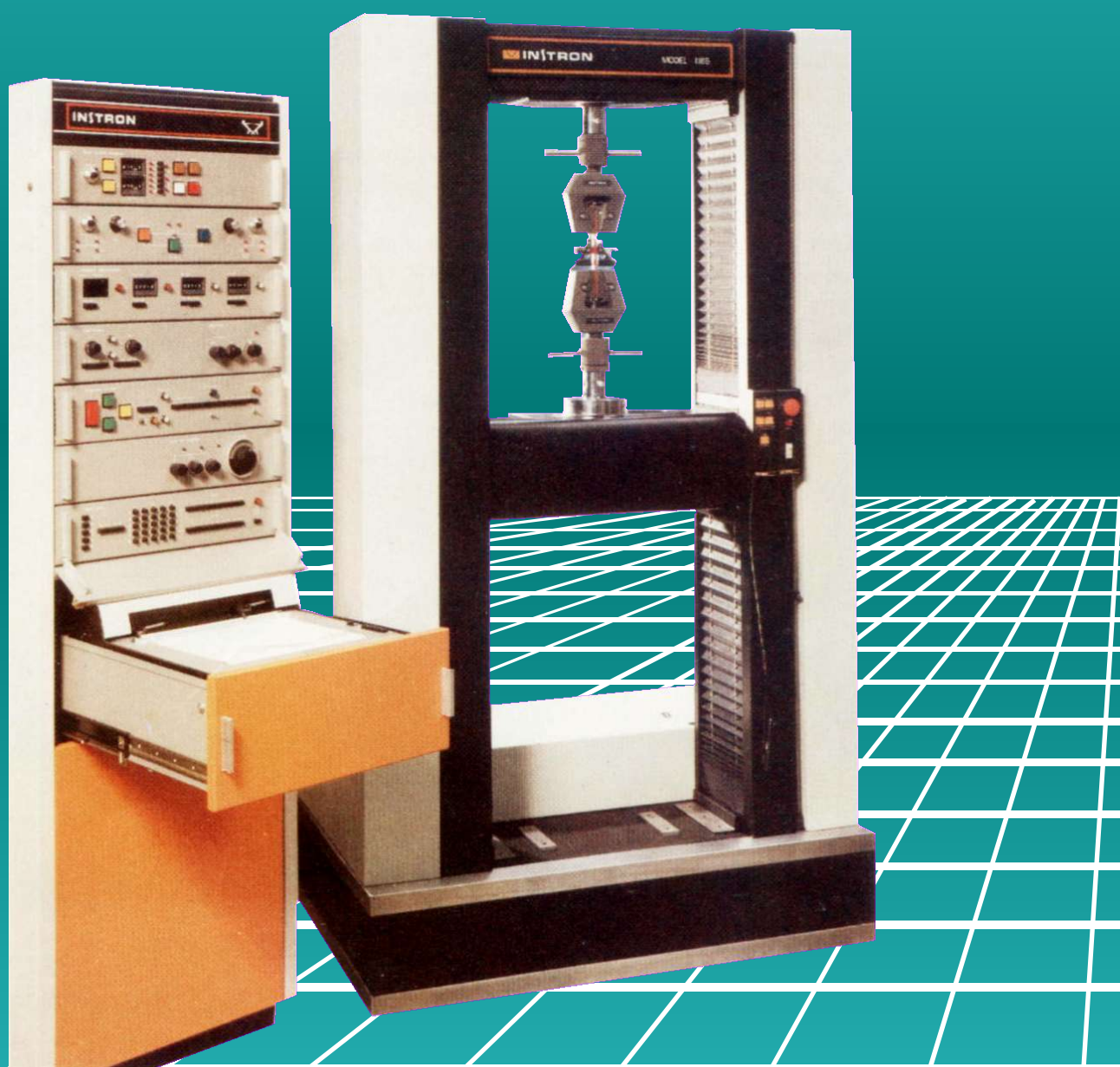


Механические испытания материалов



Нижний Новгород 2005

Федеральное агентство по образованию
Государственное учреждение высшего профессионального образования
Нижегородский государственный технический университет

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

*Рекомендовано Ученым советом Нижегородского государственного
технического университета в качестве учебного пособия (лабораторного
практикума) для студентов [машиностроительных](#) специальностей*

Нижний Новгород 2005

УДК 620.17 (075)
ББК 30.121
М55

Авторы: **Ю. В. Глявин, А. Г. Кипарисов, А. А. Миронов,
Н. Н. Михеев, А. Е. Жуков**

Механические испытания материалов: Учеб. пособие (лабораторный практикум) / Ю. В. Глявин, А. Г. Кипарисов, А. А. Миронов, Н. Н. Михеев, А. Е. Жуков / Нижегород. гос. техн. ун-т; Нижний Новгород, 2005. 81с.
ISBN 5-93272-299-1

Приводятся сведения об испытательных машинах, а также методики испытания материалов на растяжение, сжатие, срез, твердость, ударную вязкость. Описаны лабораторные работы, являющиеся экспериментальными проверками теоретических формул, излагаемых в курсе «Сопротивление материалов».

Предназначено для студентов машиностроительных специальностей.

