

И. М. ГРЯЗНОВ, В. С. ЛЕНСКИЙ, П. М. ОГИБАЛОВ, И. А. СКОРЫЙ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ
ПРАКТИКУМ
ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ
МАТЕРИАЛОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЮ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1961

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО
СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЮ

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия для университетов и вузов*

Под общей редакцией
И. М. ОГИБАЛОВА и И. А. СКОРОГО

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1961

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Московского университета

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава I. Макро- и микроструктурный методы исследования металлов	7
§ 1. Напряжения и деформации как статистически осредненные величины	8
§ 2. Структура металла и его механические свойства	11
§ 3. Анализ макро- и микроструктуры	12
Глава II. Статические испытания	19
§ 1. Основные виды статических испытаний материалов	19
Испытание на растяжение	19
Испытание на сжатие	43
Испытание на кручение	46
Испытание на изгиб	59
Измерение твердости	72
§ 2. Влияние температуры и времени на свойства материалов	85
Влияние температуры	85
Испытание на ползучесть	94
Релаксация напряжений	99
§ 3. Влияние надреза на характеристики механических свойств материалов	106
§ 4. Исследование простейших конструкций	109
Испытания сварной фермы	110
Испытания крыла самолета	119
§ 5. Устойчивость стержня	126
Глава III. Динамические испытания	132
§ 1. Распространение упругих волн и динамические характеристики материалов	132
§ 2. Поперечные колебания бруса	142
§ 3. Усталость материалов	159
§ 4. Испытания на ударную вязкость	165
Глава IV. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений	172
§ 1. Физико-механические основы метода	173
§ 2. Исследование напряжений в модели	181

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга имеет целью служить руководством для студентов высших учебных заведений при выполнении ими лабораторных работ в связи с изучением курсов, относящихся к механике твердых деформируемых тел. Она может быть полезным руководством и для преподавателей, ведущих занятия по механическому практикуму.

В книге изложен опыт лабораторного практикума, проводимого в течение ряда лет на механико-математическом факультете Московского государственного университета.

Лабораторный практикум по сопротивлению материалов деформированию дает студентам представление о современных методах изучения механических свойств материалов и о поведении их при различных термомеханических воздействиях; знакомит студентов с современными видами лабораторных испытаний элементов конструкций и сооружений и с методами их исследования на моделях. Он также знакомит студентов с различными испытательными машинами и измерительными устройствами.

Авторы благодарят коллективы кафедр теории упругости и теории пластичности Московского государственного университета за содействие в составлении этой работы.

Они также благодарят профессоров Н. И. Безухова, С. Н. Ниоифорова, В. М. Панферова и С. М. Попова за внимательное ознакомление с рукописью и критические замечания по ней.

Особую признательность авторы выражают Н. А. Кийко за выполненную им работу по редактированию книги, а также выносят благодарность И. М. Тюнцеевой за подготовку рукописи и С. А. Орловой за оформление материалов.

Авторы с благодарностью встретят критические замечания читателя, ведущие к улучшению книги.

ГЛАВА I

МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В сопротивлении материалов изучаются напряжения, перемещения, деформации и скорости деформаций, возникающие в телах (элементах конструкций, машины и сооружений, заготовках, массивах, образцах и т. п.) под действием внешних нагрузок в определенных физических условиях. В основе расчетов, проводимых методами сопротивления материалов, лежат физические законы, связывающие напряжения, деформации, температуру и время. Эти законы устанавливаются из опытов, проводимых над образцами конечных размеров. Установленные закономерности затем относятся к бесконечно малым объемам материала. Рассматривая их состояние, обусловленное внешним воздействием, на основании законов механики составляются дифференциальные уравнения равновесия и движения. Интегрирование этих уравнений при соблюдении определенных граничных и начальных условий дает возможность расчетным путем выяснить распределение и изменение напряжений и деформаций во всем теле заданной формы и размеров при заданных внешних воздействиях, определить устойчивость равновесной конфигурации или решить задачу об определении тех внешних усилий, которые необходимы для того, чтобы сообщить телу заданные деформации.

Таким образом, сопротивление материалов, как и теория упругости, гидродинамика и аэромеханика рассматривают реальные твердые, жидкие и газообразные тела как сплошную деформируемую среду (континуум). Приступая к экспериментальному исследованию механических свойств твердых тел и опытной проверке некоторых формул сопротивления материалов, полезно уяснить, насколько правильно модель сплошной среды отражает поведение реальных твердых тел при их деформировании.

§ 1. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ КАК СТАТИСТИЧЕСКИ ОСРЕДНЕННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Металлы имеют кристаллическую структуру. Например, в объемноцентрированной кубической решетке атомы и ионы располагаются в вершинах и в центрах примыкающих друг к другу кубов, называемых элементарной ячейкой. Характерным размером, называемым параметром решетки, здесь является длина ребра куба (обычно составляющая несколько ангстремов). Размеры тел, которые применяются в технике, а также искусственно выращенных монокристаллов обычно значительно больше параметров решетки. Внешние воздействия вызывают в теле деформации, т. е. изменение расстояния между частицами. При этом изменяются и силы взаимодействия между частицами. Можно с уверенностью считать, что на расстояниях порядка десятков и сотен параметров решетки указанные изменения расстояний и сил взаимодействия происходят закономерно. Поэтому, рассматривая макрообъемы, на каждом таком интервале можно дискретное распределение перемещений и сил междучастичного взаимодействия заменить непрерывным и монотонным их распределением. Это равносильно тому, что кристаллическая решетка мысленно заменится однородной сплошной средой. Такая замена означает по существу осреднение перемещений и изменений сил взаимодействия между частицами на расстояниях, во много раз превышающих параметр решетки.

Проведенные в монокристалле осреднения перемещений и сил не содержат в себе противоречий с анизотропией механических свойств кристаллов, так как такие осреднения не затрагивают зависимостей между внутренними силами и перемещениями в различных направлениях. Такое осреднение фактически осуществляется, когда изучается распределение температуры.

Для введенной таким образом сплошной среды деформация удлинения в данной точке в заданном направлении определяется как предел отношения изменения расстояния между точками тела к начальному расстоянию между ними, когда это последнее стремится к нулю. Напряжением на данной площадке называется предел отношения суммарного вектора сил дополнительных взаимодействий к площади этой площадки, когда последняя стягивается в точку. Эти понятия имеют такой же физический смысл, как, например, понятие давления газа, при введении которого дискретные удары молекул газа заменяются распределенными усилиями.

Технические металлы и сплавы представляют собой поликристаллические тела. При затвердевании из расплава в ме-

талле возникает большое число центров кристаллизации (рис. 1а). На начальной стадии рост кристаллов идет независимо от других. Ребра и вершины кристаллических зародышей более интенсивно омываются жидким расплавом, они растут быстрее граней. Получаются вытянутые образования, которые называются осями дендритов (рис. 1б). Характерные направления их расположены случайно. Выросшие кристаллы, соприкасаясь друг с другом, взаимно мешают свободному развитию, что приводит к искажению формы (рис. 1в). В результате возникает структура затвердевшего металла (зерна-кристаллиты) (рис. 1г).

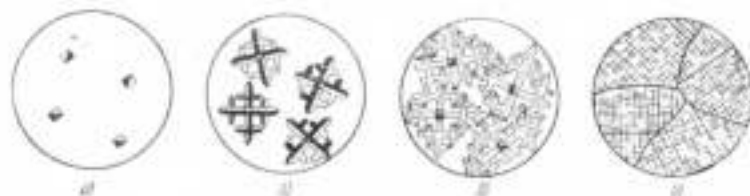


Рис. 1. Схема образования поликристаллического тела:
а) в жидком металле появились первые кристаллические зародыши;
б) образование осей дендритов;
в) искажение формы кристаллов;
г) структура затвердевшего металла (зерна-кристаллиты)

правильной формы кристаллы называются кристаллитами, или зернами. Сами кристаллиты часто состоят из многих мелких блоков (блоков мозаики). Ориентировка блока несколько отличается от соседних, но в общем все они в данном кристаллите имеют примерно одинаковую ориентировку. Затвердевший металл или сплав представляет собой поликристаллический агрегат, состоящий из зерен-кристаллитов (рис. 1г). По части граничной поверхности каждое зерно соприкасается с соседними, причем решетка вблизи поверхности контакта искажена и имеет повышенное сопротивление деформированию. По другой части непосредственного контакта между зернами нет, пространство между зернами заполнено междукристаллическим веществом, свойства которого отличаются от свойств материала зерна (рис. 2). Размеры зерен и их внешняя форма зависят от состава металла или сплава и от условий затвердевания. Размеры зерен и их взаимная ориентация зависят также от последующей термической и механической обработки. У многих металлов при данном режиме затвердевания и термообработки размеры зерен в среднем одинаковы и лежат в пределах от тысячных долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Допустим, что поликристаллический агрегат состоит из зерен одной и той же кристаллической структуры, одинаковых по размерам и форме. Для каждого зерна, рассматриваемого как монокристалл, можно установить его ориентацию относительно некоторой системы координат. В определенном направлении в поликристаллическом теле будут встречаться зерна различной ориентации. Будем считать одинаково ориентированными все зерна, ориентация которых лежит в пределах заданного допуска, оправданного расчетными соображе-



Рис. 2. Схема строения границ зерен

ниями. Тогда на некотором расстоянии от данного зерна встретится зерно, ориентированное так же, как данное. Это характерное расстояние между двумя одинаково ориентированными зернами называется параметром ориентации. Этот параметр зависит от типа кристаллической решетки и, как показывают расчеты, составляет 10—15 характерных размеров зерна.

Рассмотрим в поликристаллическом теле некоторую плоскость и прямую линию, лежащую в ней. Внутри каждого зерна, рассматриваемого как монокристалл, можно построить эпюры распределения дополнительных сил взаимодействия и перемещений частиц, лежащих на рассматриваемой линии.

На расстояниях порядка параметра ориентации изменения эпюр будут происходить в среднем закономерно. Если рассматривать расстояние значительно больше параметра ориентации, то вновь возникает возможность замены кусочно-непрерывного распределения усилий (напряжений) и перемещений (деформаций) непрерывным их распределением.

Таким образом, твердые тела поликристаллической структуры, наименьшие размеры которых превышают параметр ориентации, можно для расчетных целей представлять как сплошные тела и считать в них силы взаимодействия и перемещения распределенными непрерывно, а понятия напряжения и деформации вводить как статистически осредненные

характеристики. Вычисленные при решении задач перемещения будут в среднем правильно представлять перемещения микрочастиц, а напряжения в среднем правильно отражать изменение взаимодействия между частицами.

Все свойства, определенные на образцах размерами, значительно большими параметра ориентации, являются устойчивыми характеристиками поликристаллического металла.

§ 2. СТРУКТУРА МЕТАЛЛА И ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства твердого тела (упругость, пластичность, прочность и т. п.) определяются его внутренним строением. Характер сил взаимодействия между частицами и их изменение с деформацией зависят от типа кристаллической решетки, т. е. от внутреннего строения каждого зерна и поликристаллическом агрегате. Поскольку распределения напряжений и деформаций претерпевают разрывы на границах зерен, очевидно, что поведение поликристаллического агрегата в целом будет зависеть от размеров и взаимной ориентации зерен. Далее, на механические характеристики поликристалла влияет структура и свойства межкристаллического вещества. Но ни тип кристаллической решетки, ни размеры и расположение зерен, ни характеристики межкристаллического вещества не являются атрибутами материала данного химического состава: они зависят от разных факторов, в частности от термической и механической обработки, от технологии изготовления детали, от условий, в которых работает деталь.

Известно, что при изменении температуры во многих твердых телах происходит аллотропические превращения: для разных интервалов температуры характерными являются разные типы кристаллической решетки. Например, железо при температурах до 910°C имеет объемно-центрированную решетку, а от 910°C до 1400°C — решетку куба с центрированными гранями, при последующем увеличении температуры снова объемно-центрированную решетку.

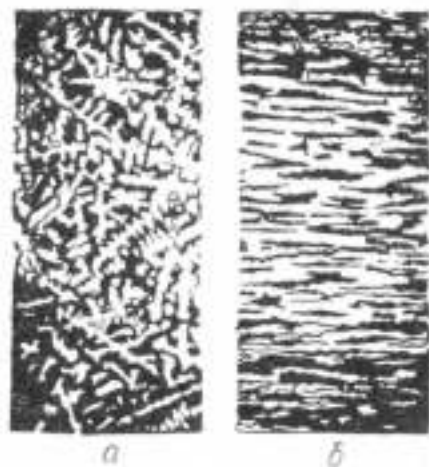
Размеры зерен, их структура и взаимное расположение, а также строение межкристаллического вещества могут быть изменены термообработкой. Если, например, изделие из стали нагреть до определенной температуры, а затем быстро охладить, то в ней зафиксируется структура, не свойственная комнатной температуре, так как структурные превращения протекают с определенной скоростью и не успевают развиться при быстром охлаждении. С другой стороны, выдержка при повышенной температуре и медленное охлаждение, характерные для процессов отжига, способствуют протеканию превра-

нений, что приводит к возникновению механических свойств, отличных от тех, которые фиксируются при закалке.

Различие в условиях охлаждения и кристаллизации на поверхности и внутри слитка приводит к неоднородности кри-

сталлической структуры и механических свойств. Устранение этих неоднородностей и улучшение механических качеств достигается путем горячей обработки давлением*. В процессе деформации при ковке, прокатке и других аналогичных операциях происходит измельчение и выравнивание размеров зерен и образование волокнистой структуры (рис. 3). Все механические свойства повышаются по сравнению с литым состоянием, но характеристики пластичности поперек волокон оказываются ниже, чем вдоль. Разница в свойствах вдоль и поперек волокон учитывается при изготовлении деталей: волокна должны огибать контур детали (рис. 4).

Рис. 3. Преобразование структуры литой стали при прокатке: а — литая структура, б — волокнистая структура после горячей прокатки



Упрочнение путем холодного пластического деформирования называется наклепом. При некоторых видах холодной об-

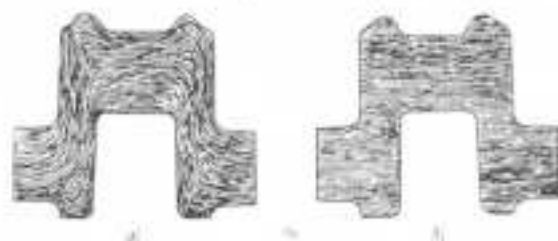


Рис. 4. Схема структуры коленчатого вала с правильным (а) и неправильным (б) расположением волокон

* Горячей обработкой давлением обычно называют обработку при температурах выше 0,4T (температуры плавления в °K), холодной — при температурах ниже 0,4T.

работки давлением (прокатка, волочение) возникает текстура: кристаллиты ориентируются определенным образом, в зависимости от характера течения металла. Это приводит к возникновению деформационной анизотропии: механические свойства в направлении прокатки или волочения и в поперечном направлении становятся различными.

§ 3. АНАЛИЗ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ

Цели работы:

- 1) Определение вида пластической деформации и волокнистой структуры в стали.
- 2) Сравнение микроструктур закаленной и отожженной стали и определение размеров зерен.
- 3) Выявление полос скольжения.
- 4) Наблюдение нежидкокристаллических и внутрикристаллических явлений.

При изучении механических свойств твердых тел важно иметь представление о структуре материала, о ее изменениях в различных термомеханических условиях и о методах исследования строения твердых тел.

Входящие в состав сплава компоненты определяются химическим или спектральным анализом. Макроструктура, т. е. строение, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении, изучается на макрошлифах.

Для изготовления макрошлифа поверхность металла шлифуется, после чего подвергается травлению. При рассмотрении подготовленного таким способом образца выявляется волокнистое строение, зоны пластически деформированного металла, инородные включения и т. п. Удобно вести наблюдение через бинокулярную лупу, дающую стереоскопический эффект. Некоторые сведения о макроструктуре можно получить, исследуя характер излома.

Микроструктура исследуется на микрошлифах. При изготовлении последнего поверхность образца шлифуется наждачной бумагой с последовательно уменьшающимися размерами зерен абразивов, причем при переходе от одного номера бумаги к другому направление шлифовки изменяется на 90°. Это способствует выведению рисок. После получения гладкой поверхности производится полировка на вращающемся диске, который покрыт сукном, пропитанным водой со взвешенными мельчайшими частицами окиси алюминия или окиси хрома. Отполированная до зеркального блеска (без рисок) поверхность шлифа промывается струей воды, окунается в спирт и просушивается фильтровальной бумагой. Для травления микрошлифа стали можно использовать, например, 3—5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. После травления шлиф промывается струей воды и в спирте и просушивается.

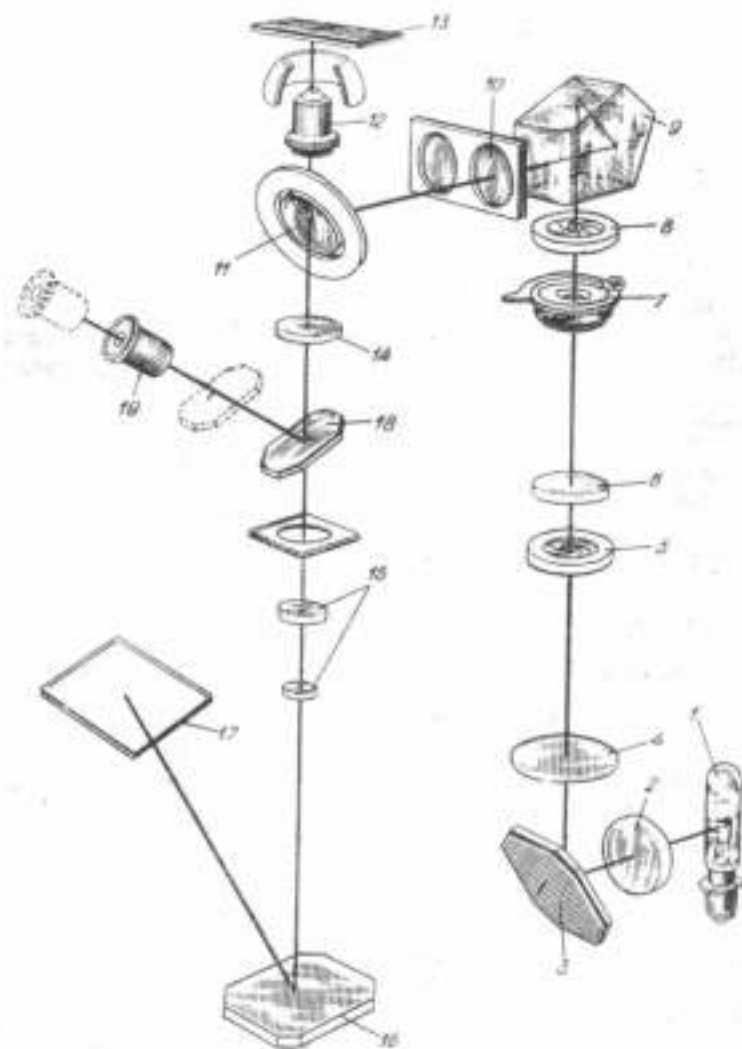


Рис. 5. Оптическая схема микроскопа МИМ-7

В результате разной реакции различных составляющих структуры на травление происходит образование рельефа и различная окраска составляющих. При рассмотрении через микроскоп можно обнаружить форму и размеры зерен, полосы скольжения, микротрещины и т. п.

Металломикроскоп. На рис. 5 изображена оптическая схема вертикального металломикроскопа МИМ-7. Лучи света из лампы 1 проходят через коллекторную линзу 2 и после отражения от зеркала 3 — через светофильтр 4, диафрагму 5, линзу 6, фотозатвор 7 и диафрагму 8. Пентапризма 9 направляет лучи через линзу 10 на плоскопараллельную стеклянную пластинку 11. Отраженные от пластинки 11 лучи проходят через объектив 12 и падают на микрошлиф 13. Отраженные от микрошлифа лучи вновь проходят через объектив 12 и, пройдя через пластинку 11 и линзу 14, зеркалом 18 направляются в окуляр 19. При фотографировании зеркало 18 переводится в положение, показанное на рис. 1 пунктиром, и лучи направляются к фотоокуляру 16, пройдя который, отражаются зеркалом 16 на фотопластинку 17.

Небольшое приспособление позволяет видимую глазом через окуляр структуру зарисовать в масштабе видимого изображения. В случае необходимости структура может быть сфотографирована.

Порядок выполнения работы. Определение зон пластической деформации. Зоны значительной пластической деформации хорошо видны на фоне недеформированного металла на макрошлифе после травления специальным реактивом.

В стальной образец вдавливается пуансон (шарик, конус, цилиндр) до появления остаточного отпечатка, после чего образец в течение полчаса нагревается в печи при температуре 200—250°. Затем образец разрезается через центр отпечатка, поверхность разреза шлифуется наждачной бумагой и обезжиривается бензином или спиртом. На 1—3 минуты микрошлиф погружается в травитель (на 100 см³ воды — 0,12 см³ концентрированной соляной кислоты и 90 г кристаллической хлористой меди). Дальнейшее травление (в течение 2—20 мин) производится путем протирания поверхности шлифа тампоном, смоченным в растворе и посыпанным порошком хлористой меди, до тех пор, пока не станут видны различия в окраске зоны пластической деформации и недеформированного металла*. Затем шлиф просушивается и обмывается спиртом. Зона пластической деформации зарисовывается.

* Во избежание повреждений шлифа работа эта производится в резиновых перчатках.

Выявление волокнистой структуры стали. Для обнаружения волокнистой структуры, возникающей при прокатке или штамповке, можно воспользоваться тем, что места, обогащенные серой и фосфором, вытянуты вдоль волокон.

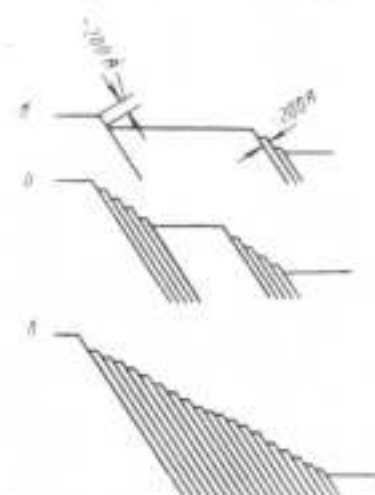


Рис. 6. Схема образования полос скольжения.

Макрошлиф обезжиривается спиртом и накладывается на эмульсию листа бром-серебряной фотобумаги, предварительно находившейся в течение 10—15 минут на свету в 5%-ном водном растворе серной кислоты. Места, обогащенные серой и фосфором, окрашивают эмульсию в темно-коричневый цвет. Фотобумага промывается и фиксируется в 15—20%-ном растворе гипосульфита.

Сравнение микроструктуры закаленной и отожженной стали и определение размеров зерен. Для выяснения влияния термообработки изготавливаются два макрошлифа, например, из стали 45: один —

закаленный, второй — отожженный. Структура и границы зерен зарисовываются. Определение величины зерна производится по методике, изложенной в ГОСТе № 5639—51, сравнением наблюдаемой структуры при увеличении 100 со стандартной. Последняя составлена на основе соотношения $F = 500 \cdot 2^{F-N}$, где F — средняя площадь зерна в квадратных микронах, соответствующая определенному номеру зерна N . Необходимо вычислить среднюю площадь зерна F .

Выявление полос скольжения. Основным механизмом пластической деформации является необратимое скольжение одной части кристалла относительно другой по плоскости скольжения (рис. 6). Скольжение сравнительно мало (в алюминии порядка $2 \cdot 10^{-3}$ см) и останавливается вследствие препятствий, вызываемых упрочнением, возникающих в связи с искажениями решетки. След этой плоскости на поверхности кристалла называется линией скольжения (рис. 6, а). Следующие сдвиги происходят на малых расстояниях друг от друга (в алюминии порядка $2 \cdot 10^{-6}$ см, рис. 6, б). Такие сдвиги локализуются в сравнительно узкой полосе, которая, таким образом, представляет собой пласт, состоящий из тонких слоев кристаллов, сдвинутых друг относительно друга (рис. 6, в).

В поликристаллическом теле вследствие хаотичности расположения зерен возможные плоскости скольжения также расположены хаотически. В некоторых зернах эти плоскости расположены благоприятно по отношению к действующим напряжениям, в других — неблагоприятно. Поэтому в одних зернах возникнет много полос скольжения, в других меньше, в третьих их вообще не образуется. На макрошлифе этому будет соответствовать разная плотность и разные направления полос скольжения.

Для обнаружения полос скольжения на плоской поверхности образца полируется площадка, как при изготовлении макрошлифа, но травление не производится. Затем образец растягивается на 10—20%. При наблюдении в микроскоп выявляются как границы зерен, так и полосы скольжения.

Наблюдение межкристаллических и интрукристаллических изломов.

В зависимости от напряженного состояния, температуры и других условий испытания разрушение может быть: интрукристаллическим, когда поверхность разрушения проходит через тело зерна, межкристаллическим, проходящим по границам зерен и смешанным — частично по границам зерен, частично по зерну.

Для наблюдения этих типов разрушения берутся два продольных макрошлифа образцов, разрушенных растяжением в разных условиях: один кратковременным растяжением при комнатной температуре, другой растяжением при повышенной температуре в результате ползучести. При рассматривании макрошлифов в микроскоп ясно видна разница типов разрушения.

Отчетными материалами являются: зарисовки зон пластической деформации, структуры, полос скольжения, изломов, данные о сравнении структуры закаленной и отожженной стали.

ЛИТЕРАТУРА

- Беряштейн М. Д. Сталь и сплавы для работы при высоких температурах. Металлургия, М., 1956.
Болховитинов Н. Ф. Металловедение и термическая обработка. Машгиз, М., 1958.
Бочвар А. А. Металловедение. Металлургия, М., 1956.
Грозин В. Д. Механические свойства закаленной стали. Машгиз, М., 1951.
Гуллев А. П. Металловедение. Оборонгиз, М., 1956.
Зейтц Фредерик. Физика металлов. ОГИЗ—Гостехиздат, М.-Л., 1947.
Нильсон А. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. Физматгиз, М., 1959.
Ляйниц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов. Машгиз, М., 1959.

- Надан А. Пластичность и разрушение твердых тел. ИИЛ, М., 1954.
 Погодин Алексей Г. И., Геллер Ю. И., Рааштадт А. Г.
 Металловедение (Методы анализа, лабораторные работы и задачи). Оборонгиз, М., 1956.
 Рид В. Т. Деформация в кристаллах. Металлургия, М., 1957.
 Справочник. Металловедение и термическая обработка. Металлургия, М., 1956.
 Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. Физматгиз, М., 1956.
 Фришман Я. В. Механические свойства металлов. Оборонгиз, М., 1952.

ГЛАВА

СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

В зависимости от скорости приложения деформирующих сил механические испытания делятся на статические — медленное нагружение образца таким образом, что можно пренебречь силами инерции — и динамические — ударное приложение нагрузки, колебания.

Кроме того, механические испытания характеризуются видом напряженного состояния: одноосное, плоское, пространственное — и соответствующим типом нагрузки: растяжение, сжатие, кручение, изгиб и т. д.

Способ изготовления образцов, их форма и размеры и метод испытания должны обеспечивать сравнимость, т. е. получение одинаковых результатов при повторных испытаниях одного и того же материала.

В процессе подготовки к опыту образцы не должны подвергаться дополнительной обработке, при которой изменяются свойства материала, например плавке, нагреву и т. д. В случае вырезки заготовок для образцов электрической дугой или газовым пламенем эти заготовки должны иметь припуск на величину зоны, подвергавшейся нагреву (больше 10 мм).

Форма образцов и способ приложения нагрузок должны согласоваться с законом механического подобия. Этот закон сформулирован В. Л. Кирпичевым в 1874 г. для упругого сопротивления материалов и в 1952 г. А. А. Ильиным для моделирования горячих и скоростных процессов обработки металлов давлением.

Испытание на растяжение

Этот вид испытаний материалов является наиболее распространенным из-за того, что, во-первых, при современной технике испытаний растяжение осуществляется практически в

чистом виде (в противоположность, например, сжатию, где сказывается трение по торцам) и, во-вторых, определяемые при растяжении механические характеристики позволяют судить о прочности материала при статических нагрузках и являются основными для расчета деталей и сооружений на прочность.

Образцы для испытаний на растяжение. Рабочей длиной l называется длина цилиндрической (у круглого) или призматической (у прямоугольного) части образца до перехода к головкам. Расчетной длиной l_0 называется длина, на которой производится определение удлинения. Головки образца пре-

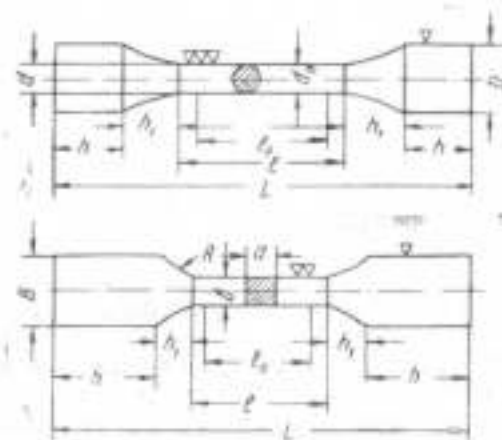


Рис. 7. Виды образцов для испытаний на растяжение

дствуют развитию деформации в прилежащих к ним частях образца, поэтому l_0 берется меньше l на диаметр (или толщину) образца, так как в областях, достаточно удаленных от мест приложения внешних нагрузок, напряжения мало зависят от детального способа их осуществления (принцип Сен-Венана) и в случае растяжения уже на расстоянии диаметра или толщины образца от головок напряженное состояние является однородным. По ГОСТу 1497-42 для обеспечения сравнимости результатов испытаний расчетная длина l_0 должна быть равной $10d_0$ для круглых образцов и $11,3 \sqrt{F_0}$ для плоских, где F_0 — площадь поперечного сечения образца до испытания. Допускается применение коротких образцов с $l_0 = 5d_0$ для круглых и $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ для прямоугольных образцов; для стального литья берется $l_0 = 2,5d_0$.

Форма и размеры образцов представлены на рис. 7 и в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение основных размеров образцов для испытаний на растяжение

Обозначение размера образцов	Круглое сечение		Прямоугольное сечение	
	десятикратный образец к d_0	пятикратный образец к d_0	десятикратный образец	пятикратный образец
L	16	10	$l + 2(h + h_1)$	$l + 2(h + h_1)$
h	1	1	$\sim 1,5 a$	$\sim 1,5 a$
h_1	1,5	1	15 мм	15 мм
l	11	6	$\sim 13 \sqrt{F_0}$	$\sim 6,5 \sqrt{F_0}$
l_0	10	5	$11,3 \sqrt{F_0}$	$5,65 \sqrt{F_0}$
R	$\sim 1,8$	$\sim 1,8$	—	—
R_1	$\sim 1,2$	$\sim 1,2$	—	—
h	—	—	~ 40 мм	~ 40 мм
a	—	—	~ 30 мм	~ 30 мм
При d_0	от 5 до 25 мм		—	—
При a	—	—	от 4 до 25 мм	от 4 до 25 мм

Мелкие профили и трубы, тонкие полосы, проволока и литые образцы испытываются без дополнительной механической обработки.

Характеристики механических свойств материалов, определяемые при растяжении. При испытании на растяжение определяются такие важные характеристики, как пределы пропорциональности $\sigma_p \sqrt{F_0}$, упругости σ_s и текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление, или предел прочности σ_b , истинное сопротивление разрыву S_b , сопротивление отрыву, или хрупкая прочность S_T , модуль нормальной упругости E и коэффициент Пуассона μ .

Кроме того, испытание на растяжение дает представление о пластичности металла по величинам удлинения δ и сужения поперечного сечения ψ и о статической вязкости по удельной работе пластической деформации a .

Диаграммы растяжения. Каждый материал в зависимости от его состава и технологии производства дает характерную для него диаграмму растяжения (рис. 8).

До нагрузки P_p (рис. 9) деформации линейно зависят от напряжения (закон Гука). Напряжение, выше которого материал перестает подчиняться закону Гука, называется пределом пропорциональности: $\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$, где F_0 — площадь первоначального сечения образца.

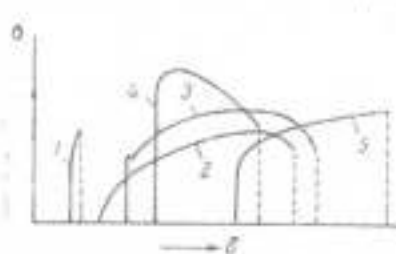


Рис. 8. Воды диаграмм растяжения различных металлов. 1 — медь, 2 — отожженная медь, 3 — отожженная малоуглеродистая сталь, 4 — холоднокатанная сталь, 5 — бронза

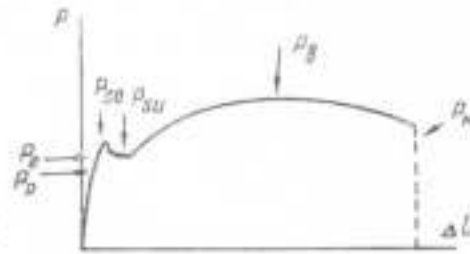


Рис. 9. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

При нагрузке выше P_p в металле начинают появляться остаточные деформации. Напряжение $\sigma_e = \frac{P_e}{F_0}$, по достижении которого в металле получают остаточные деформации, называется пределом упругости.

Следует отметить, что нахождение точных значений σ_p и σ_e из опыта в соответствии с введенными выше понятиями представляет собой крайне трудную задачу, поэтому при практическом их определении необходимо задавать допуск, т. е. величину заданного отклонения от пропорциональности при определении предела пропорциональности и величину заданной остаточной деформации при определении предела упругости.

Нагрузка P_m отвечает началу текучести, а соответствующее ей напряжение $\sigma_m = \frac{P_m}{F_0}$ называется верхним пределом текучести. Дальнейшее деформирование образца происходит при меньшей и почти постоянной нагрузке P_m до конца площадки текучести. Напряжение $\sigma_m = \frac{P_m}{F_0}$ называется нижним пределом текучести.

Так как на величину верхнего предела текучести сильно влияет плавность перехода от рабочей части образца к его головкам (рис. 10), то правильнее за предел текучести принимать значение нижнего предела σ_m , который называется физическим пределом текучести и обозначается σ_p . Нагрузка $P_m = P_e$ определяется по диаграмме или по остановке силоизмерителя машины.

Диаграммы с площадкой текучести имеют многие стали (все простые углеродистые и малолегированные) и некоторые цветные сплавы. Большинство же металлов имеют плавные диаграммы растяжения без площадки текучести. У таких металлов определяется условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, как напряжение, при котором остаточное удлинение получается равным 0,2% от измеряемой прибором длины.

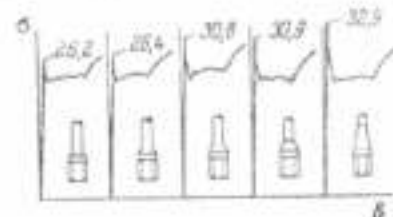


Рис. 10. Зависимость $\sigma_{0.2}$ от формы перехода цилиндрической части к головкам

Начало пластических деформаций для некоторых металлов, особенно для малоуглеродистой стали, сопровождается появлением на поверхности образцов и деталей фигур текучести Чернова-Людерса. Последние в виде узких зон, пронизывающих все сечение, начинаются в перенапряженных местах, например, при растяжении в местах перехода рабочей части к головкам, и во время прохождения площадки текучести распространяются на всю рабочую часть образца. На поверхности круглых образцов фигуры текучести при растяжении идут в виде узких полос под углом 45—50° к оси образца.

При дальнейшем растяжении образца нагрузка возрастает до максимума P_b , а затем или начинает уменьшаться вплоть до разрыва и силу уменьшения сечения (образование шейки), или разрыв образца происходит при максимальной нагрузке (рис. 8).

Условное напряжение, представляющее собой отношение максимальной растягивающей нагрузки P_b к первоначальной площади поперечного сечения, называется временным сопротивлением* $\sigma = \frac{P_b}{F_0}$. Оно соответствует максимальному равномерному удлинению и сужению образца.

* Напряжения, вычисленные по отношению к площади поперечного сечения образца до испытания $\sigma = P/F_0$, называются условными и отличаются от истинных $\sigma_t = P/F_t$, которые вычисляются по отношению к площади под нагрузкой.

Дальнейшее растяжение образца приводит к образованию шейки и разрушению. Напряжение в момент разрыва называется истинным сопротивлением разрыву $S_b = \frac{P_b}{F_b}$, где P_b — разрушающая нагрузка, а F_b — площадь поперечного сечения шейки в месте разрушения.

Разрушение от отрыва вызывается нормальными напряжениями растяжения. Для определения сопротивления отрыву необходимо устранить возможность пластической деформации. Из теории сопротивления материалов известно, что при всестороннем равномерном растяжении касательные напряжения равны нулю и, следовательно, исключается возможность пластической деформации. Однако механическими средствами такая схема нагружения не может быть осуществлена.

У хладноломких металлов (железо, простые и малолегированные стали, в структуре которых имеется феррит) может происходить разрушение от отрыва (без пластической деформации) при соответствующем понижении температуры испытания. Это свойство используется для определения сопротивления отрыву указанных хладноломких металлов. Образцы, охлажденные сухой углекислотой, жидким воздухом, кислородом, азотом, водородом или гелием, подвергаются растяжению. Напряжение $S_T = \frac{P_b}{F_b}$, вызывающее разрушение без пластической деформации, является сопротивлением отрыву (хрупкой прочностью).

О сопротивлении отрыву нехладноломких металлов (алюминия, меди, никеля и т. д.) приходится судить по косвенным данным.

Интересно отметить, что всестороннее сжатие (гидростатическое), при котором касательные напряжения, как и при всестороннем растяжении, равны нулю, так же не может вызвать пластической деформации. Опыт с гидростатическим сжатием до 1500 кг/мм^2 полностью это подтверждает: в образце при этом возникают только упругие деформации, хотя одноосное сжатие того же материала напряжением в несколько кг/мм^2 вызывает в нем остаточные деформации. Кроме того, всестороннее равномерное сжатие не вызывает разрушения тел. Следовательно, причинами разрушения могут быть только срез и отрыв.

Вид налома разорванных образцов может дать некоторые сведения о причинах разрушения. Если налом произошел без шейки перпендикулярно действующей силе, то это разрушение отрывом, а если под углом 45° к оси (в направлении максимальных касательных напряжений) — от среза. Часто бывают смешанные разрушения от среза и от отрыва.

При деформировании за пределом упругости в материале имеют место и упругие, и пластические деформации. И в этом случае упругие деформации подчиняются закону Гука; в этом и состоит сущность утверждения Герстнера.

Из него следует, что после деформирования за пределом упругости разгрузочная кривая должна идти параллельно первоначальному упругому участку кривой*.

На рис. 11 представлены кривые растяжения с повторяющимися разгрузками по Герстнеру. Линии разгрузки bb' , cc' , de' и dd' являются прямыми и идут параллельно начальному упругому участку oa .

Характеристики пластичности — удлинение δ и сужение поперечного сечения ψ — определяются по изменению длины и поперечного сечения образца:

$$\delta = \frac{l_b - l_0}{l_0} 100\%,$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_b}{F_b} 100\%,$$

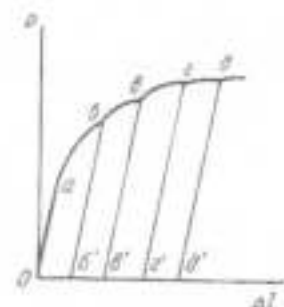


Рис. 11. Кривые растяжения с повторными разгрузками

где l_b — расчетная длина образца после разрыва, l_0 — расчетная длина до испытания, F_0 — площадь поперечного сечения до испытания и F_b — то же после разрыва.

Характеристика вязкости определяется работой A пластического деформирования до разрыва образца. Площадь диаграммы растяжения дает работу упругой и пластической деформации. Для исключения работы упругой деформации от точки P_b проводится прямая, параллельная начальному участку диаграммы, которая отсекает треугольник, соответствующий работе упругой деформации. Эта работа A равна площади диаграммы (рис. 9), умноженной на масштабы координатных осей. Вязкость металла и оценивается работой, затраченной на пластическое деформирование 1 см^2 металла образца до разрыва:

$$\sigma = \frac{A}{V} \frac{\text{кг} \cdot \text{см}}{\text{см}^2},$$

где $V = lF_0$ — рабочий объем образца.

Работу пластической деформации можно оценить, умно-

* Экспериментальные исследования последних времени указывают на то, что разгрузка идет по кривой почти параллельно упругому участку, наибольшие отклонения обнаруживаются вблизи начала разгрузки.

жив площадь прямоугольника с основанием Δl и высотой P_0 , на коэффициент заполнения диаграммы γ : $A = \gamma P_0 \Delta l$ или $a = \gamma \Delta \delta$. Для стали γ равно 0,8 ÷ 0,9.

Получение и обработка автодиаграммы

Цели работы:

- 1) Ознакомление с испытательной машиной и измерительной аппаратурой.
- 2) Получение автодиаграммы растяжения металлического образца.
- 3) Определение по автодиаграмме характеристик механических свойств металла.

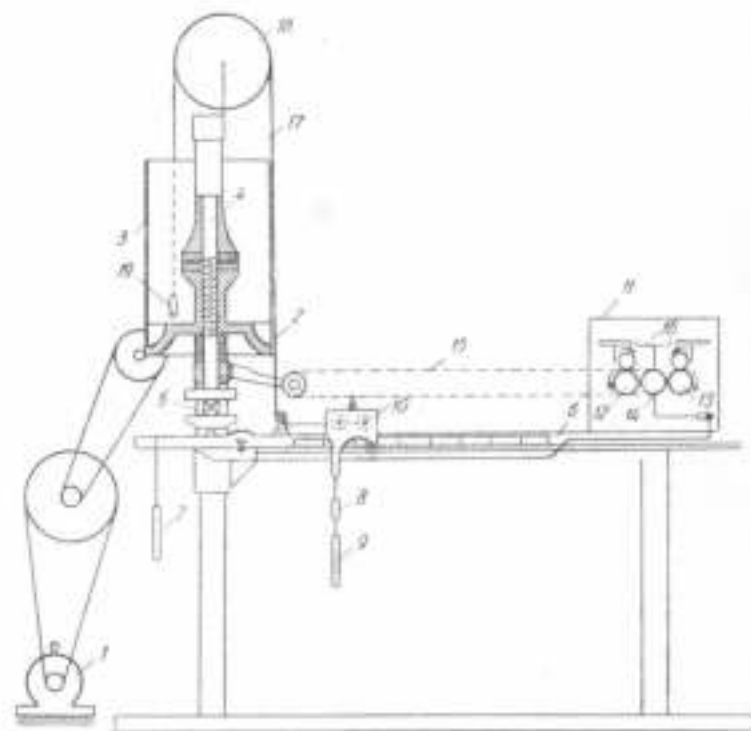


Рис. 12. Схема машины Гегарина

На рис. 12 представлена схема машины Гегарина, а эскиз образца представлен на рис. 7.

Машина предназначена для испытаний на сжатие, поэтому для испытания на разрыв применяется специальное приспособление — реверсор (рис. 13).

Движение от электромотора 1 двумя ременными передачами передается к неизменяемому поступательному движению червячному колесу 2, на которое насажен барабан диаграммного прибора 3. Червячное колесо 2 представляет собой гайку, в которой поступательно движется винт 4. Винт сжимает реверсор 5, в результате чего происходит растяжение образца. Давление от нажима винта передается на рычаг 6 с неподвижным противовесом 7 на коротком плече и подвижным на длинном. Подвижной противовес состоит из двух грузов: постоянного 8, составляющего одно целое с кареткой 10, и съемного 9. При одном постоянном грузе перемещение его по рычагу на 1 см указывает на изменение силы на 20 кг (шкала 1000 кг), а с обоими грузами — 100 кг (шкала 5000 кг).

Нагрузка на образец автоматически уравнивается при помощи часового или электромагнитного механизма 11. В первом случае шестерни 12 и 13, приводимые в движение пружинами, вращают в разные стороны колесо дифференциала с укрепленной на нем звездочкой. Через последнее перекинута бесконечная цепь 15, связанная с кареткой 10.

При равновесии рычага колесо 14 производит очень незначительные перемещения каретки 10 вперед-назад. При увеличении нагрузки рычаг поднимается и пружина 16 тормозит левую шестерню 12, вследствие чего начинает вращаться правая шестерня 13, которая и перетянет тележку вправо, пока не наступит равновесие; в силу инерции каретка пройдет немного дальше, рычаг опустится и затормозит правую шестерню 13, и каретка отойдет влево. Вследствие этого каретка будет совершать небольшие колебания около положения равновесия.

Нить 17 диаграммного прибора, связанная с кареткой 10 и переброшенная через блок 18, тянет перо 19.

Электромагнитный механизм 11 действует следующим образом: вместо дифференциала на оси со звездочкой 14 свободно вращаются в разные стороны два круглых электромагнита. Они приводятся в движение через фрикцион и дополнительный шкив (не показаны на схеме) от мотора 1. Между элек-

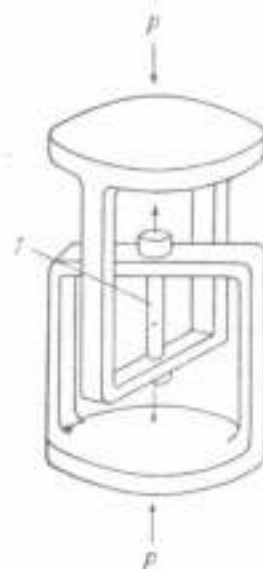


Рис. 13. Реверсор с образцом

ромагнитами на оси со звездочкой 14 на шпонке помещен свободно скользящий вдоль оси диск из мягкой стали (якорь). При нарушении равновесия рычага 6 включается соответствующий электромагнит, якорь к нему притягивается и передвигает каретку 10 до равновесия рычага 6. В остальном электромагнитный регулятор работает так же, как и часовой.

Масштабы получаемых диаграмм:

1. По оси абсцисс: 1 см соответствует 0,01 см удлинения.
2. По оси ординат (нагрузки): без съемного груза в 1 см — 20 кг; со съемным грузом в 1 см — 100 кг.

Порядок выполнения работы. Обмер диаметра образца производится микрометром с точностью до 0,01 мм в наименьшем сечении по двум взаимно-перпендикулярным диаметрам; берется среднее арифметическое из них. Измеряется полная

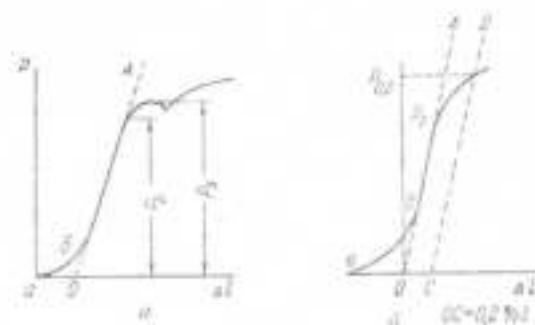


Рис. 14. Определение P_p , P_s , P_k : а) по диаграмме растяжения с площадью текущей точки и б) без площади текущей

рабочая длина l между головками образца штангенциркулем с точностью до 0,1 мм.

На рабочей части образца при помощи делительной машины наносятся две риски на расстоянии одна от другой, равном расчетной длине l_0 .

После деформации образца на 6—10% производится разгрузка и повторное нагружение до разрыва (эта операция необходима для выведения упругого состояния в пластической области). Диаграммный прибор вычертит автодиаграмму.

Получаемые данные заносятся в журнал, форма которого представлена в табл. 2.

