированные конструкционные стали хромомарганцовоникелевые и хромомарганцовоникелевые с титаном, молибденом и бором (ГОСТ 4543-71)							
15ХГН2ТА (15ХГНТА)	735	930	11	19ХГН	930	1520	7
				38ХГН	685	780	12
20ХГНР	1080	1270	10	20ХГНМ	930	1570	7
20ХГНТР	980	1180	9	40ХГНМ	835	980	12
14ХГН	835	1080	8	25ХГНМТ	1080	1180	10
Легированные конструкционные стали хромоникельмолибденовые (ГОСТ 4543-71)							
20ХН2М (20ХНМ)	685	880	11	40Х2Н2МА (40Х1НВА)	930	1080	10
30ХН2МА (30ХНМА)	785	980	10	38ХН3МА	980	1080	12
38Х2Н2МА (38ХНМА)	930	1080	12	18Х2Н4МА (18Х2Н4ВА)	835	1130	12
40ХН2МА (40ХНМА)	930	1080	12	25Х2Н4МА (25Х2Н4ВА)	930	1080	11
Легированные конструкционные стали хромоникельмолибденованадиевые и хромоникельванадиевые; хромоалюминиевая с молибденом* (ГОСТ 4543-71)							
30ХН2МФА	785	880	10	45ХН2МФА (45ХНМФА)	1325	1470	7
38ХН3МФА	1080	1180	12	20ХН4ФА	685	880	12
36Х2Н2МФА (36ХН1МФА)	1080	1180	12	38Х2МЮА* (38ХМЮА*)	835	980	14
Нержавеющие жаропрочные стали и сплавы (по ГОСТ 5632-72) [8]							
1Х13	410	610	22	1Х18Н9Т	240	580	70
2Х13	520	720	21	Х20Н77Т2ЮР	660	1090	24
1Х17Н2	770	960	17	ЖС6К	880÷940	1070	7

Механические характеристики чугунов

Марка	$\sigma_{пчр}$, МПа	$\sigma_{пчс}$, МПа	σ_T , МПа	δ , %	Марка	$\sigma_{пчр}$, МПа	$\sigma_{пчс}$, МПа	σ_T , МПа	δ , %
Серый чугун (по ГОСТ 1412-85)									
СЧ12	120	500	-	-	СЧ28	280	1100	$0,75\sigma_B$	1,2
СЧ15	150	650	-	-	СЧ32	320	1200	$0,85\sigma_B$	1,2
СЧ18	180	700	-	-	СЧ35	350	1200	$0,85\sigma_B$	1,3
СЧ21	210	950	$0,75\sigma_B$	-	СЧ38	380	1400	$0,85\sigma_B$	1,4
СЧ24	240	1000	$0,75\sigma_B$	-					
Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (по ГОСТ 7293-85)									
ВЧ35	350		220	22	ВЧ60	600-700	2100	420-550	3
ВЧ40	400		250	15	ВЧ70	700		420	2
ВЧ45	450-500	1500-1600	350-400	10	ВЧ80	800		480	2
ВЧ50	500-600	1700-1800	400-500	7	ВЧ100	1000		700	2

Механические характеристики цветных металлов

Марка	σ_T , МПа	$\sigma_{пч}$, МПа	δ , %	Марка	σ_T , МПа	$\sigma_{пч}$, МПа	δ , %
Алюминиевые сплавы (по ГОСТ 4784-97) [8]							
АМцМ	50	130	23	Д6 (З и ЕС)	300	460	18
АМг2М	80	190	23	Д16 (З и ИС)	290	440	11
АМг2П	210	250	6	Д16 (З и ЕС)	380	520	18
АМг6	170	320	24	Д16 (О)	100	220	13
АМг6М	150	300	18	Д16 (СЗ)	230	430	6
Д1 (О)	110	210	18	АК4-1	280	430	13
Д1П (З и ЕС)	250	410	15	ВД17	330	490	20
Д6 (О)	110	220	15				
Технический титан и его сплавы (по ГОСТ 19807-91)							
BT1-0	265-293	345-355	51	BT22	883	940	16
BT14	830-1240	850-1350	22	BT6	990-1240	1080-1360	8

Коэффициенты Пуассона некоторых материалов

Материал	ν	Материал	ν	Материал	ν	Материал	ν
Алебастр	0,18	Золото	0,42-0,44	Ниобий	0,397	Сталь легированная	0,25-0,30
Алмаз	0,10-0,29	Кадмий	0,3	Парафин	0,5	Сталь углеродистая	0,24-0,28
Алюминиевые сплавы	0,32	Картон	0,2	Песок	0,20-0,455	Стекло	0,18-0,3
Бакелит	0,36	Каучук	0,47	Полистирол	0,35	Тантал	0,342
Бетон	0,10-0,20	Константан	0,33	Пресный лед	0,34	Тефлон	0,41
Бронза	0,32-0,35	Костный материал	0,25-0,30	Пробка	0	Титан	0,265-0,34
Ванадий	0,365	Латунь	0,32-0,42	Резина	0,4999	Хром	0,21
Вольфрам	0,28	Магний	0,252-0,289	Свинец	0,42	Целлулоид	0,33-0,38
Вспененные материалы	0,10-0,50	Медь	0,33	Серебро	0,367	Цинк	0,27
Германий	0,31	Насыщенная глина	0,40-0,49	Слоновая кость	0,5	Чугуны	0,21-0,27
Глина	0,30-0,45	Нержавеющая сталь	0,30-0,31	Соль	0,30-0,35	Эбонит	0,389
Дюралюминий	0,32-0,33	Никель	0,31	Стали	0,27-0,30	Эпоксидная смола	0,35

Модули упругости некоторых материалов

Материал	$E (G),$ ГПа	Материал	$E (G),$ ГПа	Материал	$E (G),$ ГПа	Материал	$E (G),$ ГПа
10	190	40ХН	204	СЧ21	85 (45)	Д1, Д1П	71 (27)
20	202	20ХН3А	204 (81,5)	СЧ24	110 (48)	Д6, Д16	71
40	213,5	40ХНМА	204	СЧ28	120 (52)	ВТ1	112,1 (41,1)
45	204	30ХГСА	198 (83)	СЧ32	130 (56)	ВТ6	110 (42,5)
50	220	1Х13, 2Х13	220	СЧ35	145 (64)	ВТ3-1	115 (43)
60	208	1Х17Н2	200	СЧ38	160 (70)	ВТ14	115
30Г	217	1Х18Н9Т	200	ВЧ45	130-160 (70)	Алмаз	700-1200 (478)
60Г	210,9	Х20Н77Т2ЮР	200	ВЧ50	130 (77,5)	Лед	10
20Х	207	Вольфрам	420 (150)	ВЧ60	180 (80)	Стекло	48-85
40Х	218,5 (80,8)	Молибден	330 (122)	ВЧ40	160 (75)	Мрамор	56
45Х	210,9 (80,15)	Ниобий	106 (88)	АМцМ, АМг2М, АМг2П, АМг6М	71 (27)	Дуб	7,3-15,1
30ХМ	213	СЧ12, СЧ15, СЧ18	80-150 (45)	АМг6	70	Береза	15,0-18,4

Прочность на разрыв различных твердых тел

Материал	Предел прочности $\sigma_{пчр}$, МПа
Металлы	
Стали:	
– малоуглеродистая	400
– специально для сосудов высокого давления	2500
– рояльная проволока	3000
Чугуны:	
– серый	100-400
– специальный	300-600
Алюминиевые сплавы	100-600
Магниевые сплавы	100-300
Латунь	200-700
Бронза	100-800
Титановые сплавы	600-1500
Неметаллы	
Мышечная ткань	0,1
Цемент и бетон	4
Обычный кирпич	5,5
Дерево (сухое)	
– вдоль волокон	100
– поперек волокон	3,5
Кость	110
Обыкновенное стекло	35-175
Человеческий волос	190
Паутина	240
Хорошая керамика	35-350
Шелк, хлопковое волокно	350
Льняное полотно	700
Нейлоновая ткань	1050
Пластики, армированные стекло- или углеволокном	350-1050
Искусственно выращенные кристаллы:	
– усы железа	13000
– графитовые нити	24000

Диаграммы растяжения некоторых материалов

Сталь 10
(нормализация)

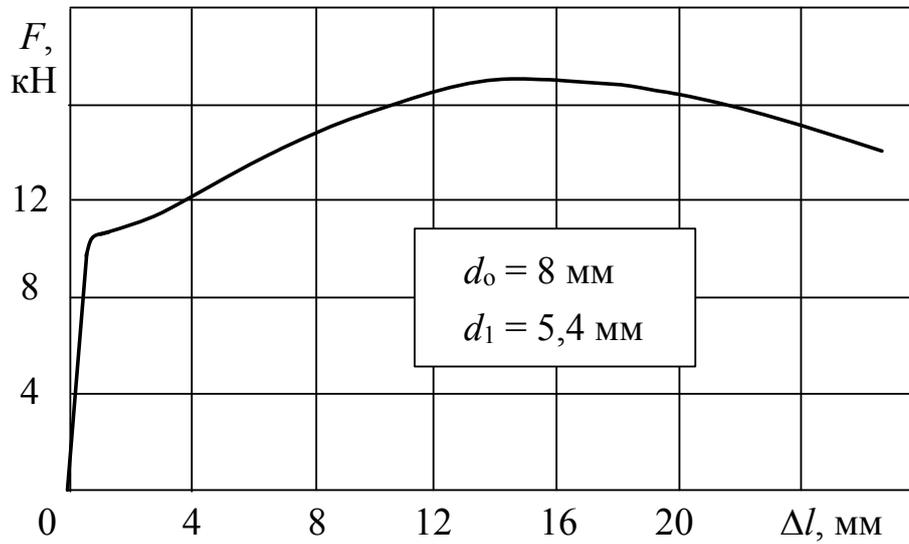


Рис. 1.

Сталь 10
(цементация и закалка с охлаждением в воде)

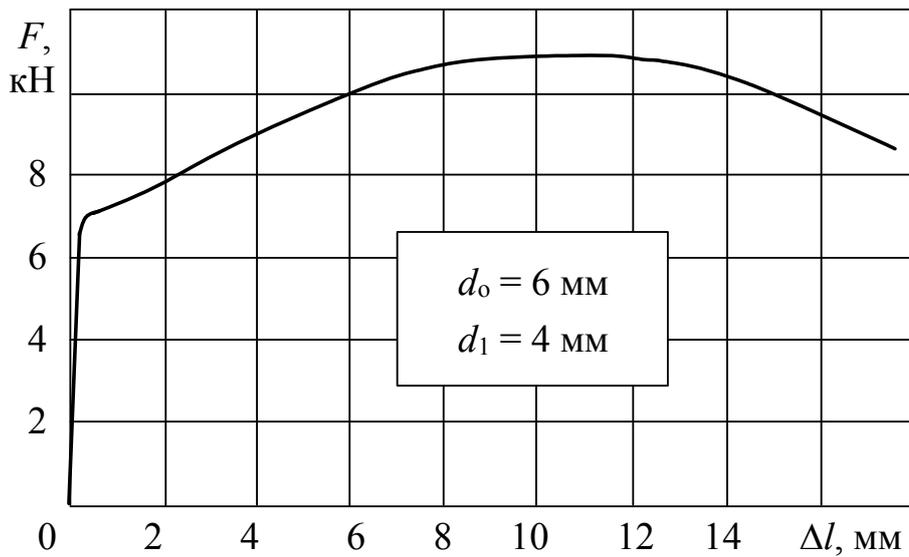


Рис. 2.

Сталь 20
(нормализация)

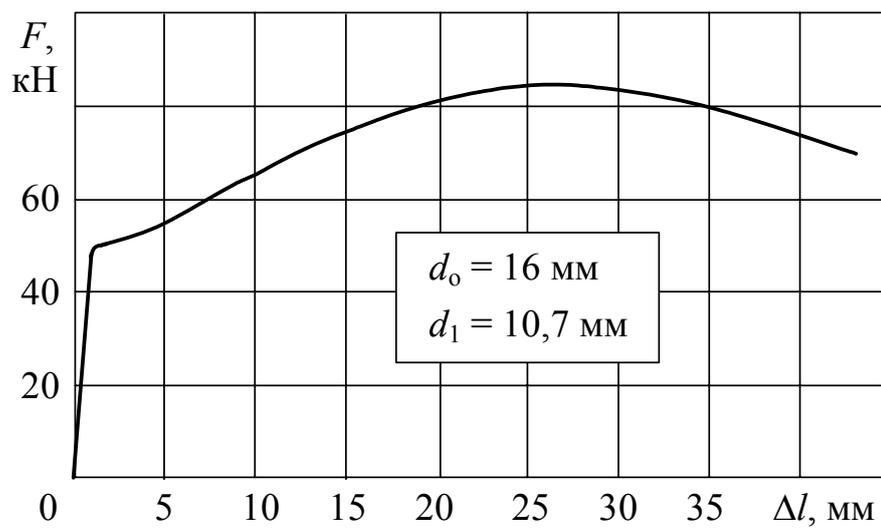


Рис. 3.

Сталь 20
(цементация и закалка с охлаждением в воде)

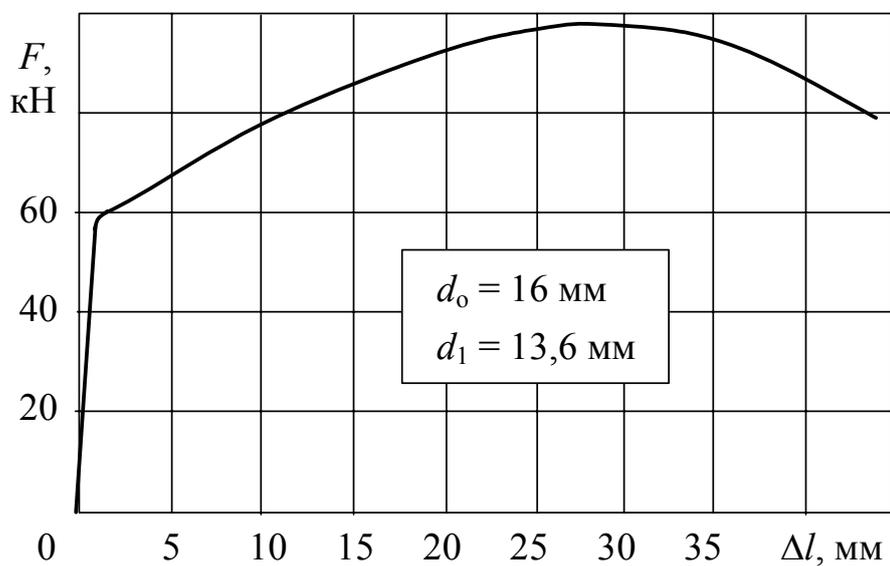


Рис. 4.