Рис. 40. Табл. 8. Библиогр.: 19 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук Ю. М. Кулагин,
канд. техн. наук Б. В. Трухин

УДК 620.17 (075)
ББК 30.121

ISBN 5-93272-299-1

© Нижегородский государственный
технический университет, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Из истории науки о сопротивлении материалов	6
1.1. Основные этапы развития	6
1.2. Создание и развитие в НГТУ кафедры и лаборатории сопротивления материалов	9
2. Определение механических характеристик прочности и пластичности материалов	12
2.1. Испытание материалов на растяжение	12
2.2. Испытание материалов на сжатие	23
2.2.1. Сжатие пластичного материала (малоуглеродистой стали)	23
2.2.2. Сжатие хрупкого материала (чугуна)	24
2.2.3. Сжатие анизотропного материала (дерева)	26
2.3. Испытание стали на растяжение и изучение диаграммы сил	27
2.3.1. Пресс А. Г. Гагарина и диаграмма сил	27
2.3.2. Определение предела пропорциональности с допуском 50 %	29
2.3.3. Определение условного предела текучести с допуском 0,2 %	30
2.3.4. Определение предела прочности	30
2.3.5. Определение относительной деформации 6-кратного и 10-кратного образцов	31
2.3.6. Определение относительного сужения поперечного сечения после разрыва образца	32
2.3.7. Определение полной и удельной работ, затраченных на деформацию образца	32
2.3.8. Построение диаграммы истинных напряжений	32
2.4. Определение предела прочности стали на срез и сравнение его с пределом прочности при разрыве	34

3. Экспериментальное определение упругих констант материала	36
3.1. Определение модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона при испытании материала на растяжение	36
3.2. Определение модуля сдвига.....	41
4. Исследование твёрдости, ударной вязкости и плоского напряженного состояния	44
4.1. Определение твёрдости материалов.....	44
4.1.1. Метод измерения твердости по Бринеллю	44
4.1.2. Метод измерения твердости по Роквеллу	50
4.2. Испытание материалов на ударный изгиб.....	56
4.3. Исследование напряженного состояния бруса при изгибе с кручением	62
5. Оценка погрешностей опытов при обработке результатов измерений	67
5.1. Классификация измерений и погрешностей	67
5.2. Абсолютная и относительная погрешности. Основные положения теории приближенных вычислений	68
5.3. Обработка результатов измерений	72
Приложение. Испытательное оборудование лаборатории «Сопротивление материалов»	78
Библиографический список	80

ВВЕДЕНИЕ

При расчетах на прочность, жесткость и устойчивость элементов машин и сооружений необходимо знать механические характеристики материалов и их константы упругости: модуль продольной упругости, модуль сдвига, а также коэффициент Пуассона. Все эти данные можно получить только в результате экспериментальных исследований свойств материала в специализированных лабораториях, оснащенных современными испытательными машинами. По этой причине в курсе «Сопротивление материалов» большое внимание уделяется вопросам испытания материалов и изучения их свойств, которые выполняются обычно параллельно с лекционными занятиями. Настоящее учебное пособие является руководством при подготовке и проведении этих лабораторных работ.

Основная цель данного пособия — научить студентов ставить эксперименты, определять механические характеристики материалов, их константы упругости, выполнять экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, проводить проверку теоретических выводов.

Предполагается, что до выполнения лабораторной работы студенты ознакомятся по пособию с содержанием и методикой проведения экспериментальных исследований. Каждый параграф посвящен описанию определенного вида испытаний материалов. Указывается основная цель испытания, даются общие теоретические положения, описывается устройство и принцип работы испытательных машин, приборов и приспособлений, приводится порядок проведения испытаний, а также предлагаются вопросы для самопроверки.

В начале каждого параграфа сноской указывается, перед проведением какой лабораторной работы студенту необходимо изучить данный материал (нумерация работ произведена в соответствии с бланками-отчетами к лабораторным работам). Это позволяет студентам в отведенное время выполнить максимальное количество работ.

Результаты, полученные при проведении лабораторных работ, заносятся в журналы-отчеты или в специальные бланки. После выполнения всех работ студенты сдают зачет по лабораторным работам.

1. ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ О СОПРОТИВЛЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

1.1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ

Когда люди впервые начали заниматься строительством различных сооружений, они убедились в необходимости иметь сведения о свойствах строительных материалов, чтобы на их основе можно было назначать надежные размеры частей сооружений. Уже в Древнем Египте, Риме и Греции были известны некоторые свойства материалов. Однако эти сведения были поверхностными, вследствие чего возводимые в то время грандиозные монументы, храмы и пирамиды строились с излишним запасом прочности.