Определение предела текучести, временного сопротивления и истинного сопротивления разрыву. Нагрузки, соответствующие этим величинам, отмечены на диаграмме (рис. 9) знаками P_p , P_s , P_k . При отсутствии площади текущей оп-

Размеры образца до испытания					Размеры образца после испытания		
диаметр d_0 , мм	рабочая длина l , мм	расчетная длина l_0 , мм	площадь поперечного сечения F_0 , мм ²	рабочий объем V , см ³	диаметр шейки d_k , мм	расчетная длина l_k , мм	площадь сечения в шейке F_k , мм ²
Нагрузки, кг				Напряжения, кг/мм ²			
P_p	P_s	P_k	P_b	$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$	$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$	$\sigma_k = \frac{P_k}{F_0}$	$\sigma_b = \frac{P_b}{F_k}$
Характеристики вязкости и пластичности							Коэффициент заполнения диаграммы
полная работа пластической деформации A , кг·см	удельная работа деформации $a = \frac{A}{V}$, кг·см/см ³	удлинение $\epsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$	сужение $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$	$\lambda = \frac{A}{P_b \Delta l}$ или $\lambda = \frac{a}{\sigma_b}$			

ределяется условный предел текучести. В этом случае первоначальная криволинейная часть диаграммы растяжения исключается продолжением прямолинейного участка диаграммы до точки O , которая и считается началом координат

(рис. 14). От точки O откладывается в масштабе диаграммы величина $OC = \Delta l_{0,2} = 0,2\% l$, где l — рабочая длина образца (между головками), удлинения которой записываются на автодиаграмме.

Так как за пределом упругости (в области пластических деформаций) возникающие упругие деформации пропорциональны напряжениям, то, проведя прямую CD параллельно OA , исключаем упругие деформации. Ордината точки пересечения прямой CD с кривой растяжения и есть нагрузка $P_{0,2}$, соответствующая условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$.

Для определения удлинения и сужения поперечного сечения производится измерение расчетной длины l_k между двумя рисками и наименьшего диаметра шейки d_k при помощи штангенциркуля.

Образец сохраняется для дальнейших испытаний на твердость.

Отчетными материалами являются: схема машины и эскиз образца, полученная автодиаграмма и табл. 2 измеренных и вычисленных величин.

Построение диаграммы истинных напряжений и определение E , μ , σ_p , σ_e , σ_s , σ_b , δ и ψ .

Цели работы:

- 1) Ознакомление с испытательными машинами и измерительной аппаратурой.
- 2) Построение диаграммы истинных напряжений.
- 3) Определение величин: E , μ , σ_p , σ_e , σ_s , σ_b , δ и ψ .

Для испытания берется металлический образец диаметром 20 мм. Испытание производится на машине с рычажным или маятниковым силоизмерителем.

Машина с механическим приводом и рычажным силоизмерителем (рис. 15). Гайка 1 может только вращаться, но не имеет поступательного движения; вследствие этого винт 2 опускается или поднимается в зависимости от направления вращения гайки 1 и тем самым производит деформирование образца 3, закрепленного в захватах 4. Нагрузка от образца передается через дифференциальную подвеску, состоящую из равноплечего коромысла 6 и двух тяг 6, на рычаг 7, имеющий неподвижную опору в точке 8. Рычаг 7 поднимает или опускает рычаг 9, на котором нанесена шкала нагрузок. Система приводится в равновесие перемещением груза 10.

Схема машины с гидравлическим приводом и маятниковым силоизмерителем представлена на рис. 16. Из насоса масло под давлением поступает под поршень 1 и поднимает тяги 2 с верхним захватом. Измерение усилия производится с помощью измерительного цилиндра 3 и маятника 5. Давление

масла перемещает поршень 4 и связанные с ним две тяги вниз; это вызывает отклонение маятника 5. При этом зубчатая рейка 6 перемещается и вращает зубчатое колесо с укрепленной на нем стрелкой силоизмерителя.

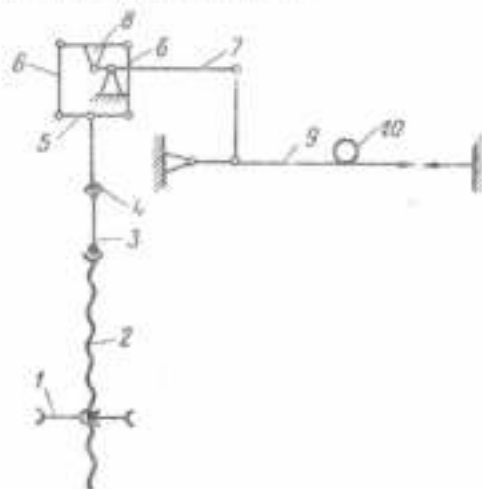


Рис. 15. Схема машины с механическим приводом и рычажным измерением силы

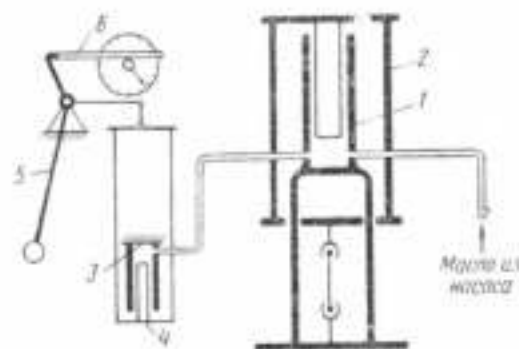


Рис. 16. Схема машины с гидравлическим приводом и маятниковым измерением силы

Тензометры. Так как упругие деформации при нагружении в пределах закона пропорциональности весьма малы, то для их измерения применяются специальные приборы, так называемые тензометры.

В лаборатории МГУ эта работа проводится с зеркальным тензомером Мартенса (рис. 17).

Зеркальный тензомер обладает большой чувствительностью и точностью. Устанавливаются два тензомера на двух

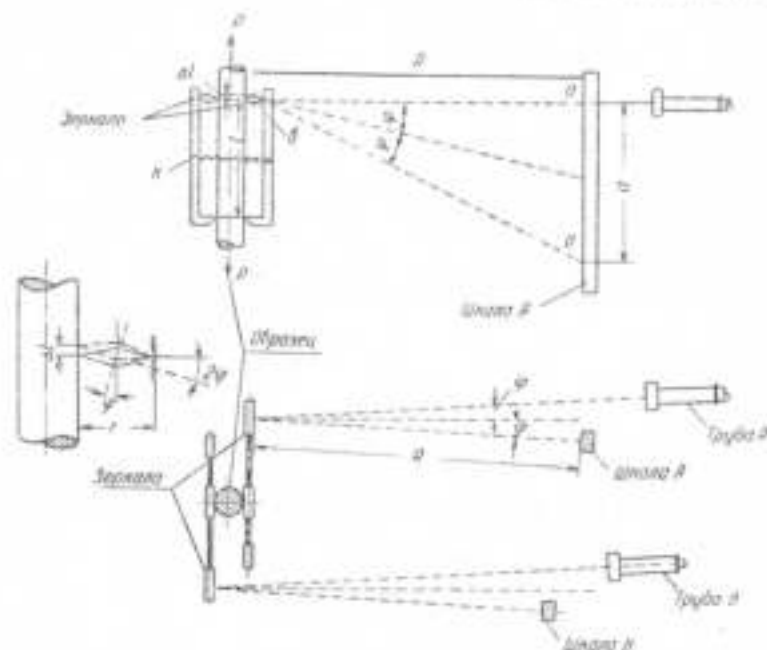


Рис. 17. Схема зеркального тензомера Мартенса

противоположных сторонах образца, что позволяет учесть влияние изгиба образца в плоскости, перпендикулярной осим призм*.

При растяжении образца на Δl ромбическая призма и связанное с ней зеркало повернутся на угол φ . Луч от зеркала повернется на 2φ (угол падения равен углу отражения) и в зрительную трубу будет виден на шкале А отсчет a_2 , тогда как при начальном положении (при предварительной нагрузке) был виден отсчет a_1 .

* На центровку образца при работе с любым тензомером должно быть обращено большое внимание. Следует иметь отдельный комплект исправных пластинок и вкладышей и пользоваться ими только при работе с тензомером. Если есть возможность, то одну из испытательных машин использовать только для работы с тензомерами, не допуская на них других испытаний, особенно связанных с ударами.

Разность отсчетов $a = a_2 - a_1$ соответствует удлинению образца Δl . Если r — длина большой диагонали призмы, а R — расстояние от зеркала до шкалы, то

$$\Delta l = r \sin \varphi \quad \text{и} \quad a = R \operatorname{tg} 2\varphi.$$

Деля эти соотношения одно на другое, получим:

$$\frac{\Delta l}{a} = \frac{r \sin \varphi}{R \operatorname{tg} 2\varphi}.$$

В силу малости угла φ принимаем $\frac{\sin \varphi}{\operatorname{tg} 2\varphi} = \frac{1}{2}$, поэтому

$\Delta l = \frac{r}{2R} a$. Отношение $\frac{r}{R}$ обычно берется равным 1/250, тогда $\Delta l = \frac{a}{500}$. Так как тензомер спаренный, то берется полусумма отсчетов по обоим приборам и тогда:

$$\Delta l = \frac{r}{2R} \frac{a+b}{2};$$

при $\frac{r}{R} = \frac{1}{250}$

$$\Delta l = \frac{1}{500} \frac{a+b}{2} = \frac{a+b}{1000},$$

где a — разность отсчетов по левому, а b — по правому зеркалу прибора.

Определение предела пропорциональности. Предел пропорциональности σ_p есть напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между напряжениями и деформациями достигает определенной величины; например, по ГОСТу 1497-42 требуется уменьшение тангенса угла, образованного касательной к кривой деформаций с осью деформаций, на 1/3.

Так как испытательные машины при нагрузках, близких к нулю, имеют недостаточную точность показаний, то образцам сообщается предварительное начальное нагружение. Начальное нагружение должно быть не менее 1% максимальной нагрузки на шкале машины.

Начальное напряжение σ_0 берется 10 кг/мм² для стали и ~ 3 кг/мм² для цветных металлов. Для термически обработанной стали σ_0 можно брать и выше; величина σ_0 , однако, должна быть такой, чтобы до σ_p было 8—10 ступеней нагружения.

Нагружение при определении σ_p ведется равными ступенями с замером приращения деформации на каждой ступени нагружения. Ступени нагружения берутся не более чем через 2 кг/мм².

Для исключения мертвых ходов машины и тензометра каждая ступень нагружения достигается повышением нагрузки, но не обратным разгрузением после перегрузки.

Пусть ступень нагружения равна ΔP кг, а соответствующее ему приращение деформации в пропорциональной части диаграммы равно Δl (рис. 18). При отклонении от пропор-

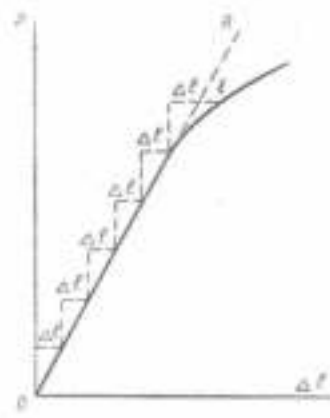


Рис. 18. Схема определения предела пропорциональности

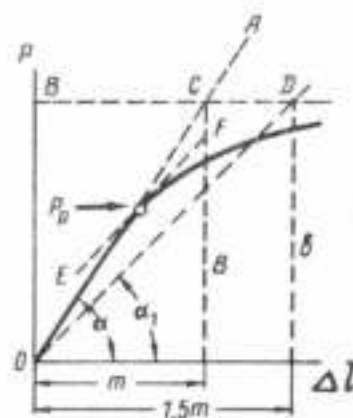


Рис. 19. Схема графического определения предела пропорциональности

циональности ступени нагружения ΔP будет соответствовать приращение деформации $\Delta l + \gamma$. До момента отклонения от пропорциональности $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\Delta P l_0}{F_0 \Delta l}$, при отклонении от пропорциональности $E_1 = \frac{\Delta P l_0}{F_0 (\Delta l + \gamma)}$.

Уменьшение модуля упругости:

$$n = \frac{E - E_1}{E} = \frac{\frac{\Delta P l_0}{F_0 \Delta l} - \frac{\Delta P l_0}{F_0 (\Delta l + \gamma)}}{\frac{\Delta P l_0}{F_0 \Delta l}} = 1 - \frac{\Delta l}{\Delta l + \gamma} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\Delta l}}.$$

При $n = 1/3$, $\gamma = 0,5 \Delta l$ и, следовательно, на пределе пропорциональности $\Delta l + \gamma = 1,5 \Delta l$.

Величина σ_p определяется по таблице или графически; в первом случае следят за приращением удлинения при равных ступенях приращения нагрузки. Нагрузка P_p , при которой приращение удлинения становится в 1,5 раза больше средней

ее величины в пропорциональной части диаграммы, соответствует пределу пропорциональности по данному допуску. Пример определения σ_p по заданному уменьшению модуля упругости представлен в табл. 3.

При графическом определении σ_p результаты опыта представляют в виде графика (рис. 19). Проводят прямую OA, совпадающую с прямолинейным участком диаграммы. Затем проводится произвольная прямая BD, отрезок ее BC делится пополам и эта половина откладывается вправо от точки C. Полученную точку D соединяют с началом координат O. После этого проводится касательная EF к кривой растяжения параллельно OD. Точка касания соответствует нагрузке на пределе пропорциональности P_p . Так как $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P l_0}{F_0 \Delta l} = \frac{l_0}{F_0} \frac{P}{\Delta l}$, то в координатах $P, \Delta l$ величина E для данного образца пропорциональна $\operatorname{tg} \alpha$ (рис. 19).

$$\text{Поэтому } n = \frac{E - E_1}{E} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\frac{b}{m} - \frac{b}{1,5m}}{\frac{b}{m}} = 1 - \frac{1}{1,5} = \frac{1}{3}.$$

Определение модуля упругости E производится по формуле $E = \frac{S l_0}{F_0 \Delta l_c}$, где S — ступень нагрузки, F_0 — площадь поперечного сечения образца, l_0 — база тензометра и Δl_c — среднее удлинение при ступени нагрузки S до начала отклонения от пропорциональности.

Удлинение δ и сужение поперечного сечения ψ определяются так же, как и в случае, рассмотренном ранее.

Пример определения предела пропорциональности по допуску $\Delta l + \gamma = 1,5 \Delta l_c$ образца из термически обработанной стали приведен в табл. 3. Диаметр образца $d = 10$ мм, площадь поперечного сечения $F_0 = 78,54$ мм². Зеркальный тензомер с базой $l_0 = 100$ мм.

Из графы 6 видно, что до десятого нагружения включительно разность сумм отсчетов, представляющих собой удлинения Δl , практически одинакова. Δl_c будет равно разности отсчетов 10-го и 1-го нагружений, деленной на число нагружений без начального:

$$\Delta l_c = \frac{369,1 - 257,1}{9} = 15,44; \quad \Delta l + \gamma = 1,5 \Delta l_c = 23,2.$$

Из табл. 3 видно, что P_p лежит между 4500 и 4750 кг; $P_p = 4500 + x$. При нагружении от 4500 до 4750 кг, т. е. на 250 кг,

Таблица 18

№ п/п	Нагрузка <i>P</i> , кг	Отсчеты по тензомеру в 0,002 мм		$a + b$ в 0,001 мм	$\Delta l = (a + b)_n -$ $-(a + b)_{n-1}$ в 0,001 мм
		левый <i>a</i>	правый <i>b</i>		
1	2	3	4	5	6
1	1000	129,0	128,1	257,1	—
2	1250	137,5	135,1	272,6	15,5
3	1500	145,9	142,0	287,9	15,3
4	1750	154,0	149,0	303,0	18,1
5	2000	162,2	156,5	318,7	15,7
6	2250	170,1	164,0	334,1	15,4
7	2500	178,0	171,3	349,3	15,2
8	2750	186,0	179,0	365,0	15,7
9	3000	193,9	186,6	380,5	15,5
10	3250	201,9	194,2	396,1	15,6
11	3500	210,1	202,4	412,5	16,4
12	3750	219,0	210,0	429,0	16,5
13	4000	228,0	219,3	447,3	18,3
14	4250	238,3	229,1	467,4	20,1
15	4500	249,1	239,3	488,4	21,0
16	4750	264,0	253,9	517,9	29,5
17	5000	279,3	267,7	547,0	29,1

разность отсчетов возросла от 21 до 29,5, а при нагружении с 4500 до $4500+x$ — от 21 до 23,2. Поэтому

$$x = 250 \frac{23,2 - 21}{29,5 - 21} = 65 \text{ кг}, \quad P_p = 4500 + 65 = 4565 \text{ кг},$$

$$\tau_p = \frac{P_p}{F_p} = \frac{4565}{78,54} = 58,1 \text{ кг/мм}^2.$$

$$E = \frac{Sl_g}{F_s \Delta L_s} = \frac{250 \cdot 100 \cdot 1000}{78,54 \cdot 15,44} = 20\,600 \text{ N2/MM}^2.$$

Диаграмма истинных напряжений строится в координатах $S \sim \psi$, где S — истинное напряжение — есть отношение нагрузки к площади поперечного сужения образца при данной нагрузке.

Порядок выполнения работы. Диаметр образца измеряется микрометром в наименьшем сечении по двум взаимно-перпендикулярным направлениям. Затем на рабочей части образца при помощи делительной машины наносятся деления через 1 см; образец устанавливается в захваты машины и устанавливаются тензометры.

Дается начальное нагружение и снимаются отсчеты; дальнейшее нагружение ведется ступенями, снимаются показания

приборов на каждой ступени и заносится в журнал (табл. 4). Отсчеты по тензоретам прекращают, когда приращение удлинения больше чем в 1,5 раза превысит среднее приращение удлинения на первых ступенях нагружения (в прямолинейной части кривой растяжения, рис. 18).

После этого тензометры снимаются и дальнейшее растяжение ведется с остановками машины для измерения микрометром диаметра образца так, чтобы до разрыва провести 6—10 измерений. Данные измерений заносятся в журнал (табл. 5).

Таблица 4

Материал образца . . . Диаметр $D_0 =$. . . мм. $F_0 =$. . . мм

№ п/п	Нагрузка P , кг	Отсчеты по тензиометрам				
		продольные деформации			поперечные деформации	
		a левый и 0,002 мм	b правый и 0,002 мм	$a+b$ и 0,001 мм	$\Delta l =$ $\frac{(a+b)}{2}$	
						Так как в немногих лабораториях имеются тензиометры для измерения поперечных деформаций круглых образцов, то определение производится в специальном задании

Таблица 5

№ п/п	Нагрузка P , кг	Диаметр образца d , мм	Площадь поперечного сечения F , мм ²	$S_t = \frac{P_t}{F_t}$, кг/мм ²	$\gamma_t = \frac{F_0 - F_t}{F_0}$

Образец сохраняется для дальнейших измерений твердости. Отчетными материалами являются: схемы машины и тензо-

метров, эскиз образца, таблицы 3 и 4 и вычисления величин σ , σ_0 , E , δ , φ , S_0 , S_2 , диаграммы истинных напряжений при растяжении.

Определение предела упругости при растяжении. Для испытания берется металлический образец, например латунный; испытание проводится на одной из описанных ранее машин; деформация измеряется различными приборами, например, тензометром Мартенса, или Мартенса — Кеннеди.

Схема тензометра Мартенса — Кеннеди представлена на рис. 20. Две планки 1 с дугообразными шкалами опираются нижними остриями на образец, а верхними концами — на ром-

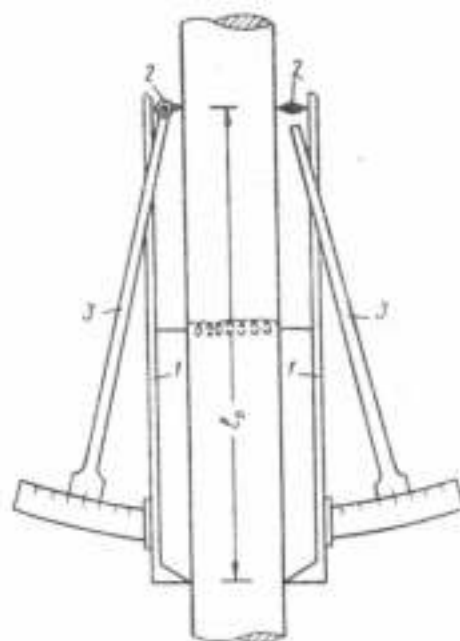


Рис. 20. Схема тензометра Мартенса — Кеннеди

бические призмы 2. К призмам прикреплены стрелки 3. При удлинении образца прижатое к нему ребро ромбической призмы увлекается образцом и призма поворачивается около второго ребра, опирающегося на планку 1; вместе с призмой поворачивается стрелка 3.

Если r — длина большой диагонали ромбической призмы, то удлинение образца $\Delta l = r \sin \varphi$ и соответствующее переме-

щение конца стрелки R будет $a = R\varphi$. Увеличение тензометра $n = \frac{a}{\Delta l} = \frac{R\varphi}{r \sin \varphi} \approx \frac{R}{r}$; по малости угла φ принимаем $\sin \varphi \approx \varphi$. Обычно отношение $\frac{r}{R}$ — длины диагонали призмы к длине стрелки — бывает 0,05, 0,04 или 0,02.

Для определения удлинений нужно брать полусумму отсчетов.

Допуски при определении предела упругости. Нагрузкой P_0 , соответствующей пределу упругости, считается такая нагрузка, при которой получается остаточная деформация, равная наперед заданной величине.

В табл. 6 приведены значения остаточной деформации, соответствующие пределу упругости.

Таблица 6

Величина допуска в % от длины, измеряемой тензометром	Обозначение τ_0
0,001	$\tau_{0,001}$
0,003	$\tau_{0,003}$
0,005	$\tau_{0,005}$
0,08	$\tau_{0,08}$
0,01	$\tau_{0,01}$

Допуск для определения σ_0 в разных странах различный, в СССР часто применяется допуск 0,005.

Порядок выполнения работы. После измерения диаметра образец закладывается и захватывается на нем устанавливается тензометр; дается начальное нагружение и снимаются отсчеты; дальнейшее нагружение ведется ступенями с теми же предосторожностями от перегрузки, как в предыдущем случае. Отличием является то, что после каждой ступени производится разгрузка до величины начального нагружения, и в этот момент снимаются показания тензометра (а не в момент нагружения).

В табл. 7 приведен пример определения предела упругости латуни по допуску 0,01 с тензометром Мартенс — Кеннеди.

Так как допуск 0,01 % при базе прибора в 200 мм соответствует полной остаточной деформации $200 \cdot 0,01 \% = 0,02$ мм,

то опыт прекращают, когда отсчет по тензометру будет больше 0,02 мм. После этого тензометр снимается и машина разгружается.

Таблица 7

Материал—латунь, диаметр образца—20 мм, тензометр—Мартенса—Кеннеди. База прибора 200 мм, цена деления 0,02 мм

№ п/п	Нагрузки P , кг	Отсчеты по тензометру в 0,02 мм		$a + b$	Остаточная деформация в 0,01 $(a + b)_n - (a + b)_{n-1}$
		левый a	правый b		
1	2	3	4	5	6
1	1000	9,2	10,5	19,7	
2	1500	—	—	—	
3	1000	9,1	10,5	19,7	0,0
4	2000	—	—	—	
5	1000	9,5	10,7	20,2	0,5
6	3000	—	—	—	
7	1000	9,5	10,9	20,4	0,7
8	3500	—	—	—	
9	1000	9,6	11,0	20,6	0,9
10	4000	—	—	—	
11	1000	9,7	11,1	20,8	1,1
12	4500	—	—	—	
13	1000	9,8	11,4	21,2	1,5
14	5000	—	—	—	
15	1000	10,0	11,5	21,5	1,8
16	5000	—	—	—	
17	1000	10,1	12,0	22,1	2,4

Рассматривая графу 6 табл. 7 видим, что остаточная деформация в 0,02 мм получается при нагрузках между 5000 и 5500 кг.

Вычисления ведем так же, как в предыдущей работе:

$$P_{0,01} = 5000 + x; \quad x = 500 \frac{2,0 - 1,8}{2,4 - 1,8} = 167 \text{ кг.}$$

$$P_{0,01} = 5000 + 167 = 5167 \text{ кг;} \quad \sigma_{0,01} = \frac{5167}{3,14} = 16,4 \text{ кг/мм}^2.$$

Отчетными материалами являются: схемы машины и тензометра, эскиз образца, табл. 7 и вычисления.

Определение коэффициента Пуассона. Коэффициентом Пуассона называется отношение поперечной относительной деформации $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}$ к продольной относительной деформации $\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1}$:

$$\mu = \frac{|\varepsilon_2|}{|\varepsilon_1|}.$$

Коэффициент Пуассона определяется при растяжении стального плоского образца; опыт производится на пятитонной машине Р-5, схема которой представлена на рис. 21.

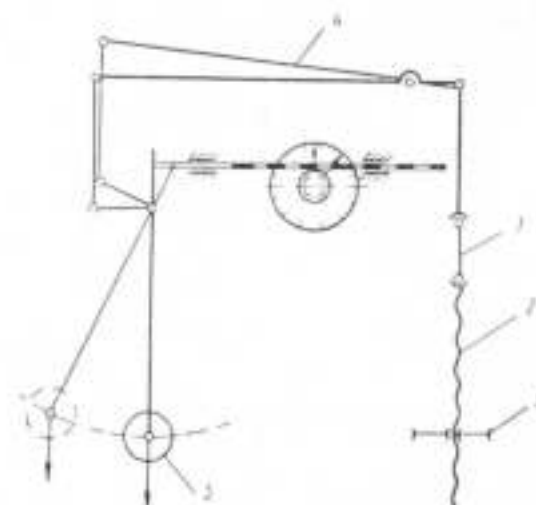


Рис. 21. Схема машины Р-5

При вращении гайки 1 винт 2 опускается и растягивает образец 3. Усилие далее передается через рычаг 4 и уравновешивается тяжелым маятником 5.

Измерение деформаций производится при помощи тензометров Гугенбергера (рис. 22). База прибора 20 или 10 мм. При деформировании образца на Δl верхний конец рычага 3, связанный с призмой 2, перемещается на cc_1 и поворачивает стрелку 4, которая проходит дугу $\lambda\lambda_1$. Винт 5 служит для установки стрелки 4 на нуль шкалы.

Ввиду малости перемещений можно написать:

$$\frac{\Delta l}{cc_1} = \frac{ab}{bc} \cdot \frac{\lambda \lambda_1}{dd_1} = \frac{\lambda f}{df}$$

При $cc_1 = dd_1$ получим:

$$\Delta l = \lambda \lambda_1 \frac{ab \cdot df}{bc \cdot f}$$

Так как ab , df , bc , λf для данного прибора величины постоянные, то $\Delta l = k \lambda \lambda_1$.

Величина k берется обычно 0,001. В силу погрешностей изготовления она отличается от теоретической, поэтому в паспорте каждого прибора должна быть указана величина k , определенная опытным путем при помощи тензокалибратора или зеркального прибора.

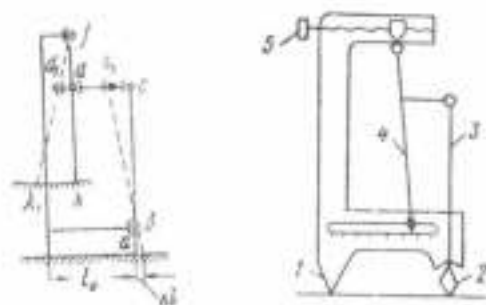


Рис. 22. Схема тензометра Гугенбергера

Шкала прибора разделена на миллиметры и снабжена зеркалом. При отсчете стрелку нужно совмещать с ее зеркальным изображением. Цена одного деления прибора около 0,001 мм, отсчеты берутся с точностью 0,1 мм по шкале.

Порядок выполнения работы. Толщина и ширина образца измеряются микрометром. После этого образец закладывается и захваты машины и на него устанавливаются 4 тензометра: два в продольном направлении и два в поперечном по обеим сторонам образца.

Производится три-пять повторных нагружений в пределах пропорциональности, при этом, чтобы исключить мертвый ход приборов, следует разгружать ниже начальной нагрузки и не перегружать выше предельной. Результаты наблюдений заносятся в табл. 8.

Таблица 8

Нагрузка P , кг	Отсчеты по тензометрам в 0,001 мм							
	продольные				поперечные			
	a_1	Δa_1	a_2	Δa_2	b_1	Δb_1	b_2	Δb_2
	Среднее Δa_1		Среднее Δa_2		Среднее Δb_1		Среднее Δb_2	

Из данных табл. 8 вычисляются средние арифметические величины продольных и поперечных деформаций, а по ним величина μ .

Отчетными материалами являются: схемы машины и тензометра, эскиз образца, табл. 8 и вычисления величины μ .

Испытание на сжатие

Цели работы:

- 1) Ознакомление с испытательными машинами и измерительной аппаратурой.
- 2) Построение диаграммы сжатия.
- 3) Определение величин $\sigma_{0,2\text{сж}}$ и $\sigma_{0,5\text{сж}}$.

Испытание на сжатие является основным при определении качества хрупких материалов: чугуна, фарфора, естественных и искусственных строительных материалов и др. Некоторые вязкие материалы, как например баббиты, также подвергаются испытанию на сжатие с целью определения сопротивления смятию. Образцы из пластичного материала от сжатия, как правило, не разрушаются.

На рис. 23 представлена диаграмма сжатия мягкой стали, из которой видно, что усилие сжатия непрерывно возрастает, поскольку увеличивается поперечное сечение; при этом вследствие влияния сил трения, возникающих по торцам образца, он принимает бочкообразную форму (рис. 24).

Результаты испытаний на сжатие в сильной степени зависят от условий трения по торцам и от отношения высоты к диаметру образца. Круглые образцы из пластического материала при устранении трения сжимаются, сохраняя начальную форму образца, что может быть достигнуто, если заменить плоские поверхности обоих торцов поверхностями входящего конуса. Образующая этого конуса должна составлять с пло-

скостью торца угол α , равный углу трения между плитой пресса и торцом образца (рис. 25). Так же действуют широкие, но неглубокие пазы по торцам образца, заполненные вазелином или парафином.

Хрупкие материалы разрушаются от сжатия и поэтому этот вид испытания широко применяется для определения механических свойств хрупких материалов.

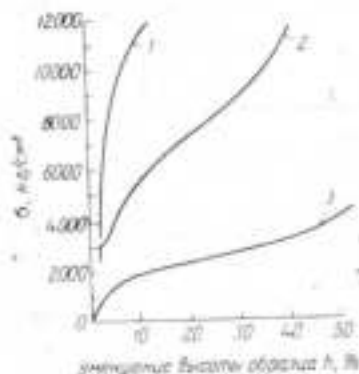


Рис. 23. Диаграммы сжатия: 1 — чугуна, 2 — малоуглеродистой стали и 3 — цинка

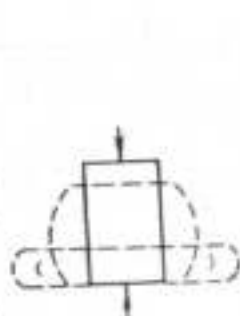


Рис. 24. Изменения формы образца из пластичного металла при сжатии

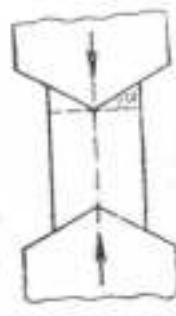


Рис. 25. Схема сжатия образца с конусными углублениями

Образцы для испытания на сжатие чугунов по ГОСТу 2055-43 должны иметь диаметр от 10 до 25 мм и высоту, равную диаметру. Особое внимание должно быть обращено на чистоту изготовления и параллельность торцов и перпендикулярность их оси образца. Образцы из дерева готовятся в виде кубов.

Модуль упругости при сжатии, пределы пропорциональности, упругости и текучести определяются на сравнительно длинных образцах. Примерная форма образца приведена на рис. 26. Методика определения E , σ_{-p} , σ_{-a} , σ_{-s} та же, что и при растяжении.

Механические характеристики, определяемые при испытании на сжатие. Предел прочности на сжатие $\sigma_{0.сж} = \frac{P_0}{F_0}$ есть отношение максимальной нагрузки P_0 к площади поперечного сечения образца F_0 до испытания. Следует иметь в виду, что $\sigma_{0.сж}$ сильно зависит от отношения $\frac{h_0}{d_0}$, где h_0 и d_0 — вы-

сота и диаметр образца до испытания. С уменьшением $\frac{h_0}{d_0}$ величина $\sigma_{0.сж}$ увеличивается.

При испытании на сжатие хрупких материалов следует тщательно центрировать образцы, т. е. добиваться совпадения сжимающей силы с осью образца; это достигается при помощи

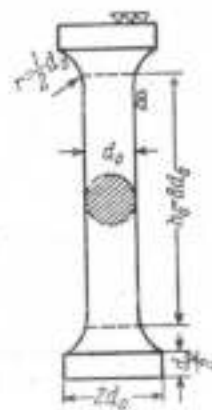


Рис. 26. Образец для испытания на сжатие

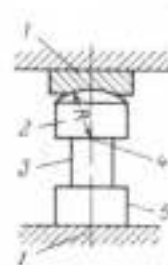


Рис. 27. Шаровые опоры для испытания на сжатие: 1 — плита машины; 2 — опоры с шаровой поверхностью; 3 — образец; 4 — центр шаровой поверхности и 5 — опорная подушка

шаровых опор (рис. 27) и специальных приспособлений. Торцы образца и опорные плиты должны быть тщательно очищены от смазки.

Вид разрушения хрупких материалов зависит от отношения $\frac{h_0}{d_0}$. При отношении $\frac{h_0}{d_0}$, близком к единице, разрушение образцов из хрупких материалов начинается с образования трещин по двум конусам, направленным вершинами друг против друга (конуса разрушения), с последующим выкрашиванием боковых частей (рис. 28). Образцы из того же материала при отношении $\frac{h_0}{d_0} > 2$ разрушаются при сжатии по трещине, вызванной скольжением двух половинок образца по

скошенным конусообразным поверхностям (рис. 29). Сжатие образцов из хрупких материалов при ослаблении трения по торцам вызывает понижение предела прочности на сжатие и разрушение по продольным трещинам.



Рис. 28. Вид разрушения образца из хрупкого материала при $\frac{h_0}{d_0} \approx 1$

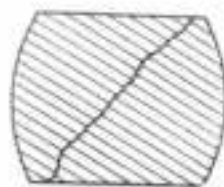


Рис. 29. Вид разрушения образца из хрупкого материала при $\frac{h_0}{d_0} \approx 2$

Порядок выполнения работы. Испытание на сжатие производится на прессе или на универсальной машине на растяжение — сжатие. Испытываются: чугун, сталь, камень, дерево вдоль и поперек волокон.

В результате испытания определяется временное сопротивление сжатию $\sigma_{\delta \text{ сж}}$ и относительная усадка до момента разрушения $\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$.

Отчетными материалами являются: схема пресса и эскизы образцов, диаграммы сжатия, таблицы полученных величин, схемы разрушения образцов.

Испытание на кручение

Цели работы:

- 1) Ознакомление с испытательными машинками и измерительной аппаратурой.
- 2) Построение графиков $M \sim \varphi$ и $\tau \sim \gamma$.
- 3) Определение величин: G , τ_p , τ_{δ} , $\tau_{\text{ср}}$, $\tau_{\text{сж}}$.

Испытание на кручение дает возможность определить механические свойства в условиях чистого сдвига.

При кручении форма круглого образца не изменяется. Это дает возможность определить деформации и соответствующие им напряжения при больших деформациях. Хрупкие при растяжении материалы, как например, закаленная сталь, дают при кручении значительную деформацию.

Легко установить характер разрушения скрученных образцов: поверхность разрушения, перпендикулярная оси образца, указывает на разрушение от среза, винтовая поверхность — на разрушение от отрыва (рис. 30).

Так как при кручении шейка не образуется, то диаграммы кручения (рис. 31) не имеют нисходящего участка и крутящий момент M после площадки текучести непрерывно возрастает вплоть до разрушения, благодаря чему исключаются



Рис. 30. Типы разрушения при кручении: а) от среза, б) от отрыва, в) от неоднородности

трудности измерения нагрузок и деформаций, имеющих место при падении нагрузки в случае растяжения. Поэтому определение истинных напряжений при кручении значительно проще, чем при растяжении, тем более, что не нужно измерять поперечное сечение образца во время опыта*.

На рис. 32 представлено распределение напряжений при кручении. Элемент цилиндрической поверхности $abcd$ находится в состоянии чистого сдвига; его стороны до деформации были параллельны оси цилиндра, возникающая деформация характеризуется относительным сдвигом $\gamma = \frac{cc'}{ac}$; так как $cc' = \frac{1}{2} D d\varphi$, где D — диаметр, то $\gamma = \frac{1}{2} D \frac{d\varphi}{dx}$; но $\frac{d\varphi}{dx}$ есть относительный угол закручивания θ , а поэтому $\gamma = \frac{1}{2} \theta D$. В поперечных и продольных сечениях действуют напряжения сдвига $\tau = G\gamma = \frac{1}{2} G\theta D$, где G — модуль сдвига.

* По-видимому, в момент разрушения при кручении в зоне излома происходит дополнительная локальная деформация. Вычисленные для этого момента деформации и напряжения не соответствуют действительным.

В материалах, сопротивление которых продольному сдвигу меньше, чем поперечному, первые трещины при кручении возникают от напряжений сдвига в продольном направлении, как это бывает, например, при скручивании деревянного вала с волокнами, расположенными параллельно его оси.

В элементе $abcd$ по площадкам, наклоненным под углом 45° к его граням, действуют главные напряжения, численно равные касательному напряжению τ . Их действием и обуславливается разрушение по винтовой поверхности образцов из материалов с сопротивлением отрыву меньшим, чем сдвигу (чугун).

Наилучшими образцами для испытаний на кручение являются тонкостенные трубы, так как в них распределение напряжений почти равномерно. Однако трубчатые образцы во вре-

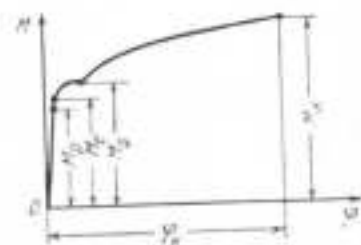


Рис. 31. Диаграмма кручения

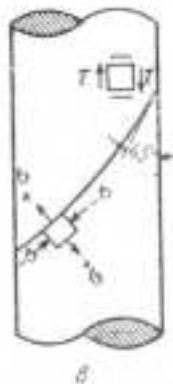


Рис. 32. Распределение напряжений при кручении

мя испытания часто теряют устойчивость и поэтому редко применяются. Обычно для испытания на кручение применяют-

ся образцы в виде сплошных цилиндров; по ГОСТу 3565-47 нормальным считается образец диаметром 10 мм с расчетной длиной $l = 100 \text{ мм}^*$.

На диаграмме кручения (рис. 31) ординаты M_p , M_e , M_s , M_b обозначают моменты, отвечающие соответственно пределам пропорциональности τ_p , упругости τ_e , текучести τ_s и τ_b и, временно, сопротивлению при кручении τ_b .

Порядок определения G , τ_p и τ_e при кручении аналогичен применяемому для определения E , σ_p и σ_e при растяжении.

Допуск при определении τ_p может быть взят таким же, как и для σ_p . Предел пропорциональности при испытании на кручение определяется в опытах с последовательно возрастающими нагрузками (ступенями) с замером углов закручивания на каждой ступени нагружения. Момент кручения M_p соответствует ступени нагружения, при котором приращение угла закручивания равно полуторной величине среднего приращения указанного угла в прямолинейной начальной части кривой кручения, т. е. $\Delta\phi + \gamma = 1,5 \Delta\phi_e$.

Что касается допусков для определения пределов упругости и текучести, то они должны быть выбраны так, чтобы значения τ_e и τ_s соответствовали их значениям, полученным из опытов при других видах деформирования и прежде всего при растяжении. Известно, что $\gamma = 1,5 \epsilon$, где γ — относительный сдвиг, а ϵ — относительное удлинение. Поэтому при определении предела упругости и условного предела текучести при кручении допуски по относительному сдвигу γ , отвечающие остаточным относительным удлинениям $\epsilon = 0,002\%$ (для $\sigma_{0,002}$) и $\epsilon = 0,2\%$ (для $\sigma_{0,2}$), будут соответственно равны $0,003\%$ для $\tau_{0,003}$ и $0,3\%$ для $\tau_{0,3}$.

Подсчет напряжений и деформаций в пределах применимости закона Гука (пропорциональности) и небольших отклонений от него производится по обычным формулам сопротивления материалов: для цилиндрических сплошных образцов

$$\tau = \frac{16M}{\pi D^3}; \quad \varphi = \frac{32Ml}{G\pi D^4}; \quad \gamma = \frac{D}{2l}\varphi;$$

* Расчетная длина l_0 — расстояние между двумя сечениями, где определяется угол закручивания.

** Величина физического предела текучести при кручении соответствует горизонтальному участку (текучести) на диаграмме кручения. Горизонтальный участок диаграммы (площадка текучести) часто наблюдается при кручении трубчатых образцов из мягкой стали и иногда сплошных цилиндрических. Для материалов, не имеющих участка текучести, определяется условный предел текучести $\tau_{0,2}$.

для трубчатых образцов

$$\tau = \frac{16M}{\pi D^3 \left(1 - \frac{D_1^4}{D^4}\right)}; \quad \bar{\tau} = \frac{32M_0}{\pi G (D^4 - D_1^4)},$$

где D — внешний, D_1 — внутренний диаметры. При скручивании за пределом пропорциональности напряжения распределяются в сечении по некоторой кривой (рис. 33). В этом случае напряжения при кручении сплошных цилиндрических стержней вычисляются по формуле Льюдвига — Кармана:

$$\tau = \frac{4}{\pi D^3} \left(3M + G \frac{dM}{d\theta} \right),$$

где $\theta = \frac{\gamma}{l_0}$ — относительный угол закручивания. Поскольку площадка текучести параллельна оси абсцисс, на ней

$$\frac{dM}{d\theta} = 0,$$

а следовательно, величина физического предела текучести при кручении будет равна:

$$\tau_s = \frac{12M_s}{\pi D^3}.$$

Напряжения за пределом упругости в тонкостенных трубчатых образцах вычисляются по формуле:

$$\tau = \frac{2M}{F_0 D_0},$$

где F_0 — площадь поперечного сечения трубы, $D_0 = \frac{D + D_1}{2}$ — средний диаметр трубчатого сечения.

Машины и измерительные приборы. Испытание на кручение производится обычно на горизонтальных машинах.

Машины с маятниковым измерением крутящего момента. На рис. 34 представлен общий вид машины ЦНИИТМАШ МК-20, а на рис. 35 — схема машины Амслера. Образец 1 закрепляется в захватах 2 и 3. Захват 2 вращается в неподвижном подшипнике 4 от червячного колеса 5. Углы поворота захвата 2 отмечаются укрепленным на нем указателем 6 на неподвижной шкале 7, расположенной на подшипнике 4. За-

хват 3 составляет одно целое с тяжелым маятником 8 и вращается в шарикоподшипнике 9. Этот захват может перемещаться по горизонтальным направляющим 10 и устанавливаться на необходимом расстоянии от зажима 2. Крутящий

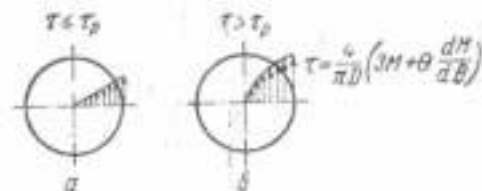


Рис. 33. Распределение напряжений по сечению скрученного круглого стержня: а) до предела пропорциональности; б) в упруго-пластической области.

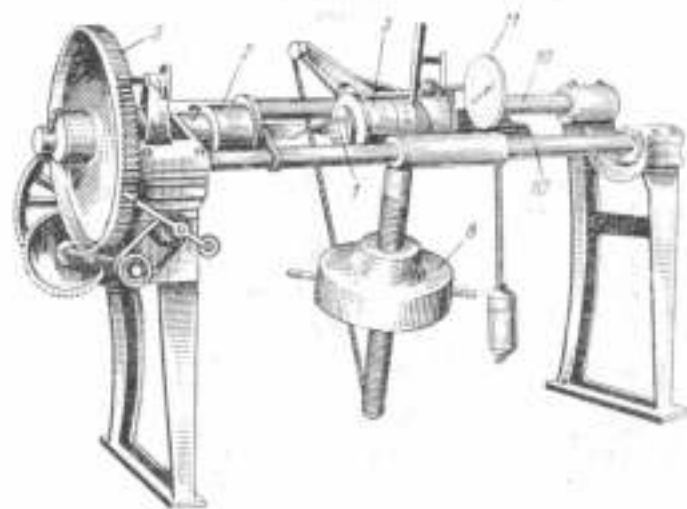


Рис. 34. Общий вид машины на кручение МК-20 с маятниковым измерением момента

момент, приложенный к образцу через захват 2, уравновешивается моментом маятника. Отклонение маятника регистрируется стрелкой измерительного устройства 11, шкала которого проградуирована в кг·м.

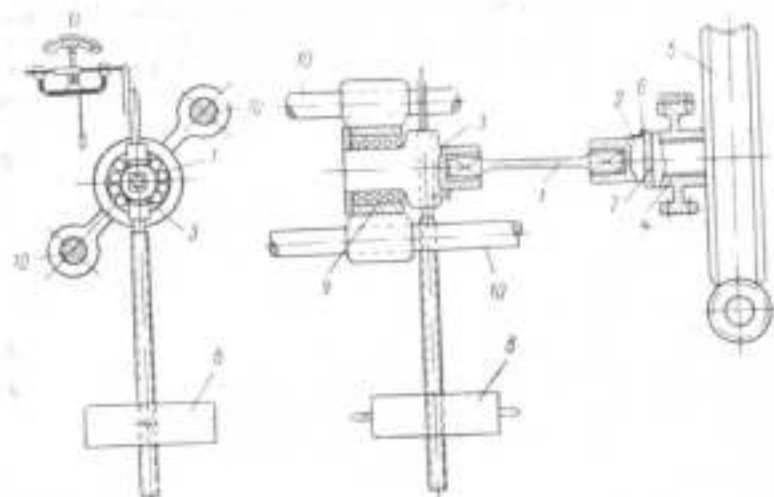


Рис. 35. Схема машины Анслера с маятниковым измерением момента

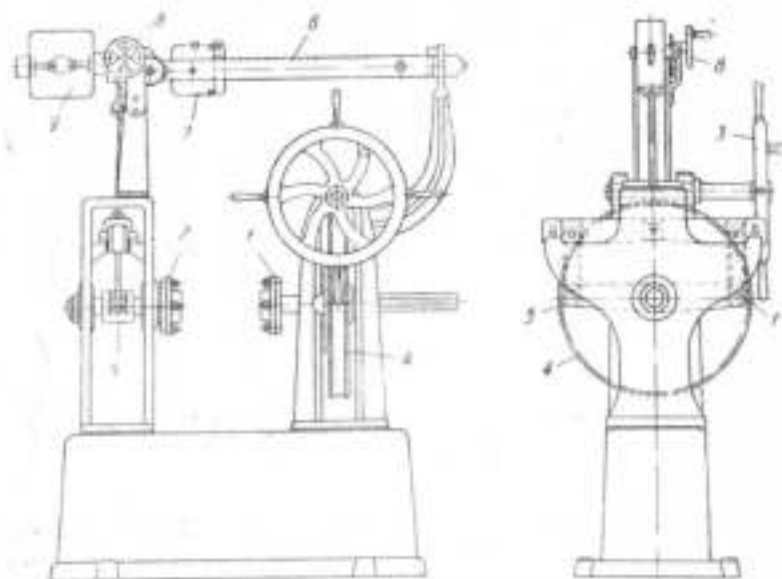


Рис. 36. Схема реверсивной машины на кручение

Машины с рычажным измерением крутящего момента. На рис. 36 представлена схема машины реверсивного действия. Образец закрепляется в захватах 1 и 2. Вращение захвата 1 осуществляется ручным маховиком 3 при помощи червячной шестерни 4. Этот захват может иметь поступательное перемещение, позволяющее производить на машине испытания образцов разной длины. Крутящий момент, воспринимаемый захватом 2, передается рычагом 5 на измерительный рычаг 6.