Сталь 30
(нормализация)

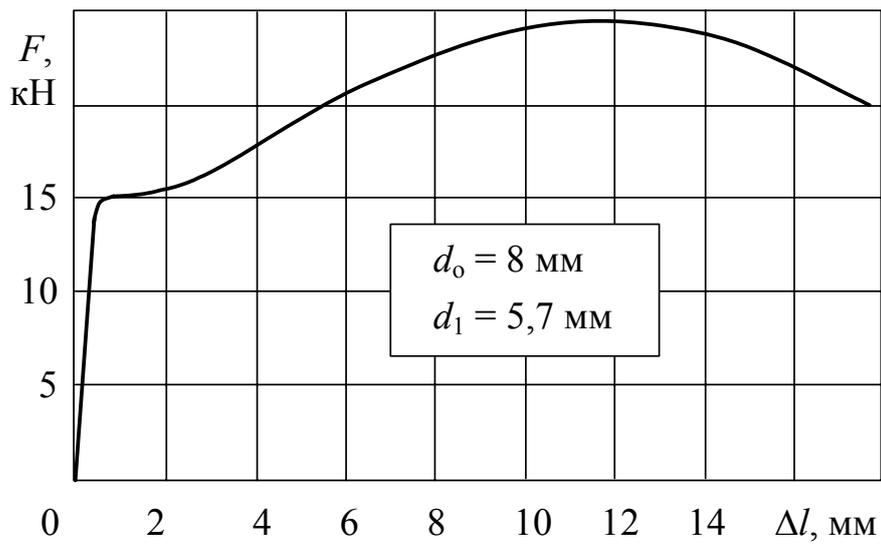


Рис. 5.

Сталь 30
(улучшение)

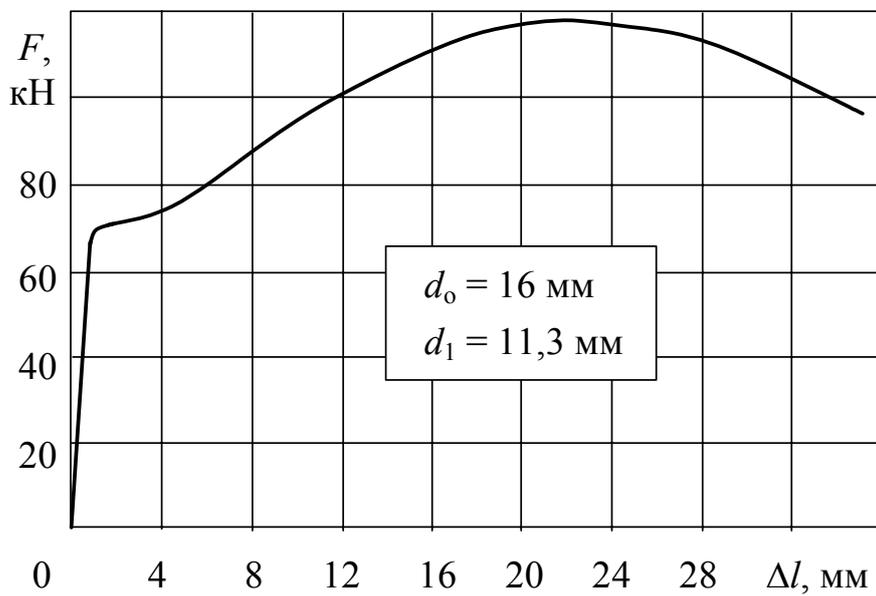


Рис. 6.

Сталь 35
(нормализация)

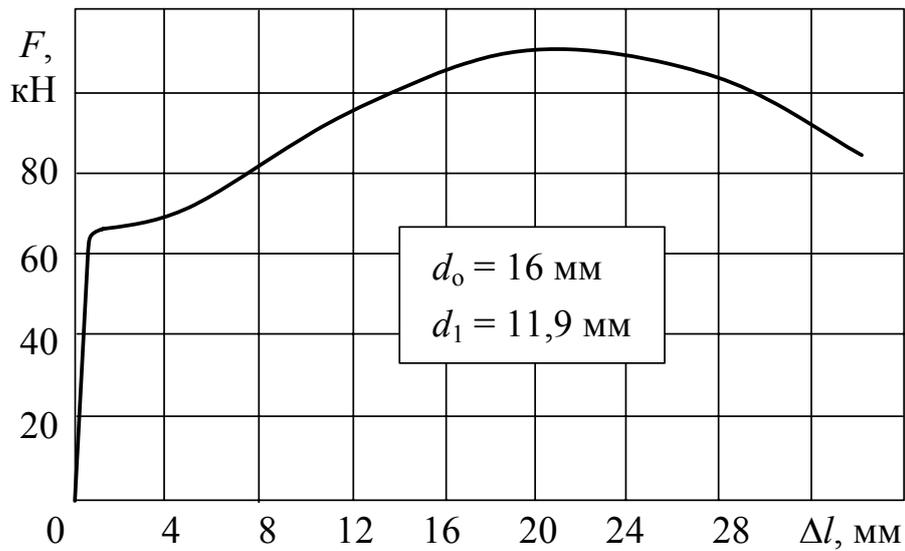


Рис. 7.

Сталь 35
(закалка с охлаждением в воде)

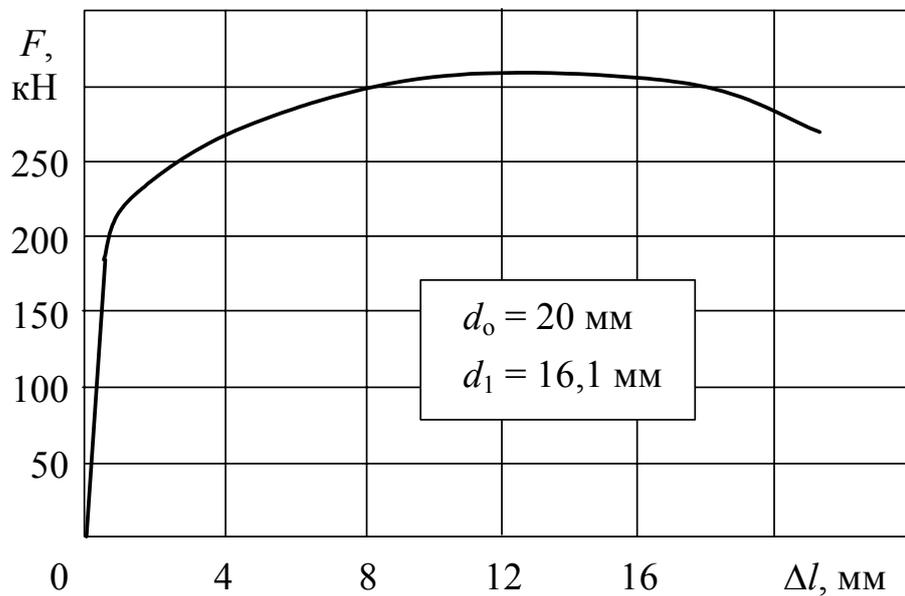


Рис. 8.

Сталь 40
(нормализация)

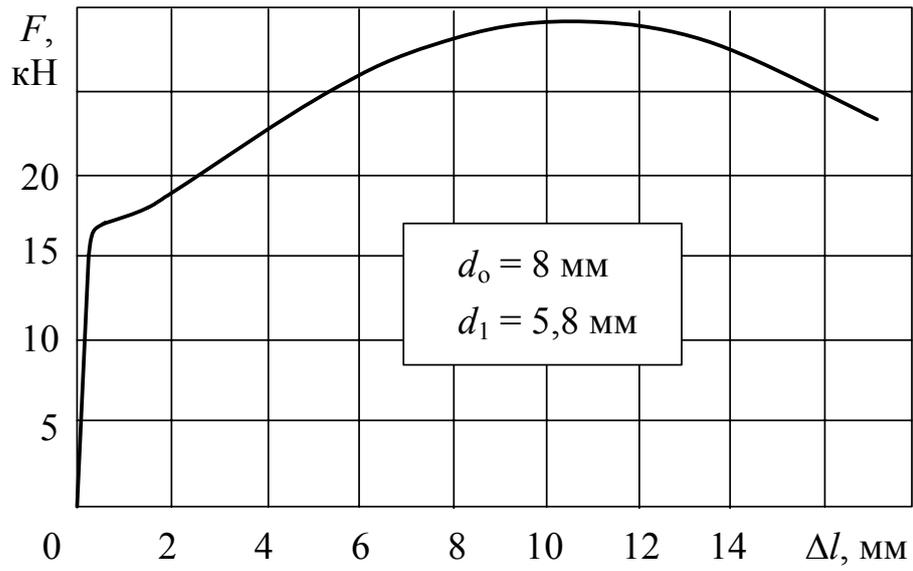


Рис. 9.

Сталь 40
(улучшение)

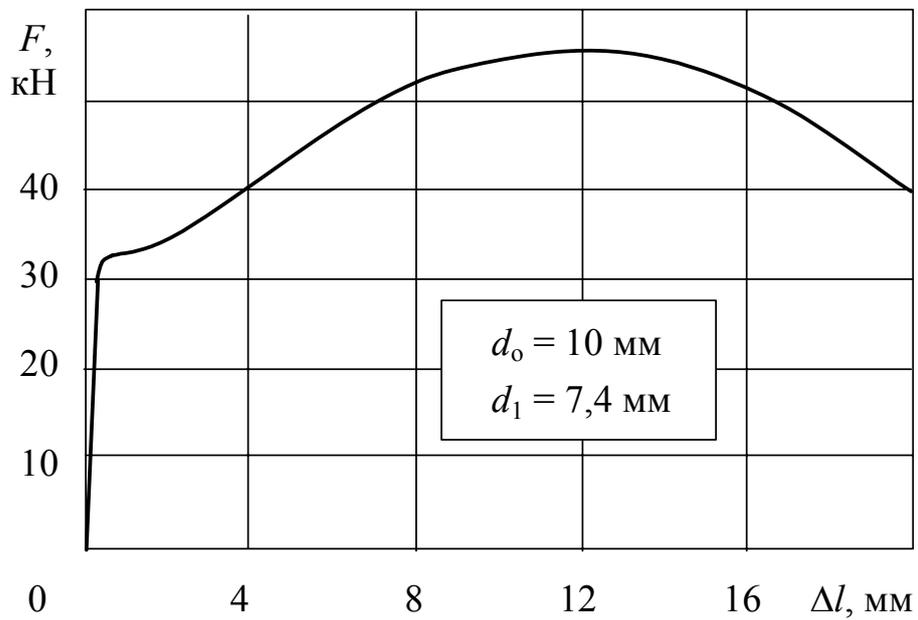


Рис. 10.

Сталь 45
(закалка с нагревом т.в.ч.)

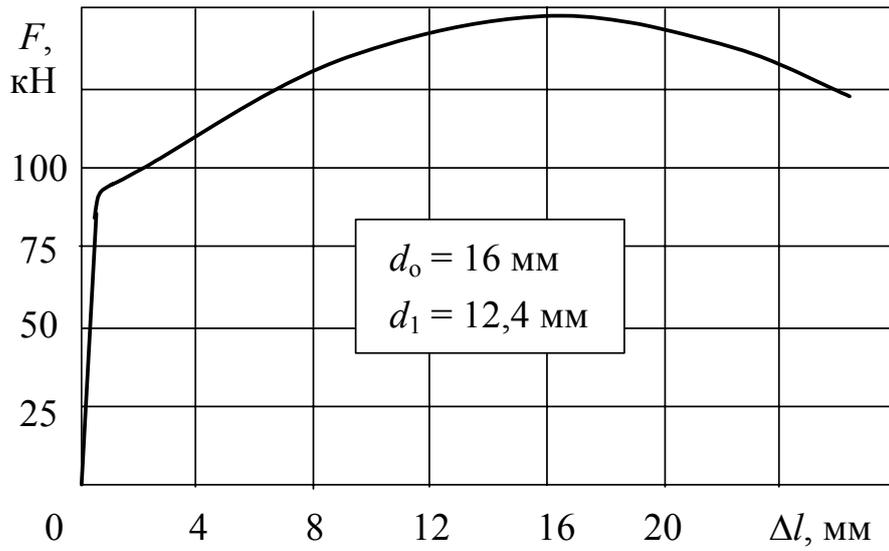


Рис. 11.

Сталь 45
(закалка с охлаждением в масле)

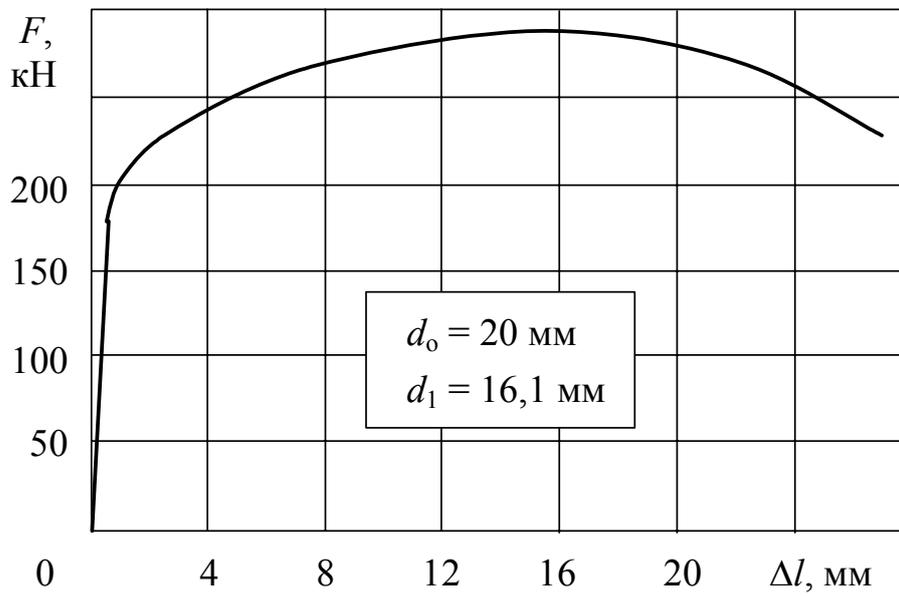


Рис. 12.

Сталь 30Г
(нормализация)

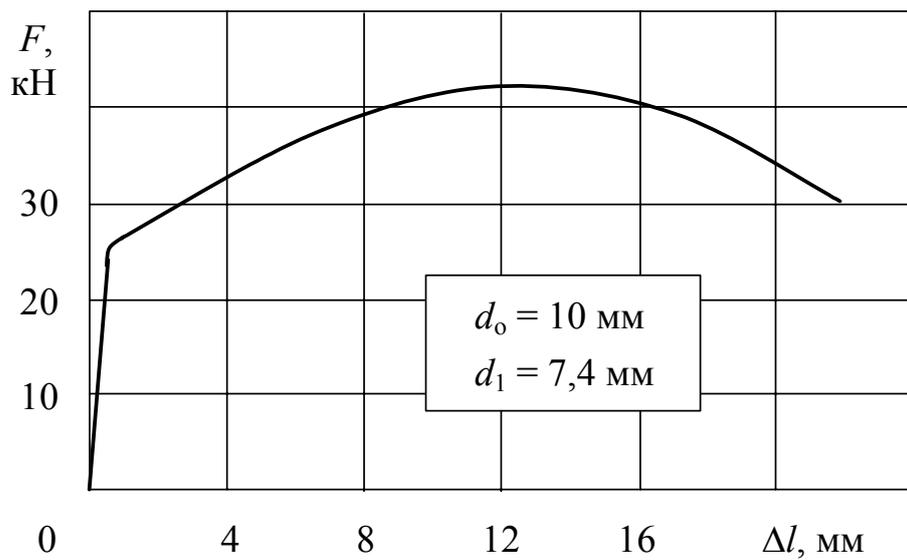


Рис. 13.