Эпоха Возрождения принесла с собой не только выдающиеся достижения в области искусства, но и интерес к науке о прочности. Наиболее ярко дух эпохи воплотился в образе Леонардо да Винчи (1452–1519). Он был не только великим мастером в области искусства, но и ученым, и инженером. В его записных книжках было найдено много данных о сделанных им крупных открытиях в разных областях науки, в частности, Леонардо да Винчи экспериментально изучал прочность материалов. В заметке «Испытание сопротивления железных проволок разных длин» он писал: «Укрепив железную проволоку длиной 2 локтя на чем либо так, чтобы она крепко держалась, затем, подвесив к ней корзину, ящик или что-либо подобное, через малое отверстие на дне воронки насыпать туда некоторое количество мелкого песка... Вес песка и место разрыва следует заметить. Испытание повторяется несколько раз для контроля результатов». Проводимые таким образом опыты были первыми экспериментальными исследованиями свойств материалов.

Первые попытки установления научно обоснованных безопасных размеров элементов сооружений, основанных на экспериментально изученных свойствах материалов, относятся к XVII веку.

Книга Галилео Галилея «Две новые науки» (1638 г.) знаменует собой возникновение науки о прочности, т. е. сопротивления материалов. В этой книге, например, впервые установлено, что при простом растяжении прочность бруса пропорциональна площади поперечного сечения и не зависит от его длины.

Несколько позже Роберт Гук (1635–1703) определил, что между величиной сил и производимыми ими деформациями существует линейное соотношение, получившее в дальнейшем название «закон Гука». В 1675 году Р. Гук издал работу «Десять изобретений, которые я намерен опубликовать». Одним из исследований была «Истинная теория упругости и жесткости». Однако под заголовком были только буквы: *ceiinossttvu*. Так в то время зашифровывали научные разработки, если не были уверены в их достоверности. Лишь три года спустя, убедившись в справедливости своих выводов, он в трактате о пружинах («О восстанавливающей способности или об упругости») расшифро

вал свою анаграмму: *ut tensio sic use* (каково удлинение, такова и сила). В этой работе содержались результаты проведенных им опытов с упругими телами, она являлась, по существу, первым печатным трудом, в котором рассматривались упругие свойства материалов. Следует заметить, что Р. Гук был до конца своих дней в ссоре с И. Ньютоном. Причиной ее послужили неоднократные споры о **приоритетах** каждого в совершенных научных открытиях. Став после смерти Р. Гука президентом Лондонского Королевского общества, И. Ньютон уничтожил все его экспериментальные установки. Вероятно из-за этого оказались навсегда потерянными и все портреты Р. Гука.

Закон Гука послужил фундаментом, на котором впоследствии была создана вся механика упругих тел.

Однако использование этого закона было невозможно без установления физических констант материалов, связывающих величину силы с упругой деформацией, возникающей под действием силы. Понятия о константах (модуле упругости и коэффициенте поперечной деформации) были впервые введены Томасом Юнгом (1773–1829) и Симоном Дени Пуассоном (1781–1840). Впоследствии константы получили имена своих авторов.

Томас Юнг изучал медицину в Лондонском, Эдинбургском и Геттингенском университетах. Вернувшись в Англию, он поступил в Кембридж. Представляя его будущим руководителям, магистр заявил: «Я представляю Вам ученика, который может читать лекции своим учителям». Однако Т. Юнг никогда не стремился этого делать. Он вообще не вступал в беседы, не навязывал своих убеждений, но если ему задавали какой-либо из труднейших вопросов, всегда отвечал не задумываясь, как будто речь шла о пустяке. Поэтому Т. Юнг потерпел неудачу в роли преподавателя. Его изложение страдало излишней сжатостью, он не был способен останавливаться в своих лекциях на сложных для учащихся вопросах курса. Он родился с задатками гения: в два года читал, в 14 лет знал не только современные европейские языки (немецкий, французский, итальянский, английский), но и латинский, греческий, арабский, персидский и еврейский. Его способности в физике не оставляли сомнений в том, что это будет блестящий ученый. Однако до конца жизни Т. Юнг разрывался между физикой и медициной, увлекался археологией, расшифровывал древние египетские иероглифы, был живописцем, ходил в цирке по проволоке. Так он «разбрасывался» всю свою жизнь. Поэтому, возможно, ему не удалось добиться должного признания со стороны своих современников.

В отличие от Т. Юнга, С. Пуассон родился в бедной семье и к 15 годам научился только читать. Лишь поступив в Париже в Политехническую школу, он показал свои выдающиеся способности, был оставлен в ней преподавателем математики и проявил себя большим ученым и исследователем. Он стал членом или членом-корреспондентом почти всех европейских и американских академий.

Однако введенное Юнгом понятие о модуле упругости отличалось от того, которым пользуются в настоящее время. Последним шагом в формировании закона Гука сделали французский математик Огюстен Луи Коши (1789-1857), который ввел такие понятия, как «напряжения» и «деформация» и французский инженер Луи Мари Анри Новье (1785–1836).

Таким образом, потребовалось почти 150 лет, чтобы записать закон Гука в современном виде.

Следует отметить, что сегодня, как и раньше, также невозможно рассчитать на прочность, жесткость и устойчивость ни одну конструкцию, предварительно не определив экспериментальным путем модуль продольной упругости (модуль Юнга), модуль упругости при сдвиге и коэффициент Пуассона материала конструкции.