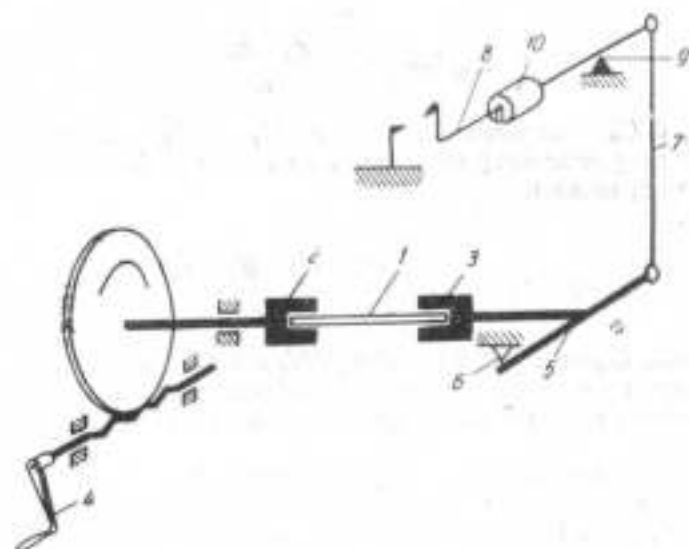


Рис. 37. Схема машины на кручение с рычажным измерением момента

где и уравнивается моментом груза 7, перемещаемого вращением рукоятки 8. Противовес 9 служит для уравнивания рычага 6 при положении груза 7 на нуле. Для измерения углов закручивания служит градуированное кольцо, закрепленное на червячной шестерне 4.

Другая схема машины с рычажным измерением представлена на рис. 37. Образец 1 крепится в захватах 2 и 3. Захват 2 получает вращение через червячный редуктор и шестерню от ручки 4. Захват 3 воспринимает крутящее усилие от образца и передает на поперечный рычаг 5, у которого один конец является шарниром 6, другой соединен с подвижной тягой 7, которая передает усилие на коромысло 8, опирающееся на неподвижную призму 9. Посредством подвижного груза 10 достигается уравнивание коромысла 8. На шкале коромысла нанесены деления в кгм.

Зеркальный прибор (рис. 38). Угол закручивания φ определяется как разность углов α_1 и α_2 поворота сечений I_1 и I_2 , ограничивающих расчетную длину образца l_0 . Углы α_1 и α_2 отсчитываются по шкалам 2, отражающимся в зеркалах 1. Ввиду малости углов α можно принять:

$$2\alpha_1 \approx \lg 2\alpha_1 = \frac{C_1 - C_0}{L}$$

и

$$2\alpha_2 \approx \lg 2\alpha_2 = \frac{C_2 - C_0}{L}$$

где C_0 и C'_0 — первоначальные, а C_1 и C'_1 — последующие (после закручивания) отсчеты по шкалам 2; L — расстояние зеркала от шкалы.

Отсюда

$$\varphi = \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{(C_1 - C'_1) - (C_0 - C'_0)}{2L}$$

L обычно берется равным 1000, 1500 и 2000 мм.

Чтобы не вводить поправку, связанных с заменой углов их тангенсами, целесообразно применять вогнутые шкалы радиуса L .

Угломер (рис. 39). Прибор состоит из двух колец 1, которые при помощи винтов крепятся на образец на расстоянии l_0 друг от друга. С левым кольцом жестко связана угловая шкала 3, а с правым — стрелка 2, которые и показывают угол закручивания.

Порядок проведения работы. Определение модуля упругости сдвига и величин главных напряжений в круглом образце.

Круглый образец закрепляется в захватах машины. Углы поворота сечений при кручении определяются зеркальным прибором. Для определения главных нормальных напряжений на поверхности образца наклеиваются под углом 45° к образующей два проволочных датчика (рис. 40), которые подключаются к клеммам прибора. Перед испытанием необходимо вычислить по формуле $M_p = \tau_p W_p$ величину крутящего момента, соответствующего пределу пропорциональности; в опыте величина крутящего момента должна быть меньше M_p .

Предварительно дается начальный момент M_0 , соответствующий напряжению $\tau_0 = 1,5 - 2,5$ кг/мм², и делаются первые отсчеты по всем приборам. Далее даются одинаковые приращения крутящего момента ΔM и после каждого нагружения снимаются показания приборов. Для стального образца

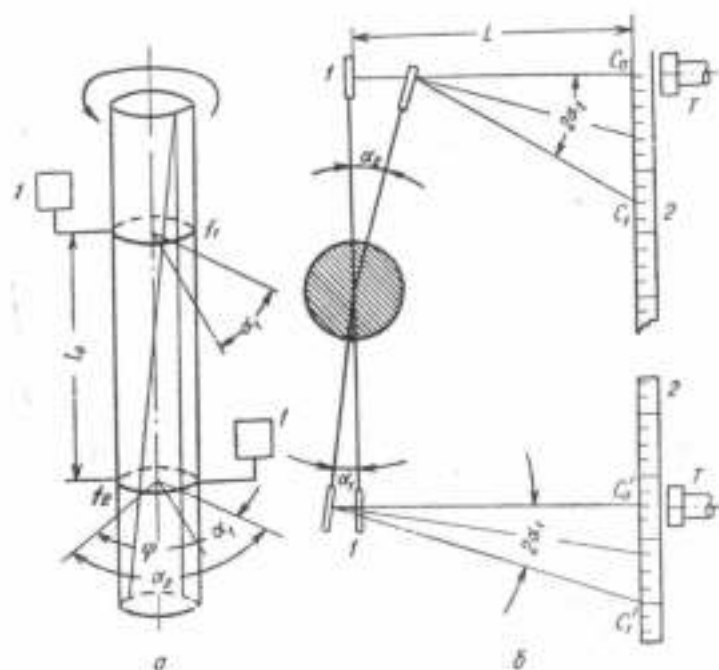


Рис. 38. Зеркальный прибор для измерения углов закручивания

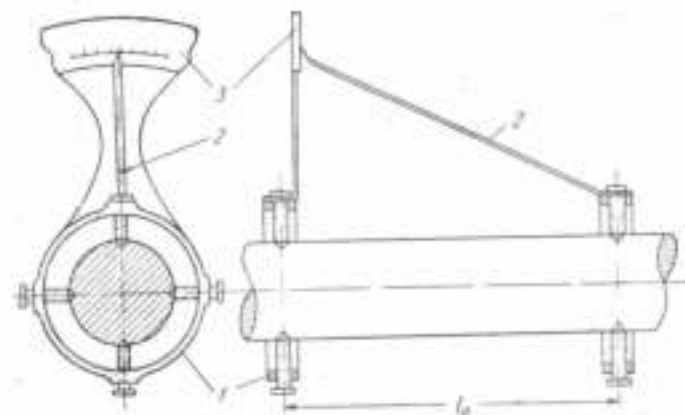


Рис. 39. Угломер. Схема прибора

следует давать ступени нагружения, соответствующие напряжениям $\Delta\sigma = 1-1,5 \text{ кг/мм}^2$. По окончании опыта образец разгружается до M_0 и делаются контрольные отсчеты, которые при удовлетворительном проведении опыта должны совпадать с первоначальными.

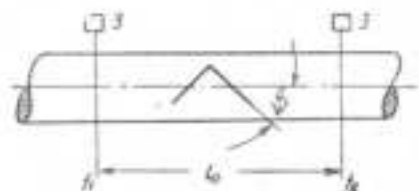


Рис. 40. Схема установки зеркального прибора и датчиков.

Данные опыта записываются в журнал наблюдений (табл. 9).

Таблица 9

Материал Предел пропорциональности кг/мм²
Диаметр образца $d = \dots$ мм Расчетная длина $l = \dots$ мм
Полярный момент инерции сечения $I_p = \dots$ мм⁴
Момент сопротивления $W_p = \dots$ мм³

№ п/п	Крутящий момент M , кгсм	Показания зеркального прибора				$\Delta C - \Delta C'$	Показание датчиков	
		левое зеркало		правое зеркало			A	ΔA
		C	ΔC	C'	$\Delta C'$			
1	M_0							
2	$M_0 + \Delta M$							
3	$M_0 + 2\Delta M$							
4	и т. д.							

По среднему значению величины $\Delta C - \Delta C'$ находится среднее значение угла закручивания сечения 1 относительно сечения 2 соответствующее приращению момента ΔM :

$$\Delta\tau = \frac{\Delta C - \Delta C'}{2L},$$

где L — расстояние от зеркала до шкалы. В результате опыта

строится зависимость: момент — угол закручивания ($M \sim \varphi$). Полученные на диаграмме точки при тщательном проведении опыта ложатся на одну прямую. Этим подтверждается закон Гука при кручении.

Определяем модуль сдвига:

$$G = \frac{\Delta M l_p}{\Delta\varphi l_p}.$$

Определив среднее значение приращения показаний датчиков и умножив его на тарировочный коэффициент α , получим величину деформации волокна, расположенного под углом 45° к образующей:

$$\Delta\epsilon = \alpha \Delta A.$$

Теперь можно определить величину нормальных напряжений

$$\Delta\sigma = \frac{E}{1 + \mu} \Delta\epsilon$$

и сравнить ее с величиной касательных напряжений

$$\Delta\tau = \frac{\Delta M}{W_p}.$$

Значения $\Delta\sigma$ и $\Delta\tau$ должны совпадать.

Определение временного сопротивления при кручении хрупкого материала. Обычный серый чугун является металлом, у которого сопротивление отрыву меньше сопротивления срезу, поэтому он при кручении разрушается в упругой области от растягивающих напряжений.

Чугунный образец после необходимых измерений закручивается до разрушения. Отмечается величина наибольшего момента M_k , по которой и определяется $\tau_k = \frac{M_k}{W_p}$.

Определение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и временного сопротивления σ_b при кручении пластичного металла. Образец с установленным на нем угломером закрепляется в захватах машины. Нагружение сначала ведется равными ступенями с $\Delta\sigma = 2 \text{ кг/мм}^2$, а за моментом, соответствующим пределу пропорциональности, ступени задаются углом закручивания ($\sim 30^\circ$). На каждой ступени делаются соответствующие отсчеты и заносятся в журнал наблюдений (табл. 10).

Журнал наблюдений при испытании на кручение

Материал $d = \text{мм}$, $l = \text{мм}$

№ п/п	Крутящий момент M , кг·мм	Угол закручивания φ		Относительный угол закручивания $\theta = \frac{\varphi}{l}$	$\frac{dM}{d\theta}$	$\tau = \frac{\kappa \varphi}{\text{мм}^2}$	$\gamma = \frac{\varphi D}{2l}$
		в градусах	в радианах				
1	2	3	4	5	6	7	8

По данным граф 2 и 5 табл. 10 строится кривая кручения в координатах $M \sim \theta$.

По этой кривой определяются величины $\frac{dM}{d\theta}$, которые удобно определять при помощи зеркальной линейки (рис. 41).

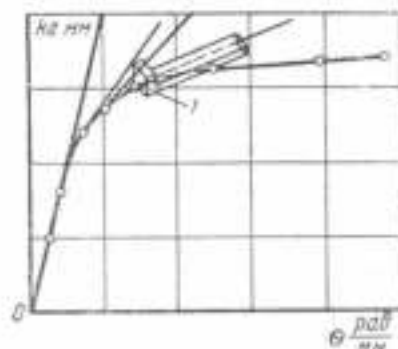


Рис. 41. Построение касательных к кривой кручения при помощи зеркальной линейки

В графу 7 записываются значения τ , вычисленные по формуле Льюдвика — Кармана, а в графу 8 — величины относительного сдвига. По данным граф 7 и 8 строится кривая кручения в координатах $\tau \sim \gamma$.

Условный предел текучести определяется графически по кривой кручения $\tau \sim \gamma$ (рис. 42). По оси γ откладывается допуск условного предела текучести 0,3% и от этой точки проводится прямая, параллельная начальному участку кривой. Ордината точки пересечения этой прямой с кривой кручения является условным пределом текучести $\tau_{0.3}$. Временное сопротивление при кручении τ_k определяется как ордината крайней точки кривой кручения на рис. 42.

Характеристикой пластичности при кручении является относительный сдвиг:

$$\gamma = \frac{\tau_k D}{2l},$$

где φ_k — угол закручивания в момент разрушения в радианах, l_0 — расчетная длина, а D — диаметр образца.

Отчетными материалами являются: схема машины и приборов, эскизы образцов, журналы наблюдений и таблицы 8 и 9, графики $M \sim \theta$ и $\tau \sim \gamma$, зарисовки поверхностей разрушений.

Испытание на изгиб

Цели работы:

- 1) Проверка основных гипотез, используемых в сопротивлении материалов при решении задач об изгибе бруса.
- 2) Опытная проверка теоремы взаимности.
- 3) Ознакомление с электрическими методами измерения деформаций.

Электрический метод измерения деформаций. Проволочный датчик сопротивления. Для определения относительного удлинения $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ надо измерить изменение Δl расстояния l между двумя точками.

Отсчеты удлинений в телах сравнительно малых размеров или из жесткого материала снимаются после их увеличения с помощью различного рода тензометрических устройств. В частности изменение расстояний между точками можно связать с изменением электрических величин: емкости, сопротивления, индуктивности. Приспособление, преобразующее изменение расстояния в изменение электрической величины, называют тензодатчиком, или датчиком деформации. Наибольшее распространение получали проволочные датчики сопротивления. Хотя измерения деформаций с помощью таких датчиков требует специальной аппаратуры, этот метод обладает некото-

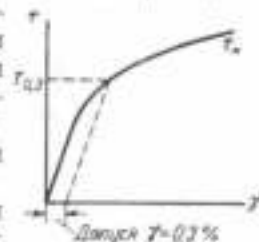


Рис. 42. Схема определения условного предела текучести $\tau_{0.3}$ и истинного предела прочности τ_k при кручении пластичного металла

рыми преимуществами перед измерениями с помощью механических тензометров. Портативность датчика и удобство его крепления (наклейка) позволяют использовать его как на образцах, так и на целых конструкциях и сооружениях. При этом один и тот же измерительный прибор может быть с помощью переключателя быстро подключен к любому из датчиков, что важно при осуществлении многоточечного тензометрирования. Датчики сопротивления могут быть, ввиду их почти полной безинерционности, приспособлены для измерения динамических деформаций (при колебаниях, при распространении волн). Точность измерений с помощью проволочных датчиков несколько уступает точности тензометров типа Мартенса, но достаточна не только для технических, но и для научно-исследовательских целей.

Принцип действия проволочного датчика сопротивления прост. Так как электрическое сопротивление цилиндрического проводника при данной температуре зависит от длины и площади поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{F},$$

где ρ — удельное сопротивление, l — длина, $F = \frac{\pi d^2}{4}$ — площадь поперечного сечения, то проволочка, наклеенная на поверхность тела между точками A и B , будет изменять сопротивление при изменении расстояния между A и B вследствие деформации. При этом, если проволочка удлиняется или укорачивается в пределах упругости, относительное изменение ее сопротивления $\frac{\Delta R}{R}$ пропорционально относительному удлинению $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$. Действительно, при упругих деформациях

$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \varepsilon,$$

(где μ — коэффициент Пуассона), а потому при неизменном удельном сопротивлении

$$\frac{R + \Delta R}{R} = \frac{l + \Delta l}{(d + \Delta d)^2} \cdot \frac{l}{d^2};$$

откуда, отбрасывая малые порядка выше первого, находим

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta d}{d} = \varepsilon (1 + 2\mu).$$

В этой формуле не учтены некоторые факторы, например, изменение удельного сопротивления, зигзагообразность прово-

локи и датчиках, влияние склеивающих и изолирующих слоев и т. д. Поэтому зависимость между $\frac{\Delta R}{R}$ и ε можно записать в виде:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \varepsilon,$$

где S — коэффициент, называемый тензочувствительностью. Он обычно лежит в пределах от 1,8 до 2,3.

Так как при упругих деформациях ε мало, то в короткой проволочке (когда R мало) мало и изменение электрического сопротивления. Для датчика с сопротивлением 200 ом изменение сопротивления составляет не более 1—2 ом. Поэтому для увеличения R датчик изготавливают в виде зигзагообразной проволочки, а для измерения малой электрической величины ΔR используют дифференциальные методы. Упрощенная схема измерения с помощью мостика Уитстона приведена на рис. 43. Если R_1 — датчик сопротивления, а сопротивления R_2, R_3, R_4 подобраны так, что мостик при отсутствии деформации находится в равновесии, т. е. разность потенциалов между точками A и B равна нулю (для этого, как известно, необходимо соблюдение равенства $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$), то стрелка гальванометра, включенного в измерительную диагональ AB , будет стоять на нуле. Если теперь вследствие деформации тела, на которое наклеен датчик, сопротивление R_1 изменится, то баланс мостика нарушится и стрелка гальванометра отклонится.

Датчик можно протарировать прямо по показаниям гальванометра. Однако обычно поступают иначе: одно из сопротивлений, например R_3 , делают переменным и при нарушении баланса моста изменяют его так, чтобы восстановить баланс*.

Регулируемое изменение сопротивления R_3 в этом случае и является измеряемой величиной, которая, как и R_1 , пропор-

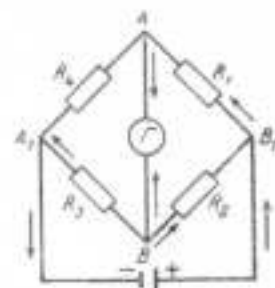


Рис. 43. Упрощенная схема измерения с помощью мостика Уитстона

* Если сопротивление R_1 изменилось в k раз (k — положительное, целое число или дробь — правильная или неправильная), то для восстановления баланса надо сопротивление R_3 изменить также в k раз, так как тогда равенство $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ равносильно равенству $kR_1 \cdot R_3 = kR_2 \cdot R_4$.

циональна ϵ . Изменение R_2 и его измерение основано на том же принципе датчика сопротивления. Само сопротивление R_2 изготавливается в виде проволоочного датчика, наклеенного на консольную измерительную балочку (рис. 44). Такая система образует бесконтактный реохорд.

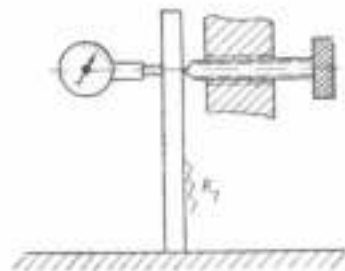


Рис. 44. Консольная измерительная балочка

Так как в пределах упругости удлинения продольных волокон балки пропорциональны прогибу, то изменение R_2 будет также пропорционально прогибу, измеряемому с помощью индикатора*.

Соответствие между показаниями индикаторов и деформацией ϵ (т. е. изменением R_2) устанавливается при тарировании. При нарушении баланса мостика винт B вращают до тех пор, пока баланс не восстановится.

Очень важным при пользовании проволоочными датчиками сопротивления является вопрос температурной компенсации. Хотя при малых колебаниях температуры изменений сопротивлений малы, но они часто оказываются сравнимыми с измеряемыми изменениями сопротивлений вследствие деформации. Для осуществления температурной компенсации сопротивление R_4 можно изготовить в виде такого же датчика, как R_1 и поместить его в те же температурные условия, как R_1 , например наклеить его на такой же кусок материала и поместить рядом с R_1 . Так же можно поступить и с сопротивлением R_2 и R_3 . Тогда изменение вследствие нагрева R_1 в λ раз будет сопровождаться изменением R_4 также в λ раз, а изменение R_2 в κ раз — изменением R_3 также в κ раз, так что из равенства $\lambda R_1 \kappa R_3 = \kappa R_2 \lambda R_4$ будет вновь следовать равенство $R_1 R_3 = R_2 R_4$, т. е. нарушения баланса моста от температуры не произойдет.

В настоящее время разработаны способы использования проволоочных тензодатчиков не только при упругих, но и при пластических деформациях.

* Линейная зависимость не является принципиально важной и представляет лишь дополнительное удобство. Важно лишь, чтобы зависимость между удлинением и прогибом была взаимно однозначной, одинаковой при нагрузке, разгрузке и повторных циклах.

Тарирование датчиков сопротивления. Для тарирования проволоочных датчиков сопротивления удобно использовать балку равного сопротивления на изгиб.

При постоянной толщине h (высоте) балки прямоугольного сечения деформация продольного волокна на верхней или нижней поверхности балки прямо пропорциональна значению изгибающего момента M и обратно пропорциональна жесткости балки в этом сечении:

$$\epsilon = \frac{My}{EI}$$

В консольной балке с сосредоточенной силой на конце изгибающий момент возрастает по линейному закону от нуля на конце до максимального значения у заделки. Если по тому же закону будет изменяться жесткость EI , то относительное удлинение ϵ во всех точках верхней или нижней поверхности будет одинаково.

Для однородной балки E постоянно; для линейного изменения EI должен линейно меняться момент инерции I , а для этого при постоянной толщине должна по линейному закону изменяться ширина балки, т. е. в плане она должна иметь трапециевидную форму.

Наклеив в какой-нибудь точке верхней поверхности балки датчик R_1 и обеспечив температурную компенсацию с помощью датчика R_4 , рядом с датчиком R_1 помещают, например, стрелочный рычажный тензометр. Мостик балансируется с помощью сопротивления R_2 , как указано выше. Затем к концу тарировочной балки подвешивается груз, что вызывает нарушение баланса моста. При восстановлении баланса стрелка индикатора сместится на несколько делений. По тензометру определяется деформация, соответствующая показанию индикатора. Затем груз изменяется, и вся процедура повторяется до нового значения деформации. Так как тарировочная балка работает в пределах упругости, то при повторном тарировании нет необходимости использовать тензометр, поскольку при первом тарировании устанавливается соответствие между продольной деформацией и силой (грузом) на конце балки.

Наклеенный для тарирования проволоочный датчик нельзя отклеивать, использовать для измерений. Поэтому проволоочные датчики изготавливаются партиями одинакового качества, и тарирование ведется выборочно — несколько экземпляров из партии.

Электронный измеритель статических деформаций. Для статических измерений деформаций в МГУ используется электронный прибор типа.

Диапазон измерения относительных удлинений лежит в пределах от $0,57 \cdot 10^{-3}$ до $570 \cdot 10^{-3}$ с погрешностью не более $\pm 0,57 \cdot 10^{-3}$, что соответствует цене одного деления шкалы прибора для датчиков из константановой проволоки диаметром 0,03 мм, имеющих базу 10 мм и сопротивление 200 Ом. Тензочувствительность такого датчика $S=2,18$. Питание мостика осуществляется переменным током частоты 15–16 герц при напряжении на клеммах датчиков от 2,8 до 3,2 в от лам-

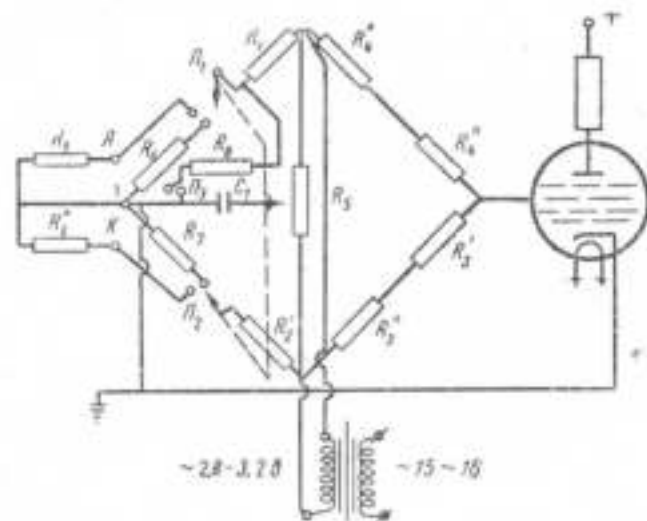


Рис. 45. Мостовая схема с балансировкой по реактивной составляющей сопротивления

пового генератора. Электрические сигналы от мостовой схемы подаются на усилитель, выход которого связан с ламповым вольтметром. Использование в усилителе избирательного каскада достигается подавление помех от сети питания прибора. Питание прибора от сети переменного тока с напряжением 220 в производится через феррорезонансный стабилизатор напряжения.

Мостовая схема усложнена по сравнению с рис. 43 и учитывает, в частности, необходимость балансировки моста по реактивной составляющей сопротивления, возникающей при прохождении переменного тока. В каждом плече моста сопротивление R_i состоит из двух отдельных сопротивлений R_i' и R_i'' (рис. 45). Сопротивления R_i' и R_i'' представляют собой соответственно активный (измерительный) и компенсирующий

датчики, находящиеся вне прибора, на исследуемой детали; клеммы «О» (общая), «А» (активного датчика) и «К» (компенсирующего датчика) выведены на заднюю стенку прибора. На измерительную балку прибора с двух сторон наклеены попарно датчики R_1' , R_1'' и R_2' , R_2'' , так что при изгибе измерительной балки увеличение сопротивлений R_1' и R_2' сопровождается уменьшением сопротивлений R_1'' и R_2'' , что приводит к нарушению баланса моста или к его восстановлению в мостике с нарушенным балансом. Такой способ увеличивает чувствительность мостовой схемы.

Подающий винт измерительной балки выведен на правую стенку прибора (ручка «измерение»). Перемещение конца измерительной балки отсчитывается по индикатору, расположенному на передней панели прибора, с ценой деления 0,01 мм. Прибор смонтирован так, что при увеличении сопротивления активного датчика (при растяжении поверхности детали) показания индикаторов увеличиваются; при сжатии — показания индикатора уменьшаются. Чтобы обеспечить измерение как положительных, так и отрицательных деформаций, начальное положение измерительной балки устанавливается так, что стрелка индикатора указывает 500 (середина шкалы). Можно, если заранее известен знак деформации, устанавливать другое начальное положение, чтобы обеспечить наиболее широкий диапазон измерений. Шкала прибора по деформациям линейна.

Сопротивления R_3' и R_4' также изготовлены в виде датчиков, наклеенных на противоположные плоскости дополнительной балки начальной (до измерений) установки нуля по активной составляющей. Ручка управления этой балочкой («установка нуля») находится справа внизу на передней панели прибора.

Балансировка по реактивной составляющей достигается потенциометром R_5 и емкостью C . Управление потенциометром выведено на переднюю панель (слева внизу ручка «баланс С»).

Таким образом, если в начальном положении включить прибор и измерительную балку привести в произвольное фиксированное положение, так что баланс моста будет нарушен, то баланс можно восстановить с помощью ручек «установка нуля» и «баланс С» (поочередно), причем восстановление баланса отмечается по минимальному отклонению стрелки микроамперметра от нулевого деления.

Стабильность нулевого отчета в ходе измерений контролируется контрольными датчиками R_6 и R_7 , наклеенными на алюминиевую пластинку и тщательно изолированными от влияния температуры, влажности и механических воздействий.

Эти датчики с помощью двойного переключателя P_1 и P_2 (рис. 45) можно включить вместо активного и компенсирующего датчиков. Если измерительную балочку при этом установить в начальное положение (по индикатору), например, на 500, то при отсутствии нарушений в работе прибора микроамперметр покажет наличие баланса (наименьшее отклонение от нулевого деления). При отклонении стрелки от нуля баланс восстанавливается ручкой «установка нуля». Переключатель P_1 , P_2 находится в середине нижней части передней панели и может быть установлен в положение «работа» и «контроль».

Стабильность работы мостовой схемы контролируется с помощью высокоомного сопротивления R_3 (около 100 килоом). С помощью переключателя P_3 (на передней панели прибора между микроамперметром и индикатором) в положении «тарировка» это сопротивление шунтирует контрольный датчик R_4 . Параметры схемы подобраны так, что при положении переключателя P_1 , P_2 «контроль», а переключателя P_3 «тарировка» баланс моста, достигаемый с помощью измерительной балки, при нормальной работе моста соответствует показанию индикатора 184 (паспортная величина).

При многоточечном тензометрировании выводы датчиков (активных и компенсирующих) подключаются (подпаиваются) к барабанному переключателю ПБ-50М, который последовательно подключает к клеммам «А», «О», «К» измерителя одну пару датчиков за другой.

Подготовка прибора к работе. 1. Наклейка датчиков и припайка коммуникаций производится заблаговременно при выключенном приборе.

2. При отключенном от сети стабилизаторе напряжений и при положении выключателя сети (на задней стенке прибора) «выключено» прибор соединяется кабелем питания (ввод на задней стенке прибора) со стабилизатором напряжений, после чего стабилизатор включается в сеть.

3. Выключатель сети становится в положение «вкл.», переключатель P_1 , P_2 — в положение «контроль», а переключатель P_3 — в положение «работа».

4. После 30—40-минутного прогрева прибора ручкой «измерение» (на правой стенке прибора) установить стрелку индикатора в положение 500 (если ожидаются деформации растяжения и сжатия), а ручками «установка нуля» и «баланс С» (последовательно то одной, то другой несколько раз) добиться минимального отклонения стрелки микроамперметра от нуля.

5. Перевести переключатель P_3 в положение «тарировка», а ручкой «измерение» добиться баланса моста. Если стрелка индикатора при этом остановится на 184, прибор готов к работе.

Производство измерений. 1. Переключатели P_1 , P_2 и P_3 ставят в положение «работа».

2. С помощью барабанного переключателя подключаются поочередно датчики (активный и компенсирующий попарно), причем для каждой пары датчиков записывается нулевой отсчет (показание индикатора при наступлении баланса моста). Балансировка моста достигается ручкой «измерение» и ручкой «баланс С» (ручку «установка нуля» не трогать). Если остаточный разбаланс по реактивной составляющей не превышает 4 делений микроамперметра, использование балансировки ручкой «баланс С» нецелесообразно, так как это не улучшает точность измерений.

Нулевой отсчет путем включения и выключения повторить 3—4 раза. Если разброс нулевых отсчетов превышает 2 деления по шкале индикатора, контакт переключателя ПБ-50М, на котором ведется работа, непригоден, и датчик надо перепаять к другому контакту.

3. После записи нулевых отсчетов к испытываемому телу прилагается первая ступень нагрузки. С помощью переключателя ПБ-50М вновь датчики поочередно подключаются к прибору, причем каждый раз ручками «измерение» и «баланс С» мост балансируется, а соответствующее показание индикатора записывается. Разность между этим отсчетом и нулевым отсчетом для того же датчика, умноженная на цену деления (по данным тарирования), дает величину деформации (растяжения или сжатия — в зависимости от знака разности) в точке, в которой установлен датчик.

4. К телу прилагается вторая ступень нагрузки. Показания снимаются, как в пункте 3.

Перед каждой серией измерений надо проверить стабильность нуля путем подключения контрольных датчиков (переключатель P_1 , P_2 в положение «контроль» при положении индикатора на 500, как указано выше). При наличии ухода нуля устранить его с помощью ручки «установка нуля».

Тарирование датчиков. 1. Выбранные из партии датчики наклеиваются на балку равного сопротивления; устанавливается компенсирующий датчик. Датчики соединяются с прибором, снимаются нулевые отсчеты.

2. В местах крепления датчиков устанавливаются тензометры.

3. При подвешенном грузе записываются показания тензометров и показания индикатора электронного измерителя. То же повторится при других грузах.

4. По данным этих измерений (средним для всех тарированных датчиков) устанавливается цена деления прибора: ве-

личина деформации, соответствующая одному делению индикатора.

При повторном тарировании (другой партии датчиков) тензометры можно не ставить, так как первое тарирование дает зависимость между грузом и деформацией.

Опыты по изгибу балки. Основные гипотезы и выводы теории изгиба брусев. Элементарная теория изгиба брусев в сопротивлении материалов базируется на двух основных гипотезах: гипотезе плоских сечений и гипотезе, согласно которой продольные волокна не нажимают друг на друга. Непосредственным следствием гипотезы плоских сечений является линейная зависимость относительного удлинения продольного волокна от его расстояния до нейтральной плоскости:

$$z = \kappa y, \quad (1)$$

где κ — кривизна изогнутой оси, y — расстояние от нейтральной плоскости. Кривизна связана с изгибающим моментом M соотношением

$$\kappa = \frac{M}{EI}, \quad (2)$$

где EI — жесткость бруса на изгиб. Для однородного бруса постоянного поперечного сечения на участке, находящемся в состоянии чистого изгиба, кривизна κ постоянна. Поэтому, согласно (1), в двух различных поперечных сечениях на участке чистого изгиба распределение продольных удлинений одинаково.

При поперечном изгибе сосредоточенной силой F изгибающих моментов изображается треугольником с вершиной под точкой приложения силы. В этом случае, согласно (2), $\kappa(x) = ax + b$, где постоянные a и b определяются величиной силы, точкой ее приложения, размерами бруса и свойствами материала. Тогда согласно (1)

$$z = (ax + b)y,$$

а, следовательно, в точках с одним и тем же значением $y = y_0$ деформация по длине бруса изменяется по линейному закону:

$$z = a_1 x + b_1, \quad (3)$$

где $a_1 = ay_0$, $b_1 = by_0$.

В теории изгиба брусев, как и в ряде других задач, пользуются принципом Сен-Венана. Поэтому если, например, нагрузить шарнирно опертую однопролетную балку сосредоточенной силой P_1 на расстоянии l_1 от правой опоры, а во второй раз нагрузить ее силами P_2 и P_3 такими, что $P_2 + P_3 = P_1$,

в точки их приложения выбрать так, чтобы $l_2 P_2 + l_3 P_3 = l_1 P_1$, то на расстояниях, превышающих наибольший поперечный размер балки, распределение деформаций в обоих случаях будет одним и тем же.

Следствием линейности упругой системы является известная **теорема взаимности**: если система сил (P') вызывает в упругом теле перемещения (u'), а система сил (P'') — перемещения (u''), то работа сил первой системы на перемещениях точек их приложения, вызванных второй системой сил (A_{12}), равна работе сил второй системы на перемещениях, вызванных первой системой сил (A_{21}).

Действительно, пусть вначале к телу приложены силы (P'). На вызванных ими перемещениях (u') они совершают работу (A_{11}). Не снимая этих сил, приложим к телу силы (P''), которые вызовут такие же перемещения (u''), какие возникли бы при отсутствии сил (P'). На этих перемещениях силы (P'') совершат работу (A_{22}). Но так как точки приложения сил (P') тоже переместились, то эти силы вынужденно совершат работу (A_{12}), которая может быть как положительной, так и отрицательной. Общая работа сил от начала нагружения равна $A = A_{11} + A_{22} + A_{12}$.

Прилагая теперь вначале силы (P''), а потом силы (P'), повторяя те же рассуждения и используя принцип линейной суперпозиции, получим

$$A' = A_{22} + A_{11} + A_{21},$$

причем $A' = A$. Отсюда следует, что

$$A_{12} = A_{21},$$

что и доказывает теорему.

Описание лабораторной установки. В лабораторной установке МГУ* используется балка прямоугольного сечения $b \times h$, свободно опирающаяся на две поперечные призмы A и B (рис. 46.)

С помощью подпирных подвесок M и N , опирающихся поперечными призмами на верхнюю грань балки, можно в любых двух сечениях балки приложить силы P_1 и P_2 , величины которых можно менять. В сечениях I и II на боковой грани и на верхней и нижней гранях балки наклеены две группы по 7 одинаковых тензодатчиков сопротивления $I-7$ и $8-14$. Кроме того, датчики наклеены на равных расстояниях друг от друга

* Установка может быть легко изготовлена в лаборатории собственными силами.

на нижней грани балки (15, 16... 23), в промежутке между датчиками 17 и 18 стоит датчик 8 группы II. На боковой грани балки на разной высоте наклеены три поперечных датчика 24, 25, 26. В промежутке между датчиками 18 и 19 стоит датчик 1 группы I.

На станине установки может быть укреплено несколько стрелочных индикаторов $И_1, И_2, И_3$, упирающихся в нижнюю (верхнюю) грань балки.

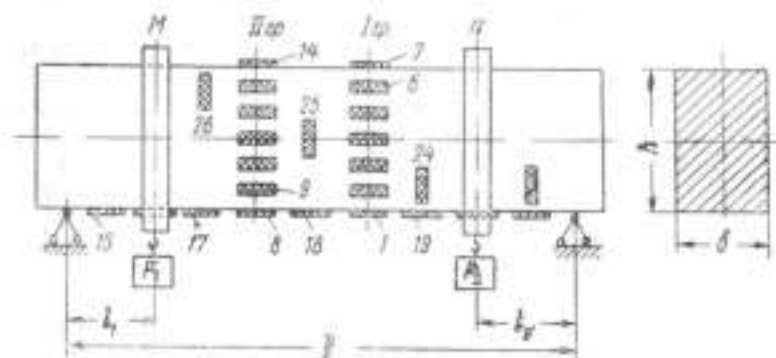


Рис. 46. Схема лабораторной установки для испытания на изгиб прямоугольной балки

Порядок выполнения работы. Производится тарирование проволоочных датчиков сопротивления, в результате чего устанавливается цена деления индикатора электронного измерителя деформаций.

Для проверки гипотезы плоских сечений при чистом изгибе подвески M и N помещаются на равных расстояниях $l_1 = l_2 = -l_1$ от опор и нагружаются одинаковыми грузами $P_1 = P_2 = P$. Записываются показания всех датчиков и соответствующие им значения деформаций (по данным тарирования). Записываются также показания индикаторов, расположенных на расстояниях $l/4, l/2$ от левой опоры. По данным измерений строятся эпюры (графики) деформаций в сечениях I и II. Если гипотеза плоских сечений верна, то обе эпюры будут прямолинейны, причем тождественны, поскольку сечения I и II находятся на участке чистого изгиба. Согласно теории, деформации, определенные по показаниям тех датчиков группы 15, 16... 23, которые находятся между M и N , должны быть одинаковыми. Опыт повторяется еще два раза при тех же положениях подвесок, но при других грузах

$$P_1 = P_2 = P_1 + P_1 \quad \text{и} \quad P_1 = P_2 = P_1 + P_1.$$

В целях проверки гипотезы плоских сечений при поперечном изгибе подвеска M не нагружается, а на тарель подвески N , помещенную на некотором расстоянии l_1 от правой опоры, кладется груз P_{II} . Строятся эпюры деформаций в сечениях I и II, а также эпюры распределения деформаций в крайнем полукне (по показаниям датчиков 15, 16... 23). Согласно теории первые две эпюры должны быть прямолинейны (но уже не идентичны), а третья эпюра должна иметь форму треугольника.

Опыт повторяется при том же положении подвески, но с грузами

$$P_{II} + P_{II} \quad \text{и} \quad P_{II} = P_{II} + P_{II}.$$

Отсутствие взаимного надавливания продольных волокон проверяется по показаниям датчиков 24, 25, 26 уже в проведенных ранее опытах. Деформация, соответствующая показанию датчика 25, должна быть близка к нулю. Деформации, определенные по датчикам 24 и 26, отличны от нуля (при отсутствии поперечных напряжений поперечные деформации не равны нулю).

Для проверки принципа Сен-Венана подвески M и N помещаются на одинаковом расстоянии $l_{II} = l_1$ от опор и нагружаются одинаковыми грузами P_{II} так, чтобы $P_{II} l_{II} = P_1 l_1$. Снимая показания датчиков и сравнивая с теми, которые были получены в опыте 2 при l_1 , убеждаемся, что они одинаковы. Это и доказывает равнозначность действия двух статически эквивалентных систем сил.

Теорема взаимности проверяется следующим образом: подвески M и N помещаются в произвольные положения I и 2 и нагружаются грузами P_1 и P_2 . С помощью индикатора измеряется прогиб δ_2 в каком-нибудь сечении 3. Затем одна из подвесок помещается в сечение 3 и нагружается грузом P_2 , а в сечениях I и 2 измеряются индикаторами прогибы δ'_1 и δ'_2 .

По этим данным проверяется выполнение равенства

$$P_2 \delta_2 = P_1 \delta'_1 + P_2 \delta'_2.$$

Отчетными материалами являются: оформленные протоколы испытаний, графики (эпюры деформаций), расчеты, данные тарирования.

Измерение твердости

Цели работы:

- 1) Ознакомление с приборами и методами измерения твердости.
- 2) Определение твердости по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу и Шору.

Твердость есть свойство материала оказывать сопротивление пластическому деформированию или разрушению в поверхностном слое при местных контактных воздействиях. Измерение твердости можно осуществить многими методами.

Наиболее распространенным является способ вдавливания стандартного наконечника. Реже применяются способы измерения твердости путем разрушения поверхностных слоев материала царапанием. Упомянем еще о способах измерения твердости, связанных с работой упругого и пластического деформирования. Определенные разными методами характеристики твердости получаются различными по величине и по размерности, поэтому перевод значений твердости из одних в другие возможен только по эмпирическим формулам и таблицам.

Испытания, связанные с измерением твердости, получили весьма широкое распространение, что объясняется следующими причинами: а) испытание проводится быстро и на удобном портативном оборудовании; б) испытанию могут быть подвергнуты не только образцы, но и, что особенно важно, готовые детали, главным образом термически обработанные; при этом испытанные детали в большинстве остаются годными для дальнейшей эксплуатации. Для оценки качества азотированных и цементированных деталей знание твердости является основным; в) наконец, по твердости можно судить о некоторых других механических характеристиках материала.

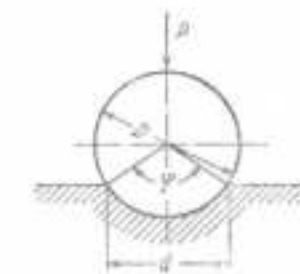


Рис. 47. Схема измерения твердости по Бринеллю

Статические методы измерения твердости. Наиболее широкое применение в технике имеет метод вдавливания стандартного наконечника. За меру твердости принимается или отношение нагрузки к поверхности отпечатка (Бринелль, Виккерс), или величина, связанная с глубиной вдавливания под определенной нагрузкой (Роквелл), или нагрузка, при которой наконечник вдавливается на определенную глубину (монотрон).

В методе измерения твердости по Бринеллю шарик диаметром D вдавливается в испытуемый металл и оставляет на его

поверхности отпечаток диаметра d (рис. 47). Мерой твердости является отношение

$$H_B = \frac{P}{F},$$

где F — площадь поверхности сферического отпечатка после снятия нагрузки (восстановленного отпечатка).

Для получения одинаковых значений твердости материала при испытании шариками разного диаметра необходимо, чтобы $\frac{d}{D} = \sin \frac{\psi}{2} = \text{const}$, где ψ — угол вдавливания (рис. 47).

Так как

$$F = \frac{\pi D^2}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)$$

и, следовательно:

$$H_B = \frac{P}{D^2} \left[\frac{2}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2}} \right],$$

то одинаковые значения H_B при испытании одного и того же материала шариками разного диаметра могут получаться только при условии: $\frac{P}{D^2} = k = \text{const}$.

Величина k при P в кг и D в мм принимается равной 30 для черных металлов, 10 для цветных металлов и 2,5 для очень мягких металлов. Величина диаметра отпечатка должна удовлетворять условию: $0,2D < d < 0,6D$.

Твердость антифрикционных и некоторых алюминиевых сплавов уменьшается с увеличением времени выдержки испытуемого образца под нагрузкой; твердость стали при этих условиях заметно не меняется. Время выдержки под нагрузкой обычно принимают 10—60 сек.

Диаметр отпечатка определяется как среднее арифметическое результатов измерений по двум взаимно-перпендикулярным направлениям. Величины твердости можно определить по диаметрам отпечатков, пользуясь данными табл. 12.

Между пределом прочности при растяжении и твердостью по Бринеллю H_B существует приблизительно прямолинейная зависимость. Ориентировочно можно принять: для кованой и катаной углеродистой стали $\sigma_s = 0,36 H_B$, для термически обработанной на сорбит легированной стали $\sigma_s = 0,34 H_B$, для серого чугуна $\sigma_s = \frac{H_B - 40}{6}$, для литейных цинковых сплавов $\sigma_s = 0,09 H_B$ и для стального литейного $\sigma_s = (0,3 \div 0,4) H_B$.

Для измерения твердости, по Бринеллю, пригоден любой пресс с точностью измерения силы $\pm 1\%$, допускающий плавное нагружение и выдержку под нагрузкой в течение $10 \div 60$ сек.

В настоящее время распространены автоматические прессы, в которых нагрузка на шарик производится грузами через систему рычагов. Скорость нагружения, время выдержки под нагрузкой и скорость разгружения в автоматических прессах постоянны, что обеспечивает однообразие условий испытаний.

На рис. 48 представлена кинематическая схема автоматического прессы типа ПБМ. Шарик 1 закреплен в конце шпинделя 2. Пружина 3 в ненагруженном прессе прижимает втулку

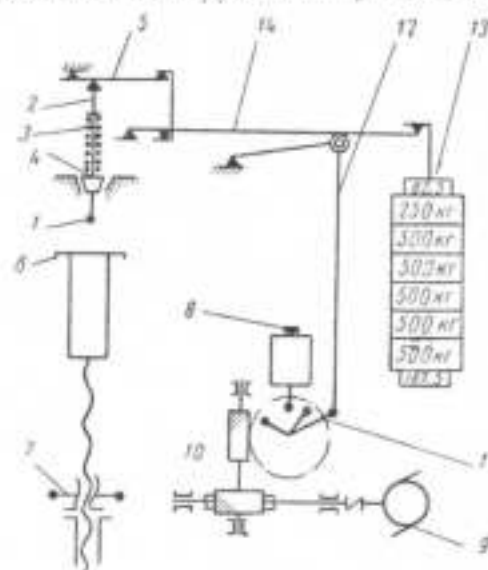


Рис. 48. Кинематическая схема автоматического прессы типа ПБМ.

4 к конусному седлу, а верхнюю часть шпинделя 2 — к призме рычага 5. Это определяет точное положение шпинделя. При нагружении втулка 4 выходит из конусного седла, и второй точкой, определяющей положение шпинделя, будет центр поверхности соприкосновения шарика с образцом*. При испытании образец укладывают на столик 6. Вращением маховика 7 образец прижимается к шарiku 1, пока точка на шпинделе 2

* Первой точкой, определяющей положение шпинделя, является точка упора верхней части шпинделя в призму рычага 5. Такая система допускает перемещение шпинделя практически без трения.

не станет против риски на неподвижном указателе. При этом втулка 4 вышла из своего гнезда. Затем нажимаем на кнопку 8 включают электродвигатель 9, вращение от которого через редуктор 10 передается кривошипу 11. Кривошип опускает шпindel 12, в результате чего нагрузка от грузов 13 через два рычага 5 и 14 передается на шпindel 2 с шариком 1. При дальнейшем вращении эксцентрика некоторое заданное время шарик находится под постоянной нагрузкой, затем шпindel поднимается и снимает нагрузку с шарика. Вращением маховика опускают столик с образцом и диаметр отпечатка измеряется лупой.

Для испытания громоздких изделий на месте удобны переносные прессы.

Твердость по Виккерсу определяется вдавливанием алмазного наконечника в виде пирамиды с квадратным основанием и углом между противоположными гранями, равным 136° ; пирамида вдавливается в испытуемый образец перпендикулярно к поверхности. Испытания могут производиться при нагрузках от 1 до 120 кг. Наиболее часто применяются нагрузки: 5,20, 30,50, 100 и 120 кг.

Величиной твердости является отношение нагрузки P к поверхности вызванного ею пирамидального отпечатка F :

$$H_V = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \text{ кг/мм}^2,$$

где d — диагональ отпечатка в мм, α — угол при вершине между противоположными гранями пирамиды. Для $\alpha = 136^\circ$ $H_V = 1,8544 \frac{P}{d^2}$.

Твердость обозначается с указанием нагрузки. Например, H_{V20} означает, что испытание проведено при нагрузке 20 кг.

Соотношения между H_V и числами твердости, определенными другими методами, приведены в табл. 12.

Угол 136° между противоположными гранями алмазной пирамиды выбран с целью получения величины H_V , близких к H_B . Однако совпадение величин H_B и H_V для стали имеет место только при значениях H_B , не превышающих 400.

На рис. 49 представлена схема прибора. Перед испытанием прибор должен быть взведен рукояткой 1. Образец помещается на предметный столик 2, и вращением штурвала 3 доводится до соприкосновения с торцом чехла алмазной пирамиды 4, что обеспечивает зазор между поверхностью образца и вершиной пирамиды в 0,1—0,3 мм. Стержень 5 передает нагрузку на пирамиду от рычага 6, к которому при помощи стержня

7 подвешены грузы 8. Грузовой привод включается нажимом на педаль пускового рычага 9.