Сталь 30Г
(закалка с охлаждением в масле)

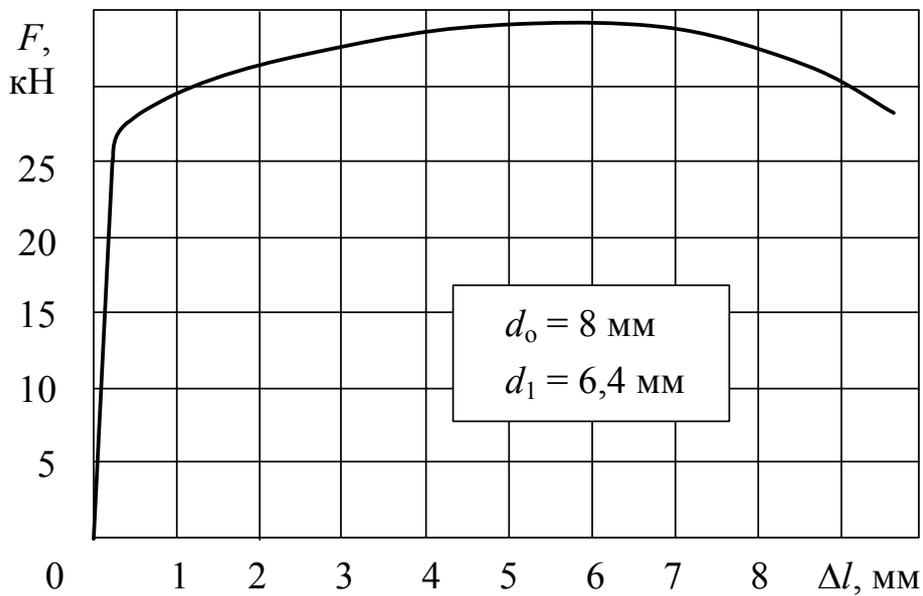


Рис. 14.

Сталь 10Г2
(нормализация)

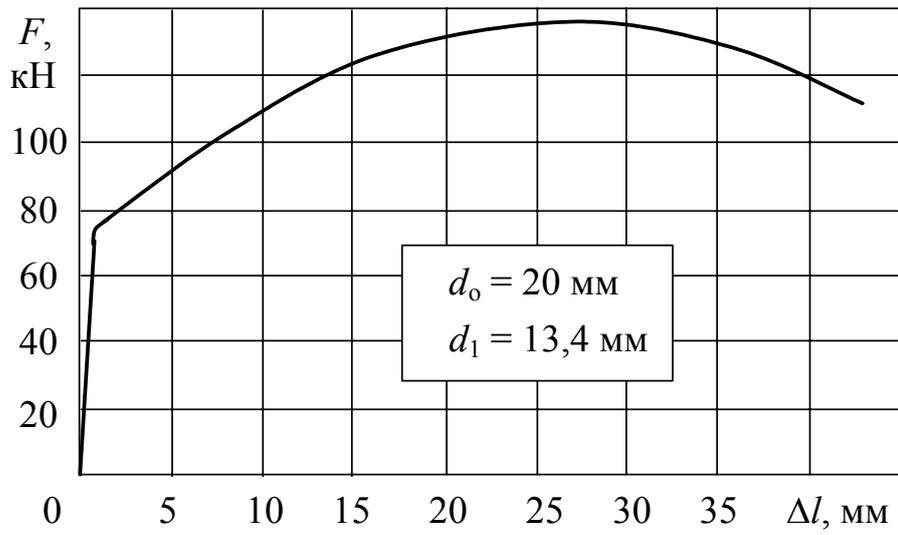


Рис. 15.

Сталь 09Г2С

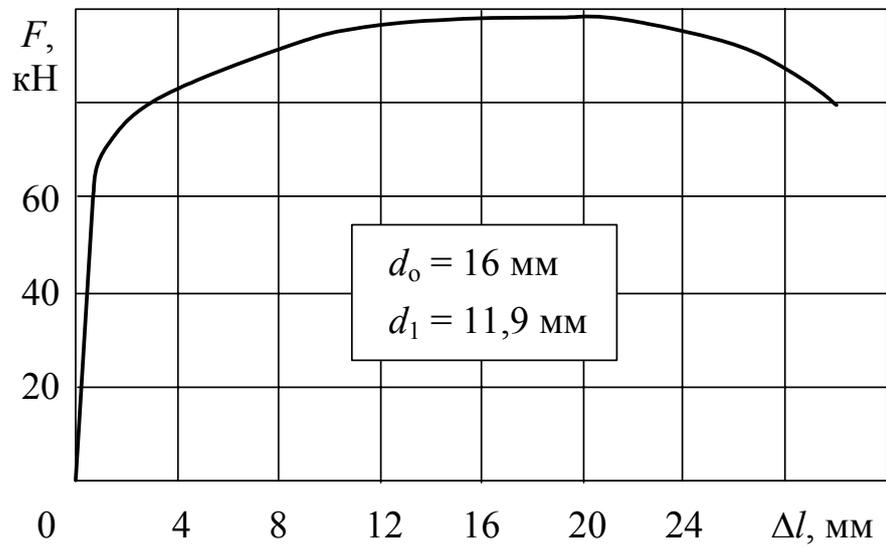


Рис. 16.

Сталь 20Х
(отжиг)

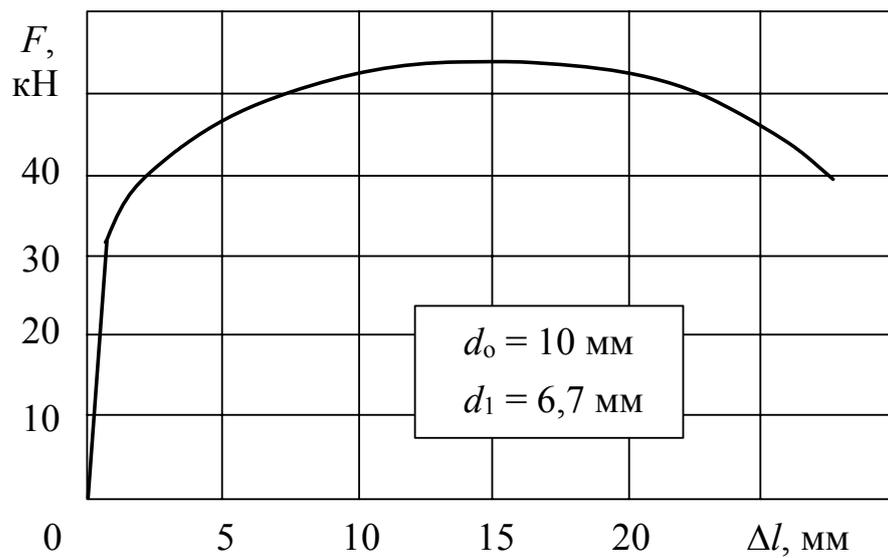


Рис. 17.

Сталь 20Х
(закалка, отпуск 180 °С)

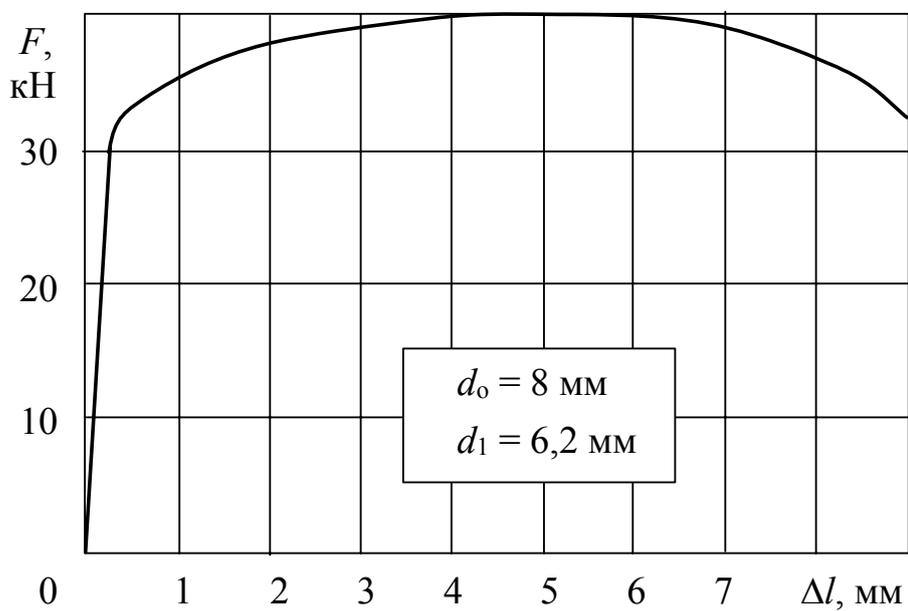


Рис. 18.

Сталь 40Х
(улучшение)

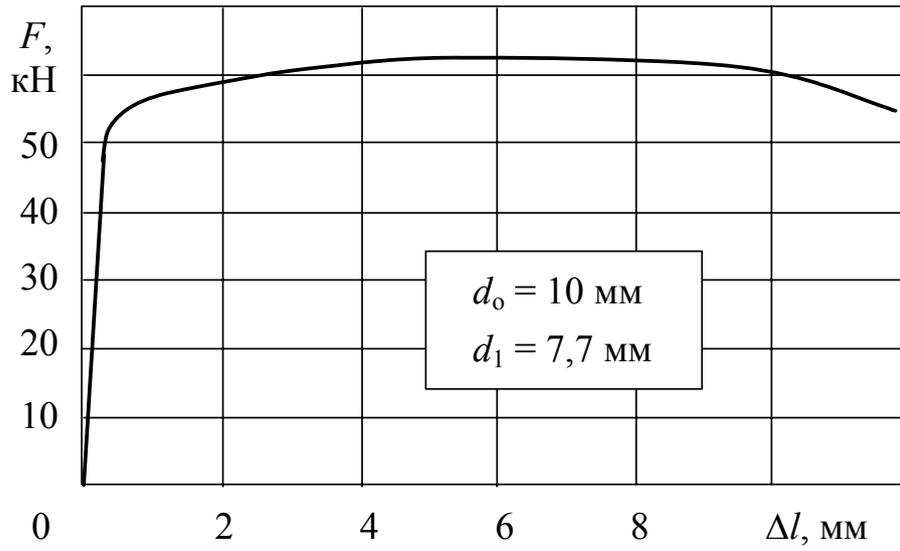


Рис. 19.

Сталь 40Х
(закалка, отпуск 600 °С)

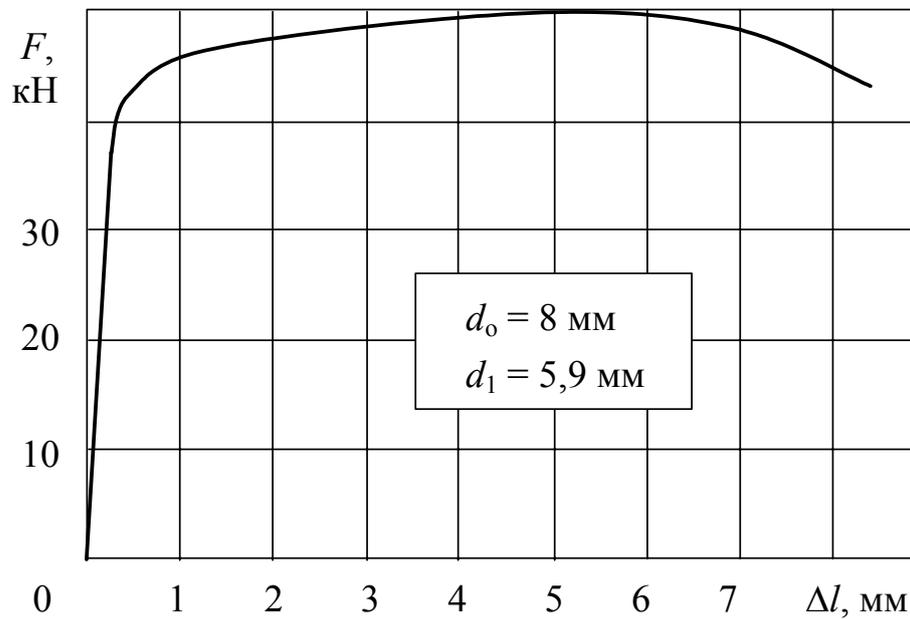


Рис. 20.

Сталь 18ХГТ
(нормализация)

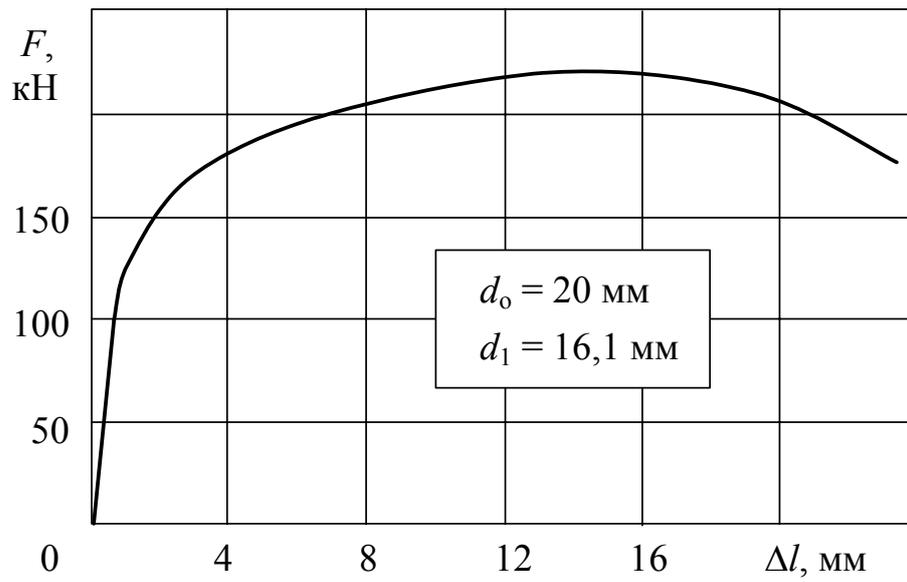


Рис. 21.