Кроме того, без предварительного экспериментального определения максимальных напряжений, которые может выдержать материал под нагрузкой при растяжении, кручении, сдвиге, невозможно составить условие прочности и подобрать допустимую нагрузку или безопасные размеры конструкции. Сначала испытания ограничивались только определением предела прочности материала, но вскоре обнаружилось, что этого недостаточно. В 1788–1867 гг. Ж. Понселé строит в своей лаборатории диаграммы растяжения, сравнивает по ним различные сорта железа и стали, а также предлагает способ вычисления допускаемых напряжений. Однако получение качественных диаграмм растяжения стало возможным только после того, как инженером, князем А. Г. Гагариным был сконструирован и построен пресс для механических испытаний материалов. В 1986г. этот пресс был удостоен золотой медали на Всероссийской промышленной выставке в Нижнем Новгороде.

Более глубокое изучение свойств материалов потребовало вскоре применения специального оборудования для их испытания. Лаборатории, оснащенные таким оборудованием, были созданы И. Баушингером (Германия, 1871 г.), Д. Киркальди (Англия, 1865 г.). Там, например, имелась машина, способная развивать усилия до 100 т. В этих лабораториях было впервые установлено, что образцы удлиняются равномерно только до некоторого предела, а относительная деформация в месте разрыва является важной характеристикой материала, зависящей от формы образца.

В России начало механическим испытаниям положил Г. Ламé, установивший испытательную машину в Петербургском институте путей сообщения раньше, чем подобные машины были изготовлены в Англии и Германии. Лаборатория, созданная Г. Ламе, быстро расширялась и заняла в дальнейшем под руководством П. И. Собко (1819–1870) и Н. А. Белелюбского (1845–1922) первое место по своему значению в России и в континентальной Европе. Выдающийся русский инженер и ученый Н. А. Белелюбский отстаивал необходимость внедрения в практику испытаний материалов единых международных технических условий. Он принимал активное участие в организации Международного общества по испытанию материалов.

Сейчас экспериментальные исследования свойств материала проводятся в специализированных лабораториях испытания материалов, которые существуют при конструкторских бюро заводов, научно-исследовательских и учебных институтах.

1.2. СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ В НГТУ КАФЕДРЫ И ЛАБОРАТОРИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Лаборатория «Соппротивление материалов» НГТУ была эвакуирована в Нижний Новгород в 1916 г. вместе с Варшавским политехническим институтом. В то время она называлась «Станция испытания материалов». В опись станции входило 3927 предметов на общую сумму около 80 тыс. рублей (по тем временам эта была очень большая сумма). В лаборатории до сих пор сохранилась часть этого оборудования.

Из Варшавы также были эвакуированы и пятьдесят три из шестидесяти шести преподавателей института. Среди них был и окончивший в 1914 г. Варшавский политехнический институт Николай Афанасьевич Семенов, который занимал в то время должность старшего лаборанта. После эвакуации института в Нижний Новгород и преобразования его в 1918 г. в университет, Н. А. Семенов работал сначала преподавателем, а затем доцентом и заведующим кафедрой «Соппротивление материалов».

В 1930 году постановлением правительства университет был разделен на три института, при этом вся кафедра «Соппротивление материалов» перешла в механико-машиностроительный институт, преобразованный в 1934 г. в индустриальный. Кафедра вскоре была переведена из 3-го во 2-й корпус нашего университета, где находится и в настоящее время. Заведующим кафедрой все эти годы (1930–1948) оставался Н. А. Семенов. Он в разное время работал также заместителем директора института, деканом механико-технологического и автомеханического факультетов. За заслуги перед родиной Н. А. Семенов был награжден орденом Ленина.

При его содействии были установлены в 1931г. испытательные машины фирмы “*Amsler*”, “*Mor and Federgaff*”, пресс *А. Гагарина*, прессы на 30 т и 100 т, копры и твердомеры, которые полностью обеспечивали все испытания, проводимые обычно в таких лабораториях. На этом оборудовании под руководством Н. А. Семенова испытывались материалы для строительства Окского моста, а также других строек города, а в годы войны осуществлялись испытания некоторых изделий оборонной промышленности. Все образцы, необходимые для испытания материалов, изготавливались на кафедре в специально оборудованной мастерской.

С 1948 по 1970 г. кафедрой «Соппротивление материалов» заведовал д-р техн. наук, профессор Александр Васильевич Верховский, награжденный орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, Знаком Почета. В эти годы число часов, предусмотренных учебными планами, на лабораторные работы

значительно возросло. Существующие площади лаборатории уже не могли обеспечить проведение всех лабораторных работ, и потребовалась организация второй лаборатории. При этом общая площадь кафедры увеличилась почти в три раза. Было приобретено много новых испытательных машин, высота которых не позволяла их разместить в существующих помещениях (*ГМС-50*, *ГМС-100* и др.). В связи с этим лаборатории кафедры были переоборудованы, высота части помещений была значительно увеличена, стены по периметру были покрыты керамической плиткой.

К 1970 г. количество сотрудников на кафедре увеличилось до 35 человек. К этому времени он создал на кафедре научную школу по расчету деталей сложной формы методом неплоских сечений. Для проверки предложенной им гипотезы неплоских сечений в лаборатории проводились многочисленные исследования напряженного состояния деталей сложной формы на образцах больших размеров методом тензометрирования.