Под действием груза 10 втулка 11 и опирающийся на нее стержень 12 опускаются, освобождая рычаг 5, и нагрузка плавно передается на пирамиду. Одновременно тяга 13 начинает поднимать рычаг 14 навстречу стержню 12. Дальнейшее

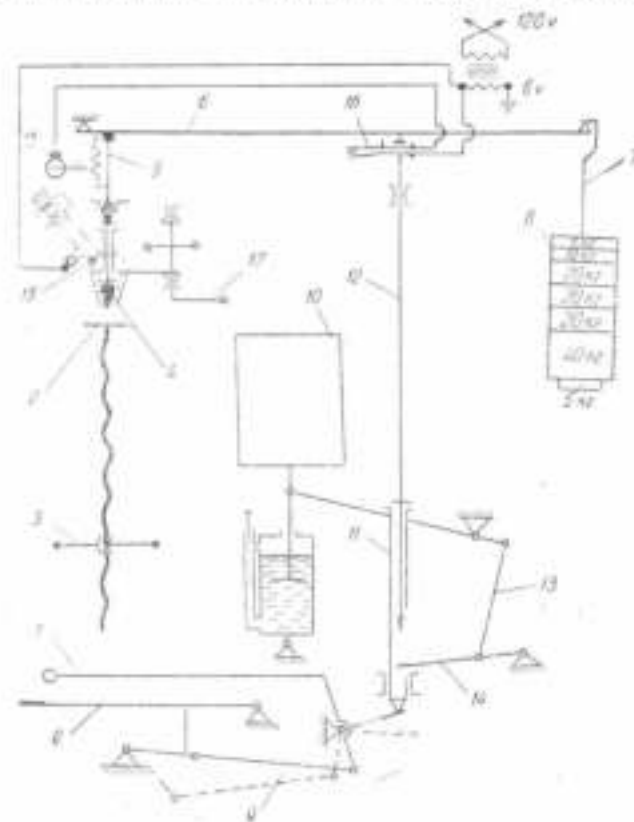


Рис. 49. Схема твердомера ТК

опускание втулки 11 продолжит подъем рычага 14 и стержня 12, который к концу хода скалки масляного амортизатора придет в начальное положение и снимет нагрузку. Такое устройство способствует опусканию и подъему груза без толчков. В течение выдержки образца под нагрузкой горит сигнальная лампочка 15, включаемая контактом 16, установленным на стержне 12. Поворотом маховичка 3 опускают столик 2 так, чтобы не было касания пирамиды к образцу, и поворотом го-

ловки за ручку 17 подводит окуляр микроскопа к отпечатку и измеряют его диагональ. В поле зрения микроскопа имеются два штриха, раздвижение которых определяется по микрометрическому винту, который при соизмеренных штрихах устанавливается на нуль. В зависимости от объектива ($\times 10$ или $\times 4$) одно деление счетчика соответствует 1,0 или 2,5 мс. Микроскоп устанавливается так, чтобы неподвижный штрих совпал с углом отпечатка. Второй штрих при помощи микрометрического винта передвигается до совпадения с другим углом отпечатка (рис. 50).

Для большей точности измерения H_V нагрузка P выбирается наибольшей, согласно с размерами и твердостью образца. Однако нагрузка выше 100 кг может повлечь поломку алмаза.

Монотрон Шора. Твердость по Шору определяется величиной нагрузки, необходимой для вдавливания алмазного наконечника на постоянную глубину. Глубина отпечатка до некоторого определенного (малого) значения пропорциональна действующей на шарик силе P . Так как $H_D = \frac{P}{\pi D h}$, то при постоянной величине h сила P может служить мерой твердости.

Твердость по монотрону определяется по нагрузке P (кг) на алмазный наконечник со сферической поверхностью диаметром $D = 0,75$ мм, при которой глубина невосстановленного отпечатка (под нагрузкой) h получается равной 0,045 мм.

Измерение твердости по Роквеллу. В этом методе алмазный конус или стальной шарик вдавливаются в испытуемый образец. Сначала прикладывается предварительная малая нагрузка P_0 , затем нагрузка увеличивается до окончательной P и после этого уменьшается до P_0 . Глубина получившегося при этом отпечатка $h = h' - h_0$ является мерой твердости по Роквеллу (рис. 51).

Числа твердости по Роквеллу выражаются числами, равными разности между некоторой постоянной величиной k и значением h :

$$H_R = k - \frac{h}{c},$$

где c (цена деления индикатора) равна 0,002 мм, а $k = 130$

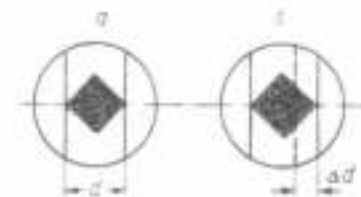


Рис. 50. Схема измерения диагонали отпечатка: а) при одиночных испытаниях, б) при массовом контроле. Δd — допуск на длину диагонали

при испытании стальным шариком и $k=100$ при испытании алмазным конусом.

Циферблат индикатора имеет 100 делений, соответствующих глубине вдавливания до 0,2 мм, и две шкалы — черную и красную; последняя смещена по отношению к черной на 30 делений. При испытании алмазным конусом отсчеты производятся по черной шкале, стальным шариком — по красной.

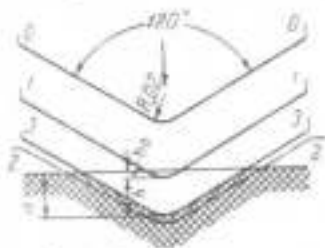


Рис. 51. Схема испытания твердости по Роквеллу: 1—1 предварительная нагрузка P_0 ; 2—2 окончательная нагрузка P ; 3—3 нагрузка уменьшена до предварительной P_0 .

При испытании шариком диаметром $1/16$ " шкалы обозначаются 15 — T , 30 — T , 45 — T , при испытании алмазным конусом — шкалы 15 — N , 30 — N , 45 — N .

В обычной модели прибора Роквелла применяются нагрузки в 10, 60, 100 и 150 кг.

В табл. 11 приведены обозначения шкал твердости по Роквеллу по ОСТу 10242-40.

Для определения твердости в тонких слоях применяют прибор супер Роквелл с $P_0=3$ кг и $P=15,30$ и 45 кг. При испы-

Таблица 11

Твердость по Бринеллю H_B	Обозначение шкалы Роквелла	Вид наконечника	Нагрузка P , кг	Обозначение твердости по Роквеллу	Допустимые пределы шкалы
60—230	<i>B</i>	стальной шарик $\geq 1/16$ "	100	H_{RB}	25—10
230—700	<i>C</i>	алмазный конус	150	H_{RC}	20—67
Свыше 700	<i>A</i>	то же	60	H_{RA}	Свыше 70

Значения твердости по разным шкалам прибора Роквелла несравнимы, и поэтому в протоколах должны отмечаться условия испытаний.

Примерные соотношения между твердостью по Роквеллу и твердостью, определенной другими методами, приведены в табл. 12.

Образцы для испытаний на твердость по Роквеллу должны иметь в месте испытания плоскую сухую и чистую поверх-

ность. Кривые поверхности допускаются с радиусом не меньше 5 мм. Образцы должны плотно (без зазора) прилегать к предметному столику прибора.

Прибор для испытания твердости по Роквеллу. Алмазный конус имеет угол $120^\circ \pm 1,5^\circ$ в диаметральном сечении и радиус закругления у вершины $0,2 \pm 0,02$ мм.

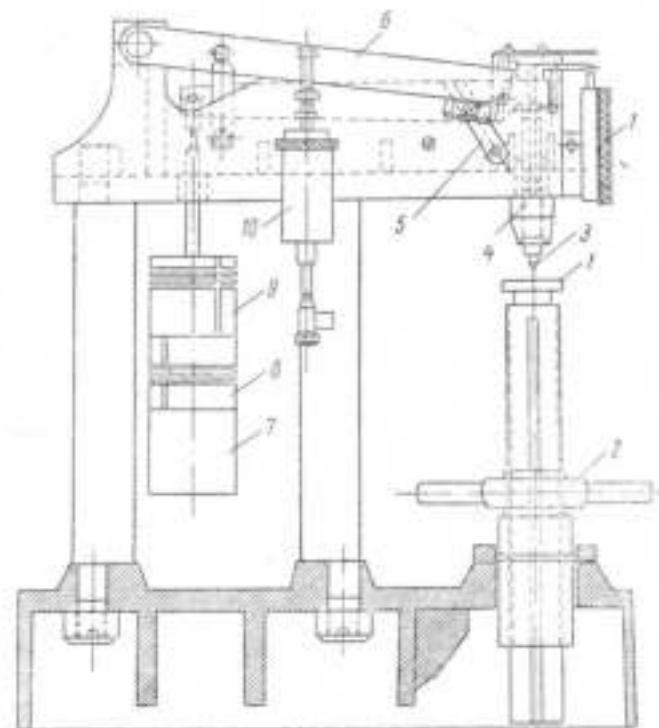


Рис. 52. Схема прибора Роквелла типа РБ

Стальной шарик имеет диаметр, равный $1/16$ " или $1,5875 \pm 0,001$ мм. Шарик должен выступать из оправки на $1/2$ своего диаметра.

На рис. 52 представлена схема прибора Роквелла. Образец укладывается на столик 1. Вращением подъемной гайки 2 поднимают образец до соприкосновения с алмазным конусом или стальным шариком 3. Вращение гайки продолжают до тех пор, пока малая стрелка индикатора не станет против красной точки, а большая — вертикально. При таком положении стрелок пружина 4 сжимается и создает предварительную

нагрузку на наконечник $P_0 = 10$ кг. Затем циферблат индикатора устанавливается так, чтобы большая стрелка показывала нуль черной шкалы или деление 30 красной (при испытании шариком). Если большая стрелка будет переведена за вертикальное положение больше чем на 5 делений, необходимо повторить испытание на новом месте образца. При помощи рычага 6 с противовесами 7, 8 и 9 прикладывается окончательная нагрузка P до 60, 100 или 150 кг освобождением рукоятки 5. Главное приложение нагрузки обеспечивается масляным амортизатором 10. После того как движение рукоятки 5 прекратится, ее возвращают обратно, чем снимается основная нагрузка. После этого стрелка индикатора 11 указывает твердость по Роквеллу. Вращением подъемной гайки 2 и обратную сторону наделки отводится от наконечника 3. Перед началом работы необходимо проверить, оттянута ли рукоятка 5 назад до отказа.

Масляный амортизатор должен быть отрегулирован так, чтобы холостой ход при $P = 100$ кг продолжался 4—5 сек.

Определение твердости по методу царапания. Метод состоит в проведении царапины на поверхности испытуемого металла алмазным или другим недеформирующимся острием, нагруженным постоянной нагрузкой. За меру твердости принимается или ширина царапины при постоянной нагрузке или величина нагрузки, при которой получается определенная ширина царапины.

Образцы должны быть тщательно отполированы, а ширина царапины должна измеряться с точностью до долей микрона.

На рис. 53 представлена схема прибора Мартенса для определения твердости по способу царапания.

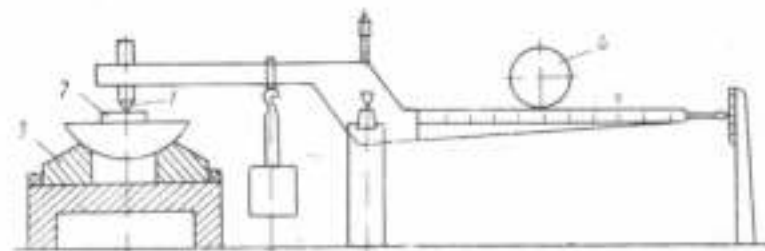


Рис. 53. Схема прибора Мартенса для определения твердости по способу царапания

Алмазным конусом 1 с углом у вершины 90° проводят черту на образце 2, перемещая столик прибора 3. Изме-

нение нагрузки достигается перемещением груза 4. Твердость определяют шириной царапины, полученной под определенной нагрузкой.

Определение твердости микроскопических объектов (микротвердость). Определение твердости структурных составляющих и тонких слоев металла может быть произведено методом царапания.

Измерение твердости микроскопических объектов по методу вдавливания имеет преимущество перед измерением методом царапания, так как значения твердости, определенные вдавливанием, можно сопоставлять с величинами, определенными по Бринеллю и Виккерсу. В приборах для испытаний по методу вдавливания наконечником служит обычно стандартная алмазная пирамида с углом между противоположными гранями $\alpha = 136^\circ$ (пирамида Виккерса). Число твердости вычисляется как отношение нагрузки к поверхности отпечатка
$$H_V = 1,8544 \frac{P}{d^2} \text{ кг/мм}^2$$
, где d — диагональ квадратного отпечатка.

Поверхность образца должна быть плоской и гладко полированной. Наружный слой, наклепанный шлифовкой и полировкой, необходимо удалить травлением. Предпочтительна подготовка поверхности электрохимической полировкой.

Твердость по Виккерсу при обычных испытаниях не зависит от нагрузки. При нагрузках меньше 1 кг числа твердости не остаются постоянными, а увеличиваются с уменьшением нагрузки. Для получения сравнимых результатов следует определять числа твердости при постоянной заданной величине диагонали d (5, 10 или 20 $\mu\text{м}$). Для этого на образце производится несколько отпечатков при разных нагрузках. По графику, построенному в координатах $\lg d \sim \lg P$, определяется P , соответствующая заданному значению d .

Измерение твердости микроскопических объектов по методу вдавливания производится специальными приборами. Прибор ПМТ-3 представляет собой вертикальный микроскоп с окулярным микрометром и приспособленным для получения отпечатка на образце. После выбора места для испытания столик с образцом поворотом на 180° подводится под наконечник. После вдавливания наконечника столик вновь подводится под микроскоп и производится измерение длины диагонали отпечатка.

Динамические методы измерения твердости. Определение твердости по двойному отпечатку шарика осуществляется на приборе Польди (рис. 54). Оценка твердости производится сравнением диаметров отпечатков шарика, полученных одновременно на образце и эталоне (с известной твердостью) в ре-

зультате одного удара. Между шариком 1 и бойком 2 находится эталон 3, прижатый к бойку пружиной 4. Удар по бойку наносится ручным молотком.

Можно приближенно считать, что

$$H_{в0} = H_{вз} \frac{d_z^2}{d_0^2},$$

где $H_{в0}$ и $H_{вз}$ — величины твердости по Бринеллю образца и эталона; d_0 и d_z — диаметры отпечатков на образце и эталоне.

Прибор Польди дает приближенные результаты, так как $H_{вз}$ определяется при статическом вдавливании, а прибор работает при ударной нагрузке.

Метод упругого отскока. В этом случае мерой твердости является высота h отскока бойка, падающего с постоянной высоты H . Вес бойка P и высота падения подобраны так, что в месте удара получаются напряжения

выше предела упругости, т. е. получается отпечаток. Величина работы пластической деформации металла $A = P(H-h)$ и характеризует ударную твердость металла. Чем больше h , тем меньше A и выше твердость. Отскок бойка вызывается силами упругости, энергия которых равна:

$$\int \frac{\sigma^2}{2E} dV,$$

где σ — упругое напряжение, E — модуль упругости, а V — упруго деформированный объем. Поэтому величины твердости, определенные по методу упругого отскока, могут быть сравнимы только при равных или близких значениях E .

Склероскоп Шора — модель С (рис. 55). Мерой твердости по Шору H_s является высота отскока h бойка 1 весом 2,5 г, падающего с постоянной высоты $H = 254$ мм на образец 2. Высота отскока отмечается визуально. Боек оканчивается шаровым алмазным наконечником диаметром 2,5 мм. Шкала прибора имеет 140 равных делений. Отскоку в 100 делений соответствует твердость закаленной на мартенсит высокоуглеродистой стали. Склероскопы Шора снабжаются эталонами твердости, по которым производится проверка правильности показаний приборов.

В склероскопе модели Д тяжелый боек падает с высоты 18 мм. Высота отскока регистрируется стрелкой, что значительно удобнее. Однако значения твердости получаются менее точными, чем на модели С, вследствие увеличения вредных потерь.

Испытуемая поверхность образца тщательно отшлифовывается. Перед испытанием склероскоп устанавливается вертикально по уровню или отвесу, а поверхность испытуемого образца — горизонтально. Образец плотно зажимается в приборе.

Для образцов толщиной менее 2 мм склероскоп непригоден, так как сказывается влияние наковальни и показания искажаются.

Для определения твердости склероскопом Шора рекомендуется делать не менее трех испытаний в различных точках образца и брать среднее.

Приборы Шора применяются для измерения твердости термически обработанных стальных деталей, однако более надежными являются приборы Виккерса и Роквелла.

Приборы Шора в настоящее время чаще применяются для измерения твердости громоздких изделий.

Твердость по Шору для углеродистой стали находится с твердостью по Бринеллю и пределом прочности при растяжении σ_b в следующей зависимости:

$$\begin{aligned} H_s &\approx 7H_b; \\ \sigma_b &= 2,5H_s. \end{aligned}$$

Соотношение чисел твердости, определенных различными методами, приведены в табл. 12.

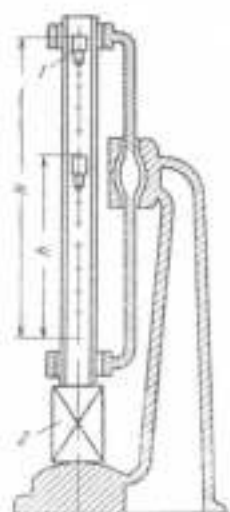


Рис. 55. Схема склероскопа Шора

Таблица 12

Соотношения между величинами твердости, определенными различными способами

Твердость по Пакерсу H_K	Твердость по Бринеллю H_B		Твердость по Роквеллу $H_{R\text{C}}$						Твердость по монету Шора	Твердость по вспрыскиванию Шора H_S
	диаметр отверстия в мм	при уста- новле- нии ста- льного на- конеч- ника	шкала							
			C	D	A	B	30-N	30-T		
224	1224	780	72	78	84	—	87	—	130	154
222	1022	712	68	75	82	—	84	—	111	98
868	2,40	653	64	72	80	—	81	—	96	91
746	2,50	601	60	70	78	—	78	—	86	84
650	2,60	555	56	67	77	—	74	—	78	78
587	2,70	514	52	64	75	—	70	—	71	73
534	2,80	477	49	62	74	—	68	—	66	68
474	2,90	444	46	60	73	—	66	—	61	64
435	3,00	415	43	58	72	—	64	—	57	61
401	3,10	388	41	56	71	—	62	—	53	57
380	3,20	363	39	55	70	—	60	—	50	54
344	3,30	341	38	53	68	—	58	—	47	51
320	3,40	321	33	50	67	—	56	—	44	49
303	3,50	302	31	49	66	—	54	—	41	46
285	3,60	285	29	47	65	—	52	—	39	44
270	3,70	269	27	46	64	—	50	—	37	42
255	3,80	255	25	45	63	—	48	—	35	40
240	3,90	241	23	43	62	102	46	85	33	38
228	4,00	229	20	41	61	100	44	83	31	36
217	4,10	217	17	39	60	98	42	82	29	34
208	4,20	207	14	37	59	95	39	81	28	33
197	4,30	197	12	36	58	93	37	79	27	31
186	4,40	187	9	34	57	91	35	78	26	30
178	4,50	179	7	33	56	90	33	77	25	29
171	4,60	170	4	32	55	88	31	76	23	28
162	4,70	163	2	31	53	86	29	74	22	27
155	4,80	156	0	30	52	84	27	73	21	26
149	4,90	149	—	—	—	82	—	71	20	24
143	5,00	143	—	—	—	80	—	70	19	24
138	5,10	137	—	—	—	78	—	68	19	23
131	5,20	131	—	—	—	76	—	67	18	22
127	5,30	126	—	—	—	74	—	66	17	22
121	5,40	121	—	—	—	72	—	65	17	21
116	5,50	116	—	—	—	70	—	63	16	20
113	5,60	111	—	—	—	67	—	62	15	20
109	5,70	109	—	—	—	65	—	60	15	19

Порядок выполнения работы. Определяется твердость по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу и Шору следующих образцов: 1) чугунный образец; 2) две половинки разорванного при испытании на растяжение стального образца; 3) две половинки

стального образца, разорванного на машине Гагарина; 4) латунный или дюралюминиевый образец.

На головках разорванных образцов должны быть зачищены площадки для испытания твердости.

Сначала все образцы испытываются по методу Шора. Значение твердости подсчитывается из 5 промеров. Затем проводится испытание по методу Роквелла, причем берется среднее значение H_R из трех промеров. После этого определяется твердость по Бриггелю и по Виккерсу. Берутся средние значения для двух отпечатков.

Результаты работы записываются в табл. 13,

Таблица 13

Результаты испытания твердости по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу и Шору

[illegible]

Отчетными материалами являются: схемы приборов, формулы для вычисления твердости и табл. 13.

§ 2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Влияние температуры

Цели работы

- 1) Ознакомление с несчетными машинками и измерительной аппаратурой.
- 2) Определение зависимости от температуры испытания величин: τ_p , τ_{Σ} , σ_d , S_A , η и ψ .
- 3) Построение диаграмм истинных напряжений в зависимости от температуры.

С повышением температуры механические свойства материалов заметно изменяются. Общая тенденция влияния температуры такова, что с повышением ее характеристики проч-

ности (σ_s и σ_b) снижаются, а характеристики пластичности (в частности δ и ψ) повышаются (рис. 56).

Для некоторых сплавов, в том числе сталей, имеют место отклонения. Например, для сталей в интервале температур 250°—400°С предел текучести σ_s , временное сопротивление σ_b повышаются, а удлинение δ понижается по сравнению с их значениями при комнатной температуре. При дальнейшем повышении температуры характеристики прочности и пластичности изменяются так, как сказано выше (рис. 57). Это явление называется синеломкостью.

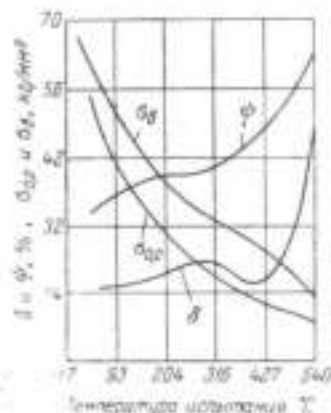


Рис. 56. Влияние температуры испытания на механические свойства углеродистой стали.

Для сплавов цветных металлов при значительном снижении температуры пластичность, как правило, заметно повышается.

Испытания на растяжение при высоких температурах могут быть проведены на любой испытательной машине. Необходимы, кроме того, печь для нагрева образца, специальные захваты для образцов и пирометр для измерения температуры.

Машина ИМ-4Р. В лаборатории МГУ испытания проводятся на машине ИМ-4Р или на машине Гатарина. Пространственная схема машины ИМ-4Р представлена на рис. 58.

Движение от электромотора 1 или рукоятки 2 передается через систему зубчатых колес к гайке 3, которая перемещает винт 4 с нижним захватом 5. Нагрузка действует на образец через верхний захват 6 и систему рычагов и тяг 7, 8, 9 на короткое плечо тяжелого маятника 10 и отклоняет его от вертикали. Толкатель 11, связанный с осью вращения маятника 10, перемещает каретку, на которой укреплен указатель нагрузки и перо для записи диаграммы. Вращение барабана 12 с диа-

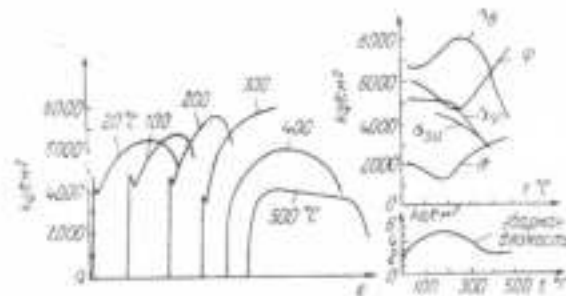


Рис. 57. Влияние температуры испытания на механические свойства углеродистой стали.

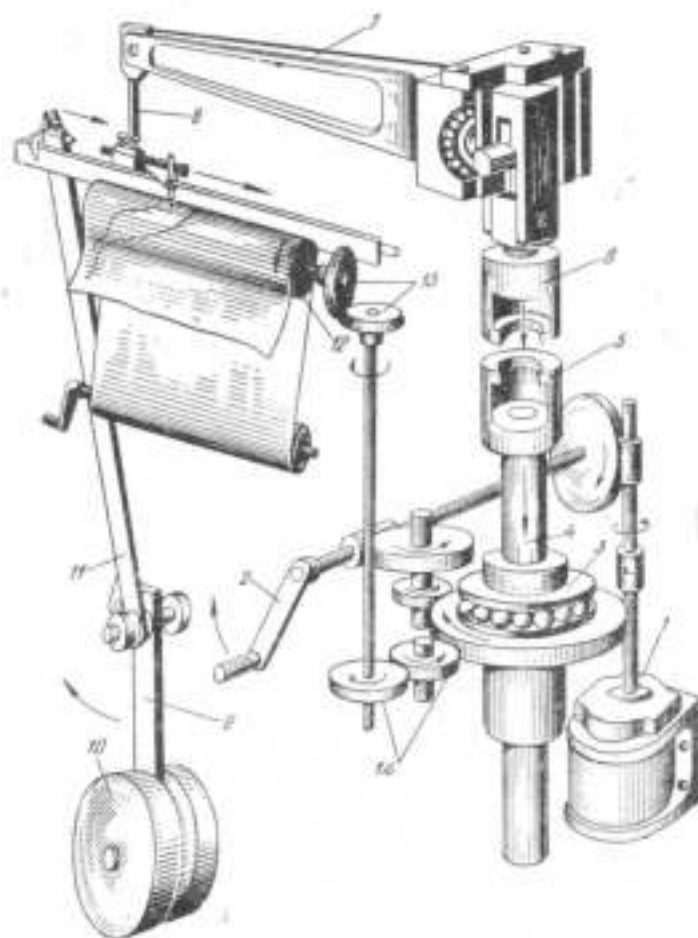


Рис. 58. Пространственная схема машины ИМ-4Р.

рамной бумагой производится системой зубчатых колес 13 и 14 от гайки 3, задающей величину деформации. Зубчатые колеса подобраны таким образом, что перемещение нижнего захвата на 1 мм вызывает перемещение диаграммной бумаги на 100 мм. Машина имеет две шкалы: до 2000 кг и до 4000 кг. В первом случае одному миллиметру диаграммы по оси нагрузок соответствует 5 кг, во втором — 10 кг. На автодиаграмме, кроме деформаций образца, записываются также паразитные деформации машины. Для их исключения производится обжатие стальной колонки диаметром 40 мм с записью автодиаграммы. Абсциссы этой автодиаграммы вычитаются из абсцисс, полученных при испытании образца, и по ним строится исправленная автодиаграмма.

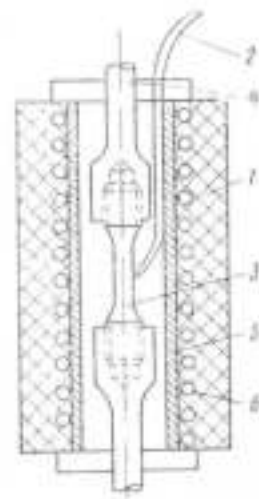


Рис. 59. Схема расположения образца и термопары в печи: 1—тепловая изоляция, 2—термопара, 3—образец, 4—захват, 5—труба печи, 6—нагреватель.

Горячий спай термопары крепится к образцу. При нагревании горячего спая (рис. 60) термопары на ее концах А и В возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э.д.с.) E , зависящая от разности температур горячего спая T и холодных концов T_0 . Эта зависимость может быть представлена формулой

$$E = a + b(T - T_0) + c(T - T_0)^2 + d(T - T_0)^3 + \dots$$

где a, b, c, d — постоянные коэффициенты, определяемые из опыта.

По устойчивости показаний платино-платинородневая термопара является одной из лучших и поэтому широко при-

меняется в лабораторной работе и для тарировки и проверки термопар из неблагородных металлов.

Высокая стоимость платины обусловила применение дешевых термопар из неблагородных металлов и их сплавов.

Наиболее часто применяются следующие термопары: медь-константан до 500°С, железо-копель до 600°С, железо-константан до 700°С, хромель-алюмель до 1100°С.

Для двух последних термопар в табл. 14 представлена зависимость термоэлектродвижущей силы от температуры при $T_0 = 0$.

Измерение термо-э. д. с. термопары производится гальванометрами, милливольтметрами или потенциометрами. В милливольтметре ток от термопары проходит через подвижную катушку с большим числом витков проволоки, находящуюся в поле сильного постоянного магнита, благодаря чему катушка поворачивается на некоторый угол. С катушкой жестко связана указывающая стрелка. Крутящий момент катушки уравнивается моментом спиральной пружины.

Ток, вызывающий поворот катушки на некоторый угол, равен

$$i = \frac{E}{R_m + R_{св} + R_p},$$

где E — термо-э. д. с., R_m — сопротивление термопары, $R_{св}$ — сопротивление соединительных проводов, R_p — сопротивление гальванометра.

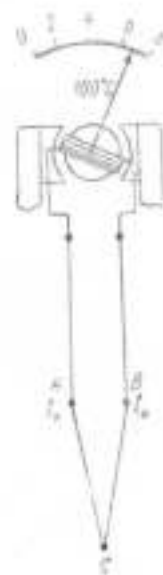


Рис. 60. Схема термоэлектрического пирометра

Таблица 14

Термо-э. д. с. в мв		
Температура	Хромель-алюмель	Железо-копель
100	4,10	5,75
200	3,13	12,00
300	12,21	18,10
400	16,39	24,55
500	20,64	30,90
600	24,90	37,40
700	29,14	44,10
800	33,31	51,15
900	37,36	—
1000	41,31	—

Гальванометр-милливольтметр для измерения термо-э. д. с. должен обладать возможно более высоким омическим сопротивлением (несколько сотен ом). Тогда изменением сопротивления термодпары и соединительных проводов (единицы омов) можно пренебречь.

Электросопротивление термодпары $R_{\text{тп}}$ изменяется с температурой и зависит от длины нагреваемой ее части. При большой величине сопротивления гальванометра это обстоятельство не скажется заметным образом, равно как замена коротких соединительных проводов более длинными или наоборот.

Более точно измерение термо-э. д. с. производится потенциометрами по известной компенсационной схеме (рис. 61).

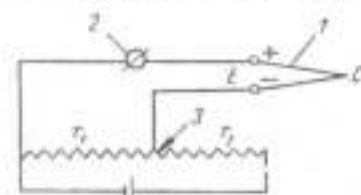


Рис. 61. Схема потенциометра: 1—термодпара; 2—гальванометр; 3—реохорд

Электродавижающая сила E , развиваемая термодпарой, уравновешивается равным по величине и противоположным по знаку падением напряжения E на реохорде потенциометра. В момент измерения ток через термодпару не идет (гальванометр приводится на нуль), поэтому сопротивление термодпары и соединительных проводов не играет роли. В потенциометрах в качестве источника известного постоянного напряжения применяется нормальный элемент. Чтобы продлить срок службы нормального элемента, им пользуются только для регулировки напряжения от обычной гальванической батареи, с помощью которой и ведутся измерения.

Потенциометры и гальванометры бывают: указывающие, указывающие и регулирующие, т. е. автоматически (через реле) поддерживающие данную температуру постоянной, самозаписывающие кривую температура—время и самозаписывающие-регулирующие.

Температуру холодного конца термодпары необходимо держать постоянной. В тех случаях, когда это невозможно, применяются удлинительные (компенсационные) провода, изготовляемые из сплавов, которые в контакте с материалом термодпары не дают добавочной термо-э. д. с. При помощи этих проводов холодные концы могут быть вынесены в место с постоянной температурой.

Для поддержания постоянной температуры холодные концы помещают в сосуд с тающим льдом (0°) или в сосуд Дьюара, в котором поддерживается постоянная температура, и т. д.

Если температуру T_1 холодных концов термодпары нельзя поддерживать равной температуре градуировки T_0 , то вводит-

ся поправка, равная термо-э. д. с., развиваемой термодпарой, когда ее горячий спай находится при температуре T_1 , а холодный конец при температуре T_0 . Знак поправки определяется на том основании, что термо-э. д. с. термодпары уменьшается при уменьшении разности температур между горячим спаем и холодными концами и увеличивается при увеличении этой разности.

Порядок выполнения работы. В данной работе определяется зависимость механических свойств металла от температуры. Испытания стали и латуни проводятся обычно при температурах 20°C , 300°C и 500°C , алюминия—при 20°C , 200°C , 300°C . Кроме того, для учета паразитных деформаций производятся испытания эталонного образца.

Перед установкой образца производится замер диаметра d_0 , длины l образца между головками. Длина $l_0=5d_0$ отмечается на образце кернами. Затем производится испытание образцов при заданных температурах со снятием автодиаграммы.

При растяжении в условиях комнатной температуры ведется наблюдение за появлением и развитием линий Чернова-Людерса.

После разрыва производится измерение диаметров образца в равномерной части d_p и в шейке d_k , а также расчетной длины l_k .

По автодиаграмме (рис. 62, 63) приемами, описанными в § 1 главы II, определяются нагрузки P_p , P_s или $P_{0.2}$, P_b , P_k

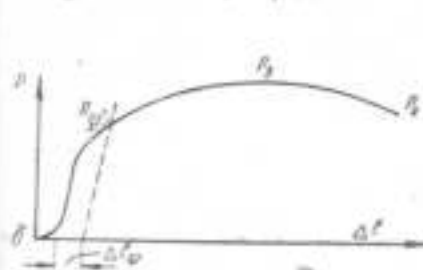


Рис. 62. Диаграмма растяжения без площадки текучести

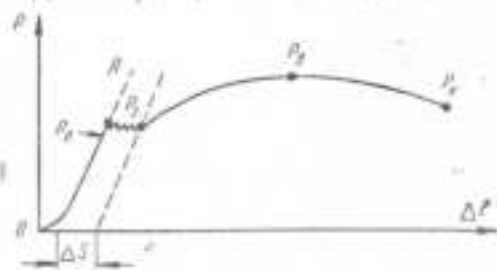


Рис. 63. Диаграмма растяжения с площадкой текучести

и длина площадки текучести ΔS . Нагрузка P_p определяется по отклонению кривой растяжения от прямой OA .

По полученным данным находят механические характеристики:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}; \quad \sigma_s = \frac{P_s}{F_0}, \text{ или } \sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}; \quad \sigma_b = \frac{P_b}{F_0};$$

$$S_k = \frac{P_k}{F_k}; \quad \delta_k = \frac{\Delta S}{l_0} 100\%; \quad \delta_k = \frac{l_0 - l_k}{l_0} 100\%;$$

$$\delta_{\text{рас}} = \frac{l_0 - l_0}{l_0} 100\%; \quad \delta_k = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%;$$

$$\delta_{\text{рас}} = \frac{F_0 - F_p}{F_0} 100\%,$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения, F_p — площадь сечения равномерной части, F_k — площадь сечения в шейке.

Для определения коэффициента упрочнения полученные автодиаграммы перестраиваются в диаграммы истинных напряжений в координатах $S = \frac{P}{F}$ и $\psi = \frac{F_0 - F}{F_0}$, где F —

площадь сечения и ψ — относительное сужение.

Известно, что при пластической деформации объем тела

меняется весьма мало, так что можно считать $V = \text{const}$ (закон постоянства объема).

Поэтому

$$l_0 F_0 = (l_0 + \Delta l) F, \quad (4)$$

где l_0 и F_0 — длина и площадь поперечного сечения до деформации, $l + \Delta l$, F — после деформации.

Из (4)

$$\frac{F}{F_0} = \frac{l_0}{l_0 + \Delta l}. \quad (5)$$

Так как $\psi = \frac{F_0 - F}{F_0}$, то

$$\frac{F}{F_0} = 1 - \psi. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем:

$$\psi = \frac{\Delta l}{l_0 + \Delta l}.$$

Последнее выражение справедливо до тех пор, пока сохраняется цилиндрическая форма образца, т. е. до момента начала образования шейки.

На автодиаграмме (рис. 64) отмечаем 4—5 нагрузок, включая P_k . За P_1 принимается P_p , P_2 берется в конце пло-

щадки текучести. Из этих точек проводим прямые, параллельные начальному участку. На оси абсцисс они отсекут соответствующие Δl .

Величина истинного напряжения определится из следующих соображений: в данный момент нагружения $P = \sigma F_0 = S F$,

откуда $\sigma = S \frac{F}{F_0}$. Подставляя сюда (6), получим

$$S = \frac{\sigma}{1 - \psi} = \frac{P}{F_0(1 - \psi)}.$$

Для каждой нагрузки определяем Δl , ψ , S (табл. 15).

Таблица 15

P , кг	Δl (мм) = $\frac{\Delta l \text{ (диагр)}}{100}$	$\psi = \frac{\Delta l}{l_0 + \Delta l} 100\%$	$S = \frac{P}{F_0(1 - \psi)}$ кг/мм ²

По точкам ψ и S строится начальная часть диаграммы истинных напряжений до точки $S_p = \frac{P_p}{F}$, где S_p — истинное временное сопротивление. Дальнейшее построение осно-

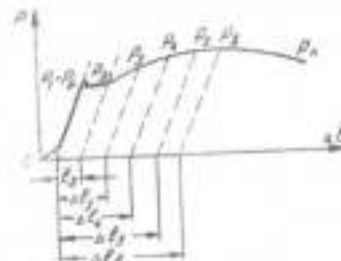


Рис. 64. Схема построения для перестройки кривой растяжения в диаграмму истинных напряжений

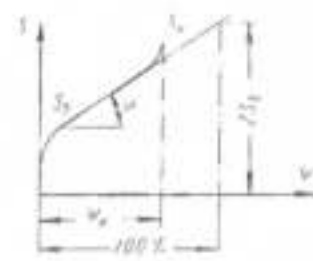


Рис. 65. Диаграмма истинных напряжений в координатах $S - \psi$

вано на правиле Кербера: экстраполированное к $\psi = 100\%$ напряжение S' равно $2S_p$. На диаграмме при $\psi = 100\%$ откладываем S' и проводим касательную из этой точки к по-

строеной кривой в точке S_B . Затем наносим точку с координатами ϕ_A и S_A , соответствующими моменту разрушения, и соединим ее плавной кривой с прямолинейной частью диаграммы (рис. 65).

По полученной диаграмме истинных напряжений определяется коэффициент упрочнения $D = \sigma_{\phi}$.

Все полученные данные сводятся в таблицы, а затем строятся графики зависимости величин, характеризующие механические свойства материала от температуры.

Отчетными материалами являются: схемы машины, печи и пирометра, автодиаграммы, таблицы измеренных и вычисленных величин, кривые истинных напряжений и графики зависимости σ_{ϕ} , σ_B , δ и ψ от температуры.

Испытание на ползучесть

Цели работы:

- 1) Ознакомление с испытательной машиной и измерительной аппаратурой.
- 2) Проведение испытания стали на кратковременную ползучесть (снятие кривой ползучести).
- 3) Определение скорости $\dot{\epsilon}$ на участке установившейся ползучести.

Закон Гука, характеризующий линейное соотношение между напряжениями и деформациями в твердых телах, далеко не охватывает всех свойств, связанных с напряженно-деформированным их состоянием. Опыты показывают, что такое состояние твердого тела существенно зависит от времени. Эта зависимость для большинства металлов, при сравнительно небольших деформациях и комнатной температуре, сказывается слабо; для высокопластических материалов (резина и пластмассы), эта зависимость является существенной уже при комнатной температуре. В нагруженном образце при постоянном напряжении деформация со временем продолжает изменяться (расти). У стали такое явление имеет место при повышенных температурах. Деформация, полученная в металлах таким образом, является пластической (необратимой).

Назовем ползучестью зависящее от времени изменение деформации. По исчерпанию способности тела пластически деформироваться происходит его разрушение. Особенностью процесса ползучести металла является уменьшение его вязкости и способности к пластическому деформированию. В железных сплавах (чугун, сталь) ползучесть имеет место при температурах выше 300°C , у многих материалов (пластмассы, каучуки и другие материалы органического происхождения) она

наблюдается при комнатной и более низкой температурах. Чем выше напряжение и температура испытания (службы), тем интенсивнее происходит ползучесть.

Кривые ползучести. Кривые ползучести снимаются при заданных постоянных напряжениях и температуре и строятся в координатах «относительная деформация — время» (рис. 66).

Кривая имеет три участка: I. Участок с постепенно уменьшающейся скоростью ползучести (неустановившаяся ползучесть). II. Участок с постоянной (минимальной) скоростью ползучести (установившаяся ползучесть). III. Участок с возрастающей скоростью ползучести, заканчивающийся разрушением.

Участок OA представляет собой деформацию, полученную в момент нагружения. Он соответствует кривой растяжения при обычных кратковременных испытаниях при данной температуре.

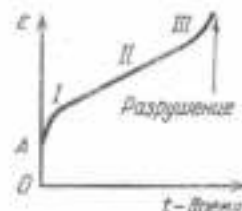


Рис. 66. Кривая ползучести

Предел ползучести. Пределом ползучести называется постоянное напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенный промежуток времени при заданной температуре равна заданной величине, установленной техническими условиями.

Длительность службы многих механизмов, работающих в условиях ползучести, составляет 10—25 лет. За это время их детали не должны деформироваться больше величины, при которой нарушится исправная работа механизма. Такие длительные испытания проводятся редко, и нужные данные получают путем экстраполирования второго участка кривой ползучести.

Машина для испытаний на ползучесть типа ДСТ-5000. Машина ДСТ-5000 служит для испытаний на ползучесть при растяжении (рис. 67).

Образец 1 с прикрепленными к нему термодатчиками вставляется в захваты машины и помещается в печь (не показана на схеме). Ручные маховички 2 (грубо) и 3 (точно) служат для точной установки образца в машине и в печи. Штанга 4 ограничивает перемещение рычага 5, она опускается и поднимается мотором 6 через редуктор 7. Грузы 8 задают предварительное напряжение в образце. Грузы 9 служат для нагружения образца до заданного напряжения. По индикатору 10 производится грубое измерение деформаций, так как он показывает суммарное удлинение образца, захватов и тяги.

Более точно деформации определяются при помощи тензомера (рис. 68). На образец 1 надевается массивный стальной стакан 2, в который устанавливаются боковые кварцевые стержни 3*. Центральный кварцевый стержень 4 вставляется в от-

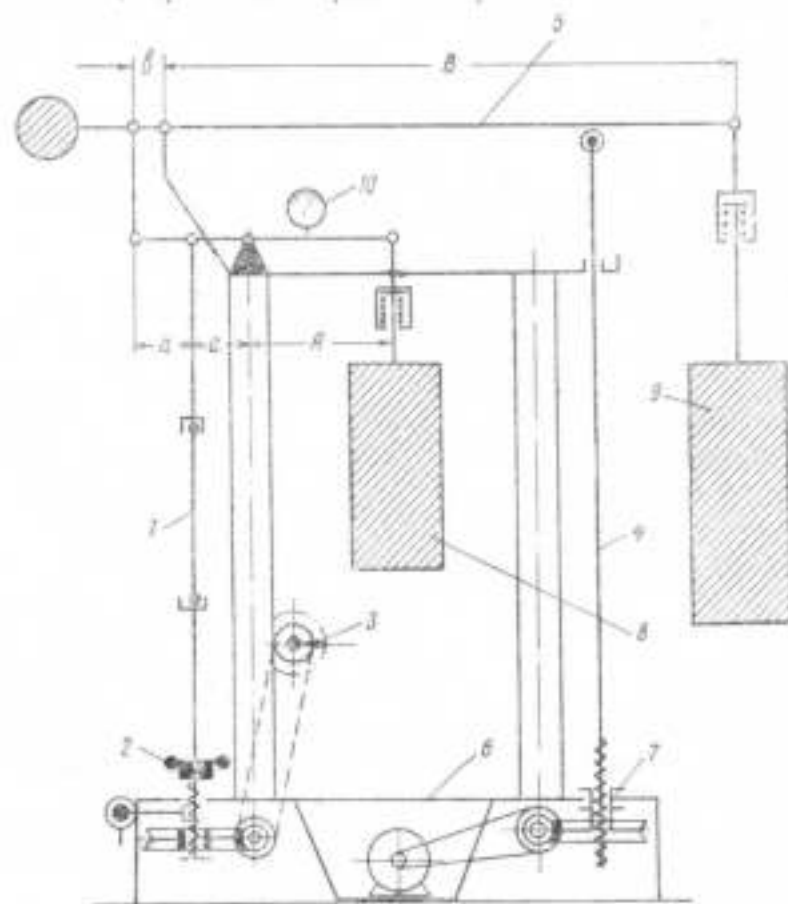


Рис. 67. Схема машины ДСТ-5000 для испытания на ползучесть.

верстие в верхней головке образца 1. Опора стойки индикатора 5 лежит на стержнях 3. При увеличении расчетной длины l_0 образца относительное перемещение стержней 3 и 4

* Стальной массивный стакан 2 служит, кроме того, для поддержания постоянной температуры по длине образца.

передается на штифт 6 стрелочного индикатора 7, который и показывает величину удлинения образца.

Схема стрелочного индикатора представлена на рис. 69. Штифт 1 индикатора в верхней части имеет винтовую нарезку (или зубчатую рейку), с ней в зацеплении находятся зубчатые колеса 2 и зубчатое колесо с жестко укрепленной на ней

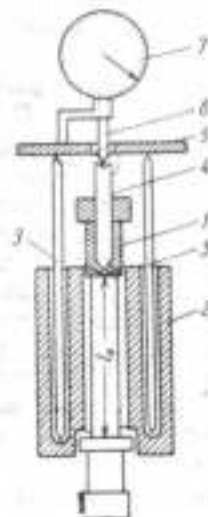


Рис. 68. Схема тензомера для измерения удлинений при ползучести

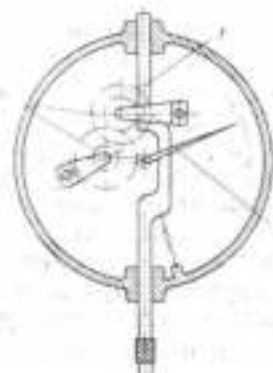


Рис. 69. Схема стрелочного индикатора

стрелкой 3. Передаточные числа этой системы подобраны так, что одно деление шкалы индикатора соответствует перемещению штифта на 0,01 мм. Имеются индикаторы с ценой деления 0,002 мм и 0,001 мм.

Температура электрической печи измеряется при помощи хромель-алюмелевой термопары и потенциометра. Температура печи регулируется при помощи dilatометрического регулятора, в котором укорочение или удлинение стержня, вызванное изменением температуры, через реле производит изменение величины электрического тока, питающего печь. На разогрев печи и установление в ней постоянной температуры требуется 6—10 час. Только после того, как температура печи установилась постоянной и не показывает тенденции к изменению, производится нагружение образца. В продолжение опыта температура должна поддерживаться с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$

при температуре до 650°C, $\pm 3^\circ\text{C}$ при температурах 650—900°C и $\pm 6^\circ\text{C}$ при температурах выше 900°C (ГОСТ 3248-46).

Образцы для испытаний на ползучесть на машине ДСТ-5000. Образец имеет расчетную часть диаметром $10 \pm 0,01$ и длину $100 \pm 0,1$ мм. Образцы с размерами, не укладывающимися в указанные допуски, не допускаются к испытаниям, так как рычаги нагружающего устройства и гири подобраны так, что каждая гиря (в зависимости от ее размеров) вызывает в образце напряжения 1,2 или 5 кг/мм².

Порядок выполнения работы. В результате работы должна быть получена кривая ползучести стали при 500°C .

В связи с длительностью разогрева и доведения печи до постоянной температуры обмер образца и установка его в печь и машину производятся накануне. Ознакомление с приемами установки образца, с работой машины, терморегулятора и термостата проводится на второй холодной машине. Затем студенты переходят к первой подготовленной к работе машине и приступают к проведению опыта: производится предварительное нагружение до напряжения в 1 кг/мм^2 наложением грузов 8. После этого индикатор 10 устанавливается на нуль и производится нагружение до заданного напряжения наложением грузов 9. При этом берется отсчет по индикатору 10 после каждого наложения грузов.