Сталь 18ХГТ
(закалка, отпуск 200 °С)

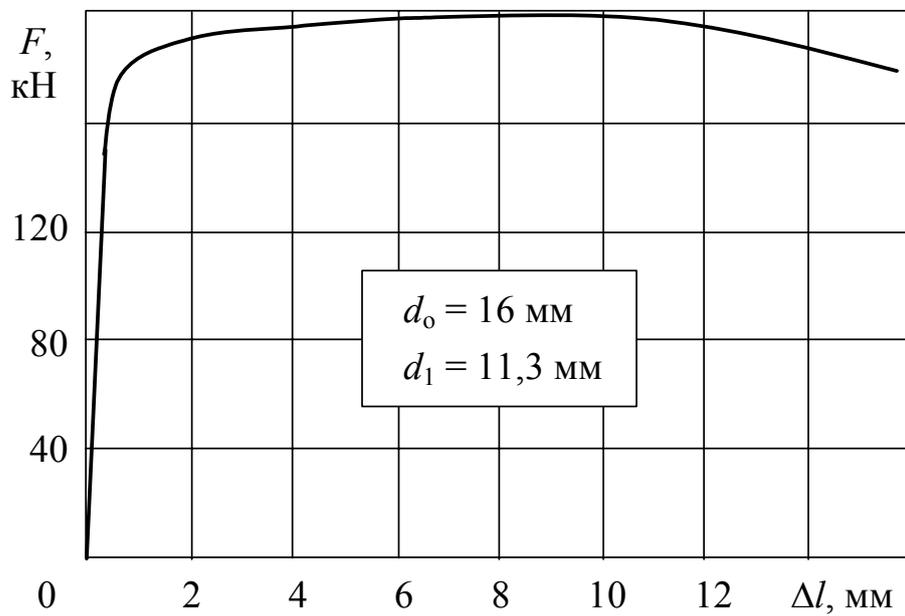


Рис. 22.

Сталь 40ХН
(нормализация)

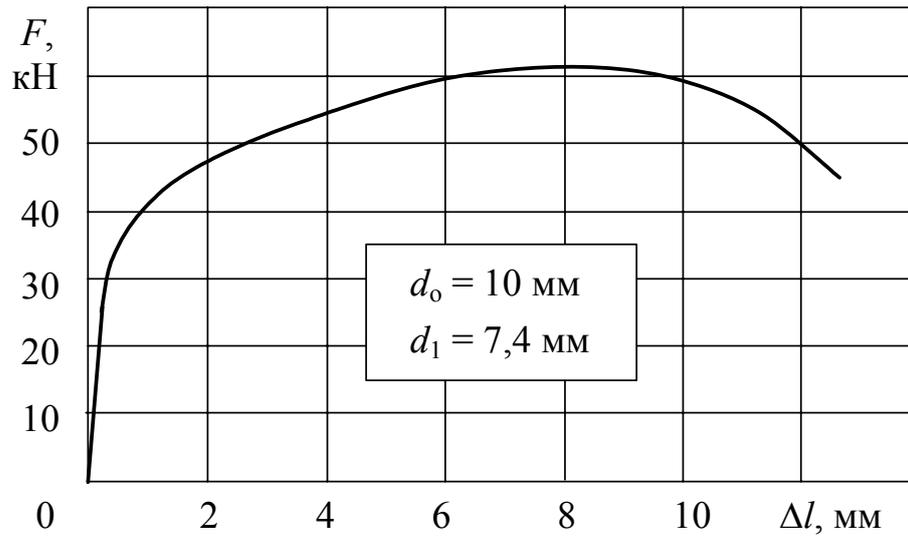


Рис. 23.

Сталь 40ХН
(закалка, отпуск 550 °С)

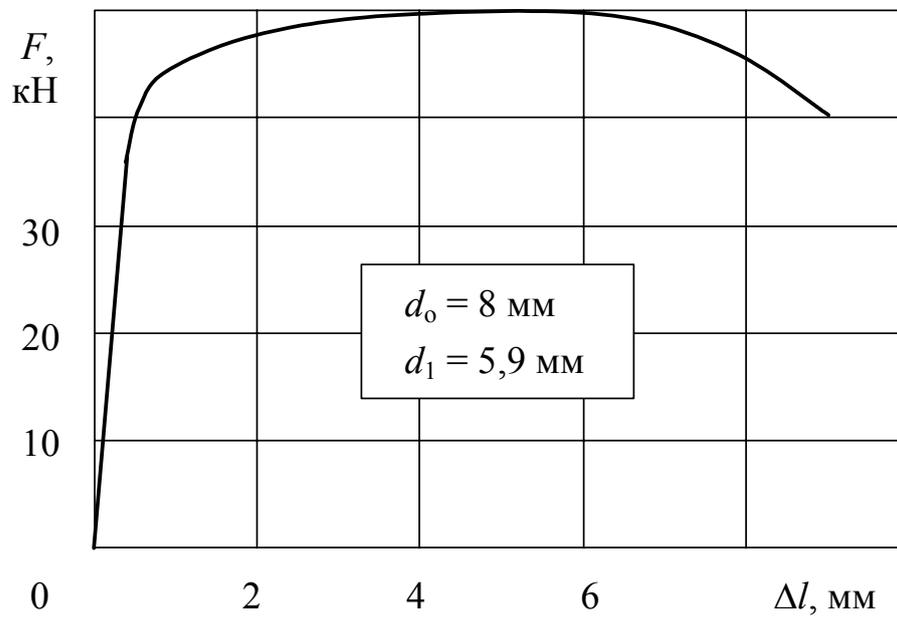


Рис. 24.

Сталь 12ХН2
(закалка с охлаждением в масле)

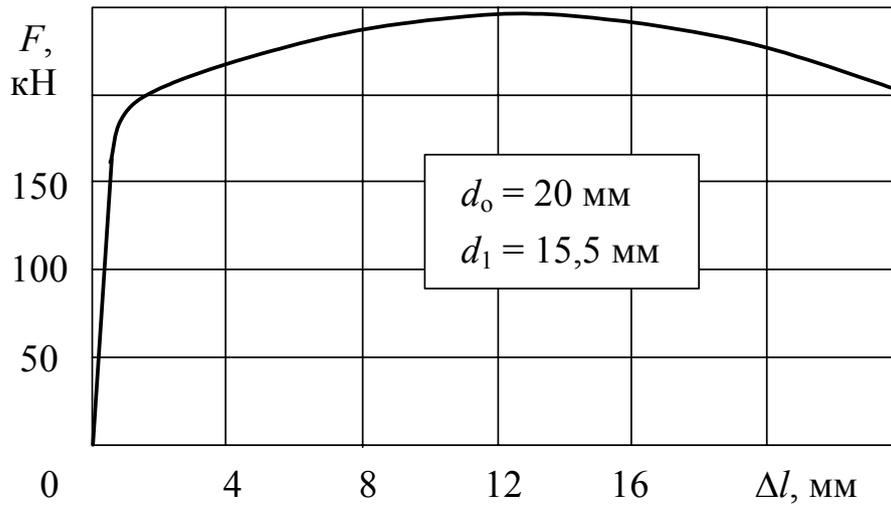


Рис. 25.

Сталь 10ХН3А
(закалка, отпуск 180 °С)

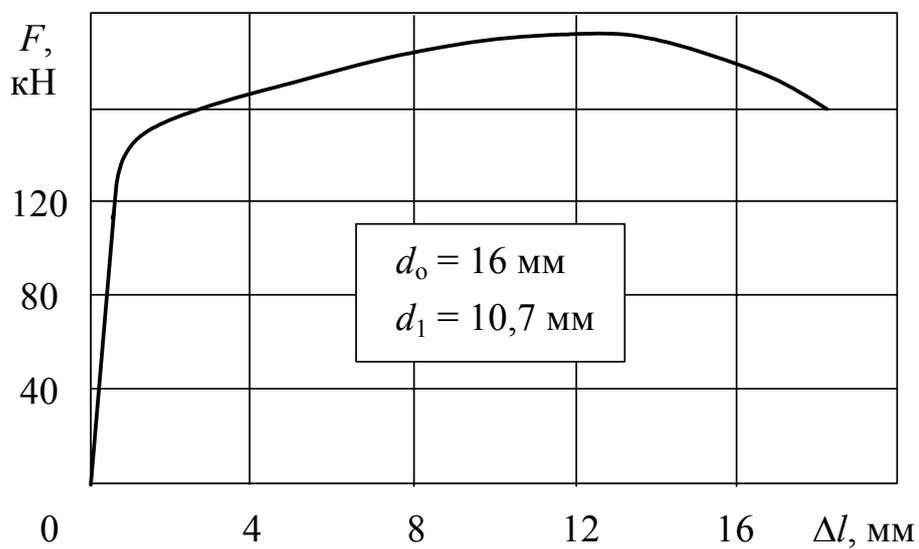


Рис. 26.

Сталь 30ХГСА
(отжиг)

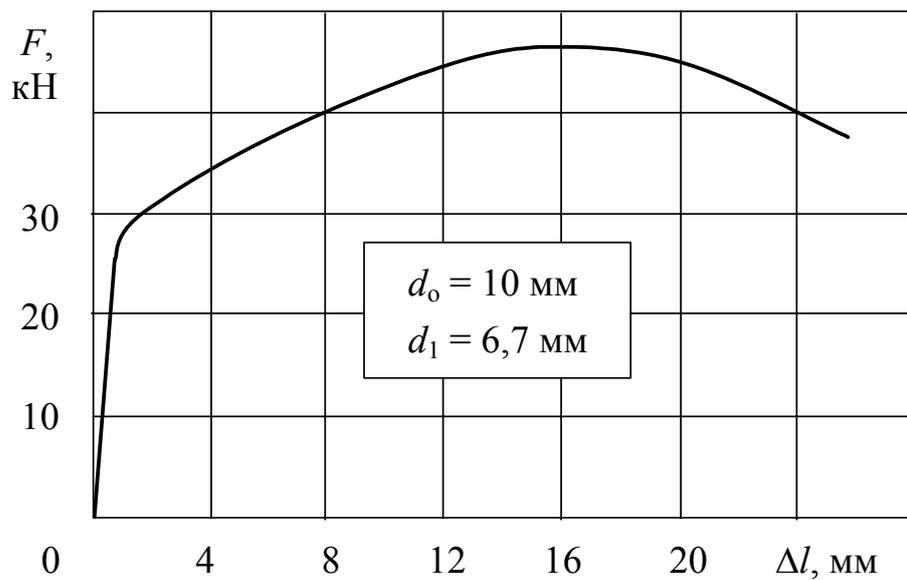


Рис. 27.

Сталь 30ХГСА
(закалка, отпуск 540 °С)

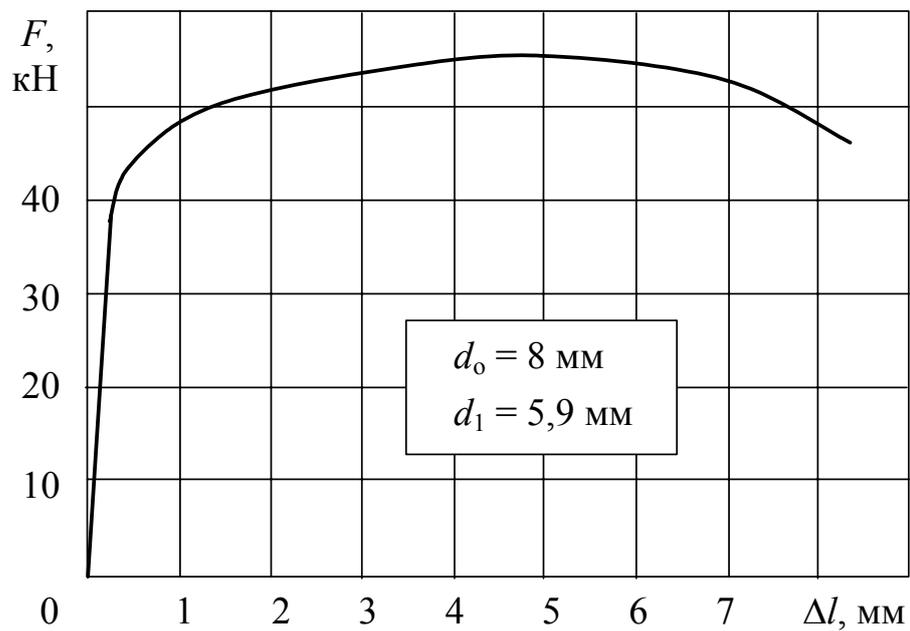


Рис. 28.

Сталь 08X13

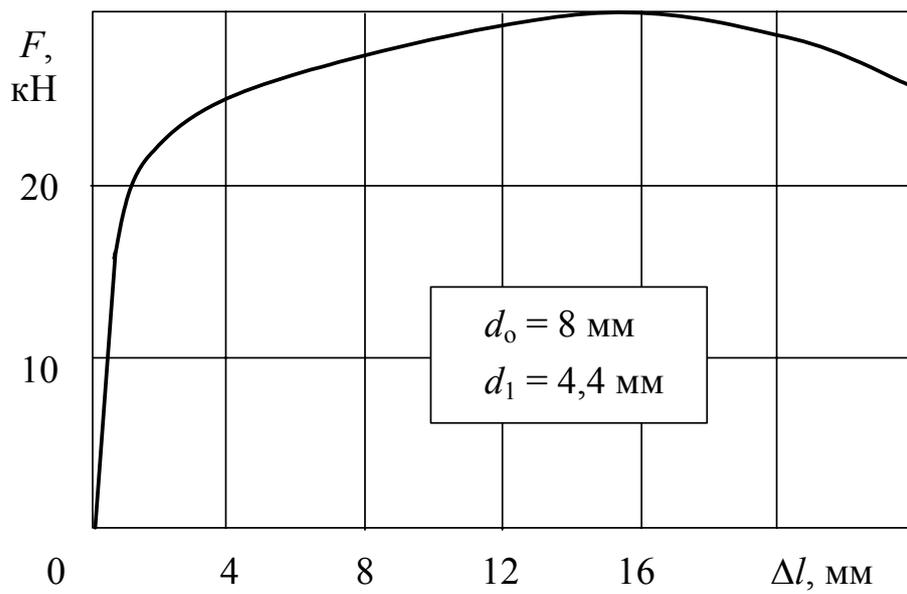


Рис. 29.