Большую работу на кафедре вел все эти годы доцент Николай Григорьевич Токарь. Его заслугой является непосредственное участие в организации государственной службы по проверке испытательных машин и оборудования. В качестве консультанта он помогал в разработке всех нормативных документов и актов, касающихся вопросов измерения силы и моментов сил. Принимая участие (с 1929 г.) в работе лаборатории по испытательным машинам при палате мер и весов, он создал более 25 видов образцовых переносных динамометров 3-го разряда, серийный выпуск которых был освоен на учебно-опытном заводе института. Динамометры Н. Г. Токаря получили широкое применение не только у нас, но и за рубежом. В дальнейшем при его участии был создан первый отечественный стационарный динамометр 2-го класса, который явился единственным эталоном в стране в годы войны в области измерения силы до 50 000 кГ и был модернизирован им в 1949 г. в первую в нашей стране тарировочную машину. По разработанному им проекту в Свердловске, в лаборатории ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, была создана также эталонная машина для воспроизведения крутящих моментов до 2000 кГм.

С 1970 г. по 1984 г. кафедрой заведовал Юрий Викторович Глявин. В эти годы в лаборатории проводились многочисленные теоретические и экспериментальные работы по договорам с различными предприятиями Горьковской области. При выполнении этих работ широко использовался метод тензометрирования и поляризационно-оптический метод исследования напряженного состояния на специальных моделях, выполненных из оптически активного стекла (испытания проводились на чехословацкой машине *FMB*).

С 1984 г. лаборатория входит в состав кафедры «Строительная механика корабля и сопротивление материалов», возглавляемой доктором технических наук, профессором, заслуженным деятелем науки РФ Вячеславом Михайловичем Волковым.

Под его руководством создано научное направление по механике разрушения и надежности конструкций для судостроения и научная школа по этому

направлению. В лаборатории в 80-х и 90-х годах проводились большие исследования по механике хрупкого разрушения, широко использовались современные методы неразрушающего контроля технического состояния конструкций. Кафедра стала головной по комплексной научно-технической программе: «Надежность конструкций в судостроительной отрасли». Учениками В. М. Волкова создан и функционирует Нижегородский центр технической диагностики, который обслуживает не только Волго-Вятский регион, но и другие области России. Кафедра и лаборатория имеют неразрывную связь с рядом научных организаций, а также предприятиями судостроительной и машиностроительной промышленности.

В 1994 году при кафедре «Строительная механика корабля и сопротивление материалов» была открыта специальность «Динамика и прочность машин», выпускающая инженеров-механиков-исследователей, магистров, а также аспирантура и докторантура по специальности «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

2.1. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ*

Основная цель – изучение поведения материалов при растяжении до разрушения; определение механических характеристик прочности и пластичности

Образцы. Для испытания на растяжение применяют пропорциональные цилиндрические или плоские образцы диаметром или толщиной в рабочей части 3,0 мм и более (рис. 2.1, а, б).

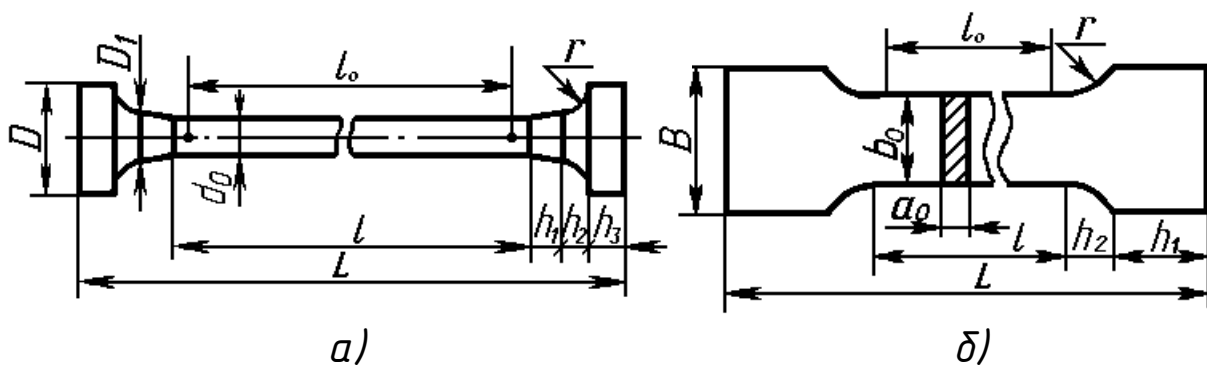


Рис. 2.1. Цилиндрические (а) и плоские (б) образцы, применяемые при испытании на растяжение

Наиболее распространены цилиндрические образцы, у которых расчетная длина $l_0 = 5 d_0$ (короткие, пятикратные образцы) и $l_0 = 10 d_0$ (длинные, десятикратные образцы). У плоских образцов соотношение между расчетной длиной и размерами поперечного сечения остается таким же, как и для цилиндрических образцов, с той лишь разницей, что в соотношении вместо диаметра фигурирует площадь поперечного сечения.