Показания приборов записываются в табл. 16.

Таблица 16

Материал		d_0 , мм		l_0 , мм		Примечание
№ п/п	Температура			Напряжение, кг/мм ²	Показание индикатора в 0,01 мм	
	холодного сплав термо- пары, °C	показания потенциометра, мВ	оборуд., °C			

После приложения заданного напряжения показания индикатора, потенциометра и термометра регистрируются через каждые две минуты. Так снимается первый участок кривой ползучести. Когда ползучесть перейдет на вторую стадию, от-

счеты снимаются через пять минут. На третьей стадии отсчеты берутся через три минуты.

Во время опыта необходимо следить, чтобы рычаг 5 не уперся в штангу 4, своевременно опуская последнюю.

В промежутках между отсчетами строится кривая ползучести в координатах удлинение — время.

Примечание: во время опыта не трогать машину руками, особенно детали регулятора.

На участке установившейся ползучести определяется ее скорость:

$$v_s = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta t}{t_0 \Delta t} 100\% \text{ в } \mu\text{с/с},$$

где Δl — приращение деформации установившейся ползучести за отрезок времени Δt , а l_0 — расчетная длина образца.

Отчетными материалами являются: схемы машины и приборов, эскиз образца, журнал наблюдений, табл. 15 и вычисления величины $\sigma_{\text{ср}}$.

Релаксации напряжений *

Цели работы:

1) Ознакомление с испытательными машинами и измерительными приборами.

2) Изучение релаксации в резине при растяжении и сжатии.

Если в деформированном теле зафиксировать его общую деформацию, то с течением времени усилия, а следовательно и напряжения, удерживающие деформацию в теле, будут убывать.

Такое уменьшение напряжений называется релаксацией.

Явление релаксации присуще всем реальным телам. Для металлов при комнатной температуре оно выражено слабо и заметно при высоких температурах. У некоторых материалов (например, свинец, высокие полимеры) оно хорошо выражено и при комнатной температуре.

Приведем несколько основных положений теории релаксации для одноосного напряженного состояния. Примем между напряжением σ и деформацией ϵ линейную дифференциальную зависимость в виде:

$$\frac{dz}{dt} + \frac{z}{\tau} = E \frac{di}{dt} + E \frac{1-\lambda}{\tau} z, \quad (7)$$

где t — текущее время, E — мгновенный модуль упругости, λ — безразмерная величина, характеризующая предельное

* Изложенный здесь материал предоставлен доцентом Бонским А. П.

падение напряжения при релаксации, T — время релаксации.

При $\lambda=0$ уравнения (7) представляет закон Гука, а при $\lambda=1$ — уравнение Максвелла:

$$\frac{dz}{dt} + \frac{z}{T} = E \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

На основании (8) Максвелл (1867 г.) ввел понятие времени релаксации, т. е. времени, в течение которого напряжение σ уменьшается при постоянной деформации ($\varepsilon = \text{const}$) в e раз, поскольку закон релаксации в этом случае запишется:

$$z = z_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (9)$$

где z_0 — напряжение в момент $t=0$, $e=2,718...$ — основание натуральных логарифмов.

Уравнение (7) удобно записать в интегральной форме. Запишем (7) в виде:

$$d\left(ze^{\frac{t}{T}}\right) = Ee^{\frac{t}{T}} dz + E \frac{1-\lambda}{T} e^{\frac{t}{T}} z dt;$$

интегрируя, получим:

$$ze^{\frac{t}{T}} = E \int e^{\frac{t}{T}} dz + E \frac{1-\lambda}{T} \int e^{\frac{t}{T}} z dt + c,$$

где c — постоянная интегрирования.

Интегрируя первый интеграл по частям и используя начальные данные: при $t=0$, $z_0 = Ez_0$, получим:

$$z(t) = Ez(t) - \frac{E\lambda}{T} \int_0^t e^{-\frac{t-\tau}{T}} z(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Положив, что при $t \geq 0$ $z = z_0 = \frac{\sigma_0}{E} = \text{const}$, из (10) получаем:

$$z(t, z_0) = z_0 \left[1 - \lambda \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right]. \quad (11)$$

Это соотношение дает закон релаксации, исходя из простой-

шей теории (7). Отсюда можно получить значение постоянных T и λ , поскольку при $t = \infty$ из (11) находим:

$$\lambda = \frac{z_0 - z_\infty}{z_0}, \quad (12)$$

при $t=T$

$$e = \frac{z_0 - z_\infty}{z_T - z_\infty}, \quad (13)$$

где z_T и z_∞ — напряжения при $t=T$ и $t = \infty$ соответственно.

Соотношение (11) удобно записать:

$$z_1 = \frac{z_0 - z(t, z_0)}{z_0} = \lambda \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (11')$$

Характер релаксации в резине качественно следует закону (11); можно подобрать из опытов T и λ так, чтобы кривая (11') прошла через большую часть экспериментальных точек. Однако полностью удовлетворить данным опыта формулой (11') не удается. Этот недостаток — следствие линейной теории (7), в которой не отражены особенности явления релаксации в начале, когда имеет место быстрое падение напряжения.

Исходя из более точной нелинейной теории релаксации, соотношение (11') можно заменить формулой:

$$z_1 = \frac{z_0 - z(t, z_0)}{z_0} = \lambda \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{1/4}} \right], \quad (11'')$$

в которой отражена особенность в начале явления: при $t=0$ $\frac{dz}{dt} = \infty$

Постановка опыта на релаксацию. Порядок работы. Цилиндрический образец, начальная высота которого H_0 сжимается между двумя плоскостями A и B до высоты H , после чего плоскости остаются неподвижными. Это соответствует постоянной деформации ($\varepsilon = \text{const}$). С помощью дополнительных приспособлений производится измерение сжимающего усилия P , начальная величина которого была P_0 . Схематически это изображено на рис. 70.

Исследование явления релаксации в резине может быть осуществлено как на сжатие, так и на растяжение. В частности, опыты на релаксацию в резине при сжатии могут быть проведены на любой испытательной машине рычажного типа (их нельзя осуществить на машинах гидравлического типа, так как они не обеспечивают длительного постоянства нагрузки — деформации).

На рис. 71 схематически изображен рычажный пресс, на котором проводятся испытания. Неподвижность плоскостей

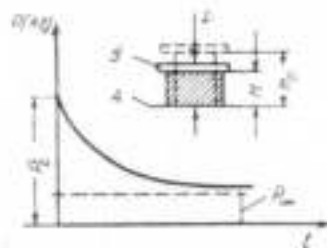


Рис. 70. Схема опыта на релаксацию

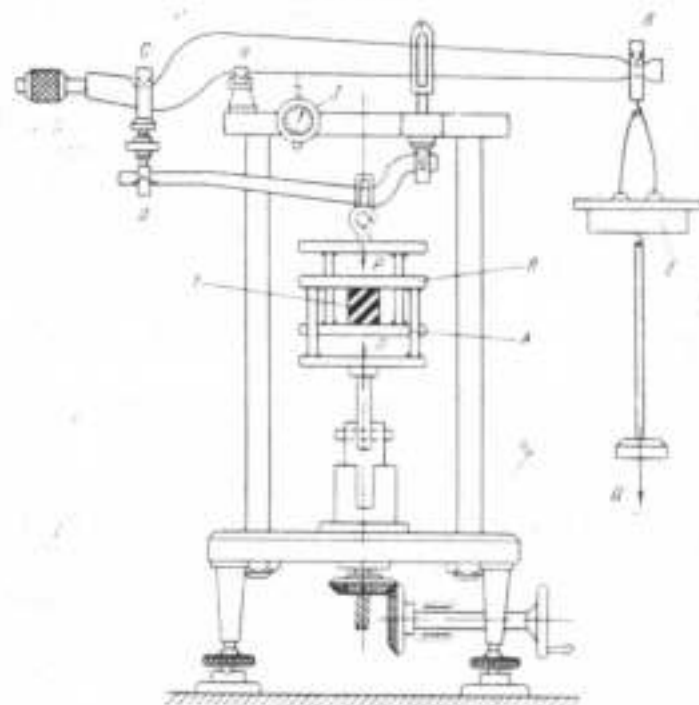


Рис. 71. Схема рычажного пресса для опытов на релаксацию при сжатии резинового образца

A и B контролируются индикатором I . Для замера падения усилия в образце суммарная нагрузка Q разбивается на основную P_1 и дополнительную G , состоящую из небольших

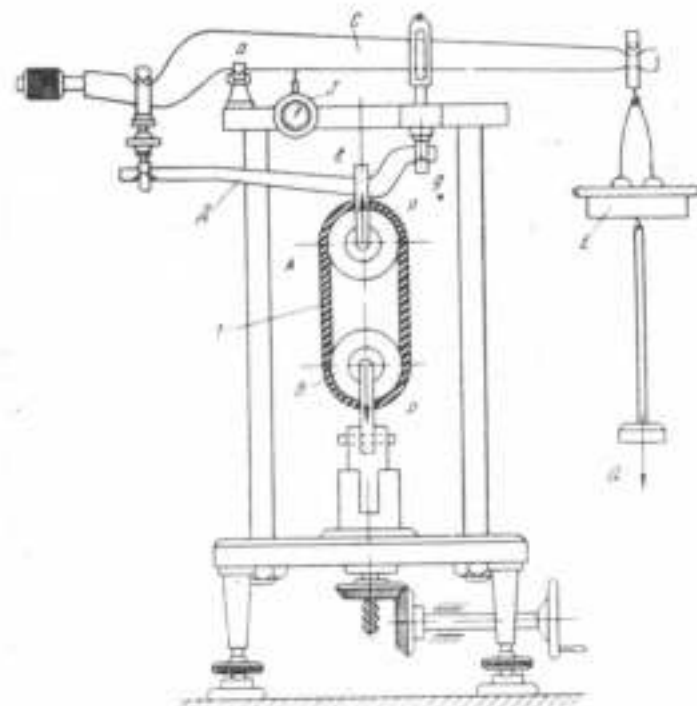


Рис. 72. Схема рычажного пресса при растяжении резинового образца (1) кольцевой формы

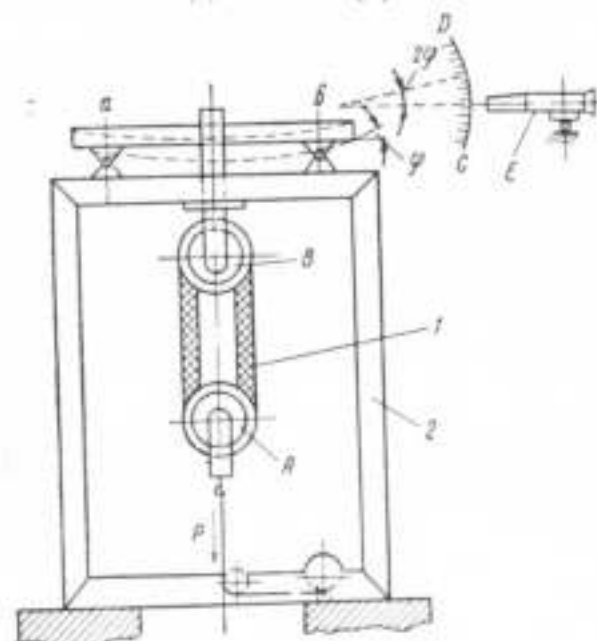


Рис. 73. Схема упрощенной установки для опытов на релаксацию

равновесок или сыпучей тяжелой среды. При опыте на релаксацию дополнительная нагрузка G уменьшается с тем, чтобы показания индикатора I оставались неизменными. При проведении опытов на прессе не удастся непрерывно поддерживать постоянство деформации во времени, но эти изменения малы, по сравнению с теми конечными деформациями, которые допускает резина.

Для исследования явления релаксации в резине при растяжении можно использовать тот же пресс (рис. 72). В качестве зажимов для образцов кольцевой формы применяются ролики. Опыты на релаксацию в резине при растяжении можно провести на более простой установке (рис. 73). Кольцевой резиновый образец, укрепленный на роликах A и B , растягивается в жесткой раме, на верхней полке которой помещается на двух призмах упругая балочка, служащая динамометром. С помощью зеркала, шкалы и оптической трубы можно произвести измерения падения усилия P и растянутом образце.

Во всех рассмотренных случаях с достаточной точностью можно произвести замеры падения усилия в сжатом или растянутом резиновом образце и построить кривую релаксации $f(z, t, z_0) = 0$. Перед опытом нужно тщательно произвести обмеры начальных размеров образцов. После деформации также производится обмер образца.

При опытах на сжатие, в целях получения однородного напряженного состояния, торцовые стороны образцов необходимо смазать какой-либо вязкой жидкостью.

Данные обмеров и эксперимента заносятся в табл. 17.

Запись данных в табл. 17 производится в указанное время для первого периода релаксации обязательно. Последующие промежутки времени отсчета могут постепенно увеличиваться, с тем чтобы можно было наблюдать падение усилия P по циферблату установки. По опытным данным (z_0, t) необходимо построить кривую $z_0 = z_0(t)$ на миллиметровой бумаге в двух масштабах по времени. Для первых 30 ÷ 40 мин опыта выбирается масштаб по оси времени: 15 сек — 5 мм. Затем последняя точка этого участка переносится влево для построения кривой в единицах второго масштаба времени, оставляя для z_0 тот же масштаб, как это показано на рис. 74.

После построения графика $z_0 = z_0(t)$ необходимо определить постоянные λ и T из соотношений (11') и (11''). Затем вычислить значения z и z_0 и построить эти кривые на том же графике.

Размеры образца до деформации $H_0 =$

Размеры деформированного образца при $t = 0$: $H = \Delta =$

№ п/п	Данные эксперимента				Теоретические подсчеты		Примечание
	время, <i>t</i>	усилие		$\frac{z - z_0}{z_0} = \bar{z}_0$	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_{12}$	
		<i>P</i> , кг	$z = \frac{P}{F}$				
0	0	<i>P</i> ₀	<i>z</i> ₀	0	0	0	
1	15"						
2	30"						
3	45"						
4	60"						
5	91"						
6	120"						
7	150"						
8	180"						
9	4'						
10	6'						
11	9'						
12	12'						
13	15'						
14	20'						
15	25'						
16	30'						
17	и т. д.						

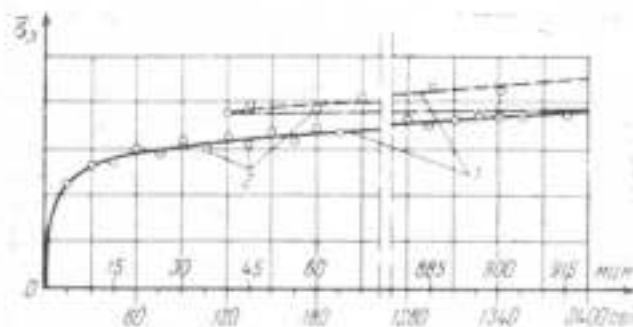


Рис. 74. Построение кривой $\sigma(t)$ в двух масштабах по времени: 1 — теоретическая кривая; 2 — точки, полученные экспериментальным путем

Отчетными материалами являются: схемы машин и приборов, эскизы образцов, формулы теоретического подсчета, табл. 17 и графики.

§ 3. ВЛИЯНИЕ НАДРЕЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Цели работы:

1) Ознакомление с испытательной машиной и измерительной аппаратурой.

2) Определение влияния надреза на предел текучести σ_s , предел прочности σ_b и характеристики пластичности δ и ψ .

В практике часто применяются изделия сложной конфигурации, имеющие нарезки, выточки, галтели и т. п. (источники концентрации или концентраторы).

Деформированное или напряженное состояние в местах резкого изменения формы изделий даже при простых условиях нагружения (растяжение, сжатие и т. п.) является весьма сложным. Вблизи источников концентрации имеет место резкое увеличение напряжений (концентрация напряжений).

Например, в случае растяжения круглого образца с кольцевым надрезом (рис. 75) напряженное состояние в сечении образца является объемным — присутствуют все три главных напряжения. На самой поверхности дна надреза напряженное состояние является плоским ($\sigma_2 = 0$); здесь продольные напряжения так же, как и тангенциальные, достигают наибольшей величины. Максимум этих напряжений будет тем больше, чем острее и глубже надрез.

Растяжение материала в надрезе связано с его поперечной деформацией, которая сдерживается примыкающими утолщенными частями, и простое растяжение в выточке невозможно.

Рис. 75. Схема распределения напряжений при растяжении круглого образца с круговым надрезом; d_0 — диаметр поперечного сечения в месте надреза, σ_1 — продольное осевое напряжение, σ_2 — радиальное напряжение, σ_3 — тангенциальное напряжение, $\sigma_4 = \frac{P}{F_n}$ — среднее продольное напряжение

Рис. 76. Пределы упругости и текучести надрезанных образцов при разных допусках

Коэффициентом концентрации напряжений называют отношение

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = \alpha,$$

где σ_{max} — наибольшее продольное напряжение в образце с выточкой, $\sigma_0 = \frac{P}{F}$ — номинальное напряжение гладкого образца, F — площадь сечения гладкого образца диаметра, равного диаметру в надрезе.

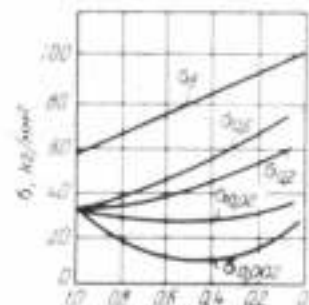
Чем острее и глубже надрез, тем коэффициент концентрации выше.

В зависимости от характера источника концентрации свойства материала могут иметь место два случая развития деформации и разрушения. Если σ_{max} превысит предел текучести, но не достигнет сопротивления отрыву, то по мере увеличения растягивающей силы пластическая область будет распространяться в глубь образца. Распределение напряжений по сечению в некоторой мере будет выравниваться и α уменьшаться; при некотором значении силы образец разрушится с заметной пластической деформацией (пластичные материалы).

Если же сопротивление материала отрыву равно или меньше предела текучести, то при увеличении силы напряжение σ_{max} достигнет сопротивления отрыву и произойдет разрушение стержня при отсутствии пластических деформаций (хрупкие материалы).

У пластичных материалов σ_{s2} , σ_s и σ_b возрастают при наличии надреза; пределы упругости и пропорциональности, определенные по строгим допускам ($\sigma_{d0.02}$, σ_p), снижаются (рис. 76); на величины σ_s , σ_{s2} и σ_b , вычисляемые как средние напряжения (рис. 77), существенно влияет форма надреза. Характеристики пластичности δ и ψ уменьшаются с увеличением глубины и остроты надреза.

Чувствительность к надрезу для разных материалов может быть определена различными способами, например по диаграмме изгиба надрезанного образца (рис. 78, а). Металлы хрупкие и весьма чувствительные к надрезу разрушаются



Сечение в выточке в долях полного сечения образца

Рис. 76. Пределы упругости и текучести надрезанных образцов при разных допусках

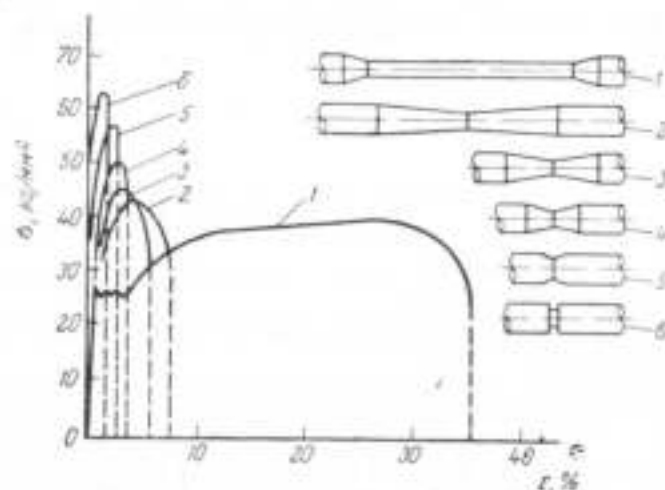


Рис. 77. Влияние формы надреза на механические свойства пластичного металла (сталь). Диаметры всех образцов в наименьшем сечении одинаковы

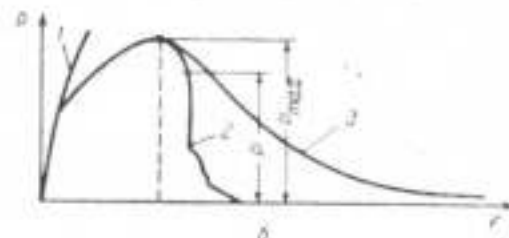
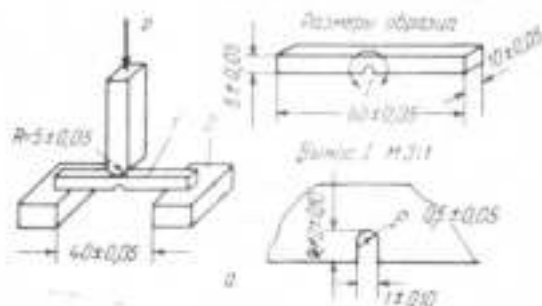


Рис. 78. Статические испытания изгибом для определения чувствительности к надрезу: а) схема испытания; б) диаграммы изгиба надрезанных образцов, 1—очень чувствительного к надрезу или хрупкого металла, 2—чувствительного к надрезу металла и 3—нечувствительного к надрезу металла

почти без остаточной деформации, чувствительные к надрезу дают кривые со срывами, а нечувствительные — плавные кривые (рис. 78, б).

Порядок выполнения работы. Для испытания берутся два образца из мягкой стали: один гладкий, другой надрезанный таким образом, что диаметр в месте надреза равен диаметру гладкого образца. После измерения диаметра и длины между головками образец растягивается на машине Гагарина или ИМ-4Р. Все данные сводятся в табл. 18.

Таблица 18

Материал							
№ п/п	Тип образца	d_0 , мм	l_0 , мм	l_k , мм	Нагрузки		
					предела текучести P_f , кг	временного сопротивления P_b , кг	истинного сопротивления P_v , кг
1	Гладкий						
2	С кольцевым надрезом						
$\epsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$		$\sigma = \frac{F_k - F_0}{F_0} \cdot 100\%$		$\tau_s = \frac{P_f}{F_0} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\tau_b = \frac{P_b}{F_0} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\tau_v = \frac{P_v}{F_0} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	

Отчетными материалами являются: схема испытательной машины, эскизы образцов и результаты испытаний, представленные в виде табл. 18.

§ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЕЙШИХ КОНСТРУКЦИЙ *

Поведение конструкций определяется числом и типом элементов, видом их соединения (клепка, сварка и т. п.), числом

* Задачи этого параграфа разработаны профессором С. Н. Никитиным и старшим инженером Л. В. Грибачевской.

и характером опор, внешними воздействиями и механическими свойствами материала ее частей. Исследования механических свойств материала обычно осуществляются на образцах описанными ранее методами.

В качестве элементов конструкций чаще всего употребляются стержни, пластинки, оболочки и их сочетания. Распространены конструкции, в которых основную роль играют стержни (фермы, рамы). Получили развитие тонкостенные конструкции, в которых пластинки и оболочки являются основными несущими элементами; стержни в них используются для подкрепления и для придания надлежащей геометрической формы.

При расчетах конструкций их расчленяют на части, рассчитываемые изолированно, и взаимное воздействие частей учитывается приближенно. В случаях, когда нет уверенности в полученных расчетом результатах, необходима экспериментальная проверка прочности и жесткости конструкций в целом (например, испытания самолетов в натуру) или моделей этих конструкций.

В этой книге приводятся два примера экспериментального исследования конструкций: стержневой системы (сварная ферма) и тонкостенной подкрепленной конструкции (крыло самолета).

Испытания сварной фермы

Цели работы:

- 1) Определение расчетом и опытным путем усилий в стержнях фермы.
- 2) Определение расчетом и опытным путем перемещений узлов фермы.
- 3) Выявление предельной нагрузки.

Определение усилий в стержнях фермы. Расчетная схема сварной фермы принимается в виде шарнирной, статически определимой стержневой системы, нагруженной в узлах силами, вызывающими в стержнях только растяжение—сжатие (рис. 79).

Нагружение фермы производится через силового возбудителя с гидроприводом (рис. 80).

Силовой возбудитель с гидроприводом представляет собой цилиндр, в котором масло под давлением перемещает поршень со штоком. Насос 2, приводимый в действие двигателем 3, качает масло из бака 1 в золотник 4, регулирующий производительность насоса (6, 12 и 18 литров в минуту). Через фильтр 5 масло попадает в предохранительный клапан 7, проходит через дроссельный кран 8, обратный клапан 10 и

подается в редукционный клапан 11. Редукционный клапан предназначен для автоматического поддержания заданного давления в пределах от 50 до 300 кг/см². Манометр 12 служит для настройки клапана. Далее масло проходит двойной клапан 13 и нагнетается в полость силового цилиндра 15. Под давлением масла поршень перемещается, что вызывает в тиге усилие, передаваемое на рычажную систему.

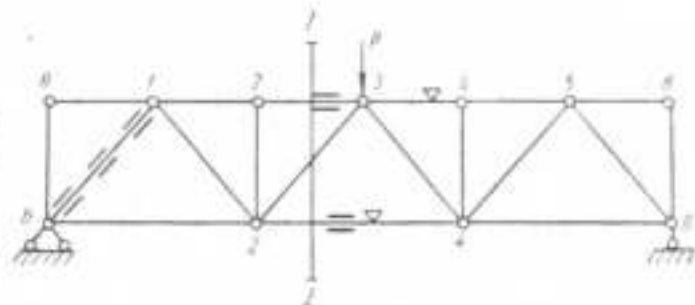


Рис. 79. Схема фермы.

Определение усилий в стержнях из опыта осуществляется при помощи рычажных тензометров и тензодатчиков, присоединенных к автоматическому измерителю деформаций. Рычажные тензометры и работа тензодатчиков описаны ранее.

Автоматический измеритель деформации (рис. 81) состоит из блока питания 1, переключателя 2, плечей мостовой схемы 3, усилителя переменного тока 4, фазочувствительного детектора 5, усилителя постоянного тока с поляризованным реле 6, релейного блока 7, регистратора 8. Измерительной частью прибора является мостовая схема, содержащая плечи 3. Переключатель 2 попеременно подключает к схеме тензодатчики на конструкции, являющиеся четвертым плечом в схеме. В схему включен реохорд с вращающейся щеткой, укрепленный на оси барабана регистратора. В схеме использован нулевой метод измерения. В момент баланса мостовой схемы происходит смена фазы сигнала. Сигнал с моста идет в усилитель переменного тока и далее, через фазочувствительный детектор и усилитель постоянного тока, поступает на поляризованное реле, срабатывающее в момент баланса мостовой схемы. Сигнал через релейный блок подается на регистратор, где происходит удар цифры по бумажной ленте, накрученной на барабан.

Величина деформации определяется расстоянием между цифрами. Цена деления: 1 мм на бумаге соответствует величина деформации $\varepsilon = 0,95 \cdot 10^{-3}$. Опроектирование каждой точки производится в течение одной секунды.

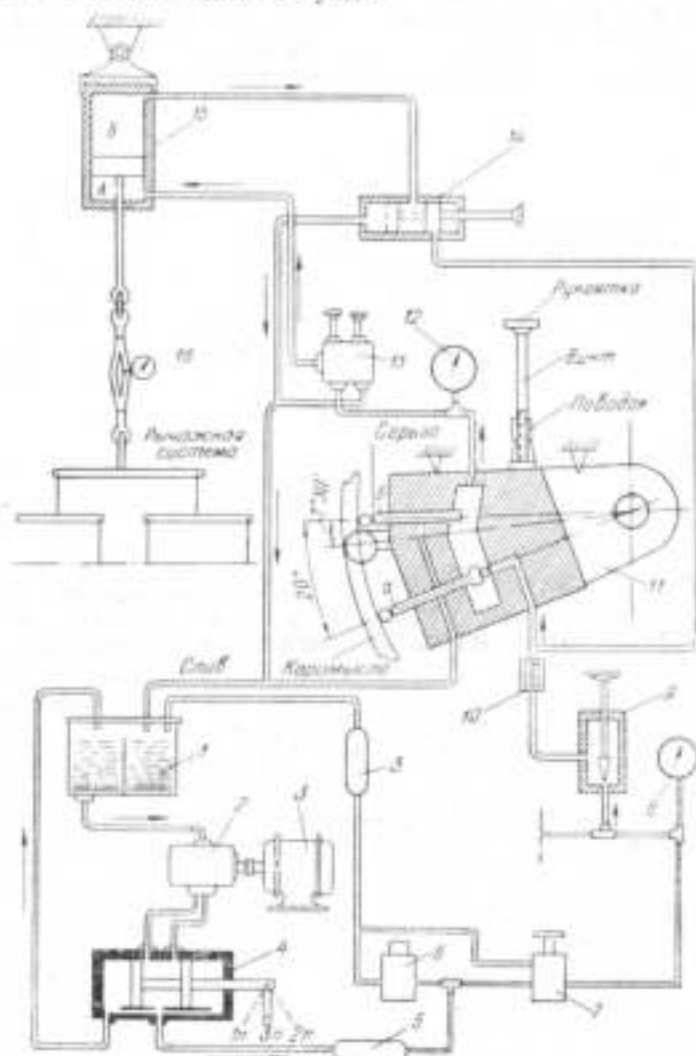


Рис. 80. Схема гидропривода

Порядок выполнения работы. Расчет усилий. При загрузке узла 3 силой $P = 2000$ кг одним из приемов статики со-

оружений находится условия в стержнях. Например, по способу Риттера, мысленно проводится сечение, пересекающее не более трех стержней (сеч. 1—1, рис. 79), отбрасывается одна

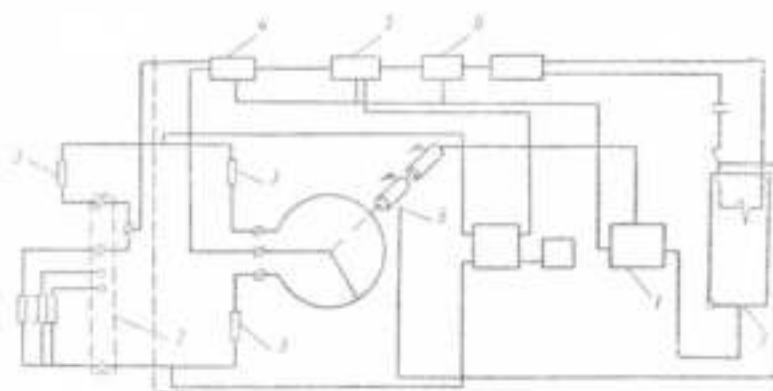


Рис. 81. Схема автоматического измерителя деформаций

из частей фермы, ее действие на оставшуюся заменяется растягивающими усилиями и из уравнений равновесия оставшейся части находятся неизвестные усилия.

Составляется табл. 19 найденных усилий.

Таблица 19

Усилия в стержнях по расчету

Элементы фермы	Раскосы			Верхний пояс			Нижний пояс		Стойки	
№ стержней	0-1	1-2	3-2	0'-1	1'-2'	2'-3	0-2	2-4	0'-0'	2'-2'
	5-6	5-4	3-4	5'-5'	5'-4'	4'-3	6-4		6'-6'	4'-4'
Усилия в стержнях по расчету										

Определение усилий в стержнях из опыта. В средних стержнях 5—6, 4'—3, 2—4 устанавливаются рычажные тензометры (рис. 79). В каждом сечении тензометры устанавливаются в четырех точках (рис. 82). В трех сечениях стержня

0—1 и в среднем сечении стержней 2—3, 2—4 (рис. 79) и шести точках каждого сечения наклеиваются тензодатчики (рис. 83).

В лаборатории МГУ ферма загружается нагрузкой в узлах 3 ступенями в 2,4 и 6 т каждая.

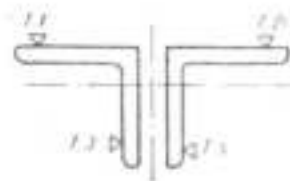


Рис. 82. Схема расположения тензодатчиков в сечении

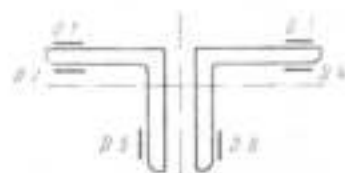


Рис. 83. Схема расположения тензодатчиков в сечении

Вначале дается предварительная нагрузка P_0 , достаточная для получения начального натяжения тросов. При этой нагрузке показания динамометров, тензометров и тензодатчиков принимаются за начальные.

После каждой ступени нагрузки показания приборов записываются в сводную табл. (табл. 20). Таблица составляется для каждой пары симметрично расположенных стержней, в средних сечениях которых находятся приборы (0—1 и 5—6, 2—3 и 4—3, 2—4).

Приращение показаний по тензометрам и тензодатчикам, расположенным в среднем сечении стержня, осредняются для ступени нагрузки. После этого вычисляется для каждой точки срединная относительная деформация ε_i по формулам

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta \varepsilon_i}{b m},$$

где $\Delta \varepsilon_i$ — среднее приращение показаний в сантиметрах,

b — база тензометра (2 или 10 см),

m — коэффициент увеличения прибора (обычно $m = 1000$) для записей по тензодатчикам;

$$\varepsilon_i = \sigma_i m,$$

где σ — среднее приращение расстояний между цифрами на бумажной ленте,

$m = 0,95 \cdot 10^{-2}$ — коэффициент перехода.

Если в одном и том же сечении стержня значения ε_i получаются близкими, то это означает, что стержень испыты-

вает осевую деформацию. В этом случае находится срединная по приборам в данном сечении относительная деформация ε_{cp} и по закону Гука определяется осевое напряжение:

$$\sigma_{cp} = E \varepsilon_{cp},$$

где $E = 2,1 \cdot 10^4$ кг/см² — модуль упругости для стали. Величина осевой силы в стержне при данной ступени нагрузки находится по формуле

$$S = \sigma_{cp} F,$$

где F — площадь поперечного сечения стержня.

Если же значения ε_i , найденные по верхним (и сечении) приборам, заметно отличаются от значений по нижним приборам, то стержень испытывает дополнительный изгиб, обусловленный в основном жесткостью соединения в узлах фермы.

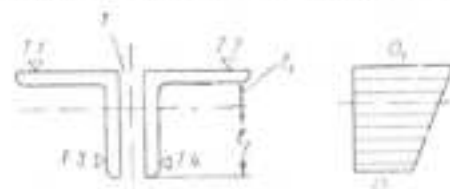


Рис. 84. Напряжения в сечении при наличии изгиба

В этом случае вычисляются средние значения напряжений отдельно по показаниям верхних ε_1 и нижних ε_2 приборов. Осевое напряжение для стержня определяется по формуле (рис. 84)

$$\sigma_{cp} = \sigma_1 + \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) l_1}{l_1 + l_2},$$

где l_1 и l_2 — расстояния центра тяжести сечения (находятся по таблицам сортамента). Осевое усилие в стержне определяется тем же способом. Записи и вычисления сводятся в табл. 20.

С целью оценить влияние жесткости узлов на стержни 0—1 установлены тензодатчики в трех сечениях — посредине и у каждого узла.

Показания датчиков для трех сечений записываются в таблицу, аналогичную табл. 20. Для приборов 1, 2, 3, 4 и для приборов 5, 6 находятся средние напряжения σ_1 и σ_2 , расхождение значений которых является показателем дополнительного изгиба вследствие жесткости узлов.

Усилия в стержнях по опытным данным
Наименование стержня

Нагрузка $P, \text{ кг}$	Тензометры				Тензодатчики					
	T. 1	T. 2	T. 3	T. 4	Д. 1	Д. 2	Д. 3	Д. 4	Д. 5	Д. 6
	бм = мм/мм прир. прир. показ.	бм = мм/мм прир. прир. показ.	бм = мм/мм прир. прир. показ.	бм = мм/мм прир. прир. показ.	приращение показаний					
P_0										
$P_0 + 2000$										
$P_0 + 4000$										
$P_0 + 6000$										
Среднее приращение показаний $\Delta_{\text{ср}}$ на ступень										
Средняя относит. деформация $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\Delta_{\text{ср}}}{b_m}$										

Средняя по тензометрам деформация

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\sum \varepsilon_i}{i} =$$

Среднее осевое напряжение

$$\sigma_{\text{ср}} = E \varepsilon_{\text{ср}} =$$

Осевое усилие по измерению

$$S_{\text{ср}} = \sigma_{\text{ср}} F =$$

Расчетное осевое усилие $S_{\text{расч}} =$

Расхождение в %

$$\frac{S_{\text{расч}} - S_{\text{ср}}}{S_{\text{расч}}} 100\% =$$

Средняя по датчикам деформация

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\sum \varepsilon_i}{i} =$$

Среднее осевое напряжение

$$\sigma_{\text{ср}} = E \varepsilon_{\text{ср}} =$$

Осевое усилие по измерению

$$S_{\text{ср}} = \sigma_{\text{ср}} F =$$

Расхождение в %

$$\frac{S_{\text{расч}} - S_{\text{ср}}}{S_{\text{расч}}} 100\% =$$

Определение вертикальных перемещений узлов фермы. Расчет перемещений осуществляется по формуле Максвелла—Мора, основанной на применении к упругим системам принципа возможных перемещений Лагранжа: если упругая система находится в равновесии, то сумма работ всех внешних и внутренних сил на любом возможном бесконечно малом перемещении равна нулю.

В качестве возможных перемещений можно брать действительные перемещения узлов и удлинения стержней от заданной нагрузки. В задаче определяется вертикальное перемещение узла 2 от силы $P = 2000 \text{ кг}$, приложенной в узле 3. Рассматриваются два состояния: первое — при действительном нагружении и второе — при нагружении единичной верти-

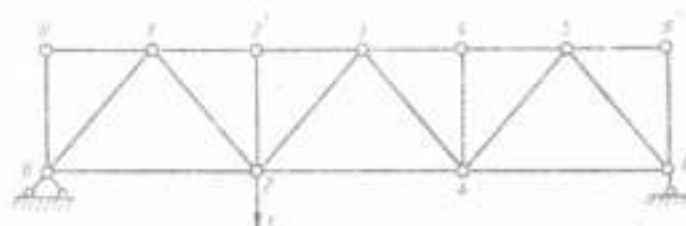


Рис. 85. Ферма, нагруженная единичной силой

кальной силой, приложенной в узле 2 (рис. 85). Составляется выражение работы сил второго состояния на перемещениях первого состояния.

Работа внешней силы будет равна:

$$T = 1 \cdot \Delta_{1P},$$

где Δ_{1P} — перемещение по направлению единичной силы, вызванное нагрузкой P . Одним из расчетных способов статик сооружений определяются усилия S во всех стержнях фермы для второго $S^{(2)}$ состояния. Индекс i означает номер стержня. Значения $S_i^{(1)}$ усилий для первого состояния найдены ранее. Удлинения стержней в первом состоянии находится по формуле:

$$\Delta_i^{(1)} = \frac{S_i^{(1)} l^{(1)}}{EF^{(1)}},$$

где $l^{(1)}$ и $F^{(1)}$ — длина и площадь сечения i -го стержня. Сум-

ма работ внутренних сил на перемещениях первого состояния будет равна:

$$W = - \sum_{i=1}^n S_i^{(1)} \Delta y_i^{(0)}.$$

Знак минус взят потому, что силы упругости совершают отрицательную работу, накапливая энергию в обратимой форме. Согласно принципу Лагранжа

$$T + W = 0$$

или

$$\Delta_{10} = \sum_{i=1}^n S_i^{(1)} \Delta y_i^{(0)} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i^{(1)} S_p^{(0)}}{EF^{(0)}} l^{(0)}.$$

При проведении опыта в узлах 2 и 4 фермы устанавливаются индикаторы, начальные отсчеты по которым берутся при начальной нагрузке P_0 . В процессе нагружения ступенями 2, 4 и 6 т записываются показания индикаторов и вычисляется среднее перемещение для ступени нагрузки. Вычисления сводятся в табл. 21.

Определение прогиба в узле 2

Наименование стержней	№ стержней	Длина $l^{(0)}$ в см	Площадь сечения $F^{(0)}$ см ²	Усилия $S_p^{(0)}$ от нагрузки $P = 2000$ кг	Усилия $S_i^{(1)}$ от ступени нагрузки P_i кг	$\frac{l^{(0)}}{EF^{(0)}}$	$\frac{S_i^{(1)} S_p^{(0)}}{EF^{(0)}} l^{(0)}$	$\Delta_i = \frac{S_i^{(1)}}{F^{(0)}}$

Вертикальное перемещение в узле 2:

$$\Delta_{10} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i^{(1)} S_p^{(0)} l^{(0)}}{EF^{(0)}}.$$

Среднее на ступень нагрузки перемещение узла 2 по эксперименту:

$$\Delta_2 = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{3}.$$

Расхождение в %:

$$\frac{\Delta_{2p} - \Delta_2}{\Delta_{2p}} 100\% =$$

Выявление предельной нагрузки. Предельная нагрузка для данного нагружения (в упругой области) определяется как та ее величина, при которой достигается предел текучести в одном из стержней, либо в одном из сжатых стержней происходит потеря устойчивости.

Из табл. 19 берется напряжение, по модулю наибольшее. Устанавливается величина нагрузки, при которой в данном стержне достигается предел текучести.

$$P_p = P \frac{\sigma_s}{\sigma_{пред}},$$

где $\sigma_s = 2400$ кг/см² предел текучести для стали. По табл. 21 выбирается раскос, в котором получено по модулю наибольшее сжимающее усилие. По формуле:

$$S_{кр} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{l^2}$$

определяется критическая сила в стержне. Нагрузка на ферму, при которой в данном раскосе возникает $S_{кр}$, будет:

$$P_{kp} = P \frac{S_{кр}}{S_p^{(0)}}.$$

Из двух значений силы P_p и P_{kp} предельным значением для фермы является меньшее.

Отчетными материалами являются: схема фермы с указанием мест установки приборов, табл. 19 расчетных усилий в стержнях, табл. 20 опытного определения усилий в стержнях, таблица для определения σ_1 и σ_2 в сечениях, близких к узлам, табл. 21 определения вертикального перемещения узла 2 фермы, расчет по выявлению предельной нагрузки.

Испытания крыла самолета

Цели работы:

Ознакомление с конструкцией и методикой определения напряжений и перемещений крыла.

Многие конструкции по своему назначению должны иметь минимальный вес (самолеты, ракеты и т. п.). Нагрузки, которым подвергаются такие конструкции, бывают значительными и поэтому рациональное использование материала для

обеспечения прочности и жесткости является определяющим при их проектировании.

Распространенной формой таких конструкций является тонкостенная оболочка типа, например, крыла самолета. В полете на самолет и его части действуют аэродинамические и инерционные силы. Эти нагрузки определяются на основании продувок моделей и аэродинамических расчетов. Из всех возможных нагружений самолета выделяются так называемые основные расчетные случаи и для них производится расчеты на прочность самолета и его частей.

Крыло самолета работает на изгиб и кручение. Для расчета крыла в целом его можно рассматривать как консольную систему, закрепленную одним концом в фюзеляже, нагруженную аэродинамическими силами, инерционными нагрузками от грузов и т. д. (рис. 86). Жесткость крыла должна быть достаточной для того, чтобы сохранить неизменность аэродинамических качеств.

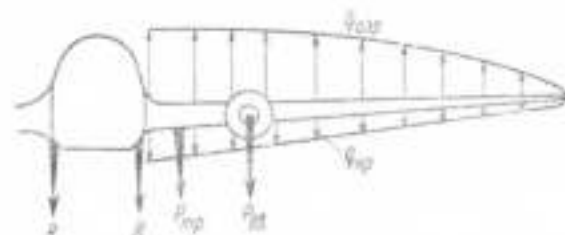


Рис. 86. Схема нагружения крыла в полете

Расчет крыла на прочность и жесткость является сложным и трудоемким. В данной работе ставится цель ознакомить студентов с экспериментальной методикой определения напряжений и перемещений и поэтому сопоставление расчетных и опытных данных не производится.

Крыло имеет покрытый обшивкой каркас, состоящий из продольного (рис. 87) набора (лонжероны и стрингеры) и поперечного (рис. 88) набора (перья).

Изгибающий момент воспринимается в основном лонжеронами и частично стрингерами и обшивкой.

Крутящий момент и перерезывающие силы вызывают касательные напряжения в обшивке и стенках лонжеронов.

Объектом испытаний в лаборатории МГУ является крыло современного самолета, стреловидное в плане с работающей обшивкой из дюралюминия (рис. 89).

Аэродинамическая нагрузка в соответствии с расчетным случаем имитируется распределенными по многим точкам на-

грузками. На крыло приклеиваются ламки или через обшивку пропускается трос, закрепленный на бобышке (рис. 90). Ламки или тросы объединены парами рычагами, которые также

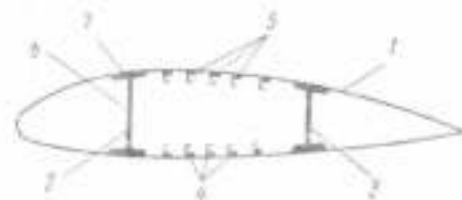


Рис. 87. Схема двухлонжеронного крыла: 1—обшивка; 2—передний лонжерон; 3—задний лонжерон; 4—5—стрингеры; 6—стенка лонжерона и 7—пол лонжерона

парно присоединены к новому рычагу, и т. д. Эта рычажная система присоединяется через трос и контрольный динамометр к гидравлическому силовозбудителю.

В лаборатории МГУ работа ставится в учебных целях, поэтому нагружение крыла осуществляется только на его концевой части.



Рис. 88. Схематическое изображение металлического перья: а) нормальная металлическая перья; б) усиленная металлическая перья. 1—рифтовка; 2—отбортовка для крепления стрингера; 3—отбортовка для крепления к лонжерону; 4) усиленная металлическая перья: 1—бокс; 2—стенка; 3—профил.

Замеры деформаций производятся при помощи тензодатчиков, наклеенных на поверхности крыла. Показания их записываются с помощью автоматического и полуавтоматического измерителей деформации.

Измерительная аппаратура. Работа автоматического измерителя деформации описана в работе по испытаниям фермы.

Электронный измеритель деформации (рис. 91) применяется для измерения электрических сигналов, пропор-

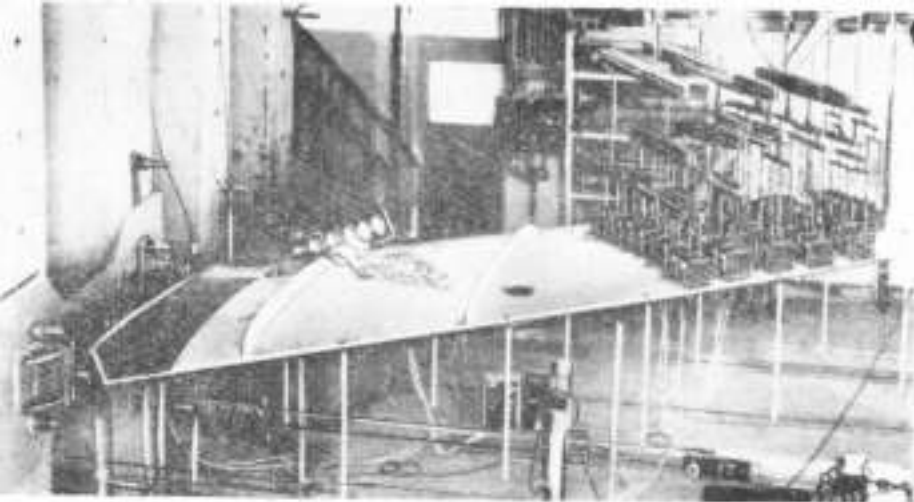


Рис. 89. Схема установки крыла для испытаний

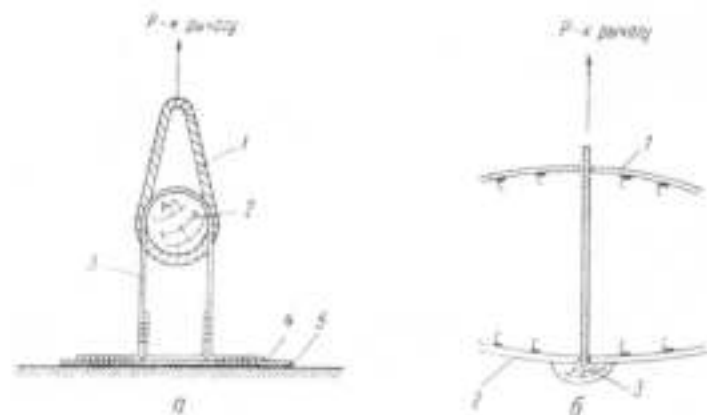


Рис. 90. Приспособления для передачи нагрузки на крыло

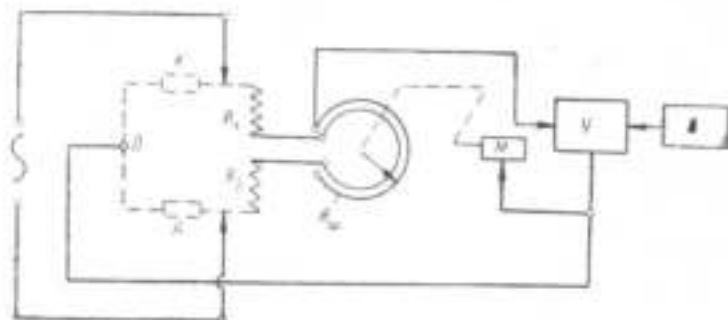


Рис. 91. Схема измерителя деформации

циональных изменений деформации в пределах от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$.