Сталь 1X13

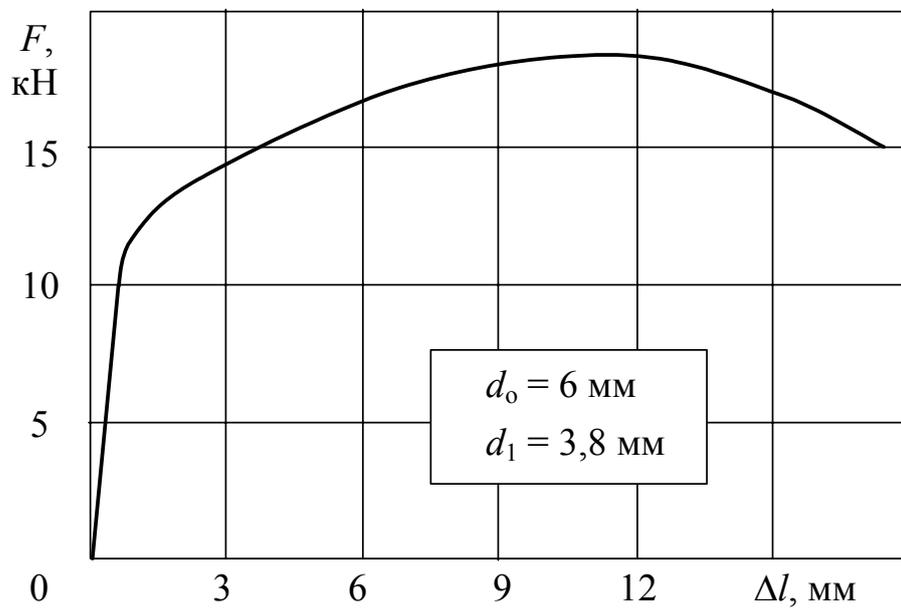


Рис. 30.

Сталь X18

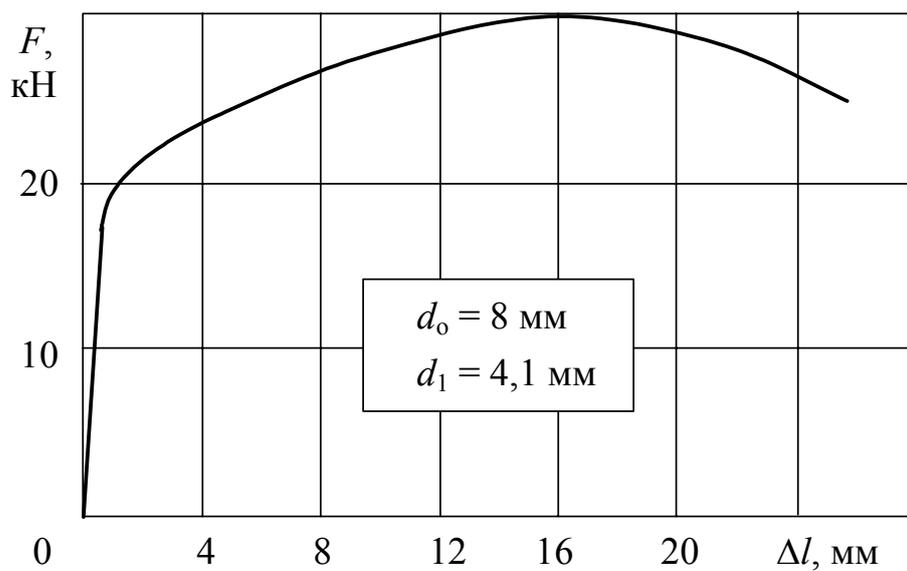


Рис. 31.

Алюминиевый сплав АК4 (закалка, искусственное старение)

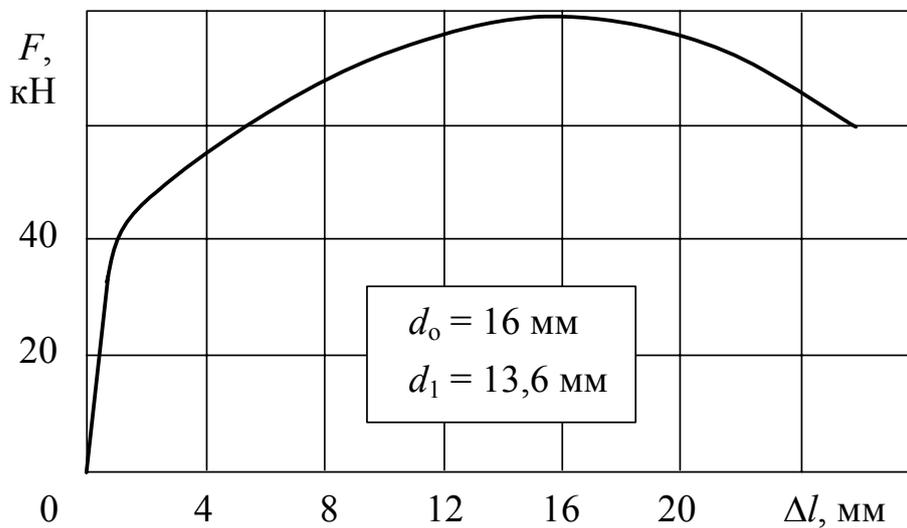


Рис. 32.

Алюминиевый сплав АМГ3

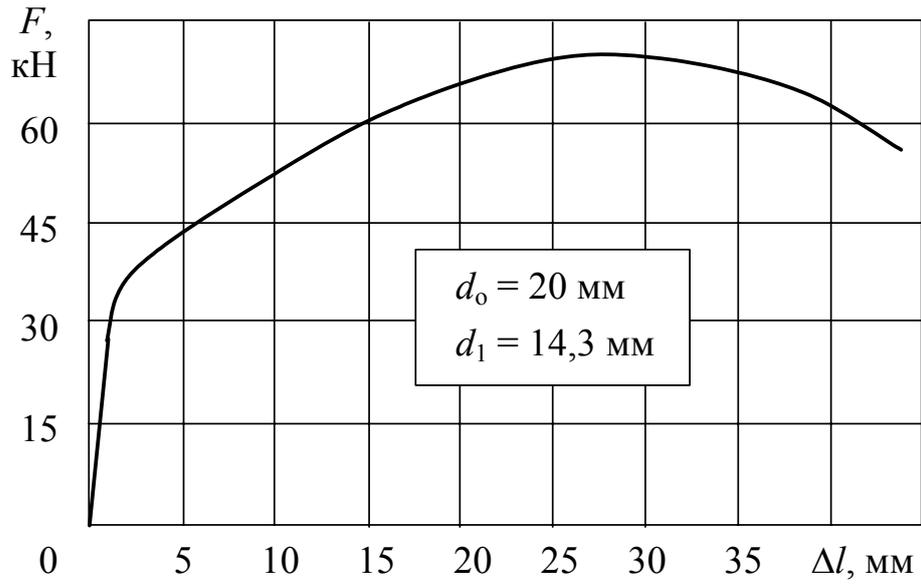


Рис. 33.

Алюминиевый сплав АМГ6

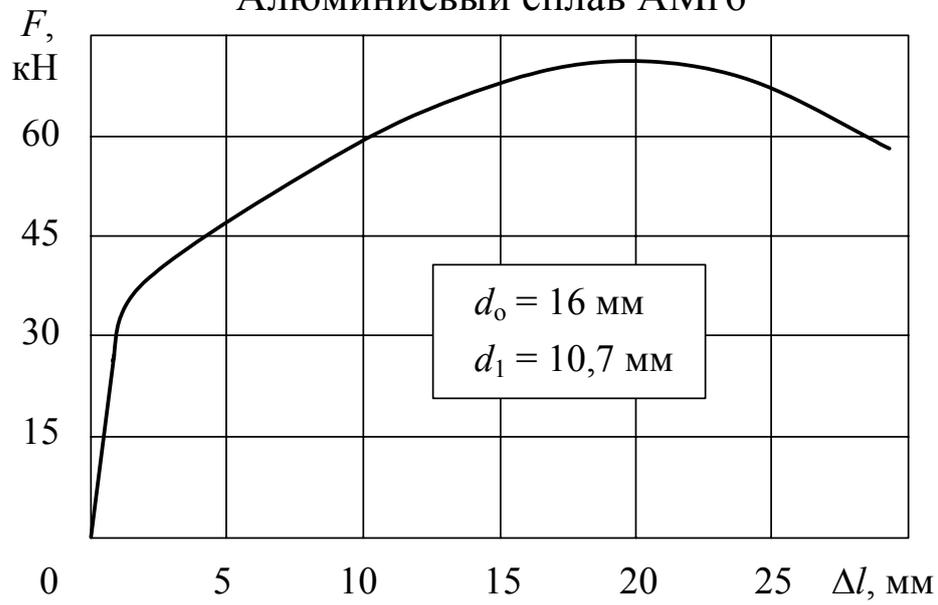


Рис. 34.

Дюралюминий Д16
(закалка, естественное старение)

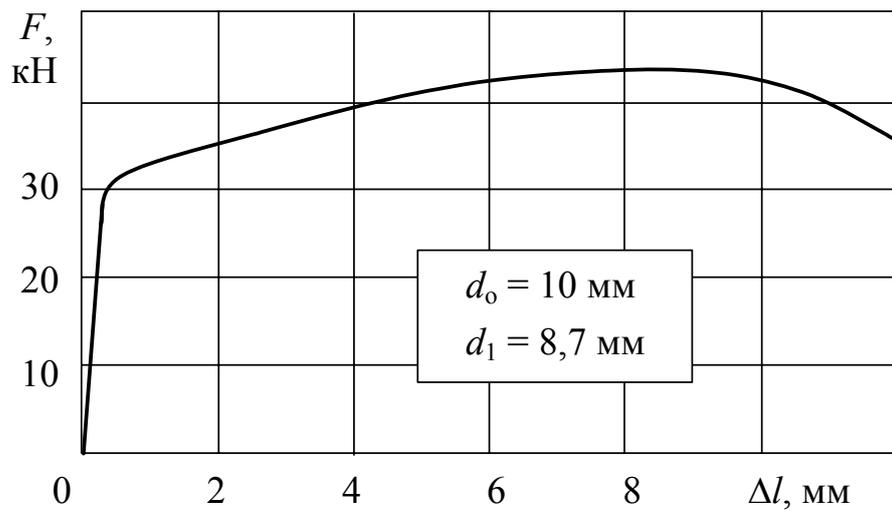


Рис. 35.

Высокопрочный алюминиевый сплав В95
(закалка, искусственное старение)

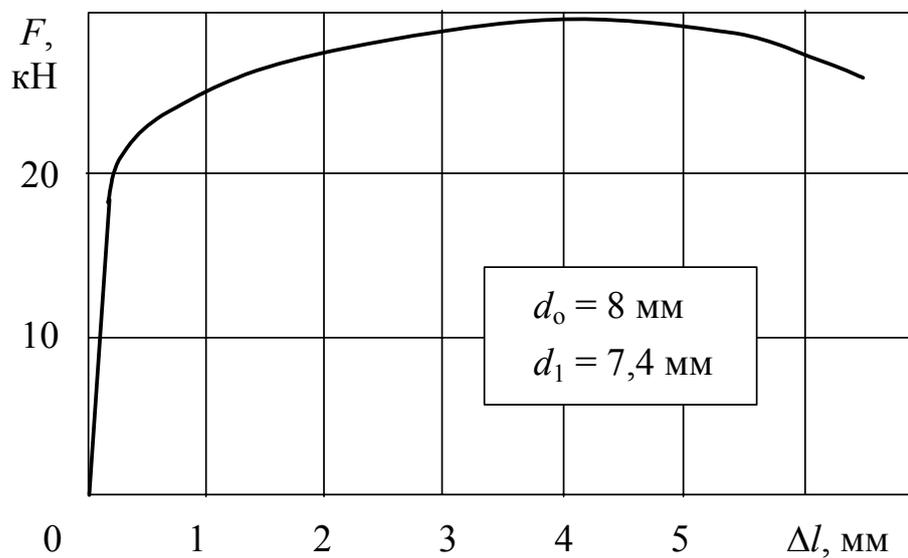


Рис. 36.

Литейный магниевый сплав МЛ5
(гомогенизация и закалка на воздухе)

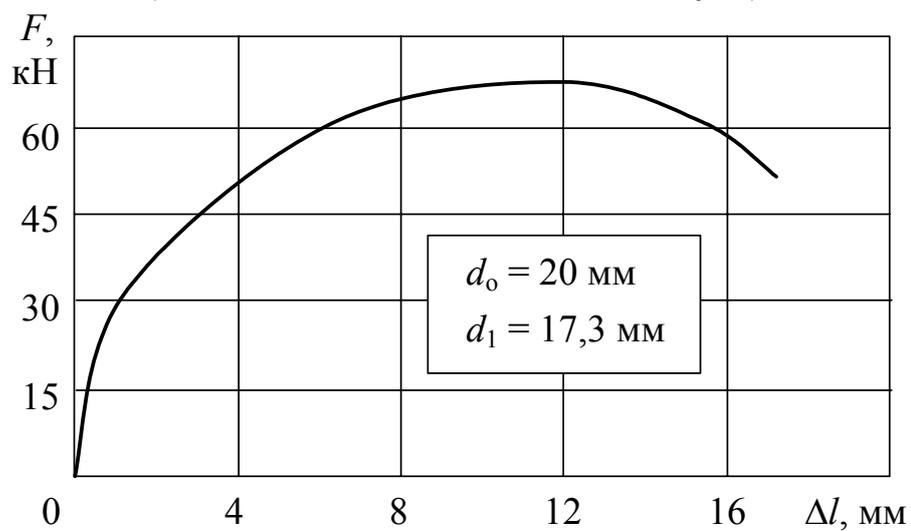


Рис. 37.

Деформируемый магниевый сплав МА5
(закалка, искусственное старение)

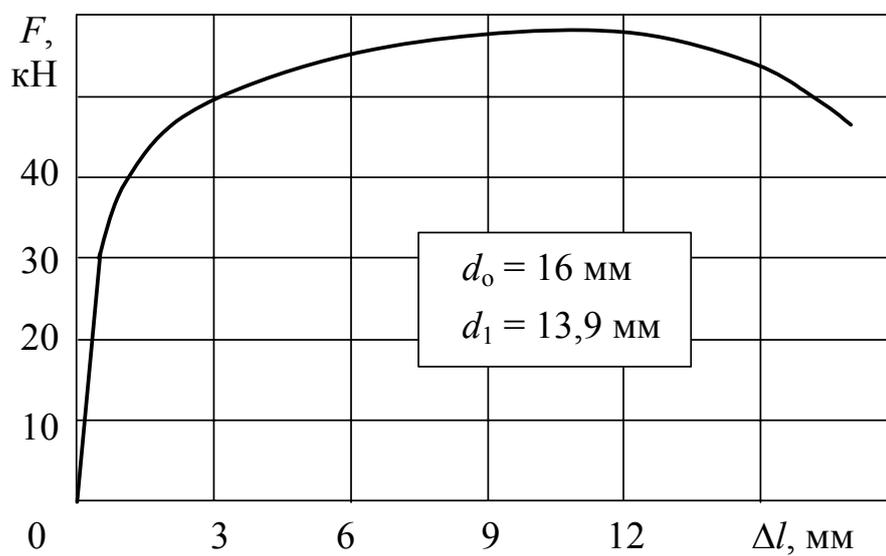


Рис. 38.