Так как площадь $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$, то для короткого образца

$$l_0 = 5d_0 = 5\sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 5,65\sqrt{A_0};$$

для длинного образца

$$l_0 = 10d_0 = 10\sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 11,3\sqrt{A_0}.$$

* Материал данного параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 1.

Начальную расчетную длину l_0 с погрешностью до 1% ограничивают на рабочей длине образца l кернами, рисками или иными метками. При этом l должна составлять

– от $l_0 + 0,5d_0$ до $l_0 + 2d_0$ – для цилиндрических образцов;

– от $l_0 + 1,5\sqrt{A_0}$ до $l_0 + 2,5\sqrt{A_0}$ – для плоских образцов.

Формы и размеры головок и переходных частей цилиндрических и плоских образцов определяются способом их крепления в захватах испытательной машины. Способ крепления должен предупреждать проскальзывание образцов в захватах, смятие опорных поверхностей, деформацию головок и разрушение образца в местах перехода от рабочей части к головкам и в головках.

Испытательная машина. Испытания на растяжение производятся в лаборатории на универсальных испытательных машинах типа Amsler, УИМ-50, ГМС, УММ, ЦДМУ, конструкцию и принцип работы которых можно свести к схеме, изображенной на рис. 2.2.

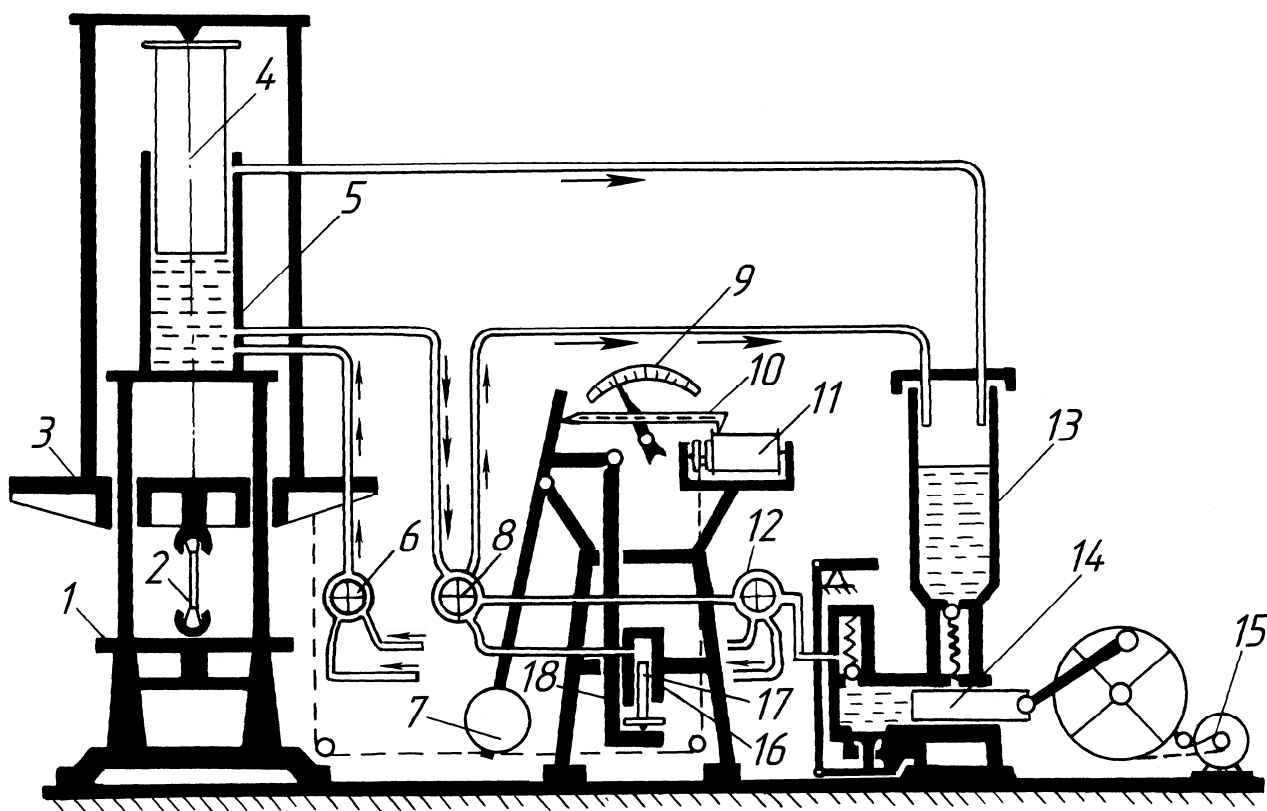


Рис. 2.2. Универсальная испытательная машина

В состав испытательной машины входят:

– собственно машина, предназначенная для деформирования образца;

– электрогидравлический привод, служащий для создания усилия на испытываемый образец;

– маятниковый силоизмеритель, предназначенный для регистрации усилия, производящего деформирование образца.

Собственно машина состоит из подвижной 3 и неподвижной 1 траверс. В неподвижной траверсе установлена гидравлическая пара – рабочий цилиндр 5 с поршнем 4. В траверсах укреплены захваты, в которых закрепляется растягиваемый образец 2.