Мостовая схема прибора состоит из активного A и компенсационного K датчиков и двух сопротивлений R_1 и R_2 . Мост питается переменным током от обмотки трансформатора выпрямителя B .

Изменение сопротивления датчика A нарушает баланс моста, вызывая в его измерительной диагонали напряжение ΔU , пропорциональное деформации. Напряжение подается на вход усилителя Y , питаемого постоянным током от выпрямителя B . Усиленный переменный сигнал подается на мотор M , перемещающий подвижной контакт реохорда R_{re} и стрелки шкалы прибора. Перемещение контакта реохорда происходит до восстановления баланса моста; напряжение в диагонали моста становится равным нулю, подача сигнала на мотор прекращается. Стрелки на шкале прибора отмечают величину, пропорциональную деформации. Малое деление шкалы соответствует относительно деформации $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$.

Вследствие того что направления главных напряжений в данной точке заранее неизвестны, применяют установку трех датчиков с осями, расположенными под углами друг к другу (розетка датчиков).

Чаще всего применяется прямоугольная розетка (рис. 92), где датчики расположены вдоль осей x , z и вдоль биссектрисы координатного угла (ось y направлена по размаху крыла).

Пусть известны деформации ε_x , ε_y , ε_z . При плоском напряженном состоянии деформация в любом направлении, определяемом углом φ к оси x , находится из формулы:

для данных по тензомерам:

$$\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_x \cos^2 \varphi + \varepsilon_z \sin^2 \varphi + \frac{1}{2} \gamma_{xz} \sin 2\varphi.$$

Используя данные из эксперимента, из этого уравнения определяем

$$\gamma_{xz} = 2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_x + \varepsilon_z).$$

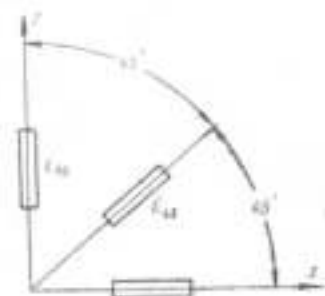


Рис. 92. Схема установки тензодатчиков «розетки»

крыла при этой нагрузке. Построить графики перемещений по передней и задней кромкам крыла для нагрузки $P = 2000$ кг.

Отчетными материалами являются: схема крыла в плане с расстановкой тензодатчиков, реок и индикаторов, таблица вычисления главных деформаций и напряжений, таблица вычисления и графики перемещений по передней и задней кромкам крыла.

§ 3. УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЯ

Цели работы:

1) Ознакомление с испытательными средствами и измерительными приборами.

2) Определение критической силы $P_{кр}$ теоретическим и опытным путем в пределах упругости.

Расчеты на прочность конструкции, подбор материала и размер ее частей производятся из условия, чтобы величины напряжений при работе не превосходили некоторых определенных значений. Иногда, из условий эксплуатации, производятся расчеты на жесткость, т. е. определяются максимально возможные перемещения конструкции и ее частей, обусловленные их деформируемостью, которые также не должны превосходить допустимых.

Такие расчеты по существу не могут выяснить вопрос о том, находится ли конструкция и ее части в состоянии устойчивого равновесия. Между тем в инженерной практике нередки случаи, когда приходится иметь дело с неустойчивыми формами равновесия. Переход от устойчивого равновесия к неустойчивому наступает при возрастании действующих сил сверх некоторого предела. Так, например, кольцо, сжатое равномерно распределенной нагрузкой, по достижении последней некоторого критического значения сразу меняет форму, становясь эллиптическим; в тонком листе, нагруженном по краям сдвигающими усилиями, при некотором их критическом значении образуются волнообразные складки, расположенные в диагональном направлении, и т. п.

Недооценка расчетов конструкций на устойчивость приводила иногда к крупным катастрофам, например: разрушение Менхенштейнского моста в Швейцарии, когда потеряла устойчивость сжатая стойка фермы при прохождении по мосту поезда с двумя паровозами; разрушение мостов через р. Ковда и р. Мозырь, разрушение Квебекского моста в Америке и др. Эти обстоятельства заставляют одновременно заниматься вопросами и прочности, и устойчивости.

Простейшая задача устойчивости — о прямом стержне, сжатом силами P вдоль его оси, — решена Эйлером в 1744 г.

Сущность ее заключается в следующем. Пока сила P не превосходит некоторого предела, определяемого геометрией стержня и материалом, стержень будет находиться в состоянии простого сжатия, причем это состояние будет устойчивым: если какими-либо силами изогнуть стержень, то он, будучи предоставлен затем самому себе, благодаря упругости вернется в первоначальное положение. Если же силы преизйдут этот предел, то наступит явление потери устойчивости — стержень приобретает изогнутую форму. Та величина силы P , по достижении которой стержень теряет устойчивость, называется критической и обозначается $P_{кр}$. Следовательно, пока $P < P_{кр}$, прямая форма стержня является устойчивой. Если же $P = P_{кр}$, то наряду с прямой формой, являющейся неустойчивой при этом значении силы, становится возможным искривленное состояние стержня. Точное решение задачи показывает, что с момента достижения критической силы кривизна оси стержня при малом изменении силы начнет возрастать очень быстро.

Пусть стержень постоянного сечения, шарнирно опертый по концам, сжимается силой P (рис. 94). Предположим, что изгиб уже произошел, запишем уравнение упругой линии

$$EIy'' = M(x), \quad (1)$$

где EI — наименьшая жесткость поперечного сечения стержня; в нашем случае $M(x) = -Py$, поэтому из (1) получаем

$$y'' + ky = 0, \quad (2)$$

где $k = \frac{P}{EI}$. Общее решение (2) имеет вид:

$$y = a \sin kx + b \cos kx;$$

постоянные a и b определяются из граничных условий:

$$y = 0 \text{ при } x = 0, \quad x = L. \quad (3)$$

Первое условие дает $b = 0$, следовательно, ось стержня принимает синусоидальную форму; из второго условия (3) находим $a \sin kL = 0$, что влечет за собой выполнение равенств: $a = 0$, либо $\sin kL = 0$. Но условие $a = 0$ противоречит предположению о том, что стержень имеет прогиб, следовательно,



Рис. 94. Стержень после потери устойчивости

$\sin kl = 0$, откуда $kl = n\pi$, где n — любое целое число. Вспомогательное обозначение k^2 , находим

$$P = \frac{\pi^2 EI}{l^2} n^2. \quad (4)$$

Наименьшее отличное от нуля значение силы получается из (4) при $n = 1$:

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

докажем, что это значение силы будет именно критическим (формула Эйлера). Действительно, так как мы предположили, что стержень изогнулся, то второе из условий (3) правильно надо было бы записать так:

$$y = 0 \text{ при } x = l - \Delta,$$

где Δ — разность между длиной стержня и его проекцией на ось x . Если теперь силу P постепенно уменьшать, то стержень будет выпрямляться; в пределе получим $\Delta = 0$; второе условие (3) станет точным и в согласии с определением даст значение (5) критической силы.

Определим критическое напряжение, возникающее в момент потери устойчивости:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{l^2 F_0} = \frac{\pi^2 E I^2 F_0}{l^2 F_0} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2};$$

здесь I — радиус инерции сечения, $\lambda = \frac{l}{i}$ — гибкость стержня.

Имея в виду, что формула (5) справедлива только в пределах закона Гука, легко найти гибкость стержня, при которой его можно еще рассчитывать на устойчивость по формуле (5); из условия $\sigma_{кр} < \sigma_p$ находим:

$$\lambda > \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}, \quad (6)$$

например, для обычной строительной стали $\lambda > 100$, для чугуна $\lambda > 80$ и т. д.

Устойчивость за пределом упругости. Если гибкость стержня меньше величины, даваемой формулой (6), то в стержне пластические деформации появятся прежде, чем он потеряет устойчивость; однако и в этом случае, при увеличении сжимающих сил, может наступить продолженный изгиб и стержень потеряет устойчивость уже за пределом упругости.

Решение задач об устойчивости за пределами упругости показывает, что вид формулы, определяющей значение критической силы, тот же, что и в пределах упругости, только модуль упругости E заменяется «приведенным» модулем, зависящим от свойств материала и геометрии сечения. Приведем формулу; не останавливаясь на выводе ее критической силы, для сжатого шарнирно опертого стержня при пластических деформациях:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 K_1 I}{l^2},$$

здесь K_1 — модуль Кармана, зависящий от свойств материала и геометрии поперечного сечения. Например, для стержня прямоугольного сечения

$$K_1 = \frac{4E \frac{dz}{ds}}{\left(1 + E \sqrt{\frac{dz}{ds}}\right)^2},$$

где $\frac{dz}{ds}$ — тангенс угла наклона касательной к кривой $z \sim s$ длинного материала.

Испытательные машины и измерительные приборы. Испытания на устойчивость стержня могут быть осуществлены на многих машинах. Например, простейшей испытательной машиной, которая может быть использована для опытов, является прибор Михалюка (рис. 95). Длинный рычаг 1 посредством тяги 2 соединен шарнирно с коротким рычагом 3; на одном конце рычага 1 имеется подвеска 7 для грузов Q , на другом укреплен противовес 8. Усилие от действия грузов Q передается на образец посредством упоров 4 и 5. Общее отношение плеч рычагов 1 и 3 равно 1:5, так что $P = 50 Q$. Для измерения прогибов испытуемого образца на станине машины укрепляется индикатор 9.

Для испытания длинных образцов — до 750 мм — может быть использована машина Р-5, описанная ранее.

Порядок выполнения работы. Перед опытом делаются необходимые обмеры образцов и по формуле Эйлера вычисля-

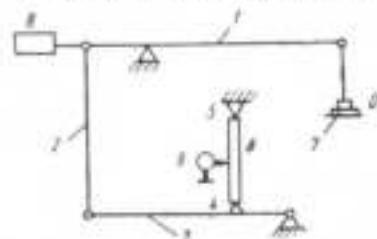


Рис. 95. Схема прибора Михалюка

ются значения критических сил. После этого образец вставляется между опорами 4 и 5 прибора Мизалеса или между опорами машины Р-5 при помощи специальных приспособлений, осуществляющих ту или иную заделку концов стержня (например, шарнирное опирание достигается применением шаровых подпятников). Момент потери устойчивости фиксируется либо по резкому изменению показаний индикатора (стрелка его делает несколько оборотов), либо по падению нагрузки на силовизмерителе (при работе на Р-5).

Опыт на устойчивость стержня при пластических деформациях можно провести на описанных выше установках, однако в проведении опыта будут некоторые отличия: а) предварительно следует по данным растяжения образца из того же материала построить диаграмму $\sigma \sim \epsilon$; б) для теоретического определения критической силы надо найти модуль Кармана, куда входит величина $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$; поэтому в момент потери устойчивости необходимо замерить деформацию, чтобы знать точку на диаграмме $\sigma \sim \epsilon$, в которой следует определять величину $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$.

Обработка результатов испытаний. Данные об опытных образцах и значения критических сил, полученных по формуле Эйлера и экспериментально, вносят в табл. 23.

Таблица 23

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Заделка «шарнирная»		
			материал	материал	материал
Длина	l	см			
Диаметр внешний	D	см			
Диаметр внутренний	d	см			
Момент инерции	I	см ⁴			
Радиус инерции	i	см			
Глубина стержня	λ	—			
Модуль Юнга	E	кг/см ²			
Критич. сила по опыту	P	кг			
Критич. сила по формуле Эйлера	$P_{\text{Эй}}$	кг			
Расхождение		%			

Отчетными материалами являются: схемы испытательных машин и измерительных приборов, журнал наблюдений и табл. 23.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев Б. А. Испытательные машины и приборы. Машино, М., 1957.
 Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. ГИТТЛ, М.—Л., 1952.
 Безухов Н. И. Сборник задач по теории упругости и пластичности. ГИТТЛ, М., 1957.
 Безухов Н. И. Теория упругости и пластичности. ГИТТЛ, М., 1963.
 Белкин Н. М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов. ГИТТЛ, М., 1954.
 Белкин Н. М. Сопротивление материалов. Физматгиз, М., 1959.
 Гиндбург Я. С. Испытания металлов при повышенных температурах. Машино, М.—Л., 1954.
 Гольденблат И. И. Введение в теорию ползучести строительных материалов. ГИЛСА, М., 1952.
 Ильюшин А. А. Пластичность. ОГИЗ—Гостехиздат, М.—Л., 1948.
 Ильюшин А. А., Леньский В. С. Сопротивление материалов. Физматгиз, М., 1959.
 Кан С. Н., Свердлов И. А. Расчет самолета на прочность. Оборонгиз, М., 1958.
 Качуков Л. М. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М.—Л., 1949.
 Лившиц Я. Д. Строительная механика самолета. Оборонгиз, М., 1946.
 Надан А. Пластичность и разрушение твердых тел. ИЛ, М., 1954.
 Найбер Г. Концентрация напряжений. ОГИЗ—Гостехиздат, М.—Л., 1947.
 Новожилов В. В. Теория упругости. Судпромгиз, Л., 1958.
 Папкович П. Ф. Теория упругости. Оборонгиз, М.—Л., 1939.
 Рабинович И. М. Строительная механика стержневых систем. Стройиздат, М., 1946.
 Раевский Н. П. Методы экспериментального исследования механических параметров машин. АН СССР, М., 1952.
 Рязанский А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем. ГИТТЛ, М., 1953.
 Саввин Г. Н. Концентрация напряжений около отверстий. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
 Свинто Н. К. Устойчивость скатых и скато-изогнутых стержневых систем. Гостройиздат, М.—Л., 1956.
 Тимошенко С. П. Курс статки сооружений, ч. I. ОНТИ—Гостройиздат, М.—Л., 1933.
 Тимошенко С. П. Теория упругости. ОНТИ—ГТТИ, М.—Л., 1934.
 Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. ОГИЗ—Гостехиздат, М., 1955.
 Ужик Г. В. Прочность и пластичность металлов при низких температурах. Изд-во АН СССР, М., 1957.
 Уорсинг А., Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. ИЛ, М., 1953.
 Филиппенко-Бородин М. М. и др. Курс сопротивления материалов, ч. I, II, ГИТТЛ, М., 1955—1956.
 Фридрих Я. Б. Механические свойства металлов. Оборонгиз, М., 1932.
 Хофф Н. Продольный изгиб и устойчивость. ИЛ, М., 1955.
 Шапошников Н. А. Механические испытания металлов. Машино, М.—Л., 1951.
 Яковлев К. П. Математическая обработка результатов измерений. Гостехиздат, М., 1953.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

§ 1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН
И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Цели работы:

- 1) Ознакомление с методами измерения малых продольных деформаций и скорости распространения волн в твердых телах.
- 2) Проверка теории Сен-Венана соударения стержней (по времени соударения).
- 3) Построение динамической диаграммы растяжения резины.

Распространение продольных волн в стержнях. При изучении многих явлений в природе (землетрясения, образование волн «цунами» в океанах и т. п.) и в технике (взаимодействие соударяющихся тел, действие взрывной нагрузки и т. п.), при исследовании механических свойств материалов при больших скоростях деформации необходимо учитывать, что механические возмущения распространяются в твердых телах с конечной скоростью в виде волн.

В теории продольных волн в длинных тонких стержнях, разработанной Сен-Венаном, пренебрегают движением частиц в направлениях, перпендикулярных оси стержня, а напряжения и деформации считают равномерно распределенными по поперечному сечению, т. е. используют гипотезу плоских сечений.

Направив ось ox по оси стержня, обозначим продольное перемещение частицы стержня, являющееся функцией координаты x и времени t , через u .

Чтобы выяснить, с какой скоростью распространяются возмущения, рассмотрим передний фронт волны, т. е. подвижную плоскость AB , перпендикулярную оси стержня и отде-

ляющую часть стержня, в которой уже имеются возмущения, от части стержня, до которой возмущения еще не дошли (рис. 96). Такую плоскость называют поверхностью разрыва. Так как перемещение является непрерывной функцией x и t , то в рассматриваемый момент времени t в сечении x , соответствующем положению AB , $u(x, t) = 0$.

За время dt эта плоскость, двигаясь со скоростью a , переместится на расстояние adt в положение $A'B'$, причем в этом новом положении поверхности разрыва вновь соблюдается равенство:

$$u(x + dx, t + dt) = 0.$$

Разлагая в ряд Тейлора и ограничиваясь членами первого порядка малости, получаем:

$$u(x, t) + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial t} dt = 0.$$

Так как $u(x, t) = 0$, а $dx = a dt$ и $\frac{\partial u}{\partial x} = v$ есть относительное удлинение и $\frac{\partial u}{\partial t} = v$ есть скорость частицы, то получаем соотношение между деформацией и скоростью частицы (эту скорость не следует смешивать со скоростью распространения возмущения) на фронте волны:

$$v = -a\varepsilon. \quad (1)$$

Если на поверхности разрыва AB скорости частиц и деформации терпят разрыв, то условие (1) переписывается в виде

$$v_1 - v_2 = -a(\varepsilon_1 - \varepsilon_2), \quad (2)$$

где $v_1, \varepsilon_1, v_2, \varepsilon_2$ — значения скоростей и деформаций справа и слева от поверхности разрыва. В этом случае говорят об ударной волне или волне сильного разрыва. При непрерывном распределении возмущений соотношение (2) можно использовать в любом поперечном сечении возмущенной области, в дифференциальной форме:

$$dv = -a d\varepsilon. \quad (3)$$

За время dt все частицы, заключенные между AB и $A'B'$ (рис. 96), перешли из состояния покоя в состояние движения со скоростью v . Это произошло за счет продольного напряжения σ , действующего в сечении AB . Если ρ — плотность мате-

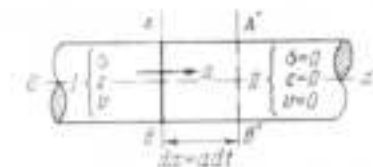


Рис. 96. Распространение фронта продольной волны в стержне

решения стержня, F — площадь поперечного сечения, то по теореме количества движения имеем:

$$\rho F a dt \cdot v = -F dz,$$

откуда получаем связь между напряжением и скоростью частиц:

$$a dv = -dz. \quad (4)$$

На ударной волне условие (4) принимает вид:

$$a_0(v_1 - v_2) = z_2 - z_1. \quad (5)$$

При непрерывном распределении возмущений выражение (5) в любой точке возмущенной области записывается в дифференциальной форме:

$$a_0 dv = -dz, \quad (6)$$

Внося в (6) значение dv из (3), получим

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{dz}{dz}}. \quad (7)$$

Итак, всякое продольное возмущение, характеризуемое скоростью v , деформацией ϵ и напряжением σ , действительно распространяется с конечной скоростью, которая по (7) зависит от плотности материала ρ и от тангенса угла наклона $\frac{dz}{d\epsilon}$ к оси ϵ касательной в соответствующей точке к кривой зависимости напряжения — деформация при растяжении — сжатии. Значит, скорость распространения возмущения зависит, вообще говоря, от величины деформации.

В частности, для упругих возмущений $\frac{dz}{d\epsilon} = E$ — модуль продольной упругости материала, так что скорость распространения упругой волны равна

$$a_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

и не зависит от величины деформации (в пределах упругости).

Продольное соударение упругих стержней. В качестве приложения теории распространения упругих волн рассмотрим задачу о продольном соударении стержней.

Пусть стержень длины l (денный на рис. 97) движется вдоль своей оси со скоростью v и в момент $t = 0$ встречает соосно с ним расположенный стержень из того же материала и того же поперечного сечения, что и первый стержень. При

ударе влево по первому стержню и вправо по второму стержню будут распространяться ударные упругие волны со скоростями a_0 (рис. 97). Так как на площадке контакта одинаковы скорости частиц в обоих стержнях и равны напряжения, то уравнений типа (5) достаточно для определения этих величин.

Действительно, применяя уравнение (5) к фронтам A_1 и A_2 (рис. 97), получим (для фронта A_1 , распространяющегося влево, надо в уравнении (5) писать $-a_0$ вместо a):

$$-a_0(v_1 - v) = -z_1,$$

$$a_0 v_1 = -z_1.$$

Решая эту систему уравнений относительно v_1 и z_1 , найдем

$$v_1 = \frac{v}{2}, \quad z_1 = -\frac{a_0 v}{2}. \quad (9)$$

Так как рассматриваем упругую волну, то должно быть $z_1 > -z_2$ — предела текучести материала на сжатие, значит удар будет упругим, если

$$v < \frac{2z_2}{a_0}.$$

Будем считать в последующем, что это условие выполняется.

Через время $\frac{l}{a_0}$ фронт A_1 достигнет левого конца левого стержня и, отразившись от него, пойдет вправо вновь со скоростью a_0 (фронт A'_1 , рис. 97,б). Так как левый конец левого стержня свободен, то позади фронта A'_1 $\sigma_2 = 0$. Используя (5) в виде $a_0(v_1 - v_2) = -z_1$ и значения (9), находим

$$v_2 = 0, \quad z_2 = 0. \quad (10)$$

т. е. часть стержня позади фронта A'_1 находится теперь в покое и недеформирована.

Через время $\frac{l}{a_0}$ фронт A_2 достигнет правого конца правого стержня и, отразившись, пойдет влево со скоростью a_0 (фронт

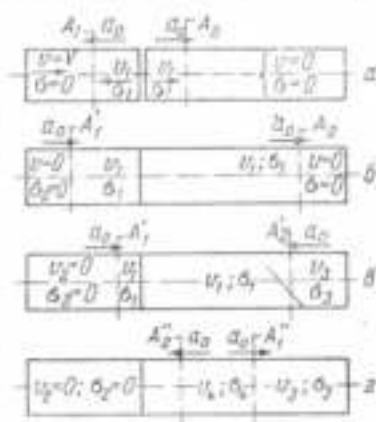


Рис. 97. Продольное соударение упругих стержней

A_2 , рис. 97, в). Так как правый конец правого стержня свободен, то $\sigma_2 = 0$. По уравнению (5), учитывая (9), получаем

$$v_2 = v, \quad z_2 = 0, \quad (11)$$

т. е. теперь часть правого стержня правее A_2 находится в таком же состоянии, в каком находился левый стержень до удара.

Фронт A_1 проходит через плоскость контакта без искажений, так как позади его напряжения равны нулю, а стержни одинакового поперечного сечения и из одного и того же материала. Где-то в правом стержне фронты A_1 и A_2 встретятся. Состояние (v_3 , σ_3) после встречи фронтов вновь рассчитывается по уравнению (5). Имеем на фронтах A_1' и A_2' (рис. 97, г):

$$\begin{aligned} a_0(v_3 - z_3) &= \sigma_3 - z_1, \\ -a_0(v_3 - v_2) &= z_2 - z_1. \end{aligned}$$

Учитывая значения (10) и (11), находим

$$v_3 = \frac{v}{2}, \quad z_3 = \frac{a_0 v^2}{2}.$$

Значит, скорости частиц между фронтами A_1' A_2' направлены вправо, а напряжения растягивающие (знак плюс в напряжении соответствует растяжению). Поэтому фронт A_2' не может пройти через площадку контакта и левый стержень, так как место стыка не воспринимает растягивающих напряжений. Следовательно, как только фронт A_2' достигнет места стыка, соударение закончится. Левый стержень останется в покое, а правый будет двигаться вправо, вибрируя.

За время контакта между стержнями фронт упругой волны дважды пробежал по длинному стержню. Поэтому время контакта, называемое временем удара или временем соударения, равно

$$T = \frac{2L}{a_0}. \quad (12)$$

Видно, что согласно изложенной теории время соударения не зависит от длины более короткого стержня, от скорости удара, если она подчиняется условию $v < \frac{2z_2}{a_0}$, и, наконец, не зависит от того, какой стержень двигался и какой был в покое, так как все рассуждения можно повторить, вложив на всю систему поступательную скорость v .

Одним из способов контроля изложенной теории соударения стержней является экспериментальная проверка форму-

лы (12). При этом надо иметь в виду, что теории развита для стержней, диаметр которых значительно меньше длины.

Динамическая диаграмма растяжения резины. Механические свойства материалов зависят от скорости деформации. Например, при ударных испытаниях мягкой стали обнаружено, что предел текучести повышается в 2—3 раза, а предел прочности более чем в 1,5 раза по сравнению с данными статических испытаний. Относительное удлинение при разрыве уменьшается с увеличением скорости деформации, хотя имеются случаи обратного изменения. То же относится к поперечному сужению при разрыве. Качественно влияние повышения скорости деформации имеет то же направление, что влияние понижения температуры испытания.

Расчет деталей конструкций, сооружений и машин, работающих в условиях приложения динамических нагрузок, требует поэтому знания механических свойств материала при высоких скоростях деформации. Рассмотрим здесь способ построения динамической диаграммы растяжения резины по измерениям скорости распространения волн, названный методом догрузочных импульсов.

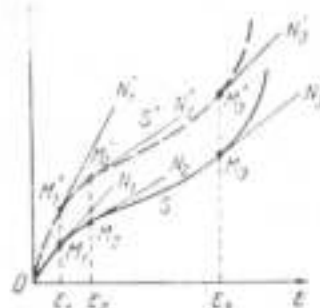


Рис. 98. Статическая (сплошная линия) и динамическая (пунктирная линия) диаграммы растяжения резины

Материалы типа резины имеют диаграмму растяжения, подобную той, которая изображена на рис. 98: кривая $\sigma \sim \epsilon$ обращена выпуклостью к оси σ при малых деформациях и к оси ϵ при больших деформациях. Если резиновый шнур растянуть статически до некоторой деформации ϵ_1 , которой соответствует точка M_1 на кривой $\sigma \sim \epsilon$, а затем ударом по концу шнура сообщить малый догрузочный импульс, то он согласно (7) должен был бы распространяться со скоростью, соответствующей $\left(\frac{dz}{d\epsilon}\right)_{M_1}$, т. е. наклону касательной в точке M_1 к оси ϵ .

При предварительном натяжении до деформации ϵ_2 (рис. 98) скорость распространения догрузочного импульса должна быть меньше, чем в предыдущем случае, так как наклон касательной M_2N_2 здесь меньше наклона M_1N_1 . После того, как на диаграмме $\sigma \sim \epsilon$ пройдена точка перегиба S ,

должно начаться возрастание скоростей распространения догрузочных импульсов.

Однако опыт показывает, что скорость распространения догрузочных импульсов отличается от тех значений, которые получаются из формулы (2) с использованием статической диаграммы растяжения. Это связано с тем, что динамическая диаграмма растяжения при высоких скоростях деформации (пунктирная кривая на рис. 98) лежит заметно выше кривой статического растяжения. Сделано предположение, что скорости распространения догрузочных импульсов соответствуют наклонам касательных $M_1' N_1'$, $M_2' N_2'$ к динамической диаграмме растяжения (рис. 98). Если это предположение справедливо, то по измерениям скоростей распространения догрузочных импульсов можно построить динамическую диаграмму растяжения. Действительно, определив для ряда значений предварительной деформации ε_0 величины скоростей распространения догрузочных импульсов a_0 , можно построить зависимость

$$a = a(\varepsilon)$$

и, следовательно, зависимость

$$\omega^2 = \omega^2(\varepsilon).$$

Согласно (7) имеем

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega^2(\varepsilon),$$

так что, интегрируя, находим искомую зависимость в виде

$$\tau(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \omega^2(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Для проверки сделанного предположения были проведены опыты, в которых рассчитанные по построенной таким образом диаграмме растяжения детали подвергались испытаниям и их результаты сравнивались с результатами расчетов.

Электромеханический хронограф. Так как скорость распространения упругих волн велика (для стали $a_0 \approx 5200$ м/сек), то возможность определения этой скорости в лабораторных условиях зависит от наличия средств точного измерения малых промежутков времени. Для этой цели может быть использован электромеханический хронограф, если начало и конец исследуемого процесса отмечаются электрическими импульса-

ми, которые являются соответственно пусковым и останавливающим.

Блок-схема этого хронографа изображена на рис. 99. В нем имеется генератор 2 на 100 кГц с кварцевой стабилизацией, который включается до произведения измерений. Синусоидальные электрические колебания от него с периодом 10 микросекунда (мксек) подаются в преобразующую схему 3, которая до начала измерений не работает. Первый электрический

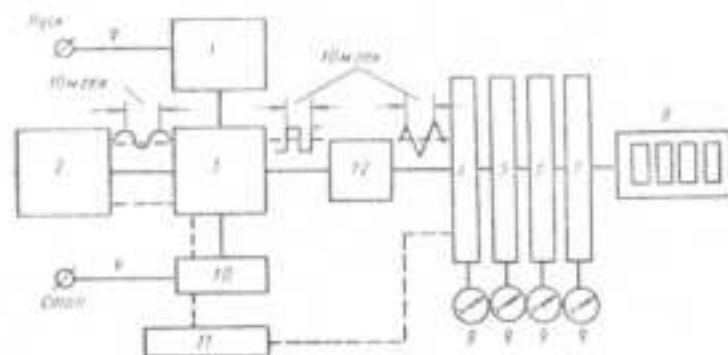


Рис. 99. Блок-схема электромеханического хронографа

отрицательный импульс (в момент начала исследуемого процесса) через пусковое устройство 1 приводит в действие преобразующую схему 3, причем если в последующем на клемму пуска поступают посторонние электрические сигналы, они не влияют на работу хронографа. С этого момента поступающие в 3 синусоидальные колебания преобразуются в колебания прямоугольной формы, которые с помощью дифференцирующей ячейки 12 преобразуются в отдельные импульсы. При этом ограничительная лампа ячейки 12 пропускает только положительные импульсы. Эти импульсы поступают в первую счетную декаду 4. Количество поступивших в эту декаду импульсов отсчитывается на миллиамперметре 9. Десятый импульс поступает во вторую счетную декаду 6 и т. д. Если процесс длится более 1 сек, то автоматически включается в работу механический счетчик 8. Конец процесса отмечается приходом отрицательного импульса на клемму «стоп», который через останавливающую схему 10 прекращает действие преобразующей схемы 3, так что поступление импульсов в счетные декады прекращается. На миллиамперметрах 9 и на механическом счетчике 8 остаются показания, по которым можно прочитать промежуток времени от сигнала «пуск» до сигнала

* «стоп». При этом одно деление миллиамперметра первой счетной декады 4 соответствует 10 мсек, второй декады — 100 мсек, третьей — 1000 мсек, четвертой — 10 000 мсек.

Принцип действия счетной декады поясняется на рис. 100. Лампы I и II образуют «двойку», а лампы 1—5 «пятерку». В исходном положении все лампы, кроме лампы I и I заперты. Анодный ток, проходящий через лампу I от «+» цепи анодного тока U_{an} , проходит через сопротивление R_1 , тогда

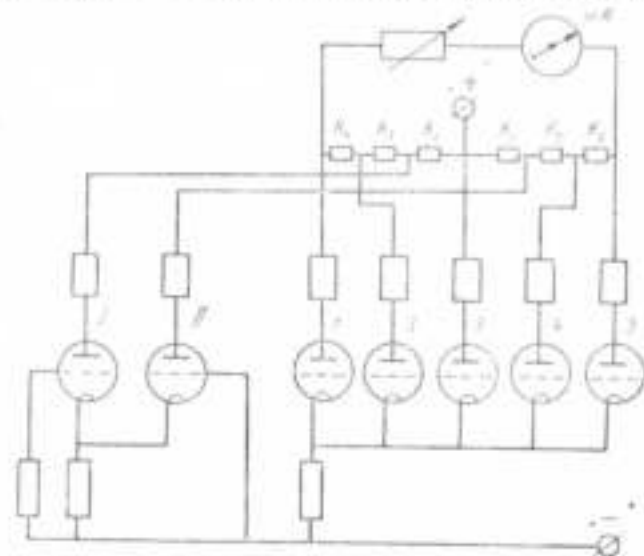


Рис. 100. Принципиальная схема действия счетной декады

как ток, проходящий через лампу I , преодолевает сопротивление R_1, R_2, R_4 . Части тока, проходящей через ветвь, содержащую миллиамперметр (mA), соответствует положение стрелки миллиамперметра, которое принимается за нулевое.

Первый положительный импульс, поступающий из преобразующей схемы на катоды «двойки», запирает лампу I и открывает лампу II , причем поступающий с анода лампы II на катод лампы I отрицательный импульс оставляет эту лампу открытой. Но теперь анодный ток, проходящий через лампу II встречает на своем пути вместо сопротивления R_1 сопротивление R_2 . Ток в миллиамперметре меняется, положение стрелки соответствует теперь цифре 1 на шкале. Второй импульс запирает лампу II открывая лампу I , но при этом на катоды лампы $I-5$ подается положительный импульс, лампа I запирается, лампа 2 открывается, в набор сопротивлений, через который

проходит анодный ток, как видно по схеме, изменится (R_2 заменится на R_3 , а R_4 отключается). Стрелка миллиамперметра становится в положение 2 на шкале. Третий импульс вновь перебрасывает «двойку», оставляя открытой лампу 2, и т. д.

Таким образом, каждая из ламп 1—5 отырана в течение прохождения двух импульсов. Десятый импульс запирает 5, отырывая лампы 1 и 1, и проходит в следующую счетную декаду, а стрелка мильнаметра первой декады возвращается в положение 0. После этого первая декада повторяет счет.

Проверка готовности электромеханического хронографа, в счету после его включения и прогрева в течение 3–5 мин производится так. Нажимается кнопка «пуск», стрелки на всех миллиамперметрах колеблются, причем слышно потрескивание от работы механического счетчика. При нажатии кнопки «сброс» потрескивание прекращается, а стрелки всех миллиамперметров становятся в нулевые положения.

Если при сбросе какая-нибудь стрелка не останавливается в нулевом положении, то установка нуля осуществляется с помощью переменного сопротивления на каждой декаде.

Порядок выполнения работы. Измерение времени соударения стержней. Соударяющиеся стержни соединяются проводами с входными клеммами электромеханического хронографа. Соударяя несколько различных стальных стержней одного диаметра с одним и тем же наиболее длинным стержнем и измерив каждый раз время соударения, проверяется, зависит ли T от длины короткого стержня и от скорости удара. Время соударения сравнивается с теоретическим, вычисленным по формуле (8). То же повторяется для стержней из других материалов.

Физические величины берутся из табл. 24.

Таблица 24

Материал	Модуль продольной упругости E , кг/см ²	Удельный вес, г/см ³
Резина	—	1,02
Сталь	$2,1 \cdot 10^6$	7,8
Алюминий	$7,2 \cdot 10^5$	2,7
Латунь	$9 \cdot 10^5$	8,5

Испытание резины методом догрузочных импульсов

Опыт проводили: диаметр шнура—12 мм;
удельный вес—1,06 г/см³; площадь сечения—мм²

№ опыта	Била между контактами	M, ед	$\epsilon = \frac{M}{T_0}$	Показание индикатора	Сила P (кг)	Напряжение $\sigma = \frac{P}{F}$, кг/см ²	Показание хронографа при сообщ. догруз. имп. (сек)	Скорость распространения волны (см/сек)	σ^2 (г)	σ^2 (г)
1	25	0	0,000	375	0	0	3530 3530 3540 3520 3530	7000		
II	25	1	0,040	382	1,35	1,2	3620 3610 3630 3610 3620	6050		

Таблица 26

Испытание стержней на соударение

Опыт проводили: материал стержней—сталь 5;
диаметр стержней—6 мм; длина стержней № 1—120 см; № 2—90 см;
№ 3—70 см; № 4—60 см; № 5—40 см; $E=2,1 \cdot 10^6$ кг/см² (по таблицам);
удельный вес—7,7 г/см³

№ соударения стержней	Показания хронографа		Теор. значение T , мсек	ΔT , %	Опытное значение σ_0 , мсек	Опытное значение E , кг/см ²	ΔE , %
	номер, мсек	средн., мсек					
№ 1— — 2	00230 00230 00240 00230 00220 00230	230	232	0,85	5160	$2,09 \cdot 10^6$	0,4
№ 1— — 3							

Для катушки значение модуля продольной упругости E определяется по измерениям скоростей соударения различных стержней на основании формул (12) и (8). Полученные значения сравниваются с табличным значением.

Построение динамической диаграммы растяжения резины по методу догрузочных импульсов. Резиновый шнур слегка натягивается между зажимами. По изменению расстояния между фиксированными точками определяется относительное удлинение ϵ , а по динамометрическому устройству — усилие, пересчитываемое в условное напряжение σ . Это дает точку статической диаграммы растяжения. Укрепленные на шнуре электрические контакты ставятся в исходное положение, а электро-механический хронограф приводится в рабочее состояние. Сообщается догрузочный импульс, в результате чего контакты при прохождении возмущения последовательно размыкаются; по хронографу отсчитывается время прохождения импульса между контактами, что определяет скорость его распространения.



Рис. 101. Схема испытания резины методом догрузочных импульсов

Опыт повторяется несколько раз при каждом начальном натяжении и при различных начальных натяжениях.

В результате опытов получается:

- 1) статическая диаграмма растяжения резины;
- 2) график зависимости $\sigma = \sigma(\epsilon)$.

Строится график зависимости $\sigma \sigma^2 \sim \epsilon$. Затем путем графического интегрирования получается динамическая диаграмма растяжения $\sigma \sim \epsilon$ резины. Статическая и динамическая диаграммы для удобства сравнения помещаются на одном листе и одном и том же масштабе.

При нескольких значениях ϵ определяется в процентах разница значений σ по статической и динамической диаграммам. Отчетными материалами являются графики и расчетные таблицы. При отчете требуется знание основ теории, наложенных здесь, умение обращаться с электро-механическим хронографом, знание принципиальной схемы и принципа работы счетного устройства.

§ 2. ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ БРУСА

Цели работы:

- 1) Ознакомление с испытательной вибраторной установкой и измерительной аппаратурой.
- 2) Определение собственных частот и нормальных форм изгибных колебаний стержней, сравнение с теоретическими значениями.
- 3) Определение модуля продольной упругости методом колебаний.

Нормальные формы и собственные частоты колебаний упругого тела. Механическая система с одной степенью свободы, выведенная из состояния равновесия и освобожденная затем от действия внешних сил, может совершать свободные гармонические колебания с определенной частотой.

Примерами могут служить колебания математического маятника, колебания груза, подвешенного на пружине малой массы и имеющего возможность перемещаться только в вертикальном направлении, крутильные колебания тонкого стержня с массой на конце и т. п. В последних двух примерах пружина и стержень ввиду их малой массы играют роль только восстанавливающих усилий, упругих связей; возникающими в них инерционными усилиями можно пренебрегать по сравнению с силой инерции груза.

Нормальным колебанием системы материальных точек называется такое свободное движение, при котором каждая точка совершает простое гармоническое колебание, причем частоты всех точек одинаковы и все точки колеблются в одной фазе (или в противофазе). Эта общая для всех точек частота называется частотой колебания системы. В теоретической механике показано, что механическая система с n степенями свободы имеет n собственных частот, соответствующих n возможным видам нормальных колебаний. При произвольном свободном колебании перемещение каждой точки представляется в виде геометрической суммы перемещений, которые имела бы точка при различных нормальных колебаниях.

Формой некоторого i -го нормального колебания назовем распределение перемещений всех точек в какой-либо произвольный момент движения. Из определения ясно, что при нормальном колебании форма колебания изменяется подобно самой себе по синусоидальному (по времени) закону.

Упругое тело, рассматриваемое как материальный континуум, имеет бесчисленное множество степеней свободы. Поэтому упругое тело обладает бесчисленным множеством собственных частот, соответствующих бесчисленному множеству нормальных форм колебаний. Вектор перемещения точек упругого тела при каком-то n -м нормальном колебании $\bar{W}_n$ представляется, следовательно, таким образом:

$$\bar{W}_n(x, y, z, t) = \bar{u}_n(x, y, z) \cdot \cos(p_n t + z_n).$$

Здесь $p_n = 2\pi\nu_n$ — так называемая круговая частота, соответствующая собственной частоте ν_n , z_n — начальная фаза, определяемая начальным состоянием системы, а функция $\bar{u}_n$ определяет форму n -го нормального колебания. Согласно ска-

занному ранее, произвольное свободное колебание можно представить в виде суммы нормальных колебаний:

$$W(x, y, z, t) = \sum \bar{u}_n(x, y, z) \cdot \cos(p_n t + z_n).$$

Возможность представления сложных движений упругого тела при свободных колебаниях в виде результатов наложения нормальных колебаний соответствует возможности разложения функции в тригонометрический ряд (теорема Фурье).

Если на упругое тело действует периодическая внешняя нагрузка с частотой, равной одной из собственных частот тела, то имеет место резонанс — амплитуда колебаний тела при отсутствии диссипативных сил будет возрастать теоретически до бесконечности. Хотя практически всегда имеются диссипативные силы (внешние и внутренние), препятствующие безграничному возрастанию амплитуды, наличие резонанса может привести к возникновению недопустимо больших напряжений и к разрушениям, особенно в случаях резонанса на одной из главных собственных частот. В других случаях, наоборот, пользуются явлением резонанса для раскачки тел. Отсюда ясно, почему важно определение собственных частот и соответствующих им нормальных форм колебаний упругих тел.

Изгибные колебания бруса. Если на брус постоянного поперечного сечения действует распределенная нагрузка $q(x, t)$ в одной из главных плоскостей бруса, где x — координата, отсчитываемая вдоль бруса, и t — время, то дифференциальное уравнение изогнутой оси имеет вид

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = q(x, t), \quad (13)$$

где EI — изгибная жесткость бруса, E — модуль продольной упругости, I — момент инерции поперечного сечения относительно центральной оси сечения, перпендикулярной плоскости изгиба, v — перемещение (прогиб).

В уравнении (13) вместо полной производной написана частная производная по x , так как перемещение v является функцией x и t . При свободных изгибных колебаниях, согласно принципу Даламбера, внешней распределенную нагрузку q следует заменить силами инерции. Если ρ — плотность материала бруса и F — площадь поперечного сечения, то сила инерции на единицу длины будет равна $(-\rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2})$. Поэтому вместо уравнения (13) получим*

* В уравнении (14) не учтена инерция поперечных сечений. Соответствующая поправка может быть введена. Она незначительна для тонкого бруса при не слишком высоких частотах колебаний.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0, \quad (14)$$

где введено обозначение

$$\lambda^2 = \frac{EI}{\rho F}. \quad (15)$$

Для обнаружения собственных частот и нормальных форм колебаний ищем частное решение уравнения (14) в форме

$$v(x, t) = \chi(x) \cdot \cos(pt + z), \quad (16)$$

где $\chi(x)$ — функция, характеризующая форму собственного колебания (вид изогнутой оси).

Подставляя выражение (16) в уравнение (14) и сокращая на $\cos(pt + z)$, приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению для функции $\chi(x)$:

$$\frac{d^4 \chi}{dx^4} - k^4 \chi = 0, \quad (17)$$

где обозначено

$$k^4 = \frac{\rho^2}{\lambda^2} = \frac{\rho^2 F}{EI} = \frac{4\pi^2 \rho^2 F}{EI}. \quad (18)$$

Общим решением этого уравнения является

$$\chi(x) = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 e^{kx} + C_4 e^{-kx}.$$

Заменив в последних двух членах экспоненциальные функции гиперболическими, удобно это решение представить через четыре функции, введенные А. Н. Крыловым:

$$\begin{aligned} S_1(x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch} x + \cos x), \\ S_2(x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh} x + \sin x), \\ S_3(x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch} x - \cos x), \\ S_4(x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh} x - \sin x), \end{aligned} \quad (19)$$

которые обладают свойством круговой замены: по произвольным до четвертого порядка включительно, так что, например

$$S_1'(x) = S_2(x); \quad S_1''(x) = S_3'(x) = S_2(x);$$

$$S_1'''(x) = S_3''(x) = S_2'(x) = S_1(x);$$

$$S_1^{(4)}(x) = S_3^{(3)}(x) = S_2''(x) = S_1'(x) = S_1(x)$$

и т. д.

При $x=0$ имеем

$$S_1(0) = 1, \quad S_2(0) = S_3(0) = S_4(0) = 0.$$

Общее решение уравнения (17) представляется при этом в виде

$$\chi(x) = C_1 S_1(kx) + C_2 S_2(kx) + C_3 S_3(kx) + C_4 S_4(kx). \quad (20)$$

Если брус бесграничен по длине и не имеет опор, то ничего другого о нормальных колебаниях сказать нельзя: никаким ограничений на частоту колебаний ν не налагается, а нормальная форма колебаний ограничена только видом (20) при ничем не ограниченных коэффициентах C_1, C_2, C_3, C_4 . Следовательно, для такого бруса любая частота может быть собственной; иначе говоря, бесграничный брус имеет непрерывный спектр собственных частот. В брус конечной длины имеются определенные граничные условия (условия закрепления), которые ограничивают произвол постоянных C_1, C_2, C_3, C_4 ; для этих величин получаются из граничных условий линейные однородные алгебраические уравнения, которые содержат в коэффициентах величину k , связанную с частотой ν . Из условия наличия нетривиальных решений этой системы уравнений (иначе ни о каких колебаниях говорить нельзя) получается уравнение, вообще говоря, трансцендентное для k , называемое уравнением частот. Таким образом, наличие границ делает спектр собственных частот дискретным.

Так как из системы однородных уравнений, в коэффициенты которой подставляются корни уравнения частот, определяются только отношения искоемых постоянных, например, $\frac{C_1}{C_4}, \frac{C_2}{C_4}, \frac{C_3}{C_4}$, то форма нормального колебания определяется с точностью до постоянного множителя. Это соответствует тому, что форма изогнутой оси при нормальном колебании изменяется во времени подобно самой себе, причем амплитуда колебаний остается неопределенной.

При различных способах закрепления концов получаются различные уравнения частот и различные формы нормальных колебаний.

Рассмотрим три случая.