Титановый сплав ВТ3-1
(закалка, старение)

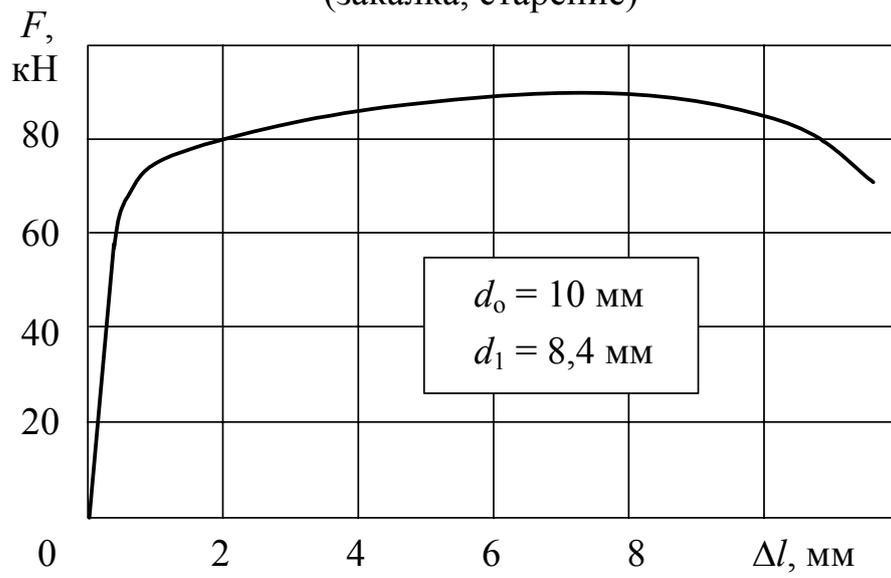


Рис. 39.

Титановый сплав ВТ6
(закалка, старение)

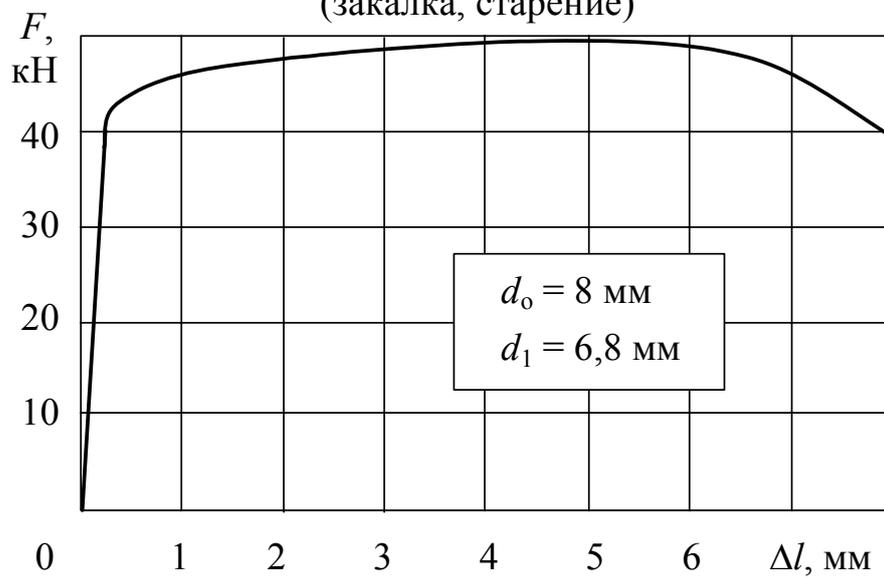


Рис. 40.

Титановый сплав ВТ14
(закалка, старение)

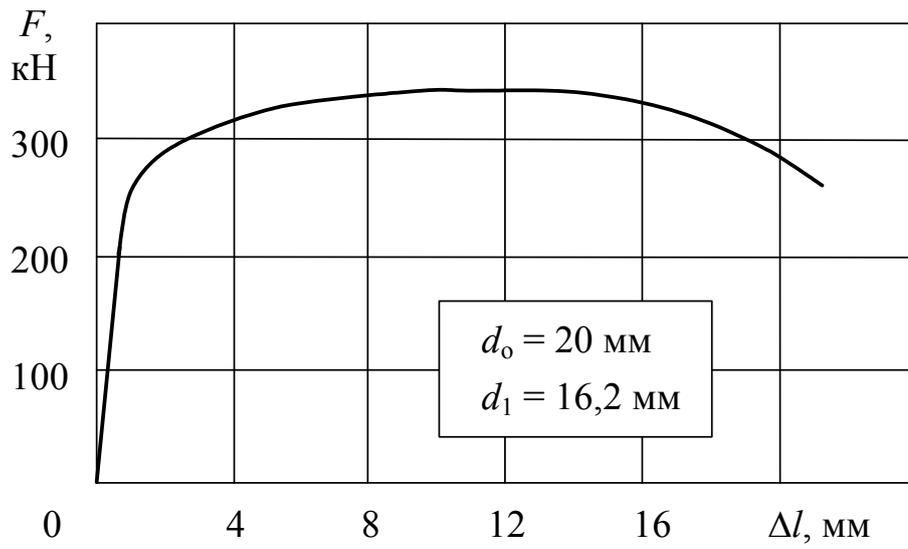


Рис. 41.

Титановый сплав ВТ14
(изотермический отжиг)

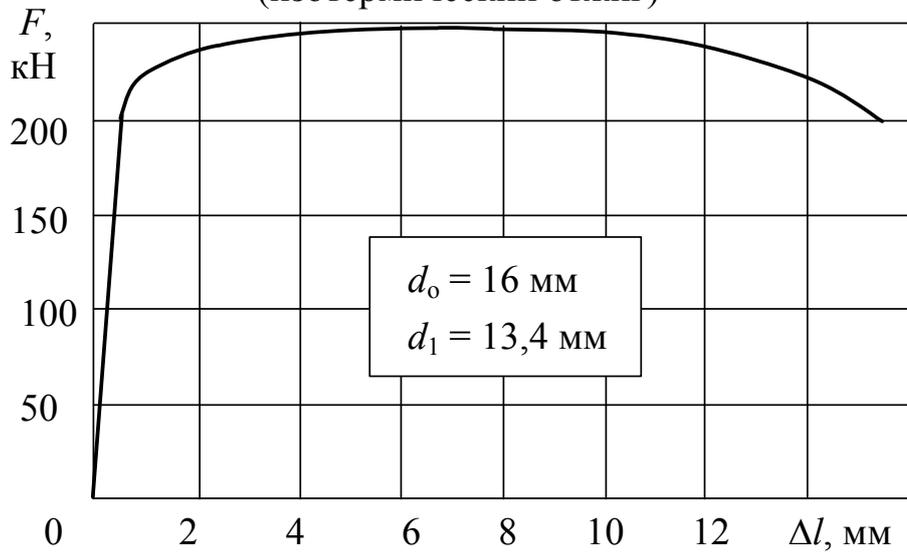


Рис. 42.

Ручная обработка диаграммы растяжения

Перед обработкой диаграммы растяжения необходимо произвести измерение конечной длины образца после разрушения l_K и наименьшего диаметра в области шейки d_1 . Вычислить абсолютное удлинение после разрушения $\Delta l_{\text{ост}} = l_K - l_0$ и площадь поперечного сечения в шейке $A_1 = \pi d_1^2 / 4$.

Обработка диаграммы осуществляется с помощью линейки или иных средств измерения, предназначенных для определения линейных размеров.

Процесс обработки диаграммы растяжения без явно выраженной площадки текучести представлен на рис. 1.

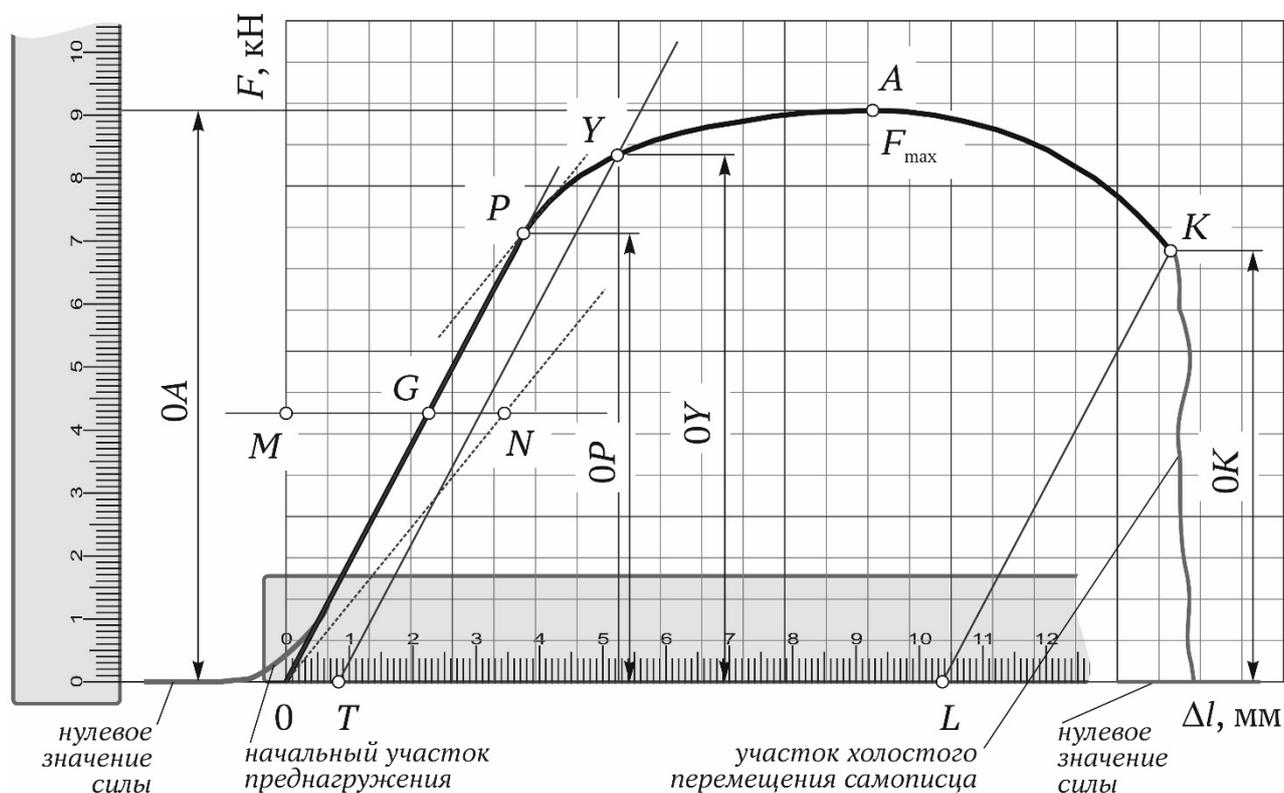


Рис. 1. Обработка диаграммы растяжения

Для определения механических характеристик материала необходимо выполнить следующие действия.

1. Отметить на диаграмме шкалу абсцисс, соответствующую абсолютному удлинению образца. Для этого необходимо провести карандашом или ручкой прямую через точки, соединяющие горизонтальные метки самописца в начале и конце диаграммы.

2. Приложив линейку к прямолинейному начальному участку диаграммы провести линию до пересечения с осью абсцисс. Это позволит исключить из обработки начальный нелинейный участок диаграммы, соответствующий преднагрузению образца, выборке зазоров испытательной машины и т. д. (см. ч. II, п. 3.3). Отметить точку K , соответствующую разрушению образца и исключить из обработки конечный участок диаграммы, соответствующий холостому перемещению самописца по диаграммной бумаге.

3. Отметить на диаграмме ось ординат, проведя линию перпендикулярно оси абсцисс из точки ее пересечения с линией, соответствующей упругому нагружению образца.

4. Определить масштаб диаграммы по оси абсцисс, соответствующей абсолютному удлинению образца. Для этого построить отрезок LK , параллельный начальному упругому участку нагружения образца. Вычислить масштабный коэффициент:

$$k_l = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{OL} = \frac{l_K - l_0}{OL}.$$

Определить масштаб диаграммы по оси ординат, соответствующей силе нагружения образца. Для этого измерить высоту OA , соответствующую максимальной силе на образце. Вычислить масштабный коэффициент:

$$k_F = \frac{F_{\text{max}}}{OA}.$$

5. Определение силы, соответствующей пределу пропорциональности. Для этого на произвольном уровне проводят прямую, параллельную оси абсцисс, и на ней откладывают отрезок GN , равный половине отрезка MG . Через точку N и начало координат проводят прямую ON и параллельно ей проводят касательную CD к диаграмме растяжения. Точка касания P определяет искомую силу $F_{\text{пц}}$. Измеряют высоту OP и вычисляют силу:

$$F_{\text{пц}} = k_F \cdot OP.$$

6. Определение силы, соответствующей пределу текучести. Физический предел текучести определяется по точкам на диаграмме, в которых угол наклона кривой уменьшается до нуля или становится отрицательным. Тогда для определения данной силы измеряют отрезок от оси абсцисс до данного участка и умножая это значение на масштабный коэффициент k_F определяют значение силы, соответствующее физическому пределу текучести.

Для определения условного предела текучести на оси абсцисс откладывают отрезок OT , соответствующий остаточному удлинению образца 0,2 %. Величину отрезка вычисляют по формуле

$$OT = \frac{1}{k_f} \cdot l_0 \frac{\varepsilon_{0,2}}{100\%} = \frac{1}{k_f} \cdot l_0 \frac{0,2\%}{100\%}.$$

Из точки T проводят прямую до пересечения с диаграммой в точке Y , параллельную начальному упругому участку. Измеряют высоту OY и вычисляют значение силы, соответствующей условному пределу текучести:

$$F_{0,2} = k_F \cdot OY.$$

7. Определение силы в момент разрушения образца. Измеряют высоту OK и вычисляют значение силы:

$$F_K = k_F \cdot OK.$$

Определение допускаемых напряжений

Для определения важнейших механических характеристик конструкционных материалов чаще всего используются испытания на растяжение, результатом которых служит диаграмма растяжения. Ниже дается пример вычисления основных механических характеристик и допускаемого напряжения для стали 40ХФА (закалка в масле при 880 °С и отпуск при 650 °С).

Для проведения опыта был изготовлен нормальный цилиндрический образец диаметром в расчетной части $d_0 = 15$ мм и расчетной длиной $l_0 = 10d_0 = 150$ мм. После изготовления он был подвергнут упрочняющей термической обработке. Испытания проводились на машине УММ-20. Диаграмма растяжения представлена на рис. 1.