Электрогидравлический привод включает плунжерный насос 14 и электродвигатель 15. Насос приводится в действие электродвигателем, и масло из резервуара 13 по трубопроводам поступает в рабочий цилиндр 5 машины. Его подача регулируется рабочим вентилям 12 в зависимости от необходимой скорости нагружения образца. С целью более быстрого перемещения траверсы вверх, необходимо для установки ее в надлежащее положение перед испытанием, использовать вентиль 6, для опускания – вентиль 8.

Давление масла, поступающего в рабочий цилиндр 5, вызывает перемещение поршня 4, связанного с помощью поперечин и тяг с подвижной траверсой 3. Перемещаясь, траверса будет растягивать или сжимать образец в зависимости от того, где он на ней закреплен (снизу или сверху).

Из рабочего цилиндра 5 давление масла по специальной трубе передается также в цилиндр силоизмерителя 16 и перемещает расположенный в нем поршень 17 (для уменьшения трения поршень во время работы машины находится во вращательном движении). Усилие, действующее на поршень цилиндра силоизмерителя, при помощи тяг 18 передается на кривошип маятника 7. Маятник, поворачиваясь на оси, отклоняет угловым рычагом зубчатую рейку 10, связанную с шестеренкой, на оси которой находится стрелка, движущаяся по круговой шкале 9 силоизмерителя. Стрелка в каждый данный момент указывает действующую на образец нагрузку. Маятниковый силоизмеритель представляет собой штангу со сменными грузами 7. Посредством изменения длины маятника и его веса можно изменить максимальное усилие машины. Для рассматриваемых машин возможны установки с максимальным усилием 5, 10, 25 и 50 тонн*.

Для автоматического вычерчивания диаграммы растяжения имеется барабан 11, вокруг которого намотана прочная нить, соединенная с подвижной траверсой через систему блоков (на схеме нить показана пунктиром). Подъем траверсы вызывает вращение барабана. Одновременно вдоль его оси передвигается карандаш, который связан с рейкой 10. Благодаря сочетанию двух движений (вращение барабана и поступательное перемещение карандаша), осуществляется вычерчивание на бумаге, обернутой вокруг барабана, кривой (диаграммы растяжения), абсциссы которой (вращение барабана) в некотором масштабе дают абсолютное удлинение образца, а ординаты (перемещение карандаша) – действующую на образец силу.

* Размерность усилий указана в тоннах в связи с тем, что шкалы силоизмерителей всех лабораторных машин проградуированы в системе CGSE. Для перевода в международную систему единиц СИ можно воспользоваться переводным коэффициентом $1 \text{ т} = 9,81 \text{ кН}$.

Машинная диаграмма растяжения. В процессе испытания на барабане II испытательной машины (рис. 2.2) автоматически вычерчивается диаграмма растяжения, которая показывает зависимость между растягивающей силой P , действующей на образец, и вызываемой ею деформацией Δl . Типичный вид машинной диаграммы растяжения малоуглеродистой стали изображен на рис. 2.3.

На диаграмме $P-\Delta l$ можно указать пять характерных точек, положение которых определяется методом графического построения или методом тензометрирования.

Прямолинейный участок диаграммы OA указывает на пропорциональность между нагрузкой P и удлинением Δl . (Эта пропорциональность впервые была замечена в 1670 г. Робертом Гуком и получила в дальнейшем название закона Гука).

Величина силы $P_{пл}$ (точка A), до которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала.