а) Брус, свободный на одном конце и жестко заделанный на другом

Пусть конец бруса $x=0$ жестко заделан, а конец $x=l$ свободен. В заделке прогиб и наклон касательной к изогнутой оси бруса равны нулю, так что

$$\chi(0) = 0, \quad \left. \frac{d\chi}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad (21)$$

На свободном конце равны нулю изгибающий момент и поперечная сила, так что

$$\left. \frac{d^2\chi}{dx^2} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{d^3\chi}{dx^3} \right|_{x=l} = 0. \quad (22)$$

Из условий (21) получаем $C_1 = C_2 = 0$. Удовлетворение условий (22) приводит к системе уравнений

$$\begin{aligned} S_1(kl) C_3 + S_2(kl) C_4 &= 0, \\ S_3(kl) C_3 + S_4(kl) C_4 &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Равенство нулю детерминанта этой системы приводит к уравнению частот

$$S_1^2(kl) - S_2(kl) S_3(kl) = 0,$$

или

$$\cos kl - \operatorname{ch} kl + 1 = 0. \quad (24)$$

Корнями уравнения (24) являются:

$$k_1 l = 1,875; \quad k_2 l = 4,694; \quad k_3 l = 7,855; \quad k_4 l = 10,996; \quad \dots$$

$$k_n l \approx \frac{(2n-1)\pi}{2}, \quad \dots$$

Принимая во внимание обозначение (18), для собственных частот колебаний получаем:

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1,875}{l} \right)^2; \quad \nu_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{4,694}{l} \right)^2; \quad \nu_3 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{7,855}{l} \right)^2; \\ \nu_4 &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{10,996}{l} \right)^2; \quad \dots \end{aligned} \quad (25)$$

Из системы уравнений (23) для каждого значения $k_n l$ можно определить отношение

$$\left(\frac{C_3}{C_4} \right)_n = - \frac{S_2(k_n l)}{S_1(k_n l)} = - \frac{S_3(k_n l)}{S_4(k_n l)}.$$

так что форма нормальных колебаний определяется с точностью до постоянного множителя A_n :

$$A_n f_n(x) = S_2(k_n l) \cdot S_3(k_n x) - S_3(k_n l) \cdot S_2(k_n x). \quad (26)$$

При каждом нормальном колебании имеется некоторое число точек оси, которые остаются неподвижными. Эти точки называются узлами колебаний. Те точки между узлами, в которых амплитуда колебаний максимальна, называются пучностями. Узел отличается от точки защемления бруса тем, что перемещение в узле шириной опоры не приводит к возникновению опорной реакции. Поэтому, если положения узлов какой-либо конструкции известны, то удобно точки опоры располагать в узлах: инерционные усилия в этом случае не будут передаваться основанию.

Положение узлов определяется из уравнения $\chi_n(x) = 0$, то есть из уравнения

$$S_2(k_n l) \cdot S_3(k_n x) - S_3(k_n l) \cdot S_2(k_n x) = 0. \quad (27)$$

Вид изогнутой оси (нормальная форма) для первых трех нормальных колебаний показан схематически на рис. 102. При колебаниях с собственной частотой ν_1 неподвижной остается только точка закрепления (рис. 102, а). При колебаниях с частотой ν_2 имеется один узел (рис. 102, б). При колебаниях с частотой ν_3 появляются две узловых точки (рис. 102, в). Подсчеты показывают, что положения узлов определяются следующими числами, дающими отношение расстояния узла от свободного конца бруса к длине бруса:

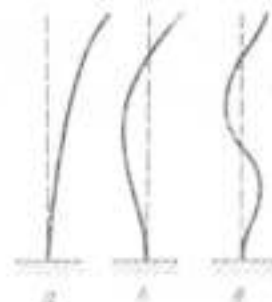


Рис. 102. Вид изогнутой оси консольного бруса для первых трех нормальных колебаний

Порядковый номер нормального колебания	Положение узлов колебаний		
I	—	—	—
II	0,226	—	—
III	0,132	0,499	—
IV	0,094	0,350	0,6439

По наличию этих узловых точек можно в опытах судить о том, что брус совершает один из нормальных колебаний.

б) Брус со свободными концами

Граничные условия в этом случае имеют вид:

$$\left. \frac{d^2 \chi}{dx^2} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{d^2 \chi}{dx^2} \right|_{x=l} = 0;$$

$$\left. \frac{d^3 \chi}{dx^3} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{d^3 \chi}{dx^3} \right|_{x=l} = 0.$$

Подставляя выражение (20) в первые два условия, найдем

$$C_2 = C_4 = 0.$$

Вторые два условия приводят к системе уравнений

$$S_2(kl) C_1 + S_1(kl) C_3 = 0, \quad (28)$$

$$S_2(kl) C_1 + S_3(kl) C_3 = 0,$$

так что уравнением частот является

$$S_2^2(kl) - S_2(kl) \cdot S_1(kl) = 0$$

или

$$\cos kl \cdot \operatorname{ch} kl - 1 = 0. \quad (29)$$

Корнями этого уравнения являются

$$k_1 l = 0; \quad k_2 l = 4,730; \quad k_3 l = 7,853; \quad k_4 l = 10,996; \quad \dots;$$

$$k_n l \approx \frac{2n-1}{2} \pi \dots$$

Соответствующие собственные частоты колебаний имеют значения

$$\begin{aligned} \nu_1 &= 0; \quad \nu_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{4,730}{l} \right)^2; \quad \nu_3 = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{7,853}{l} \right)^2; \\ \nu_4 &= \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{10,996}{l} \right)^2; \quad \dots \end{aligned} \quad (30)$$

Из системы уравнений (28) затем находим

$$\left(\frac{C_1}{C_3} \right)_n = - \frac{S_4(k_n l)}{S_2(k_n l)} = - \frac{S_3(k_n l)}{S_2(k_n l)},$$

что приводит к следующим формам нормальных колебаний:

$$A_n \chi_n(x) = S_1(k_n l) \cdot S_1(k_n x) - S_2(k_n l) \cdot S_2(k_n x), \quad (31)$$

с неопределенным множителем A_n . При этом, естественно, нулевая частота $\nu_1 = 0$ относится к прямолинейной форме оси бруса $\chi(x) = 0$, соответствующей поступательному перемещению. Положения узлов при других собственных частотах определяются из уравнения:

$$S_1(k_n l) \cdot S_1(k_n x) - S_2(k_n l) \cdot S_2(k_n x) = 0. \quad (32)$$

Формы изогнутых осей бруса при нормальных колебаниях с частотами ν_2, ν_3, ν_4 показаны схематически на рис. 103. Расстояния узлов от левого конца бруса, отнесенные к длине бруса, при различных нормальных колебаниях приведены в таблице.

Порядковый номер нормального колебания	Положения узлов колебаний			
I	0,224	0,776	—	—
II	0,132	0,500	0,868	—
III	0,094	0,356	0,644	0,906

в) Брус с шарнирно-опертыми концами

Так как на шарнирно-закрепленном конце равны нулю прогиб и изгибающий момент, то граничными условиями будут

$$\chi(0) = 0; \quad \left. \frac{d^2 \chi}{dx^2} \right|_{x=0} = 0;$$

$$\chi(l) = 0; \quad \left. \frac{d^2 \chi}{dx^2} \right|_{x=l} = 0.$$

Из первых двух находим

$$C_1 = C_3 = 0,$$

а два других приводят к системе уравнений

$$S_2(kl) \cdot C_2 + S_1(kl) \cdot C_4 = 0,$$

$$S_1(kl) \cdot C_2 + S_3(kl) \cdot C_4 = 0, \quad (33)$$

так что уравнение частот имеет вид

$$S_2^2(kl) - S_1^2(kl) = 0$$

или

$$\sin kl \cdot \sin kl = 0.$$

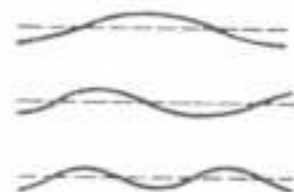


Рис. 103. Форма изогнутой оси свободно-го бруса при нормальных колебаниях

Если отбросить нулевой корень $\gamma_0=0$, соответствующий отсутствию колебаний, то уравнение частот принимает простой вид:

$$\sin kl = 0. \quad (34)$$

Не нулевыми положительными корнями его являются

$$k_1 l = \pi; \quad k_2 l = 2\pi; \quad k_3 l = 3\pi; \quad \dots; \quad k_n l = n\pi; \quad \dots$$

Значит собственные частоты колебаний равны

$$\gamma_1 = \frac{\pi}{2l}; \quad \gamma_2 = \frac{4\pi}{2l}; \quad \gamma_3 = \frac{6\pi}{2l}; \quad \dots; \quad \gamma_n = \frac{n^2\pi}{2l}; \quad \dots \quad (35)$$

Из системы (33) найдем $(C_2)_n = -(C_1)_n$, так что форма изогнутой оси при n -м нормальном колебании описывается уравнением:

$$z_n(x) = A_n \sin k_n x = A_n \sin \frac{n\pi x}{l},$$

т. е. представляет собой синусоиду с целым числом полуциклов между опорами, равным номеру собственной частоты. Опоры являются узлами колебаний.

Определение модулей упругости по опытам на колебания. Опыты по изгибным колебаниям стержней, в которых определяются собственные частоты и нормальные формы колебаний, имеют главным образом методический характер, они служат для обработки методики испытаний, для отладки измерительной и силовозбуждающей аппаратуры. В учащихся они вырабатывают физическую интуицию и уверенность в ценности теоретических построений, дают тренировку в проведении опытов. Существенно важным для практических целей являются опыты по определению собственных частот и форм нормальных колебаний конструкций или их элементов, теоретические расчеты для которых бывают сложными.

Поскольку теория изгибных колебаний проверена на многих опытах и является надежной, опыты по изгибным колебаниям стержней могут служить также для другой важной цели — для определения механических характеристик материалов.

Механические характеристики (модуль упругости, предел упругости и т. п.) зависят в той или иной мере от скорости деформации. В опытах на колебания, регулируя частоту вынуждающей силы и амплитуду колебаний, можно в довольно широких пределах изменять скорость деформации.

В формулы для определения собственных частот колебаний входят модуль упругости материала. В этих формулах собственные частоты можно считать известными, коль скоро они

определены из опытов, а искомыми величинами считать значения модулей упругости при соответствующей скорости деформации. Например, в случае пазибных колебаний по формуле (18) находим

$$E = \frac{\rho^2 F^2}{l(kl)^3}.$$

Если здесь заменить $\rho=2\pi\gamma$ и вместо γ писать измеренную в опыте собственную частоту γ_n , а вместо kl писать соответствующее значение корня уравнения частот, то для значения модуля продольной упругости при этой частоте получим:

$$E_n = \frac{4\pi^2 F^2 \gamma_n^2}{l(k_n l)^3}. \quad (36)$$

Для большинства металлов изменение модуля продольной упругости очень слабо зависит от скорости деформации, так что из опытов на колебания получают обычно значения E , близкие к тем, которые определяются в статических испытаниях. Однако поскольку возрастание напряжений до максимума и их убывание до нуля происходит в течение каждого полуцикла колебаний, т. е. за сравнительно малый промежуток времени (особенно при высоких частотах), то определяемое из опытов на колебания значение модуля продольной упругости близко к его адиабатическому значению, тогда как из опытов на статических испытательных машинах получают изотермическое значение модуля упругости.

Из опытов с другими типами колебаний (например, крутильных) можно определить другую упругую постоянную — модуль сдвига.

По измеренным амплитуды колебаний можно определить те внутренние силы, которые тормозят колебания, рассеивают энергию и которые обычно включаются в общее название «внутреннее трение».

Краткие сведения о вибрационной установке Р-50. Универсальная вибрационная установка Р-50, разработанная Институтом строительной механики Академии наук СССР совместно с кафедрой теории упругости МГУ, является установкой резонансного типа с электромагнитным силовозбуждением. Она предназначена для испытаний на вибрации и усталость образцов, приборов, элементов конструкций и машин и целых конструкций.

Важными особенностями установки являются: 1) возможность автоматической стабилизации колебаний по амплитудам перемещений, скоростей или ускорений; 2) возможность возбуждения и стабилизации связанных колебаний, т. е. нормальных колебаний разных типов (например, изгибных и кру-

тильных) в одном и том же теле одновременно, причем задается и поддерживается определенное отношение амплитуд колебаний.

Установка Р-50 состоит из следующих основных частей:

а) Станина — предназначена для крепления испытуемых тел и силовозбудителей (электромагнитов). Она представляет собой массивную ребристую плиту на железобетонном фундаменте, на которой размещены вертикальная силовая ребристая плита, колонны и опорные приспособления.

б) Аппаратурные стойки — в них помещается электрорадиоаппаратура, обеспечивающая возбуждение переменного тока и электромагнитах регулируемой частоты и силы, автоматическую стабилизацию амплитуд колебаний. Приборы, расположенные на панелях стоек, показывают параметры колебаний. Имеется приспособление для дистанционного управления стойками.

в) Наладки — представляют собой набор приспособлений для проведения типовых испытаний на вибрации и усталость.

г) Вибродатчики и выносная измерительная аппаратура. Вибродатчики крепятся на испытуемых телах и служат для преобразования механических параметров движения в электрические сигналы, передающиеся в аппаратурные стойки.

Принципиальная схема силовозбуждения такова (рис. 104). Постоянный ток от генератора подается на обмотки силовоз-

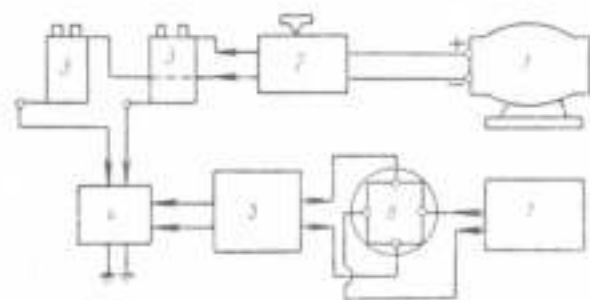


Рис. 104. Принципиальная схема силовозбуждения и измерения частоты: 1 — генератор постоянного тока; 2 — регулятор силы тока; 3 — магниты; 4 — инвертор; 5 — задающий генератор; 6 — прецизионный генератор; 7 — осциллограф.

будующих электромагнитов и через включенные последовательно лампы, называемые *тиратронами*, замыкается на землю. Тиратроны являются частью *инвертора*, который играет роль вентиляющего устройства.

На сетке тиратрона задано отрицательное смещение такой величины, что тиратроны при отсутствии переменного напряжения не проводят ток. Если на сетку подано достаточно высокое напряжение, то возникает ионизация газа, заполняющего баллон лампы (пары ртути, водород и т. п.), достаточная для возникновения дугового разряда: ток начинает проходить через тиратрон. С этого момента тиратрон становится практически неуправляемым с помощью сетки, так как протекающий дуговой разряд поддерживает необходимую ионизацию. Чтобы дуговой разряд погас, надо резко уменьшить анодный ток до значения ниже потенциала зажигания. Это достигается в схеме инвертера зажиганием второго тиратрона, включенного в цепь другого электромагнита и шунтирующего ток первого тиратрона. Таким образом, поочередное зажигание тиратронов создает поочередное возбуждение в электромагнитах прерывистого тока.

Напряжение на сетку тиратрона подается от *задающего* генератора (рис. 104) с регулируемой частотой. Какова частота *задающего генератора*, такова и частота пульсирующего тока в электромагните, т. е. такова и частота возбуждающей силы. Изменяя параметры колебательного контура задающего генератора (например, емкость), можно добиться того, что частота возбуждающей силы будет равна одной из собственных частот колебаний испытуемого тела, — наступит резонанс. Чтобы регулировать амплитуду колебаний (ослабить или усилить раскачку при резонансе), изменяют силу анодного тока регулятором (рис. 104). При этом максимальное допустимое значение силы тока — 10 ампер. На шкале частот задающего генератора можно прочесть частоту возбуждающей силы (т. е. — при резонансе — собственную частоту). Однако эта шкала не дает точных значений частоты задающего генератора. Поэтому, чтобы измерить частоту колебаний (в режиме резонанса), частоту задающего генератора сравнивают с частотой *прецизионного генератора*.

Это достигается следующим образом:

На одну пару пластин катодно-лучевого осциллоскопа подается переменное напряжение от задающего генератора, которое отклоняет луч, например, в вертикальном направлении (по оси *y*), так что на экране осциллоскопа получается размытый светящийся след луча в виде отрезка вертикальной прямой. Напряжение от прецизионного генератора подается на другую пару отклоняющих пластин, так что если подключен только прецизионный генератор, то на экране осциллоскопа виден горизонтальный светящийся прямолинейный отрезок (по оси *x*). При совместной работе генераторов луч совершает сложное движение и на экране осциллоскопа

видна кривая, меняющая свои очертания. Если частоты прецизионного и задающего генератора отличаются в целое число раз (кратны), то на экране осциллографа образуется неподвижная фигура (фигура Лиссажу). Таким образом, меняя частоту прецизионного генератора при неизменной установке задающего генератора до тех пор, пока на экране осциллографа не появится неподвижная фигура, определяется точно частота задающего генератора, т. е. частота колебаний.

С помощью осциллографа определяется также характер изменения тока в электромагнитах. Для этого по оси x дается развертка по времени, т. е. на вертикальное движение луча налагается горизонтальное движение с постоянной скоростью.

Прибор дистанционного управления содержит сельсин-датчик (директор), соединенный линией связи с сельсин-приемником (репитером), установленным на оси шкалы частот задающего генератора. При повороте ротора сельсин-датчика на какой-нибудь угол на тот же угол поворачивается и ротор сельсин-приемника. На приборе дистанционного управления установлена круговая шкала частот, совершенно аналогичная той, которая имеется на задающем генераторе. Таким образом, при включенной линии связи управление задающим генератором осуществляется на расстоянии, с места, с которого удобно наблюдать за колебаниями испытуемого объекта.

Вибродатчиками являются виброметры электродинамического типа. Корпус виброметра с жестко связанной с ним магнитной системой крепится к испытуемому телу так, что ось его совпадает с направлением колебаний. На упругих подвесках помещается индукционная катушка, вращающаяся инертной массой, практически сохраняющей свое положение при колебаниях. Сила тока, индуцируемого в катушке, пропорциональна скорости перемещения ее в магнитном поле. Если этот ток подать на осциллоскоп, то на экране можно видеть форму колебаний, а с помощью прецизионного генератора измерить частоту колебаний. Если возбуждаемое в катушке напряжение после усиления подать на сетки гиротрона, испытуемое тело будет работать в режиме автоколебаний.

Порядок выполнения работы. После ознакомления с теоретической частью и после усвоения правил пользования установкой испытания и обработка данных опытов проводится в следующем порядке.

А. Проведение испытаний. Измеряются продольный и поперечные размеры испытуемого стержня.

В стержне с одним закрепленным концом электромагниты располагаются вблизи заземленного конца, после чего изменение частоты задающего генератора добиваются совпадения ее с одной из собственных частот колебаний стержня. О на-

ступлении резонанса судят по появлению четко выраженных узлов колебаний и по максимальному возрастанию амплитуды. Форма нормальных колебаний (число узлов) указывает на порядковый номер собственной частоты.

В стержне со свободными концами магнитные опоры (подвески) располагаются приблизительно в тех местах, в которых по расчету должны располагаться узлы колебаний, а электромагниты располагаются соответственно исследуемой форме нормального колебания (одни магниты работают синфазно, другие — в противофазе). Положение опор уточняется при возбуждении нормальной формы колебаний.

Расстояние узлов от концов стержня измеряется линейкой или рулеткой.

Для точного отсчета частоты задающего генератора (с этой частотой колеблется и стержень при резонансе) пользуются сравнением ее с частотой прецизионного генератора.

Изменением установок задающего генератора возбуждаются другие нормальные колебания и производится необходимые измерения. Измерения на каждой установке производятся не менее трех раз путем расстройки и повторной настройки.

Для получения уточненных значений собственных частот стержня с одним закрепленным концом производится измерение при горизонтальном положении стержня*.

Предупреждение. Пользование токоприемниками студентам запрещается.

Включение и выключение рубильников электрической сети и генератора постоянного тока производится персоналом лаборатории.

Б. Обработка опытных данных. По измеренным размерам стержней и по табличным данным физических величин определяются значения λ (формула (15)).

Измеренные в опытах собственные частоты (средние по трем измерениям) сравниваются с теоретическими значениями (25), (30) и (35). Исчисляется в процентах расхождение между теоретическими и опытными результатами.

Теоретически определенные положения узлов колебаний, приведенные выше, сравниваются с полученными в опытах.

По данным опытов вычисляются значения модуля продольной упругости (формула (36)) E_z для каждой из частот. Вычисляется среднее значение E для каждой группы опытов (стержень со свободными концами, с шарнирно-опертыми концами, с одним заземленным концом) и сравнивается с таблич-

* В вертикальном положении стержень сила тяжести создает дополнительную изгибную нагрузку, амплитуды становятся фактически нулевыми и частоты не строго соответствуют теоретическим значениям.

ным значением. При заземленном стержне сравниваются средние значения E , полученные по испытаниям в вертикальном и в горизонтальном положениях; это дает оценку влияния силы тяжести.

По индивидуальному заданию каждый студент рассчитывает по формулам типа (26) и (31) и строит форму нормального колебания стержня при заданных размерах и граничных условиях. Отчетными материалами являются: графики, расчетные таблицы и выводы.

Таблица 27

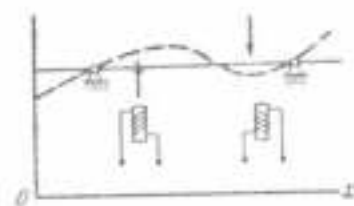


Рис. 105. Схема испытания стержня на вибрации

Испытание на вибрацию стержня со свободными концами

Объект проведения:
Схема опыта (рис. 105)
Материал стержня — сталь 5.
Размеры стержня:
длина — 194,5 см
диаметр — 14 мм
 $E = 2,1 \cdot 10^8$ кг/см²
Удельный вес — 7,8 г/см³

Испытание проводилось на вибрационной установке Р-50

Порядковый номер нормального колебания	Собственная частота				Положение узлов						
	изме- рения	среднее измере- ние	теор.	$\Delta, \%$	I-й узел				II-й		
					измерения			теор.		изме- рение	
					x см	x л	сред.	x л	$\Delta, \%$		
I											
II											
III											
IV											

Цели работы:

- 1) Ознакомление с методикой испытаний на усталость.
- 2) Выяснение влияния концентраторов напряжений на усталость.

Явление усталости материала. Значительное число случаев поломки деталей машин связано с явлением усталости материала. Термином «усталость» называется разрушение, происходящее при переменных (чаще всего, циклических) нагрузках, при этом наибольшее напряжение (или интенсивность напряжений — в случае сложного напряженного состояния) меньше разрушающего значения их при статической нагрузке.

Характерной чертой усталостного разрушения является чрезвычайная локализованность пластических деформаций вблизи трещины разрушения даже в случаях, когда детали или образцы изготовлены из такого материала, что в аналогичных условиях статического нагружения разрушению предшествует значительная пластическая деформация. Например, при растяжении цилиндрического образца из мягкой стали разрушение наступает после пластической деформации во всей рабочей части, достигающей иногда 20—30%, тогда как при знакопеременном продольном нагружении такого же образца усталостное разрушение происходит без заметной пластической деформации и только по характеру поверхности усталостной трещины и по структуре материала вблизи ее можно установить, что в некоторой малой области в окрестности трещины имела место пластическая деформация.

Чаще всего усталостная трещина начинается на поверхности в местах концентрации напряжений (у надрезов, царапин, забоин и т. д.).

Инородные включения и другие дефекты в толще детали также могут явиться началом усталостного разрушения.

Начавшаяся трещина является острым надрезом и вызывает большую концентрацию напряжений у своего дна и острых краев, поэтому при дальнейших приложениях нагрузки трещина постепенно распространяется вглубь детали и этим ослабляет ее сечение до тех пор, пока в ослабленном сечении внезапно произойдет хрупкое разрушение от отрыва.

Внешний вид налома (рис. 106) состоит из двух зон: а) зоны постепенного развития трещины и б) зоны заключительного разрушения.

Зона постепенного развития трещины имеет матовую заглаженную поверхность, так как под влиянием многократно повторяющегося нагружения края трещины то расходятся, то сходятся, благодаря чему происходит заглаживание поверх-

ностей трещины. Зона заключительного разрушения имеет кристаллический вид вследствие разрушения отрывом.

Испытания образцов на усталость. Для выяснения характеристик усталостной прочности материала проводят испытания образцов при циклических нагрузках. При испытании

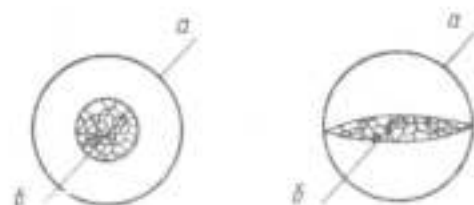


Рис. 105. Разрушение от усталости: а) зона вторичного развития трещины усталости; б) зона заключительного разрушения

на усталость при растяжении — сжатии нагрузки может быть задана в виде симметричного (рис. 107, а) или несимметричного (рис. 107, б и 107, в) цикла напряжений. Цикл характе-

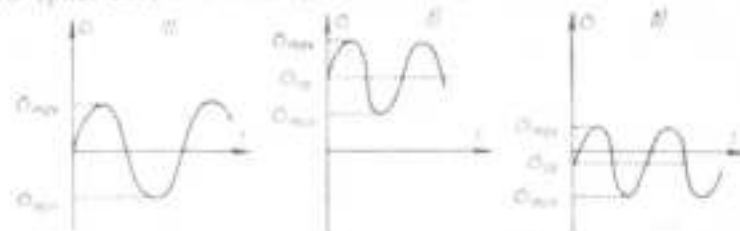


Рис. 107. Циклы напряжений

ризуется наибольшим σ_{max} и наименьшим σ_{min} напряжениями, амплитудой напряжений $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$, средним напря-

жением $\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ и коэффициентом несимметрии

(амплитуды) цикла $r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$. При симметричном цикле

$\sigma_{min} = -\sigma_{max}$, $\sigma_{cp} = 0$, $r = -1$. Аналогичные характеристики цикла нагружения можно ввести при испытаниях на усталость при кручении и при изгибе.

Выносливость металла, т. е. его сопротивление усталости, зависит главным образом от величины наибольшего и наимень-

шего напряжений, возникающих в течение цикла. Форма кривой изменения напряжений, по-видимому, не влияет на выносливость.

Результаты усталостных испытаний принято изображать в виде диаграмм (рис. 108). При каждой амплитуде цикла образец доводится до разрушения и фиксируется число циклов N . Точка с координатами $(\sigma = \sigma_{max}, N)$ изображает результат испытания. По серии таких точек, полученных при разных амплитудах цикла, строится кривая, которая часто называется диаграммой или кривой Велера. Эти диаграммы удобно строить в полулогарифмических координатах $\ln N$ и σ . Для многих сплавов на основе железа и некоторых других материалов кривая Велера имеет горизонтальную асимптоту, которой соответствует напряжение, называемое пределом усталости. Наличие горизонтальной асимптоты указывает на то, что при напряжениях, меньших предела усталости, нагружение сколь угодно большим числом циклов не приводит к усталостному разрушению.

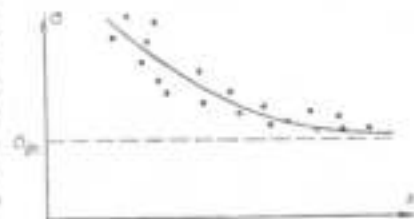


Рис. 108. Диаграмма Велера

Многие алюминиевые и другие цветные сплавы имеют непрерывно снижающиеся кривые усталости. В этом случае нет определенного предела усталости и за него следует принимать наибольшее напряжение, которое может выдержать металл при заданном числе циклов; последнее определяется из условий эксплуатации детали. Поэтому при испытаниях на выносливость назначают конкретную базу N циклов. Для сталей база испытаний выбирается обычно в интервале $10^6 \sim 10^7$ циклов, для цветных металлов $5 \cdot 10^7 \sim 10 \cdot 10^7$ циклов и более.

Предел усталости чаще всего определяется при симметричном цикле, как наиболее опасном.

Для определения предела усталости металла при симметричном цикле по ГОСТу 2860-45 изготавливается серия образцов не менее 6 штук. Первый образец испытывается при напряжении σ_{max} около $0,6\sigma_b$ для сталей и $0,4\sigma_b$ — для легких сплавов. Вторым и последующие образцы испытываются при напряжениях на 2 или 4 кг/мм² меньше в зависимости от числа циклов, вызвавших разрушение первого образца.

Сопротивление материалов усталости в значительной степени зависит от чистоты поверхности и состояния поверхности.

ных слоев. Оно снижается при наличии рисок, царапин, обезуглероживания и повышается при повышении твердости поверхности в результате наклепа, цементации и азотирования. Сопротивление усталости может быть повышено тренировкой образца при циклических напряжениях ниже предела усталости.

Коррозионные среды значительно снижают усталостную прочность.

Сильное влияние на усталостную прочность оказывают концентраторы напряжений. Например, при наличии кольцевого острого надреза на поверхности круглого цилиндрического образца у дна выточки создается объемное напряженное состояние с интенсивностями напряжений, значительно превышающими таковые в гладком образце. Кроме этого, существенную роль на усталостную прочность оказывает то, что сам тип напряженного состояния в зоне концентрации напряжений иной, чем в гладком образце. Концентраторы напряжений в технических деталях встречаются часто. Это — и концентраторы конструктивного типа (галтели, резьба, отверстия под болты и т. п.) и концентраторы типа дефектов (царапины, выбоины, инородные включения и т. п.). Поэтому выяснение роли концентраторов является существенным.

Вероятность наличия опасных в смысле усталостного разрушения пороков возрастает с увеличением размеров образца

или детали, а потому в деталях больших размеров усталостное разрушение наступает, вообще говоря, при меньших средних напряжениях или при меньшем числе циклов нагружения. Эта зависимость усталостной прочности от размеров получила название масштабного фактора.

Для проведения усталостных испытаний используются различные машины и приспособления. Схема одного из распространенных типов машин для усталост-

ных испытаний при чистом изгибе показана на рис. 109. При вращении маховика шатун *E* отклоняет рычаг *F*. Шарнирный рычаг *C*, связанный через образец *A* с шарнирным опорным рычагом *B*, поворачивается, изгибая образец *A* (при этом рычаг *B* отклоняется в противоположном направлении).

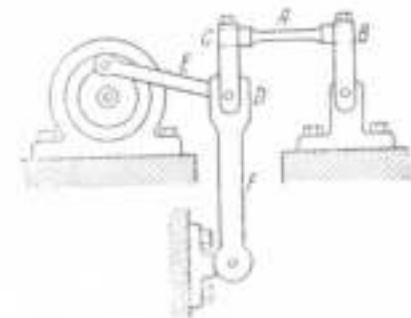


Рис. 109. Схема машины для испытаний на усталость изгибом консолидного образца

Распространенной является усталостная машина изгибно-вращательного типа (схема на рис. 110). Мотор *M* через гибкий шланг *C* вращает захваты *B*, в которых закреплен круглый образец *A*. Захваты *B* могут поворачиваться около шарнирных опор *D*. Груз *P*, подвешенный через коромысло *F* и тиги *E*, изгибает образец. Плоскость изгиба неподвижна в пространстве. Вследствие вращения образца каждое меридиональное сечение образца проходит через эту плоскость, чем и достигается знакопеременность нагрузки.

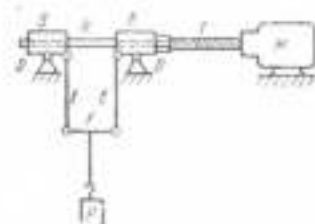


Рис. 110. Схема машины для испытаний на усталость чистым изгибом при вращении

На машинах описанных типов достигаются сравнительно малые частоты цикла нагружения, а потому даже одиночное испытание требует больших затрат времени. Более высокие частоты испытаний обеспечиваются на универсальной вибрационной установке Р-50, в комплект которой входит ряд устройств (назад), для усталостных испытаний. Устройство для испытаний на усталость при растяжении — сжатии схематически показано на рис. 111. Динамометр *A* верхним концом жестко закреплен в станине *G* и несет на нижнем конце захват *B*, в который ввернут испытуемый образец *C*. Нижний захват *D* несет на себе резонатор (вибратор) с массами *E* на концах. Назначение резонатора — усиливать возбуждающую силу, передаваемую электромагнитом *F*. Амплитуда силы фиксируется по перемещению светящейся в отраженном свете точки *M* на теле динамометра, которая наблюдается через отсчетный микроскоп. Дополнительное приспособление позволяет прилагать через пружину статическую подгрузку образца, что допускает проведение испытаний с несимметричным циклом.

Порядок проведения работы. Для построения кривой Велера с определением предела усталости требуется испытать серию образцов. Если учесть при этом, что усталостные испытания дают значительный разброс данных, достигающий 30% и более, становится ясным, что получение надежных данных требует статистической обработки результатов многих испытаний. Поэтому для учебных целей приходится ограничиваться частичными испытаниями, выявляющими влияние на усталостную прочность некоторых факторов, в частности концентраторов напряжений.

Опыт на усталость проводится над двумя стальными образцами: один — гладкий, второй имеет острый кольцевой надрез. Определяется число циклов до разрушения при одном

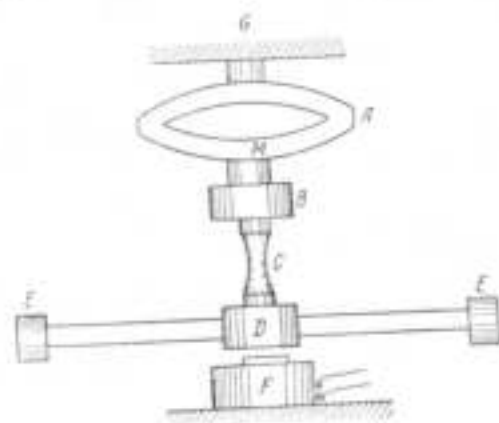


Рис. 111. Схема испытания на усталость при растяжении-сжатии

и том же номинальном напряжении (для надрезанного образца — по ослабленному сечению), составляющим примерно 70% от предела прочности при статическом растяжении. Такие же два образца разрушаются статическим растяжением.

В результате испытаний дается сравнительная оценка влияния концентратора в условиях статического и усталостного разрушений.

Отчетными материалами являются протоколы испытаний и выводы.

Таблица 28

Испытания на усталостную прочность

Дата испытаний:

Испытатели:

Материал

Диаметр образца

Размеры надреза: глубина

Площадь поперечного сечения

размер

Образец	Номинальное напряжение	Частота колебаний	Время до разрушения	Число циклов до разрушения
Без надреза				
С надрезом				

Цель работы:

Исследование влияния термобработки на ударную вязкость стали.

Хрупкое и вязкое разрушение. В зависимости от внешних условий — температуры, скорости деформации и типа напряженного состояния — металл может разрушаться различным образом. В одних условиях моменту разрушения предшествует значительная пластическая деформация, поверхность разрушения при этом матовая, фарфоровидная. В этих случаях говорят о вязком разрушении. При других условиях разрушение наступает внезапно; образованию трещины разрушения не предшествует заметная пластическая деформация, разрушение возникает в основном по типу отрыва одной части образца от другой при соответствующем нормальном растягивающем напряжении, называемом сопротивлением отрыву. Поверхность разрушения при этом блестящая зернистая. В этих случаях говорят о хрупком разрушении. Иногда бывает трудно с определенностью отнести разрушение к тому или другому типу.

Вязкость и хрупкость не являются неотъемлемыми характеристиками материалов. Однако разделение материалов на хрупкие и вязкие имеет практическое значение и важно для технических целей. Хрупкие и вязкие материалы по-разному реагируют на одинаковые внешние воздействия. Например, хрупкие материалы (бетон, чугун, стекло и др.) легче разрушаются при ударах, чем вязкие (медь, алюминий, железо и др.). Имеющаяся неопределенность в понятиях о вязкости и хрупкости материалов приводит к необходимости введения некоторых условных характеристик, дающих сравнительные оценки материалов, разрушающихся в одинаковых внешних условиях. При этом говорят не о хрупкости материала, а о его склонности к хрупкому разрушению, т. е. о возможности в определенных условиях его разрушения по типу хрупкого отрыва.

При заданном типе напряженного состояния на характер разрушения существенное влияние оказывает скорость деформации и температура. Повышение скорости деформации, как правило, повышает характеристики прочности (σ_s , σ_b), а у некоторых материалов, наоборот, понижает их. Очень чувствительным к скорости деформации является предел текучести (условный и физический), который, например, у мягких сталей при нагрузках ударного типа повышается в 2—3 раза.

Влияние температуры сказывается в том, что с повышением ее характеристики прочности понижаются (хотя для

ряда материалов имеются интервалы небольшого повышения), а характеристики пластичности (δ , ψ) увеличиваются.

Из изложенного ясно, почему для оценки склонности материала к хрупкому разрушению проводят динамические испытания образцов с концентраторами напряжений (образцов с надрезом). Концентраторы напряжений, например, при изгибе создают напряженное состояние, приближающееся к всестороннему растяжению, затрудняющему развитие пластических деформаций и способствующему хрупкому разрушению. Высокая скорость деформации также способствует хрупкому разрушению. Следовательно, наиболее опасными по отношению к хрупкому разрушению условиями работы деталей машин и конструкций являются ударные нагрузки при наличии концентраторов напряжений, а ударные испытания надрезанных образцов являются оправданным способом сравнительной оценки хрупкости материала.

Однако при таких испытаниях напряженное состояние является неоднородным, а процесс деформации и разрушения протекает очень быстро. Поэтому определение разрушающих напряжений было бы затруднительным и неоправданным с точки зрения сравнительной оценки качества материалов. Достаточной характеристикой склонности к хрупкому разрушению является энергия, которую необходимо затратить для разрушения. Вязкому разрушению предшествуют значительные пластические деформации, при этом необратимые потери энергии происходят не только на заключительной стадии разрушения, но и в предшествующей стадии пластического деформирования. В то же время при идеально хрупком разрушении необратимые затраты энергии идут только на отделение друг от друга частиц по поверхности разрушения при упругих деформациях.

Рис. 112. Изменение предела текучести и сопротивления отрыву с температурой

Понятие о хладноломкости. У металлов с кубической объемноцентрированной и с гексагональной решеткой изменение сопротивления отрыву и предела текучести с изменением температуры происходит таким образом, что можно отметить определенный интервал температур, в котором довольно резко происходит переход от вязкого к хрупкому разрушению.

На рис. 112 представлено изменение предела текучести с температурой. На этом же рисунке линией cd отмечено сопротивление отрыву, которое слабо изменяется с температурой. При температуре ниже T_{ky} , соответствующей точке M пересечения кривых σ_s и S_T , сопротивление отрыву ниже предела текучести. Поэтому разрушение наступает до начала пластических деформаций. При $T > T_{ky}$ предел текучести достигает раньше сопротивления отрыву, и разрушению будет предшествовать пластическая деформация. Температура T_{ky} называется критической температурой хрупкости*. Свойство материалов разрушаться хрупко при пониженных температурах и называется хладноломкостью.

Изображенная на рис. 112 схема является идеализированной. Фактически такой четкой границы между вязким и хрупким разрушением не наблюдается. В частности, вместо линии ad надо было бы провести серию кривых, отражающих влияние скорости деформации на предел текучести. Если производить опыты по разрушению ударом стандартных образцов и изображать результаты испытаний точками на плоскости, по оси абсцисс которой отложена температура, а по оси ординат — энергия, затраченная на разрушение, то получится график, аналогичный тому, который изображен на рис. 113. Заштрихованная область изображает разброс опытных данных в области температур от T_1 до T_2 . За критическую температуру хрупкости можно принять $\frac{1}{2}(T_2 - T_1)$. Отметим еще раз, что такой вид зависимости энергии разрушения при ударе от температуры характерен лишь для некоторых материалов, в частности для сталей. У ряда других металлов (алюминия, меди и др.) наблюдается монотонный рост энергии разрушения с понижением температуры.

Построение графика подобно тому, который изображен на рис. 113, требует серийных испытаний и соответствующей статистической обработки. Для сравнительной оценки качества металла достаточно испытаний при комнатной температуре.

* Иногда она обозначается также термином «критическая температура от вязкого к хрупкому разрушению».

Рис. 113. Изменение энергии с температурой при ударном разрушении

Рис. 113. Изменение энергии с температурой при ударном разрушении

Ударная вязкость. В качестве условной характеристики склонности материала к хрупкому разрушению может быть принята энергия, необходимая для разрушения ударом стандартного образца. На рис. 114 изображен образец по ГОСТу 1524-42.

Ударной вязкостью называется отношение энергии, необходимой для разрушения надрезанного образца ударом, к площади ослабленного сечения. Если A_k — энергия разрушения и F — площадь ослабленного сечения, то ударная вязкость σ_k равна

$$\sigma_k = \frac{A_k}{F}.$$

Ударная вязкость относится к числу распространенных технологических проб, дающих суждение о сравнительных качествах металла.

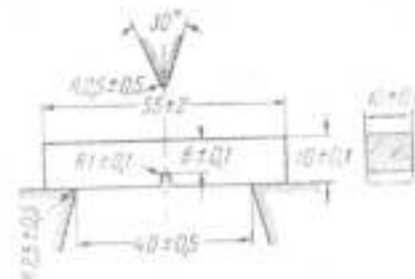


Рис. 114. Эскиз образца по ГОСТу 1524-42

может получаться при сравнительно большой величине ударной вязкости и, наоборот, вязкому разрушению может соответствовать ее малая величина. Поэтому, помимо величины ударной вязкости, необходимо рассматривать характер излома образца. Как указано выше, вязкое разрушение характеризуется волокнистым матовым изломом без блеска, а противоположность кристаллическому блестящему излому при хрупком разрушении. Часто имеют место смешанные изломы: частично волокнистые, частично кристаллические. Поскольку объемное напряженное состояние, затрудняющее развитие пластической деформации, имеет место в центральных частях сечения образца, то сердцевина имеет кристаллическую поверхность, а периферийные части — матовую.

Необходимость стандартизации образцов связана с тем, что неоднородность напряженного состояния в зоне надреза и сложность изломы, протекающих при ударе, не допускают применения закона подобия как, например, в случае растяжения гладких образцов. При соблюдении геометрического подобия величина σ_k не будет постоянной.

Следует отметить, что иногда хрупкое разрушение

Маятниковый копер МК-30. К числу испытательных устройств по определению ударной вязкости относится маятниковый копер МК-30 с максимальной энергией удара 30 кдж (рис. 115). На основании 1 укреплены стойки 2 в виде двух

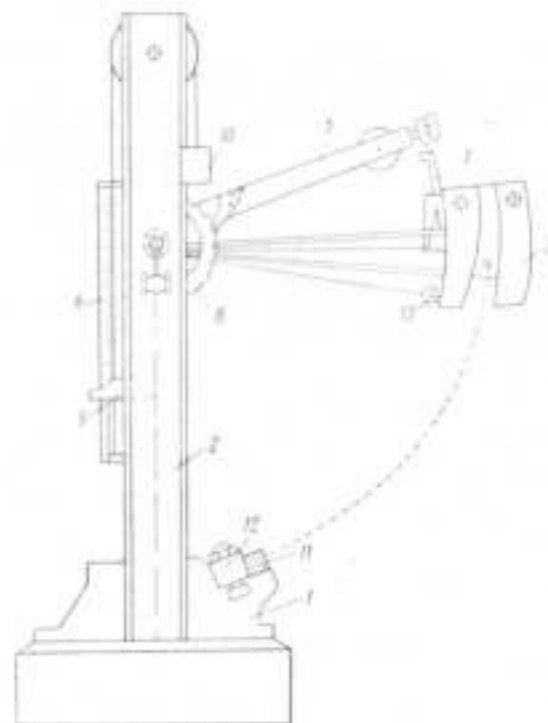


Рис. 115. Схема маятникового копра типа МК-30

швеллеров, связанных сверху поперечной. Вокруг оси, проходящей через стойки, вращается подъемная рама 3, положение которой фиксируется храповиком 6. Маятник 3, имеющий в середине нож 4, вводится и с помощью защелки 7 закрепляется на подъемной раме. При подъеме маятника палец, укрепленный на его тиге, поднимает линейку 8, на которой нанесены деления в кдж. Высота подъема линейки (в делениях ее шкалы) равна потенциальной энергии маятника во взве-

Протокол испытаний на ударную вязкость

Материал	
Режим термообработки	
Образец № 1. Температура нагрева	
Выдержка	Закалка
Образец № 2. Температура нагрева	
Выдержка	Отпуск
Режим охлаждения	

№ образца	Размеры ослабленного сечения		Площадь ослабленного сечения, см ²	Энергия разрушения, кг-см	Ударная вязкость, кг/см	Примечание

ЛИТЕРАТУРА

- Алиев Н. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. Гостехиздат, М.—Л., 1946.
- Беллер Н. М. Сопротивление материалов. Физматгиз, М., 1959.
- Нильсен А. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. Физматгиз, М., 1959.
- Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. ИИЛ, М., 1955.
- Морз Ф. Колебания и звук. Гостехиздат, М.—Л., 1949.
- Надин А. Пластичность и разрушение твердых тел. ИИЛ, М., 1954.
- Погудин-Алексеев Г. И. Свойства металлов при ударной нагрузке. Металлургия, М., 1953.
- Райнхарт Дж. С., Персон Дж. Поведение металлов при импульсных нагрузках. ИИЛ, М., 1958.
- Ридей Дж. В. Теория звука, т. I, II. Гостехиздат, М., 1955.
- Тимошенко С. П. Теория колебаний и инженерный расчет. ГИИ, М.—Л., 1954.
- Ужик Г. В. Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1948.
- Шапошников Н. А. Механические испытания металлов. Машиностроение, М.—Л., 1951.

денном положении. При спуске маятника, пройдя нижнее положение, поднимает движок 9 на высоту (в делениях шкалы латейки 8), равную энергии, сохранившейся в маятнике после разрушения образца. В результате указатель на шкале 8 остается в положении, показывающем разность энергии до удара и после удара, т. е. энергию, затраченную на разрушение образца.

Испытуемый образец 11 устанавливается на опору 12, положение которых можно в известных пределах регулировать. Расстояние между опорами должно быть таким, чтобы половинки разрушенного образца не заклинивали нож 4. Существенного влияния на величину A_0 расстояние между опорами не оказывает.

Чтобы погасить энергию маятника при обратном ходе, к крючку 13 маятниковой массы привязан трос (веревка), перекинутый через ось маятника и верхний неподвижный барабан. На конце троса подвешен груз 10. При прямом движении маятника трос ослабляется, и груз 10, опускаясь, перематывает его через барабан. При обратном движении маятника трос поднимает груз 10, что вследствие трения на поверхности барабана поглощает оставшуюся энергию.

Предупреждение. Во взведенном положении маятника вплоть до момента испытания защелка 7 должна быть зафиксирована предохранителем. При взведенном маятнике находиться перед копром нельзя.

Порядок выполнения работы. Целью работы является сравнение значений ударной вязкости одного и того же материала при различных термических обработках.

1. Два изготовленных стальных образца с надрезами подвергаются один — закалке, второй — отжигу (режимы устанавливаются в зависимости от марки стали).

2. Измеряются размеры ослабленного сечения образцов.

3. Образцы испытываются на маятниковом копре и определяются значения ударной вязкости.

4. Через микроскоп рассматриваются поверхности излома и устанавливается различие вида поверхностей.

Отчетным документом является протокол испытаний, в котором указываются: размеры образцов, режимы термической обработки, значения ударной вязкости, описание вида поверхности излома.

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Поляризационно-оптический метод исследования напряжений (метод фотоупругости) является одним из основных экспериментальных методов теории упругости. В методе используются модели изучаемых тел из прозрачных материалов (искусственные смолы, органическое стекло и т. д.), которые при их нагружении становятся, подобно кристаллам, двойно-преломляющими. Величина двойного лучепреломления связана с возникающими напряжениями. Пропуская через нагруженную модель поляризованный свет, на экране установки можно наблюдать и фотографировать изображение модели с интерференционной окраской, отвечающей распределению напряжений.

Различают два типа картин, видимых на экране. Первый из них связан с направлением главных напряжений (изоклины). По этой картине простыми приемами можно построить траектории главных напряжений (изоостаты) и траектории наибольших касательных напряжений. Эти картины определяют векторные свойства напряженного состояния. Картины второго типа (изохромы или полосы) дают распределение численно одинаковых значений разности главных напряжений или, что то же, наибольших касательных напряжений. Это распределение характеризует скалярные свойства напряженного состояния.

Такие наглядные картины сами по себе дают многое для выяснения напряженного состояния в модели. Могут быть сразу выяснены наиболее напряженные (зоны концентрации) и ненапряженные (нейтральные) места. Сопоставляя оптические картины для разных вариаций формы и очертаний модели, можно выбрать наиболее благоприятные (рис. 116). Более детальной расшифровка этих картин с несложными вычислительными операциями позволяет получить полную картину распределения напряжений и наиболее интересных

местах модели. В широких пределах данные о распределении напряжений в модели могут быть перенесены на реальные конструкции из разнообразных материалов.