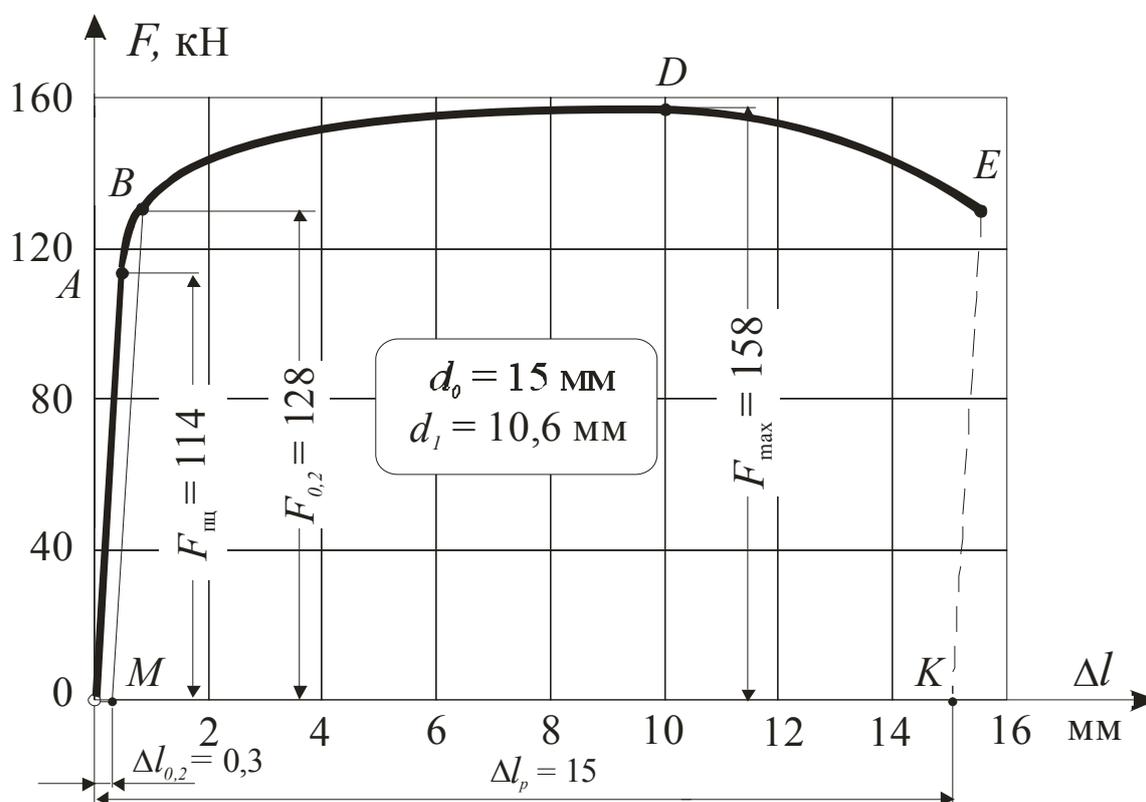


Рис. 1. Диаграмма растяжения стали 40ХФА

Основные механические характеристики

Геометрические параметры образца:

– до опыта: $d_0 = 15$ мм; $A_0 = \pi(d_0)^2/4 = 1,77$ см²;

– после опыта: $d_1 = 10,6$ мм; $A_1 = \pi(d_1)^2/4 = 0,88$ см².

Для определения характеристик прочности необходимо отметить на кривой характерные точки:

A – конец прямолинейного участка;

B – служит для определения условного предела текучести;

D – точка экстремума, которой соответствует максимальное значение растягивающей силы.

Так как на диаграмме отсутствует площадка текучести, то для данного материала определяется условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (напряжение, которому соответствует остаточная деформация 0,2 %). Соответствующая нагрузка находится следующим образом. Из точки *O* откладываем отрезок *OM*, равный заданной остаточной деформации 0,2 %, т. е. $\Delta l_{0,2} = 0,002l_0 = 0,002 \cdot 150 = 0,3$ мм. Затем из точки *M* проводим прямую, параллельную начальному прямолинейному участку *OA* до пересечения с кривой в точке *B*, ордината которой и является искомой нагрузкой $F_{0,2}$.

Переходим к нахождению характеристик пластичности. Из точки *E*, соответствующей разрушению образца, проводим пунктирную прямую *EK*, параллельную начальному прямолинейному участку *OA*. Отрезок *OK* дает абсолютное остаточное удлинение при разрыве $\Delta l_p = 15$ мм. Последующие вычисления представлены в табл. 1.

Таблица 1

1. Характеристики прочности, МПа	
Предел пропорциональности $\sigma_{пц} = F_{пц} / A_0$	644
Предел текучести (условный) $\sigma_{0,2} = F_{0,2} / A_0$	723
Предел прочности $\sigma_{пч} = F_{max} / A_0$	893
2. Характеристики пластичности, %	
Относительное остаточное удлинение $\delta = (\Delta l_p / l_0) \cdot 100$ %	10
Относительное остаточное сужение $\psi = ((A_0 - A_1) / A_0) \cdot 100$ %	50

Определение допускаемого напряжения

Оно определяется как отношение предельного для данного материала напряжения $\sigma_{\text{пред}}$ на нормативный коэффициент запаса прочности $[n]$:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n},$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ принимается равным: σ_T ($\sigma_{0,2}$) – для пластичных материалов; $\sigma_{\text{пч}}$ – для хрупких материалов. Мерой пластичности служит относительное остаточное удлинение при разрыве δ : при $\delta > 5\%$ материал считается пластичным, а при $\delta < 5\%$ – хрупким.

В «Справочнике машиностроителя» коэффициент запаса рекомендуется вычислять как произведение трех частных коэффициентов:

$$[n] = [n_1] \cdot [n_2] \cdot [n_3],$$

где $[n_1]$ – коэффициент, учитывающий неточность в определении нагрузок и напряжений; $[n_2]$ – коэффициент, учитывающий неоднородность материала; $[n_3]$ – коэффициент условий работы, учитывающий ответственность детали. Такое разделение общего коэффициента запаса прочности позволяет более точно учесть многообразие свойств материалов и конкретных условий работы конструкций и проектировать их более экономичными без снижения надежности.

Коэффициент $[n_2]$ в расчетах по пределу текучести можно принимать в зависимости от отношения предела текучести σ_T к пределу прочности $\sigma_{\text{пч}}$ согласно нижеприведенной табл. 2.

Таблица 2

$\sigma_T/\sigma_{\text{пч}}$	0,45... 0,55	0,55... 0,70	0,70... 0,90
$[n_2]$	1,2... 1,5	1,4... 1,8	1,7... 2,2

Переходим к определению допускаемого напряжения для данного материала. Вычисляем отношение $\sigma_T/\sigma_{\text{пч}} = 723/893 = 0,81$, исходя из которого по табл. 2, пользуясь линейной интерполяцией, находим $[n_2] = 1,98$. Полагая $[n_1] = [n_3] = 1$, получим $[n] = 1,98$. Следовательно, допускаемое напряжение будет равно

$$[\sigma] = \sigma_T/[n] = 723/1,98 = 365 \text{ МПа.}$$

В инженерных расчетах $[\sigma]$ берется обычно кратным 10. Поэтому для последующих расчетов принимаем $[\sigma] = 370 \text{ МПа}$.

Контрольно-оценочные средства

Контрольные вопросы

1 цикл

1. Сформулируйте основные цели лабораторного практикума по сопротивлению материалов.
2. Какие виды механических испытаний используются для определения важнейших механических характеристик материалов?
3. Какой формы образцы применяются при испытаниях на растяжение?
4. По какому признаку образцы, предназначенные для испытания на растяжение, делятся на короткие и длинные?
5. Для цилиндрического короткого образца диаметром 5 мм, предназначенного для испытания на растяжение, определите расчетную длину.
6. Для длинного образца с поперечным сечением в виде прямоугольника 20×5 мм требуется определить расчетную длину при испытании на растяжение.
7. Нарисуйте диаграмму растяжения образца из малоуглеродистой стали (Ст3) и поясните по ней основные стадии деформации.
8. Что называют диаграммой растяжения образца? Чем она отличается от условной диаграммы напряжений?
9. Какие явления наблюдают при нагружении образца силой, вызывающей напряжения: а) выше предела упругости; б) равные пределу текучести?
10. Как распределяются деформации по длине образца до и после появления шейки? Когда появляется шейка?
11. Объясните, почему после образования шейки дальнейшее растяжение происходит при все уменьшающейся нагрузке? Перечислите все механические характеристики, определяемые в результате испытаний материала на растяжение. Разделите их на характеристики прочности и пластичности. Дайте определение всем механическим характеристикам.
12. Что такое физический и что такое условный предел текучести? Для каких материалов определяется условный предел текучести?
13. Какие из приведенных ниже величин являются характеристиками прочности образца?
Ответ а) $F_{\text{пц}}, F_{\text{т}}, F_{\text{max}}$; б) $\sigma_{\text{пц}}, \sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{пч}}$.
14. Как определяется остаточная деформация после разрушения образца?
15. Выделите на диаграмме растяжения образца упругую часть его полного удлинения для момента действия максимальной силы.
16. Какова физическая суть явления наклепа? Можно ли восстановить первоначальные свойства у материала, подвергавшегося наклепу?
17. До какого предела можно довести предел пропорциональности материала с помощью явления наклепа?

18. Пользуясь диаграммой растяжения малоуглеродистой стали (Ст3), определите предел пропорциональности материала, если остаточная деформация после разгрузки составила 10 %.

19. Как определяется работа, затраченная на разрушение образца? О каком свойстве материала можно судить по удельной работе, затраченной на разрушение образца?

20. Чем отличается хрупкий материал от пластичного? По каким признакам заключают, что стекло хрупкий материал?

21. Перечислите положительные свойства пластичных сталей, обусловившие широкое применение их в инженерных конструкциях? Почему нежелательно применять хрупкие материалы для изготовления деталей, работающих на динамические нагрузки?

22. Каковы особенности испытаний на сжатие?

23. Какие характеристики материала можно получить при испытании на сжатие малоуглеродистой стали, чугуна, бетона, дерева?

24. Образцы какой формы применяются при испытании на сжатие мягкой стали, чугуна, бетона, дерева?

25. Почему при испытаниях на сжатие применяются короткие образцы?

26. Объясните, почему образец из малоуглеродистой стали при сжатии приобретает бочкообразную форму?

27. Каков вид разрушенного деревянного образца при сжатии вдоль и поперек волокон?

28. Какие материалы называют анизотропными и какие изотропными?

29. По каким признакам при сжатии можно отличить пластичный материал от хрупкого?

30. В какой мере справедлив закон Гука для хрупких материалов?

31. Каков физический смысл модуля продольной упругости? Какова его размерность?

32. Что называют коэффициентом Пуассона? Может ли он быть отрицательным? Укажите пределы изменения коэффициента Пуассона для материалов?

33. Характеристиками каких свойств материала являются модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона?

34. Какая линейная деформация при растяжении больше: продольная или поперечная?

35. Объясните схему работы тензометра Аистова? Чему равен коэффициент увеличения прибора и за счет чего он достигается? Чему равна цена одного деления прибора?

36. Расскажите об организации опыта по определению модуля продольной упругости. Почему испытания проводят не с нуля, а с некоторой начальной нагрузки? Обоснуйте принятое Вами значение начальной нагрузки. Из каких соображений устанавливается величина максимальной нагрузки? Почему для определения деформаций устанавливаются два тензометра?

37. Через какие интервалы следует увеличивать нагрузку, чтобы убедиться в справедливости закона Гука? Сколько для этого необходимо ступеней нагрузки и как выбирается величина одной ступени?

38. Расскажите, как опытным путем определялся коэффициент Пуассона для стали?

39. Что такое допускаемое напряжение и как оно определяется для пластичных и хрупких материалов?

40. Что такое коэффициент запаса прочности? Перечислите основные факторы, которые учитываются при назначении коэффициента запаса прочности?

41. Определите допускаемые напряжения для материалов, представленных в нижеприведенной таблице.

42. Какой вид нагружения называется растяжением? Что называется продольной силой? Сформулируйте правило знаков для продольной силы.

43. На каких гипотезах построена теория растяжения (сжатия) прямых брусьев?

44. По какой формуле определяется абсолютное удлинение прямого бруса при постоянной по длине продольной силе и неизменной жесткости поперечного сечения?

45. Какую величину называют жесткостью поперечного сечения бруса при растяжении и сжатии? Какова размерность этой величины?

46. Какие факторы влияют на величину абсолютного удлинения бруса при растяжении и сжатии?

47. Как изменится абсолютное удлинение бруса при растяжении, если диаметр образца будет увеличен вдвое?

48. Во сколько раз изменится абсолютное удлинение, если одновременно уменьшить вдвое диаметр и длину бруса?

49. Что называется жесткостью бруса при растяжении и сжатии? Сравните жесткости медного и стального брусьев, имеющих одинаковые геометрические размеры, учитывая, что $E_{ст} = 2E_{м}$.

Материал	Механические характеристики					Требуемый коэффициент запаса на:		
	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{тс}$	$\sigma_{пчр}$	$\sigma_{пчс}$	δ	растяжение	сжатие	
	МПа							%
1.	Ст2	220	220	340	340	22	1,6	1,6
2.	Ст3	240	240	380	380	23	1,5	1,5
3.	Ст4	250	250	420	420	21	1,5	1,5
4.	Ст5	280	280	500	500	17	1,5	1,5
5.	НЛ-1	300	300	420	420	20	1,5	1,5
6.	НЛ-2	340	340	480	480	18	1,5	1,5
7.	Чугун СЧ28	140	310	150	640	0,6	6,0	8,0
8.	Титан технический	520	520	600	-	23	1,6	1,6
Алюминиевые сплавы								
9.	магналий АМг6	280	280	390	390	13	2,0	2,0
10.	авиаль АВТ1	250	250	300	300	13	1,8	1,8
11.	дюралюминий Д16Т	220	220	380	380	13	2,0	2,0

2 цикл

1. Какой вид нагружения называется кручением?
2. Что называется крутящим моментом? Сформулируйте правило знаков для крутящих моментов?
3. На каких гипотезах построена теория кручения круглых валов?
4. Какая существует зависимость между углом сдвига γ и углом закручивания φ для круглого бруса постоянного сечения, скручиваемого парами сил, приложенными по концам?
5. По какой формуле определяют угол закручивания круглого бруса при постоянном по длине крутящем моменте и неизменной жесткости поперечного сечения?
6. Какую величину называют жесткостью поперечного сечения бруса при кручении? Какова размерность этой величины?
7. Какие факторы влияют на величину угла закручивания?
8. Как изменится угол закручивания, если диаметр образца будет увеличен вдвое?
9. Во сколько раз изменится угол закручивания, если одновременно уменьшить вдвое диаметр и длину бруса?
10. Что называется жесткостью бруса при кручении? Сравните жесткости медного и стального брусьев, имеющих одинаковые геометрические размеры, учитывая, что $G_{ст} = 2G_{м}$.
11. Сформулируйте закон Гука при сдвиге.
12. Характеристикой каких свойств материала является модуль сдвига? Какая существует связь между упругими константами G , E и ν ?
13. По какому закону распределяются касательные напряжения в поперечных сечениях при кручении круглого бруса в области упругих деформаций?
14. В каких точках поперечного сечения возникают наибольшие касательные напряжения при кручении и как они определяются?
15. Нарисуйте эпюры распределения по сечению касательных напряжений при закручивании круглого бруса в области упругих деформаций.
16. По каким формулам определяются полярные моменты инерции и полярные моменты сопротивления круга и кольца?
17. Расскажите, как определяется модуль сдвига G ?
18. Расскажите об организации опыта по определению модуля сдвига G . Из каких соображений устанавливается величина максимального момента, который может быть приложен к образцу заданных размеров? Почему испытания проводятся не с нуля, а с некоторой начальной нагрузки? Как определяется величина начальной нагрузки? Сколько ступеней нагрузки обычно используется на практике для экспериментальной проверки закона Гука при сдвиге. Чему равна величина одной ступени нагрузки?
19. Объясните принцип работы экстензометров для определения угловых перемещений? Чему равна цена одного деления прибора?
20. Какое напряженное состояние возникает при кручении брусьев круг-

лого поперечного сечения? По каким площадкам действуют максимальные касательные напряжения и по каким – нормальные?