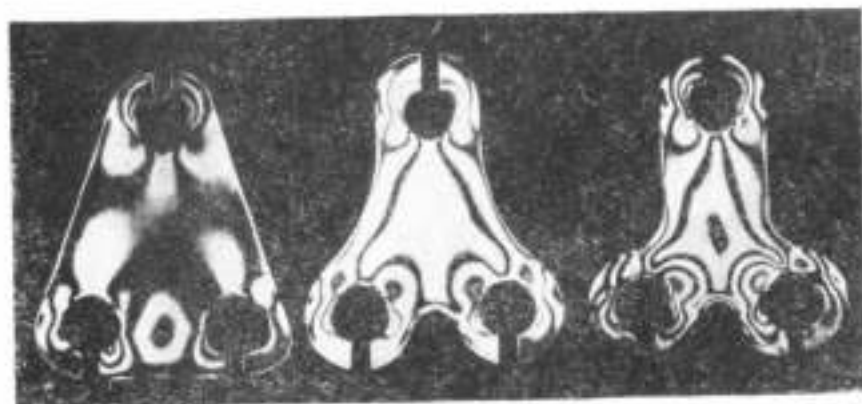


Рис. 116. Картина полос для трех моделей подвеса (нагрузка одна-квантовая):

- а) в средней части мало полос, материал используется недостаточно;
- б) более равномерное распределение полос;
- в) около внешних отверстий повышенная густота полос, материал перегружен.

Этот метод хорошо разработан для плоской задачи теории упругости. С успехом он применяется также для решения объемных задач. В последнее время ведутся работы по приложению метода к исследованию задач теории пластичности, по распространению волн напряжений и т. д.

§ 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Цель работы:

Изучение теоретических основ метода.

Сведения из кристаллооптики. Волновая теория рассматривает свет как периодическое электромагнитное возмущение, распространяющееся в виде поперечных волн. В каждой точке электромагнитное поле представляется в виде пары электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ векторов, ортогональных друг к другу (рис. 117). Оба вектора колеблются в одинаковых фазах и передают возмущение вдоль луча S (направление распространения энергии). Поверхность, все точки которой одно-

временно испытывают возмущение, называется фронтом волны. Передний фронт волны разделяет возмущенную и невозмущенную области. Фронт волны перемещается вдоль направления нормали к фронту (направление распространения фронта). Для изотропных тел луч и нормаль к фронту

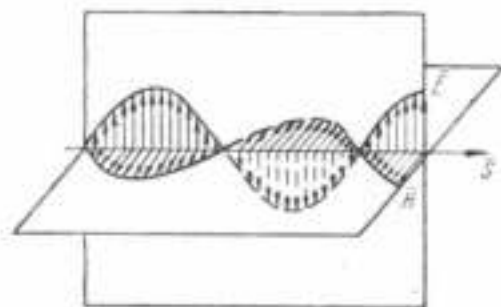


Рис. 117. Векторы $\vec{E}$, $\vec{H}$ и луч $\vec{S}$

совпадают, фронт волны имеет вид сферической поверхности. Для анизотропных тел (кристаллы) оба направления не совпадают, волновая поверхность отлична от сферической.

Распространение света связывают с поведением «светового вектора», который для изотропной среды совпадает с электрическим $\vec{E}$, а для анизотропной среды с ним не совпадает. Если «световой вектор» в процессе колебания сохраняет постоянное направление, то свет называется плоскополяризованным. Если же его конец описывает эллипс или круг, то свет называют поляризованным по эллипсу или кругу. Естественный свет имеет место при неупорядоченном изменении «светового вектора».

Поляризации света может быть осуществлена при отражении света от некоторых тел под определенным углом (угол Брюстера), при преломлении, при пропускании света через кристаллические пленки (поляроидные пленки), обладающие свойством поглощать свет с колебаниями в одной плоскости (дихроизм).

На достаточном удалении от точечного источника фронт волны можно принять за плоскость. Уравнение плоской монохроматической волны имеет вид

$$u = a \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z - vt) + \epsilon \right] = a \sin \varphi, \quad (1)$$

где a — амплитуда, λ — длина волны, v — скорость распространения, ϵ — начальная фаза.

В оптически изотропных телах все направления равнозначны и скорости распространения света одной и той же длины волны одинаковы. Для большинства кристаллов условия распространения света зависят от направления. В каждом направлении распространяются с разными скоростями две плоскополяризованные волны, плоскости колебаний которых взаимно-перпендикулярны (двойное лучепреломление). В некоторых прозрачных телах при их деформировании возникает временное двойное лучепреломление, исчезающее (в пределах упругости) при снятии нагрузки. Этот эффект открыт Брюстером (1815 г.).

В общем случае оптическая анизотропия изменяется от точки к точке; в окрестности данной точки анизотропию и напряженное состояние можно считать однородными. Такие тела при деформации можно рассматривать как соединение различно-ориентированных элементарных кристаллов, обладающих свойством двойного лучепреломления. Для каждого кристалла можно построить так называемый эллипсоид показателей преломления, описывающий оптические характеристики в связи с направлением распространения волны. Главные полуоси эллипсоида пропорциональны главным показателям преломления n_x , n_y , n_z . Направления полуосей называются главными осями оптической симметрии.

Многочисленными исследованиями установлено, что главные оси напряжений совпадают с главными осями оптической симметрии, а главные показатели преломления связаны с главными напряжениями линейной зависимостью:

$$\begin{aligned} n_x - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2), \\ n_y - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2), \\ n_z - n_0 &= C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где n_0 — показатель преломления недеформированного материала, C_1 и C_2 — постоянные для материала и длины волны применяемого света.

Для пластинки, находящейся в плоском напряженном состоянии, при нормальном просвечивании одна из главных плоскостей эллипсоида совпадает с плоскостью пластинки.

Уравнения (2) сводятся к двум

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2, \\ n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1, \end{aligned} \quad (3)$$

или, вычитая:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2) (\sigma_1 - \sigma_2) = C (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (4)$$

Обе плоскополяризованные волны, образовавшиеся при прохождении пластинки, приобретают разность фаз z_1 и z_2 по отношению к неизменной волне:

$$z_1 = \frac{h}{\lambda} 2\pi (n_1 - n), \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{h}{\lambda} 2\pi (n_2 - n),$$

где n — показатель преломления среды вне пластинки.

Относительная разность фаз будет:

$$z = z_1 - z_2 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2). \quad (6)$$

Различие скоростей вызовет опережение одной волны на расстояние

$$\delta = h (n_1 - n_2), \quad (7)$$

которое называют относительной разностью хода. Заменяя $n_1 - n_2$ разностью главных напряжений, найдем

$$z = \frac{2\pi h}{\lambda} C (z_1 - z_2), \quad (8)$$

$$\delta = Ch (z_1 - z_2), \quad (9)$$

где C — оптический коэффициент напряжений.

Измеряя относительную разность хода δ в точках пластинки можно тем самым получить разности $\sigma_1 - \sigma_2$ в тех же точках. Для измерения δ необходимо осуществить интерференцию двух волн. Френель показал, что если поляризованный луч разделить на две поляризованные системы (путем преломления или отражения) и затем их вновь соединить, то системы, являясь когерентными, будут интерферировать. Это вызывает необходимость применения поляризованного света.

Модели для экспериментов изготавливаются так, чтобы было соблюдено подобие форм и размеров. Измененные одинаковым образом нагрузки прикладываются в соответствующих местах, подобно натуре. Пересчет напряжений в модели на натуру производится по формуле

$$z_n = \frac{h_n}{h_m} \frac{I_n}{I_m} \frac{P_m}{P_n} z_m \quad (10)$$

где σ — напряжение, h — толщина, I — линейный размер в плоскости модели и натуре, P — сила, индексами «н» и «м» обозначены величины, соответствующие натуре и модели.

Кроме различия в размерах модели и натуре и величии нагрузок, может иметь место различие в механических свойствах материала модели и натуре. Это обстоятельство для большого числа случаев не является существенным. В теории упругости существует теорема (Морис Лемн, 1898 г.) о том, что для плоского напряженного состояния односвязного тела при граничных условиях, заданных в напряжениях, распределение напряжений не зависит от упругих постоянных (E , ν). Эта теорема обобщена Мачеллом (1899 г.) на случай многосвязных тел: если для многосвязного тела при плоском напряженном состоянии по каждому отдельно взятому контуру главный вектор внешних сил равен нулю, то распределение напряжений не зависит от упругих постоянных (при этом главный момент может быть отличен от нуля).

Таким образом, физико-механические основы метода можно кратко сформулировать в виде положений:

1) под действием внешних сил некоторые прозрачные оптически анизотропные материалы приобретают свойство временного двойного лучепреломления;

2) направления поляризации в каждой точке нагруженной модели совпадают с направлениями главных напряжений. Кроме того, если z_1 и z_2 суть главные напряжения в плоскости пластинки, а δ — относительная разность хода, то существуют зависимости (8) и (9);

3) распределение напряжений для плоского напряженного состояния при граничных условиях, заданных в напряжениях, не зависит от упругих постоянных материала для односвязных тел, а для многосвязных не зависит от них, если по каждому отдельно взятому контуру главный вектор внешних сил равен нулю.

Прохождение поляризованного света через нагруженную модель. Пропустим свет от точечного источника через поляризующее устройство (поляризатор), дающее плоскополяризованный монохроматический пучок. Уравнение колебаний светового вектора U_p в простейшем виде будет (1)

$$U_p = a \sin \varphi.$$

Поместим нормально пучку модель (толщины h), находящуюся в плоском напряженном состоянии. В данной точке с главными напряжениями σ_1 и σ_2 ($\sigma_2 = 0$) выберем систему координат (x, y) и расположим плоскость пропускания поляризатора вдоль оси x (рис. 118). Световой вектор разложится на две составляющие:

$$U_M = a \sin \varphi \cos \theta,$$

$$U_N = a \sin \varphi \sin \theta, \quad (11)$$

Вследствие оптической анизотропии будет иметь место относительная разность фаз (8) и относительная разность хода (9) (рис. 118).

Пусть в направлении σ_1 составляющая распространяется быстрее. Тогда, по выходе из модели, уравнения колебаний запишутся

$$\begin{aligned} U_M &= a \sin(\varphi' + \varepsilon) \cos \theta, \\ U_N &= a \sin \varphi' \sin \theta. \end{aligned} \quad (12)$$

Для создания возможности интерференции двух систем волн приведем их к одной плоскости. Это осуществляется путем пропускания обеих систем волн через второе поляризующее устройство (анализатор), поставленное по отношению к поляризатору в скрещенное положение. Через анализатор будут проходить колебания только в определенной плоскости (рис. 120).

Для светового вектора, выходящего из анализатора, уравнение колебаний будет иметь вид:

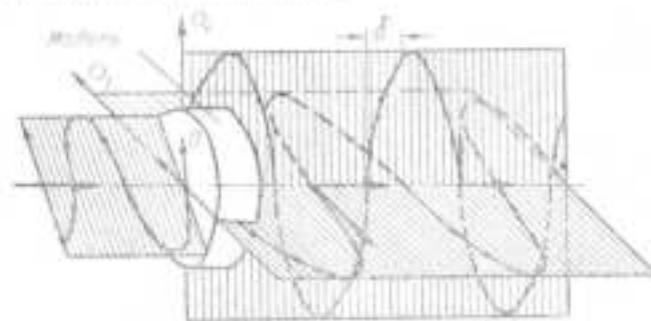


Рис. 119. Ход лучей за моделью

$$\begin{aligned} U_A &= a \sin(\varphi' + \varepsilon) \cos \theta \sin \theta = a \sin \varphi' \sin \theta \cos \theta = \\ &= a \sin 2\theta \sin \frac{\pi x}{l} \cos\left(\varphi' + \frac{\pi k}{l}\right) = A \sin\left(\varphi' + \frac{\pi k}{l} + \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned} \quad (13)$$

где A — амплитуда колебаний.

Освещенность изображения модели. Интенсивность освещения пропорциональна квадрату амплитуды

$$I = qa^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi x}{l}, \quad (14)$$

где $q < 1$ — коэффициент пропорциональности, включающий потери.

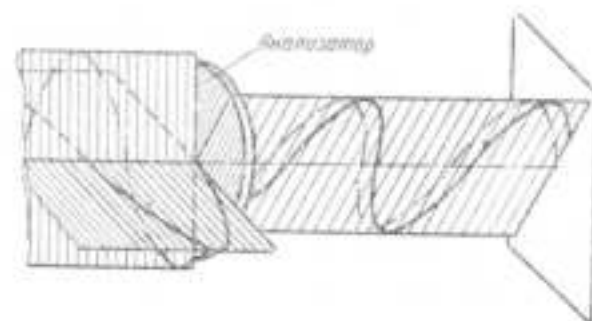


Рис. 120. Ход лучей за анализатором

Исследуем условия различной освещенности изображения модели. Выражение для I обращается в нуль в следующих случаях:

$$1. I=0 \text{ при } \sin 2\theta=0,$$

т. е. при

$$\theta = k \frac{\pi}{2}, \quad (15)$$

где $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Угол θ определяет наклон плоскости поляризатора (и анализатора) по отношению к главным напряжениям. Следовательно, если плоскости поляризатора и анализатора путем их поворота совместить с направлениями главных напряжений в данной точке, то на экране в этой точке будет погашение света. Свет будет также погашен во всех других точках, где направления главных напряжений такие же, что и в данной точке. На экране будут видны темные линии, соединяющие точки с одинаковыми направлениями главных напряжений. Такие линии называются изоклинами. Меньший положительный угол θ , определяющий направление главных напряже-

ний относительно системы координат (x, y) , называется параметром изоклины.

$$2. I = 0 \text{ также при } \sin \frac{\pi z}{\lambda} = 0,$$

т. е. при $\frac{\pi z}{\lambda} = \pi m$, где $m = 0, 1, 2, \dots$, откуда

$$z = m\lambda. \quad (16)$$

Следовательно, интенсивность света в данной точке равна нулю, если относительная разность хода равна целому числу длин волн. Этому случаю соответствует относительная разность фаз

$$z = \frac{2\pi z}{\lambda} = 2\pi m. \quad (17)$$

Условие погасания света примет вид

$$Ch(z_1 - z_2) = m\lambda. \quad (18)$$

Геометрические места точек на модели, где одновременно достигнуто погасание, могут быть видны в виде областей, линий и отдельных точек.

До сих пор выводы относились к прохождению монохроматического света определенной длины волны. Если же свет белый, то первое условие будет выполняться и в этом случае. Второе же условие будет удовлетворяться только для определенной длины волны λ_1 .

$$C_1 h(z_1 - z_2) = m\lambda_1. \quad (19)$$

где C_1 — постоянная для данной длины волны.

Составляющая спектра с длиной волны λ_1 полностью выпадает, частично будут погашены близкие составляющие и модель в данном месте будет окрашена в дополнительный цвет за счет непогашенных составляющих. Геометрические места одинаково окрашенных точек называются изохромами. В этих точках разности главных напряжений имеют одну и ту же величину. Поскольку $\frac{z_1 - z_2}{2} = z_{max}$, то изохромы являются геометрическими местами точек с одинаковыми значениями z_{max} .

3. Если одновременно выполняются оба условия (15) и (16), то изоклины и изохромы в этом случае накладываются друг на друга, что затрудняет исследование интерференционной картины. Поэтому стремятся удалить изоклинические ли-

нии путем замены света плоскополяризованным светом, поляризованным по кругу.

Для этой цели за поляризатором помещают джокреомляющую пластинку (например, из слюды). Плоскость поляризатора устанавливают под углом 45° к главным осям этой пластинки.

Уравнения колебаний после слюдяной пластинки будут

$$U_M = x = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sin(\varphi' + z) = a' \sin(\varphi' + z), \quad (20)$$

$$U_N = y = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sin \varphi' = a' \sin \varphi',$$

где ϵ — относительная разность фаз.

Конец результирующего светового вектора $\overline{OP}$ будет описывать кривую, уравнение которой, после исключения фазы ϵ , примет вид

$$x^2 + y^2 - 2xy \cos z = a'^2 \sin^2 z. \quad (21)$$

Эта кривая в общем случае является эллипсом. Если, в частности, $z = \pm \frac{\pi}{2}$, то получаем

$$x^2 + y^2 = a'^2 \quad (22)$$

и свет будет поляризован по кругу.

Такие пластинки называют пластинками в четверть длины волны $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$.

За моделью, перед анализатором, вводится вторая слюдяная пластинка в $\frac{1}{4}$. Ее оси ориентированы так, чтобы компенсировать разность хода, приобретенную в первой слюдяной пластинке (скрещенное положение). Таким образом, в анализатор войдут два пучка света, имеющие сдвиг фаз только за счет двойного лучепреломления модели.

§ 2 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МОДЕЛИ

Цели работы:

- 1) Ознакомление с поляризоскопом и измерительными устройствами.
- 2) Получение оптических картин, характеризующих напряженное состояние в модели.
- 3) Исследование распределения напряжений в модели.

Поляризоскопы. Установки, применяемые в оптическом методе исследования напряжений, называются поляризоскопами,

Полярископ с выключенными пластинками в $\frac{\lambda}{4}$ называется плоским; при включении пластинок в $\frac{\lambda}{4}$ — круговым.

Принципиальная схема установок общая и между собой они отличаются типами поляризующих устройств и некоторыми конструктивными особенностями.

Тип ППУ (проекционно-поляризационная установка, выпускаемая мастерскими НИИММ ЛГУ). Свет от точечного источника *I* собирается в сходящийся пучок, в фокусе которого находится поляризатор *P* (например, призма Николя или Франка-Риттера). Плоскополяризованный свет собирается линзой *З* в параллельный пучок, проходящий пластинку в $\frac{\lambda}{4}$ и затем нагруженную модель *М*. Далее свет проходит вторую пластинку в $\frac{\lambda}{4}$ и линзой *Л* собирается в сходящийся пучок, в фокусе которого находится анализатор *А* (призма Николя или Франка-Риттера). Обычно поляризатор и анализатор находятся в скрещенном положении. Лучи, проходящие анализатор, проектируются на экран или фотопластинку (рис. 121).

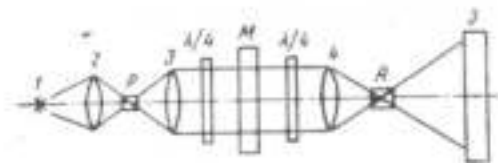


Рис. 121. Оптическая схема поляризационной ППУ

Тип БПУ ИМАШ-КБ-2 (большая поляризационная установка конструкции Института машиноведения АН СССР и конструкторского бюро 2).

Свет от источника *I* проходит через коллектор 2, который дает параллельный пучок. Светофильтр 3 выделяет более узкую область спектра. Поляризация света производится поляризатором 4 (поляроид). Свет проходит пластинку 5 в $\frac{\lambda}{4}$. Далее свет проходит нагруженную модель 6, вторую пластинку 7 в $\frac{\lambda}{4}$ и пропускается через анализатор 8 (поляроид), находящийся в скрещенном положении с поляризатором 4. Пучок попадает в объектив 9, в фокусе которого и собирается. Далее

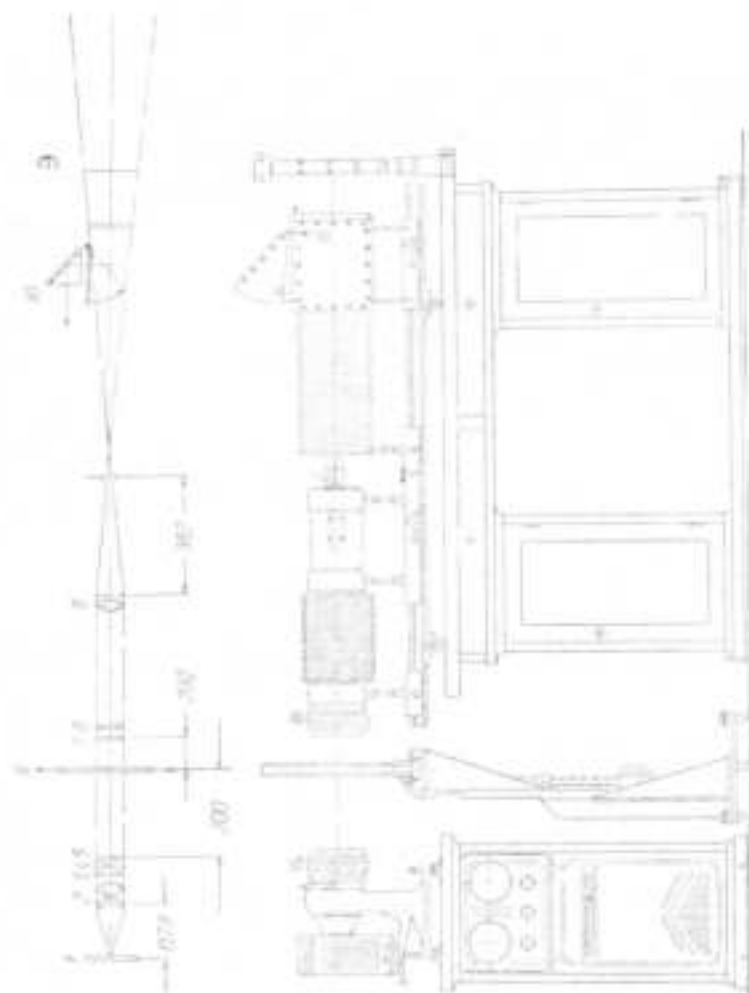


Рис. 122. Поляризационная БПУ ИМАШ-КБ-2

пучок расширится, образуя на экране Э или фотопластинке изображение модели. Для удобства наблюдений установка снабжена перископическим устройством 10 (рис. 122).

Изоклины. Изостаты. Первое условие погасления света, как было указано выше, определяется совпадением плоскости поляризатора с направлением одного из главных напряжений. При данном положении поляризатора на экране будут видны темные полосы (изоклины), в точках которых главные напряжения имеют одинаковые углы наклона θ к осям системы координат, связанной с моделью. Изменяя наклон плоскости поляризатора (и анализатора, чтобы сохранить скрещенное положение), каждый раз на экране получим новые темные полосы, отмечающие места точек, в которых главные напряжения имеют наклон, совпадающий с наклоном плоскости поляризатора. При изменении угла θ в пределах $0-90^\circ$ получим совокупность изоклин, покрывающих всю модель (рис. 123 — правая половина) и тем самым определим поле направлений главных напряжений.

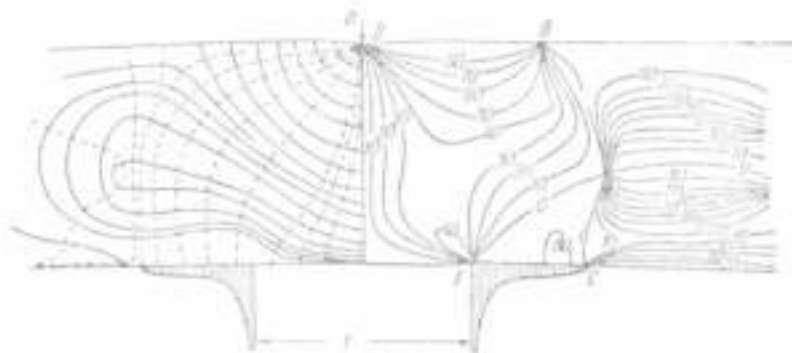


Рис. 123. Поперечный срез балки изогнутого проката, нагружаемой на жестком фундаменте:
справа — поле изоклин; слева — для семейства изостат

При плоском напряженном состоянии угол наклона главных напряжений определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} 2\theta_{1,2} = \frac{2Y_x}{X_x - Y_y} \quad (23)$$

Уравнение изоклины запишется тогда в виде

$$\frac{2Y_x}{X_x - Y_y} = \operatorname{const}. \quad (24)$$

Если в данной точке одновременно $Y_x = 0$ и $X_x - Y_y = 0$, то направление главных напряжений становится неопределенным. Это соответствует равенству $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, т. е. в этой точке имеет место равномерное растяжение или сжатие. Такие точки называются особыми, или изотропными (точки A, B, C рис. 123). В некоторых случаях такие точки располагаются в виде непрерывной кривой или области (например, нейтральная линия при чистом изгибе). Через особую точку проходят изоклины всех параметров. Через неособые точки, где имеют место единственные направления напряжений σ_1 и σ_2 , проходит изоклина только одного параметра. На ненагруженном контуре, где имеет место главное напряжение только с направлением вдоль касательной к контуру, параметр изоклины определяется углом наклона касательной к контуру. Это обстоятельство помогает при определении выхода изоклины на свободный контур.

Если нагруженная модель имеет ось геометрической симметрии, которая также является осью силовой симметрии, то эта ось будет изоклиной. Все остальные изоклины будут симметричны относительно нее. Точка приложения сосредоточенной силы является точкой сгущения изоклин (точки D, E, рис. 123).

Поворачивая скрещенные оси поляризатора и анализатора на углы $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ \dots 90^\circ$, на экране можно зарисовать поле изоклин. По этому полю в свою очередь можно построить важные кривые — изостаты (траектории главных напряжений) и траектории наибольших касательных напряжений. Изостатой называется кривая, касательная и нормаль к которой в каждой точке определяют направления главных напряжений.

Наиболее простым и достаточно точным для практических целей является графический способ построения изоклин. Пусть построено поле изоклин, например через 5° . На любой изоклине (например, с параметром 70°) в данной точке A проводим прямую, наклоненную к оси x под углом 70° . Эта прямая пересечет соседние изоклины в точках M_1 и N_1 . Расстояния AM_1 и AN_1 делим пополам и из точек P_1 и Q_1 проводим прямые под углами, равными параметрам соседних изоклин (75° и 65°), до пересечения со смежными изоклинами. Этим определяются точки A_1 и B_1 и точки M_2 и N_2 (рис. 124). Вновь делим расстояния A_1M_2 и B_1N_2 пополам и из точек P_2 и Q_2 проводим прямые под соответствующими углами и т. д. Огибающая полученной ломаной и составит с известным приближением изостат. Таким путем может быть построено одно семейство изостат. Семейство ортогональных линий совместно с первым образуют поле изостат (рис. 123 — левая часть).

Два семейства траекторий наибольших касательных напряжений строятся по полю изоклин аналогично, только угол наклона вспомогательных прямых берется равным $6 \pm 45^\circ$, поскольку $\tau_{\max}$ действуют на площадках, наклоненных под углом 45° к направлениям главных напряжений.

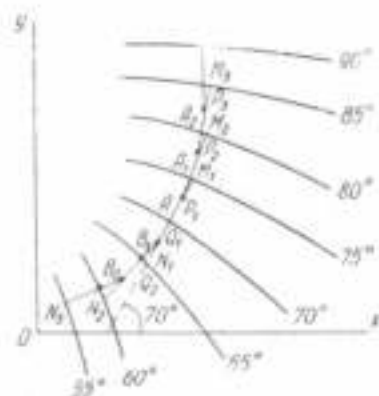


Рис. 124. Построение изостат по полю изоклин

При построении изостат следует учитывать их очевидные свойства:

1. Свободный от внешних нагрузок контур является изостатой. Второе семейство выходит на контур под прямым углом к нему. Прямолинейный свободный контур является изостатой и изоклиной.

2. Ось одновременной геометрической и силовой симметрии является изостатой и изоклиной.

3. Изостаты не могут иметь угловых точек, так как иначе в одной точке были бы два напряжения σ_1 , расположенных под углом друг к другу.

Наблюдения изоклин чаще всего ведут в белом свете, так как темная изоклина видна на цветном поле изохром. Для материалов высоко оптически активных яркая картина изохром иногда не позволяет надежно определить изоклины. В этих случаях наблюдения изоклин осуществляют на таких же моделях, изготовленных из материалов с малой оптической активностью (например, органическое стекло), для которых картина изоклин отчетливо видна. Такой прием возможен при условии соблюдения теоремы Мичелла.

Изохром. Как показано выше, при соблюдении второго условия погасания света (19) в точках изображения модели, где это условие выполняется, имеет место для монохроматического света потемнение, а для составного света — цветная окраска. В этих точках разность главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ (или $2 \tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_2$) равна постоянному числу

$$\frac{m \lambda}{C_1 \lambda} = \text{const} \quad (25)$$

($m = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Геометрическое место точек, в которых разность $\sigma_1 - \sigma_2$ имеет одно и то же значение, называется изохромой, или в монохроматическом свете полосой порядка m (рис. 125).

Значению $m=0$ соответствует значение $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ — случай особой или изотропной точки, где $\sigma_1 = \sigma_2$ или, в частности,



Рис. 125. Картина полос (изохром) балки той же, что и на рис. 123

$\sigma_1 = \sigma_2 = 0$. Особая точка или полоса определяется при круговой поляризации в белом свете: полоса нулевого порядка будет темной, а все прочие окрашенными.

Если известно распределение напряжений, то уравнение изохромы может быть записано.

Из формул преобразования компонент напряжений для плоской задачи известно соотношение

$$(X_1 - Y_1)^2 + 4Y_1^2 = (\tau_1 - \tau_2)^2. \quad (26)$$

Уравнение изохромы получится отсюда в виде:

$$(X_1 - Y_1)^2 + 4Y_1^2 = m^2 \frac{\lambda^2}{C_1^2 \lambda^2} = \text{const}. \quad (27)$$

Для исключения поля изоклин наблюдение изохром ведут в круговом полярикопе.

Определение значений $\sigma_1 - \sigma_2$ по данным эксперимента. Тарировка материала. Существуют три способа определения значений $\sigma_1 - \sigma_2$ по данным эксперимента.

1. **Использование шкалы цветов.** Для получения связи между картиной цветов и напряжениями в данном материале используется простое растяжение. Наблюдения ведут в белом свете. Напряжение в этом случае одно ($\sigma_2 = 0$), окраска об-

разия будет всюду одинаковой (исключая места, прилежащие к захватам). При увеличении растягивающей нагрузки первым гаснет фиолетовый цвет и на экране виден дополнительный желтый. Далее цвета гаснут в порядке составляющих спектра от фиолетового к красному. Дополнительные цвета возникают в последовательности: желтый, темно-красный, темно-голубой и темно-зеленый, после чего практически восстанавливается белый цвет. Считают, что первый зеленый цвет завершает смену цветов первого порядка. При дальнейшем увеличении нагрузки цвета погашаются в той же последовательности. Однако происходит некоторое видоизменение цветов, так как во втором цикле, кроме основного, гаснут и другие цвета. Например, длина волны $\lambda = 3900 \text{ \AA}^*$ фиолетового цвета примерно равна половине длины волны $\lambda = 7700 \text{ \AA}$ темно-красного. Поэтому, второе погашение фиолетового цвета соответствует первому погашению темно-красного, второе погашение красного с длиной волны $6500 \text{ \AA}$ совпадает с третьим погашением синего $\lambda = 4333 \text{ \AA}$ и т. д. В циклах более высоких порядков желто-белый, розовый и зеленый цвета следуют друг за другом, становясь все более бледными. Опыт показывает, что увеличению порядков цветов, например зеленого, соответствует пропорциональное увеличение разности $\sigma_1 - \sigma_2$. Следовательно, можно построить шкалу цветов в соответствии с величиной напряжений. Тогда для сложной модели из того же материала разность главных напряжений в данной точке может быть определена по порядку соответствующего цвета и величине напряжения, полученного из опытов на растяжение для данного порядка цвета. При оценке напряжений по окраске существенное значение имеет субъективное ощущение цвета, что может привести к ошибкам.

2. Метод полос. В монохроматическом свете (обычно зеленом, с длиной волны $\lambda = 5461 \text{ \AA}$) в круговом поляризованном свете наблюдают в виде темных полос. Картины полос делятся на две группы: простые и сложные. Простая картина имеет полосу нулевого порядка при любой нагрузке (например, чистый изгиб). Сложная картина не имеет нулевой полосы (например, растяжение или сжатие).

На фотографии или зарисовке простой картины полос порядок их в данной точке определяется счетом полос от полосы нулевого порядка или особой точки. Порядок полосы для точки модели, не лежащей на полосе, определяется интерполи-

цией: вдоль выбранного направления строятся эноды распределения порядков полос и для промежуточных точек с графика снимаются дробные значения. При сложной картине счет полос ведется и процессе возрастания нагрузки при прохождении полос через данную точку.

Количественная связь между порядком полос и разностью главных напряжений устанавливается соотношением (18):

$$z_1 - z_2 = m \frac{\lambda}{Ck},$$

Обозначим

$$\frac{\lambda}{C} = z_0^{(1,0)}, \quad (28)$$

тогда

$$z_1 - z_2 = m \frac{z_0^{(1,0)}}{k}. \quad (29)$$

Отсюда следует, что $z_0^{(1,0)}$ выражает собой значение разности главных напряжений при $m = 1$ и толщине материала, равной

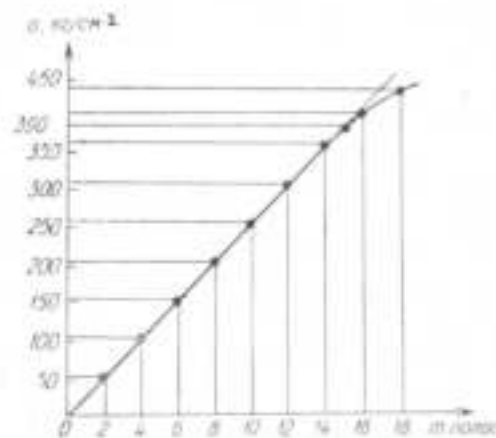


Рис. 126. Зависимость между напряжением и порядком полос m .

той же единице (в частности, одному сантиметру). Это значение $z_0^{(1,0)}$ называют ценой полосы материала.

Определение значения $z_0^{(1,0)}$ для данного материала осуществляют из экспериментов (растяжение, сжатие, чистый изгиб,

* Величина $\text{\AA} = 10^{-8} \text{ см}$ носит название ангстрем.

диск, сжатый по диаметру, и т. д.), для которых имеется теоретическое решение и напряжения могут быть вычислены. Чаще всего $\sigma_{\theta}^{(1),0}$ определяют из опытов на растяжение. Образец растягивают в поляризископе с монохроматическим источником. При этом в образце будут наблюдаться попеременно потемнения и посветления. Между напряжением и числом потемнений (полос) имеет место линейная зависимость (рис. 126). Подобрав нагрузку, соответствующую m потемнениям, из формулы

$$x_0^{(1,0)} = \frac{z_1}{m} \hbar = \frac{P}{F} \frac{\hbar}{m} \frac{\kappa z}{\varepsilon M^2} \quad (30)$$

определяют цену полосы материала. Имея распределение порядков полос в модели и зная $\sigma_0^{(1,2)}$, можно каждой точке модели приписать значения разности $\sigma_1 - \sigma_2$.

3. Метод компенсации. Метод компенсации позволяет при помощи прибора (компенсатора) измерить относительную разность хода в данной точке нагруженной модели.

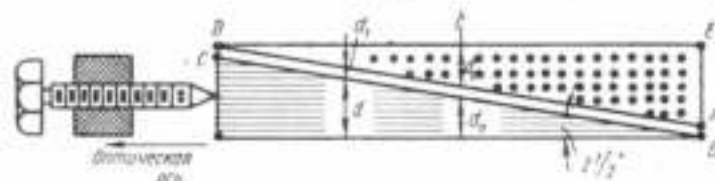


Рис. 127. Схема компенсатора Баббинге

Идея метода состоит в том, что к разности хода, возникшей в модели, добивается численно равная разность хода обратного знака, так что суммарная разность хода равна нулю.

Компенсатор Бабине состоит из двух кварцевых клиньев с углами наклона около $2,5^\circ$, расположенных так, что их оптические оси взаимно-перпендикулярны. Один из клиньев неподвижен, второй может перемещаться при помощи микрометрического винта (рис. 127). На неподвижном клине нанесен визирный крест. Когда микрометрический винт установлен на нулевом отсчете, толщины обоих клиньев одинаковы, компенсатор находится в нейтральном положении. Луч поляризованного света при входе в первый клин разлагается на два луча, один из которых приобретает опережение. Так как оба клина находятся в скрещенном положении, то луч, имевший в первом клине опережение, во втором будет иметь запаздывание.

Компексатор обычно устанавливают перед анализатором. Совмещают визирный крест (при нейтральном положении) с

данной точкой модели. Совмещают оптические оси компенсатора с направлениями главных напряжений, которые находятся предварительно по картине изоклин. Опережение $\delta_{\text{ак}}$, полученное в модели, изменится на δ_1 при прохождении первого клина. К суммарной разности хода $\delta_{\text{ак}} + \delta_1$ при прохождении света через второй клин будет добавлена величина δ_2 . Изменением толщиной подвижного клина подбирают разность хода в нем так, чтобы общая разность хода была равна нулю. Например, при рассматриваемом положении оптических осей (рис. 128) передвижением вправо подвижного клина уменьшаем его толщину до тех пор, пока суммарное опережение $\delta_{\text{ак}} + \delta_1$ не станет численно равным запаздыванию в неподвижном клине δ_2 . При обратном расположении оптических осей модели и подвижного

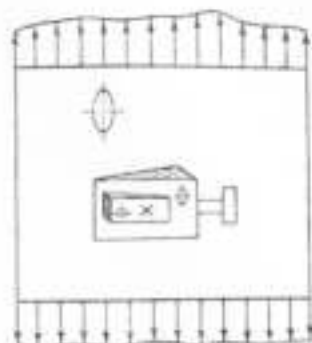


Рис. 128. Расположение компенсатора относительно модели

клина для компенсации нужно увеличить толщину и подвижной клин следует передвинуть влево. Передвижением клина влево или вправо добиваются погасания света в данной точке;

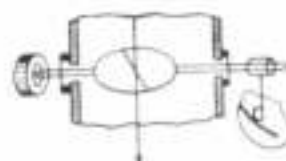


Рис. 129. Схема компенсатора Кростова

при этом против визирного креста устанавливается черная вертикальная линия. Зная число оборотов винта компенсатора и определив постоянную тарировки компенсатора, можно получить разность хода, выраженную в длинах волн.

Рис. 129. Схема компенсатора Краснова

Оптический коэффициент напряжений определяют из экспериментов, для которых могут быть вычислены напряжения. Например, при растяжении образца измеряют компенсатором разность хода и из формулы

$$C = \frac{F}{G} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon M^2}{\epsilon_0} \quad (31)$$

находят оптический коэффициент напряжений.

На свободном контуре, где одно из главных напряжений равно нулю, знание порядка полюсы или разности хода в данной точке контура позволяет сразу найти величину главного контурного напряжения.

В точках свободного контура при помощи компенсатора может быть определен и знак главного напряжения, путем сопоставления перемещения подвижного клина при компенсации на контуре модели и при растяжении. Во внутренних точках модели может быть тем же способом установлен знак разности главных напряжений.

Определение компонентов напряжений в модели. Плоское напряженное состояние будет известно, если в каждой точке известны величины главных напряжений и их направления, или если известны компоненты напряжений в некоторой системе координат (например, в декартовой системе X_x, Y_y, Y_x). Экспериментально могут быть получены направления главных напряжений и их разность $\sigma_1 - \sigma_2$ (для плоской задачи).

Иногда, особенно для целей сопоставления разных форм модели, исследования этими данными и ограничиваются. Однако во многих случаях необходимо иметь полное представление о напряжениях. Для получения отдельных значений напряжений необходимо получить еще одно добавочное соотношение между напряжениями. Это соотношение получается или построением изопас (линий, вдоль которых сумма главных напряжений $\sigma_1 + \sigma_2$ постоянна), или путем численного интегрирования уравнений равновесия.

Существуют различные способы построения изопас.

Весьма распространенным является метод, связанный с интегрированием уравнений равновесия в различных системах координат. В прямоугольной системе координат уравнения равновесия без массовых сил имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial Y_x}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial X_y}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (32)$$

Равенство массовых сил нулю несущественно. Проведем линию AB параллельно оси x на расстоянии y (рис. 130). Вдоль этой прямой первое уравнение будет зависеть только

от переменной x и его можно интегрировать

$$X_x = X_x^0 - \int \frac{\partial Y_x}{\partial y} dx, \quad (33)$$

Здесь X_x^0 — напряжение в начальной точке пути интегрирования. Проведем прямую $A'B'$ на расстоянии Δy . Приближенно значение $\frac{\partial Y_x}{\partial y}$ можно получить, составив отношение

$$\frac{\partial Y_x}{\partial y} \approx \frac{Y_{xx} - Y_{xx}}{\Delta y} = \frac{\Delta Y_x}{\Delta y}, \quad (34)$$

Разобьем прямую AB на отрезки Δx .

Уравнение (33) заменим уравнением в конечных разностях

$$X_x = X_x^0 - \sum \Delta Y_x \frac{\Delta x}{\Delta y}, \quad (35)$$

где Δy — постоянная, величина Δx может выбираться произвольно, в зависимости от необходимой точности вычислений. Часто берут $\Delta x = \Delta y$. При вычислениях необходимо учитывать знак приращений Δx и Δy в связи с избранным путем интегрирования.

Рассмотрим возможности определения ΔY_x в каждой точке прямой AB . Между главными напряжениями и напряжениями, отнесенными к выбранной системе координат (рис. 131), существуют зависимости

$$\begin{aligned} X_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta, \\ Y_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta, \\ Y_y &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta, \end{aligned} \quad (36)$$

здесь угол θ отсчитывается от оси x к оси σ_1 в положительном направлении для данной системы координат.

Выражение для ΔY_x содержит величины, определяемые из эксперимента. Угол θ вдоль прямых AB и $A'B'$ определяется замером параметров изоклин, разность главных напряжений в точках этих прямых определяется по замерам оптической разности хода или по порядку полюс. Таким образом, величина приращения ΔY_x может быть найдена. Если известно значение X_x^0 , то известно и значение X_x .

является необходимым критерием правильности полученного решения.

Порядок выполнения работы. После ознакомления с основами теории студенты получают указания от персонала лаборатории относительно практики работы на полярископах.

Модель устанавливается в полярископе. В плоском полярископе в белом свете зарисовывается картина изоклин. Точки выхода изоклин на свободный контур уточняются в связи с их свойствами. По картине изоклин строится два семейства изостат, а также одна или две траектории z_{max} .

В круговом полярископе с белым светом при нескольких нагрузках наблюдаются картины изохром. В монохроматическом свете (при включенном светофильтре) фотографируется или зарисовывается картина полос. Осуществляется тарирование материала образца. Вдоль выбранных прямых методом численного интегрирования уравнений равновесия определяются компоненты напряжений.

Проверяются условия равновесия мысленно выделенной части. Полученное распределение напряжений сравнивается с теоретическим.

В качестве задач для эксперимента могут быть, например, названы: 1) задача о сжатии диска сосредоточенными силами по диаметру (лаборатория МГУ). Определение напряжений производится вдоль хорды, перпендикулярной линии действия нагрузки, отстоящей на $\frac{R}{2}$ от центра. Тарирование материала осуществляется из опытов на растяжение или поперечный изгиб. 2) Задача о поперечном изгибе балки (консольной или на двух опорах) сосредоточенной силой. Определение напряжений осуществляется вдоль двух прямых, перпендикулярных оси балки. Одна из прямых выбирается вблизи заделки или вблизи точки приложения силы, вторая на расстоянии 1—1,5 высот балки от первой. Распределение напряжений по второму сечению сравнивается с теоретическим, получаемым по формулам сопротивления материалов. Экспериментально полученное распределение напряжений вдоль первого сечения будет отражать эффект наваливания волокон друг на друга, чем пренебрегается в сопротивлении материалов. Тарирование материала в этой задаче удобно осуществлять из опыта на диаметрально сжатие диска. Согласно теоретическому решению в центре диска

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{8P}{\pi D h},$$

где P — сила, h — толщина, D — диаметр диска. Сопоставив с формулой (29), находим

$$\sigma_0^{(1,2)} = \frac{8P}{m_0 \pi D},$$

где m_0 — порядок полосы в центре диска.

Отчетными материалами являются: схемы установок и приборов, чертеж поля изоклин, изостат и траекторий z_{max} , фотоснимок или рисунок картины полос, расчет по определению $z^{(0)}$ графики распределения X_x , Y_y , Y_x (экспериментальные и теоретические) вдоль основной линии с приложением таблицы и проверка условий равновесия.

ЛИТЕРАТУРА

- Кокер Э., Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений. ОНТИ, Л.—М., 1936.
Ландаберг Е. С. Оптика. ГИТТЛ, М., 1952.
Филоженко-Бородин М. М. и др. Курс сопротивления материалов, ч. II. ГИТТЛ, М., 1956.
Фрохт М. Фотоупругость, тт. 1, II. ГИТТЛ, М.—Л., 1948—1950.

Иван Михайлович Грязнов, Виктор Степанович Ленский,
Петр Матвеевич Огибалов, Иван Александрович Скорый

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ ДЕФОРМИРОВАНИЮ

Редактор Н. А. Кайко

Технический редактор М. С. Ермаков

Сдано в набор 10/V 1960 г. Подписано к печати 38/II 1961 г.
Л-35122. Формат 60×90/16. Печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 11,30.
Изд. № 1417. Заказ 680. Тираж 10 000 экз. Цена 50 коп.

Издательство Московского университета, Москва, Ленинские горы.
Типография Изд-ва МГУ, Москва, Ленинские горы.

В книге описывается один из наиболее распространенных элементов звуковых радиотехнических схем — блокинг-генератор. Рассмотрены типовые варианты и режимы работы схем блокинг-генераторов, а также вопросы синхронизации и деления частоты. Особое внимание обращено на выяснение физической сущности процессов. Кроме того, дано обобщенное описание расчета схем блокинг-генераторов.

Издание рассчитано на студентов и инженерно-технических работников.

КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ. Труды государственного астрономического института им. П. К. Штернберга, т. XXX, 20 л. Цена 1 р. 50 к.

В книге содержатся работы по меридианной и фотографической астрономии и по гравиметрии: «Фотографические наблюдения двойных звезд на Московской обсерватории», «Графический способ определения элементов орбит визуально-двойных звезд и некоторые статистические закономерности среди них», «Диагностика Московской обсерватории на Ленинских горах», «Определение прямых восхождения близлежащих звезд на Московском меридианном круге Рейсольда в 1955—1956 гг.», «Об определении оптического центра пластинки» и др.

Издание рассчитано на студентов, аспирантов и научных работников в области астрономии.

ЧЕЧЕРНИКОВ В. И. **Магнитные измерения**, под редакцией проф. Е. И. Комаровского. 25 л. Цена 90 коп.

В учебном пособии излагаются основные методы исследования магнитных свойств вещества в постоянных и переменных магнитных полях. Главное внимание уделено рассмотрению прецизионных методов измерений, которые находят широкое применение в лабораторной практике. Они являются магнитные методы исследования, разработанные в самое последнее время.

Учебное пособие рассчитано на студентов, аспирантов, научных и практических работников, занимающихся исследованием магнитных свойств веществ.

Книги будут высылаются наложенным платежом. Предварительная оплата не принимается. В адрес «до востребования» книги не высылаются.

Заказы направлять по адресу: Москва, В-234, Издательство МГУ.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать								
15	18 сверху	фотоокуляр 16,	фотоокуляр 15,								
18	1 сверху	Надан	Надан								
19	14 снизу	планке	правке								
21	9 снизу	$z_p \sqrt{F_s}$	z_p								
63	1 снизу	типа,	типа, «описанного» ниже								
84	Таблица 12 в первой графе	H_N	H_V								
84	Таблица 12 в первой и второй гра- фах.	<table><tr><td>224</td><td>1224</td></tr><tr><td>022</td><td>1022</td></tr></table>	224	1224	022	1022	<table><tr><td>1224</td><td>2,30</td></tr><tr><td>1022</td><td>2,30</td></tr></table>	1224	2,30	1022	2,30
224	1224										
022	1022										
1224	2,30										
1022	2,30										
129	6 сверху	формулу, не останавли- ваясь на выводе ее кри- тической силы, для...	формулу, не остано- виваясь на выводе ее критической силы для...								
130	9 снизу	декаду 6	декаду 5								
132	19 сверху	обработки	отработки								