21. Расскажите о характере разрушения различных материалов при кручении?

22. Объясните, почему поверхность излома образца из хрупкого материала наклонена к оси под углом примерно 45° ? Объясните, почему разрушение деревянного образца при кручении происходит по продольным площадкам, а стального образца – по площадкам, совпадающим с поперечным сечением? Какие напряжения ответственны за разрушение в том и другом случае?

23. Для данного материала известны механические характеристики при испытаниях на растяжение и сжатие: $\sigma_{тр} = 140$ МПа, $\sigma_{тс} = 310$ МПа, $\sigma_{пчр} = 150$ МПа, $\sigma_{пчс} = 640$ МПа, $\delta = 0,6$ %. Предскажите характер разрушения образца из данного материала при кручении.

24. Для данного материала известны механические характеристики при испытаниях на растяжение и сжатие: $\sigma_{тр} = \sigma_{тс} = 340$ МПа, $\sigma_{пчр} = 540$ МПа, $\delta = 13\%$. Предскажите характер разрушения образца из данного материала при кручении.

25. Для данного материала известны механические характеристики при испытаниях на растяжение и сжатие: $\sigma_{тр} = 75$ МПа; $\sigma_{тс} = 115$ МПа; $\sigma_{пчр} = 130$ МПа; $\sigma_{пчс} = 170$ МПа; $\delta = 1,5$ %. Предскажите характер разрушения образца из данного материала при кручении.

26. Какой вид нагружения называется изгибом?

27. Перечислите гипотезы, положенные в основу технической теории изгиба.

28. Какой вид изгиба называется чистым и какой – поперечным?

29. Что такое изгибающий момент и поперечная сила?

30. Какая существует зависимость между изгибающим моментом и кривизной упругой линии балки?

31. Какую величину называют жесткостью поперечного сечения бруса при изгибе? Какова размерность этой величины?

32. Как распределяются нормальные напряжения в поперечных сечениях балки?

33. В каких продольных волокнах возникают наибольшие нормальные напряжения при изгибе?

34. Нарисуйте эпюру распределения нормальных напряжений по высоте двутавровой балки при изгибе?

35. Как распределяются нормальные напряжения по ширине балки?

36. По каким формулам определяются осевые моменты инерции и осевые моменты сопротивления балок круглого, кольцевого и прямоугольного сечений?

37. Как проходит нейтральная ось при изгибе балки в области упругих деформаций?

38. На каких допущениях основана элементарная теория касательных напряжений при изгибе?

39. Как распределяются касательные напряжения по высоте балки прямоугольного сечения при изгибе?

40. В каких точках возникают наибольшие касательные напряжения и чему они равны для балок прямоугольного и круглого поперечных сечений?

41. Какое напряженное состояние возникает в балке при поперечном изгибе?

42. Какое напряженное состояние возникает в точках нейтрального слоя при поперечном изгибе? Как расположены главные площадки и чему равны главные напряжения?

43. Какое напряженное состояние возникает в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси? Как расположены главные площадки и чему равны главные напряжения?

44. По каким формулам определяются величины и направления главных напряжений при прямом поперечном изгибе?

45. Почему главные напряжения при прямом поперечном изгибе обозначаются σ_1 и σ_3 , а не σ_1 и σ_2 ?

46. Расскажите, как опытным путем определялись деформации продольных волокон балки?

47. Что представляют собой проволочные датчики сопротивления? Какие материалы используются для изготовления датчиков и почему?

48. Объясните, как определяются деформации с помощью проволочных датчиков сопротивления?

49. Расскажите, как опытным путем определялись нормальные напряжения в балке? Объясните причины расхождений между опытными и теоретически подсчитанными напряжениями.

50. Расскажите об организации опыта по определению нормальных напряжений при изгибе. Почему испытания производятся не с нуля, а с некоторой начальной нагрузки? Обоснуйте принятое Вами значение начальной нагрузки. Из каких соображений устанавливается величина максимальной нагрузки? Почему в равноудаленных от нейтральной оси точках ставятся по два тензометра?

51. Что такое прогиб, смещение, угол поворота?

52. Какие теоретические методы определения перемещений балок Вы знаете?

53. В чем физический смысл теоремы о взаимности перемещений? Какие преимущества дает эта теорема при исследовании перемещений упругих систем?

54. Сформулируйте теорему Кастильяно и покажите на примере ее применение.

55. В чем преимущество интеграла Мора по сравнению с теоремой Кастильяно?

56. Какие графоаналитические приемы вычисления интеграла Мора Вы знаете? В чем их преимущество по сравнению с аналитическим вычислением интеграла Мора?

57. Как определялись прогибы сечений балки? Чему равна цена одного деления измерительного прибора? Объясните причины расхождений между опытными и теоретическими значениями перемещений.

3 цикл

58. Какие системы называются статически неопределимыми? Что называется степенью статической неопределимости?

59. Что понимают под основной системой, эквивалентной системой?

60. Из каких уравнений определяются дополнительные неизвестные в статически неопределимых системах при расчете по методу сил? Что они физически выражают?

61. Расскажите, как опытным путем определялась реакция дополнительной опоры для статически неопределимой балки.

62. Какой вид нагружения называется косым изгибом? В каком случае косо́й изгиб является плоским и в каком – пространственным?

63. Как взаимно ориентированы силовая и нейтральная линии при косом изгибе?

64. Как определяются опасные точки при косом изгибе?

65. Расскажите, как опытным путем определялись перемещения при косом изгибе консольной балки.

66. Как взаимно ориентированы полюс (точка приложения силы) и нейтральная линия при внецентренном продольном нагружении?

67. Как определяются опасные точки при внецентренном продольном нагружении?

68. Расскажите, как опытным путем определялись нормальные напряжения при внецентренном растяжении стержня.

69. При каком значении сжимающей силы стержень теряет устойчивость в упругой стадии работы материала?

70. Что такое гибкость? Как классифицируются стержни по их гибкости?

71. При каких напряжениях теряет устойчивость стержень средней гибкости?

72. При каких напряжениях теряет устойчивость стержень большой гибкости?

73. Расскажите, как опытным путем определялась критическая сила для шарнирно опертого стержня.

Краткая историческая справка

Основой для создания штангенциркуля послужило изобретение и описание в 1631 г. нониуса (или верньера) измерительного квадранта бургундским математиком и изобретателем Пьером Вернье. Португальский математик **Педру Нуниш** в 1542 г. создал приспособление для навигации и астрономии, позволяющее повысить точность измерения углов. Приспособление Нуниша, хотя и использует аналогичный принцип деления подобластей и поиска совпадающих меток, имеет весьма отдаленное визуальное сходство со шкалой Вернье. Поэтому во многих странах нониус называют шкалой Вернье, а штангенциркуль – линейкой Вернье.

Роберт Гук в 1678 г. опубликовал работу «О восстановительной способности или об упругости». В ней содержатся результаты проведенных им опытов с упругими телами. Это был первый печатный труд, в котором рассматривались упругие свойства материалов. Гук не только установил соотношение между величиной сил и производимыми ими деформациями, но и указал ряд экспериментов, где этим соотношением можно воспользоваться для решения некоторых весьма важных вопросов. Это линейное соотношение между силой и деформацией, известное как закон Гука, ставший в последствии основой механики упругих тел, сформулировав его в виде анаграммы, означающей «какова сила, таково и действие».



Педру Нуниш



Прибор Нониус



Роберт Гук

Якопо Риккати в 1721 г. впервые попытался графически изобразить зависимость между растягивающей силой и удлинением образца.

Томас Юнг в 1807 г. дал определение модулю упругости, однако сформулировано оно было в весьма туманной форме: «модуль упругости какого-либо вещества представляет собой столбик этого вещества, способный произвести давление на свое основание, которое так же относится к весу, создающему некоторую степень сжатия, как длина столбика к уменьшению длины». Поэтому признание данного открытия пришло позже, когда Огюстен Коши сформулировал понятие напряжений и деформаций.

Жан-Виктор Понселе в 1828–1829 гг. предложил диаграмму растяжения в качестве важнейшей характеристики материала.

Огюстен Коши определил в 1822 г. понятие напряжений и деформаций, разработал теории напряжений и деформаций, сформулировал зависимости между напряжениями и деформациями.

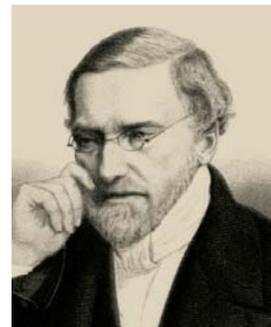
Пер Лагерхьелм в 1826 г. установил, что модуль упругости железа является стабильной величиной при статическом и динамическом нагружении, а также не зависит от техпроцесса изготовления металла и термообработки, в то время как последние влияют на пределы пропорциональности и прочности. Также им было установлено, что плотность материала перед разрушением уменьшается.



Якопо Риккати



Томас Юнг



Жан-Виктор Понселе



Огюстен Коши



Пер Лагерхьелм

Иоганн Баушингер в 1886 г. опубликовал обнаруженный им эффект при исследованиях каменной соли, являющийся проявлением неупругости материала в зоне перехода к упругопластическим деформациям.

Дэвид Киркальди в 1858–1861 гг. провел ряд экспериментов, в которых установил, что качество материала определяется не только пределом прочности, но также и характеристиками пластичности – остаточной деформацией и относительным остаточным сужением в момент разрыва.

Шарль Кулон, проведя множество экспериментов по кручению человеческого волоса, шелка и металлических проволок, в 1784 г. установил коэффициент пропорциональности, ныне известный как модуль упругости при сдвиге. Кулон установил различие между упругостью и пластичностью и открыл существование предела упругости, а также зависимости его значения от истории термической обработки образца.

Эрнст Флоренс Фридрих Хладни в 1787 г. продемонстрировал песчаные фигуры, полученные при поперечных колебаниях пластин. Хладни повторил эксперимент английского ученого Роберта Гука, который в 1680 г. в Оксфордском университете провел исследование, в процессе которого он заметил изменения формы предмета при воздействии на нее колебаний. Данный эффект используется при определении частот собственных колебаний деталей. По скорости распространения звука в металле определил модуль упругости ряда металлов.



Иоганн Баушингер



Дэвид Киркальди

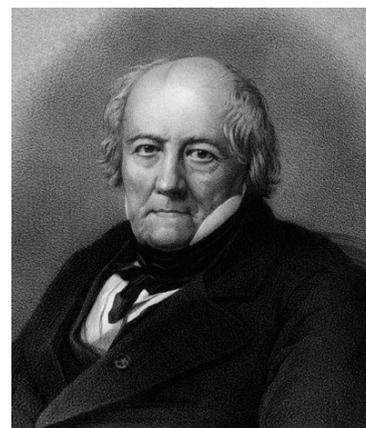


Шарль Кулон



Эрнст Хладни

Жан Батист Био (1816 г.) вычислил модуль упругости многих изотропных материалов, используя данные экспериментов Эрнстом Хланди. В 1809 г. впервые непосредственно измерил скорость распространения звука в твердом теле.



Жан Батист Био

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Общие методические указания по выполнению работ	4
Техника безопасности при работе в лабораториях кафедры сопротивления материалов.....	5
ЧАСТЬ I. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	6
1. Определение основных механических характеристик конструкционных материалов	6
Работа 1. Испытание материалов на растяжение.....	6
Работа 2. Определение модуля упругости.....	16
Работа 3. Определение коэффициента Пуассона.....	22
Работа 4. Испытание материалов на сжатие.....	28
Работа 5. Испытание материалов на срез	36
Работа 6. Испытание материалов на кручение.....	42
2. Проверка выводов и формул сопротивления материалов.....	49
Работа 7. Определение модуля упругости при сдвиге	49
Работа 8. Исследование напряжений при плоском изгибе	55
Работа 9. Проверка теоремы о взаимности работ и перемещений	63
Работа 10. Косой изгиб	69
Работа 11. Внецентренное растяжение	76
Работа 12. Определение критической силы	81
Работа 13. Определение «лишней неизвестной» для статически неопределимой балки.....	88
Работа 14. Статически неопределимые рамы	95
Работа 15ф. Изучение резонансных явлений при упругих колебаниях	102
Работа 16ф. Испытание материалов при переменных напряжениях.....	109
Работа 17ф. Исследование усталостной прочности материалов при малоцикловом нагружении	116
Работа 18ф. Экспериментальное определение напряжений и перемещений при ударном нагружении	126
Работа 19ф. Испытание материалов при ударной нагрузке	136

Работа 20и. Автоматизированные испытания на растяжения.....	141
ЧАСТЬ II. ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ	
ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	157
1. Измерительные приборы.....	157
1.1. Штангенциркули	158
1.2. Индикаторные головки	160
1.3. Рычажный тензомер Гутгенбергера	161
1.4. Рычажно-винтовой тензомер Н. Н. Аистова	162
1.5. Электрические тензометры	162
1.6. Механический рычажный экстензометр Instron	189
1.7. Видеоэкстензометр Instron AVE.....	190
1.8. Катетометр	194
2. Испытательные машины	197
2.1. Разрывные машины Р-0,5, Р-5.....	197
2.2. Универсальная гидравлическая машина Р-20.....	203
2.3. Машина для испытания на кручение КМ-50.....	205
2.4. Электромеханическая разрывная машина Instron 3382.....	207
2.5. Сервогидравлическая машина Instron 8801	211
2.6. Вибростенд ВЭДС-400.....	212
3. Настольные лабораторные установки.....	214
3.1. Установка для определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона	214
3.2. Установка для определения модуля сдвига.....	215
3.3. Установка для испытаний на плоский прямой изгиб	216
3.4. Установка для испытаний на косоу изгиб	216
3.5. Установка для определения перемещений в статически неопределимых рамах	217
3.6. Установка для испытаний на продольный изгиб.....	218
3.7. Установка для испытаний на выносливость	219
Список литературы.....	221
Приложение 1. Механические характеристики материалов	222
Приложение 2. Контрольно-оценочные средства	254
Приложение 3. Краткая историческая справка.....	261

Учебное издание

Составители:
ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич
ГАФАРОВ Радик Хайдарович
ЕРМОЛЕНКО Анатолий Николаевич

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Редактор *Ф. Х. Гарипова*
Компьютерная верстка *Ф. Х. Гарипова*
Оформление обложки *А. Н. Ермоленко*

Подписано в печать 00.12.2019. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура PT Serif.
Усл. печ. л. 16,7. Уч.-изд. л. 16,6.
Тираж 106 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.