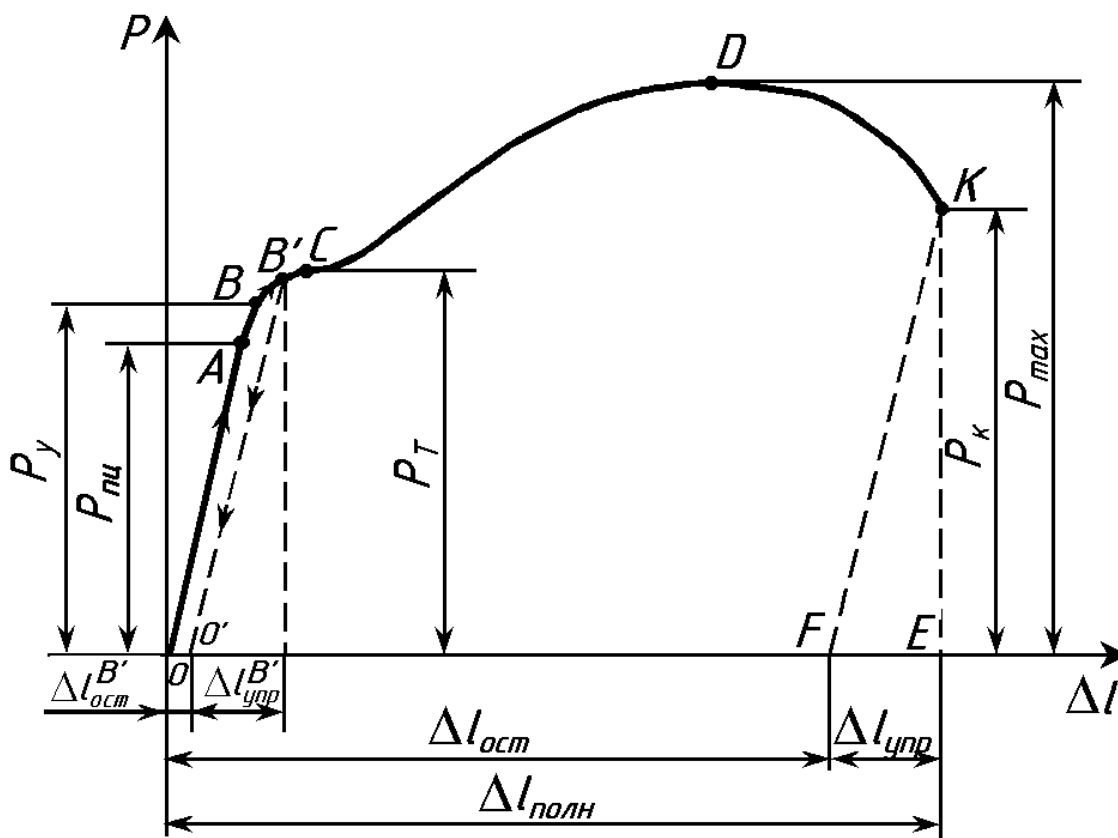


Рис. 2.3. Машинная диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Если испытуемый образец нагрузить растягивающей силой, не превышающей величину ординаты точки B (силы P_y), а потом разгрузить, то при разгрузке деформации образца будут уменьшаться по тому же закону, по которому они увеличивались при нагружении. Следовательно, в этом случае в образце возникают только упругие деформации.

В случае если растягивающее усилие выше P_y , при разгрузке образца деформации полностью не исчезают и на диаграмме линия разгрузки будет представлять собой прямую $B'O'$, уже не совпадающую с линией нагружения, а параллельную ей. В этом случае деформация образца состоит из упругой $\Delta l_{упр}^{B'}$ и остаточной (пластической) $\Delta l_{ост}^{B'}$ деформации.

Таким образом, характерной особенностью точки B является то, что при превышении нагрузки P_y образец испытывает остаточные деформации при разгрузке.

Выше точки B диаграмма растяжения значительно отходит от прямой (деформация начинает расти быстрее нагрузки, и диаграмма имеет криволинейный вид), а при нагрузке, соответствующей P_T (точка C), переходит в горизонтальный участок. В этой стадии испытания в материале образца по всему его объему распространяются пластические деформации. Образец получает значительное остаточное удлинение практически без увеличения нагрузки.

Свойство материала деформироваться при практически постоянной нагрузке называется текучестью. Участок диаграммы растяжения, параллельный оси абсцисс, называется площадкой текучести.

В процессе текучести на отшлифованной поверхности образца можно наблюдать появление линий (полос скольжения), наклоненных примерно под углом 45° к оси образца (рис. 2.4, *a*). Эти линии являются следами взаимных сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями.

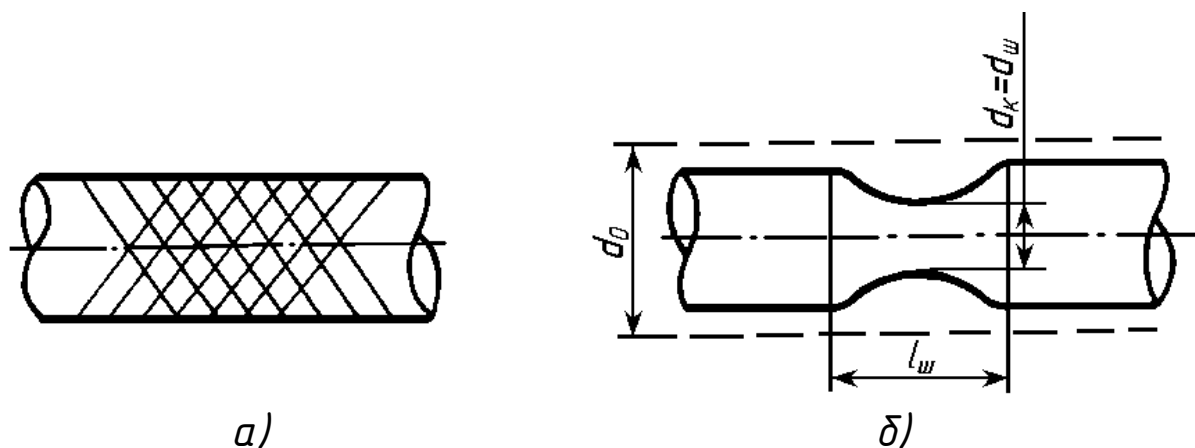


Рис. 2.4. Образование линий сдвига (*a*) и местного сужения – шейки (*б*) при испытании образца на растяжение

Линии сдвига называются линиями Чернова, по имени знаменитого русского металлурга, впервые обнаружившего их.

Удлинившись на некоторую величину при постоянном значении силы, т.е. претерпев состояние текучести, материал снова приобретает способность сопротивляться растяжению (упрочняться), и диаграмма поднимается вверх,

хотя гораздо более полого, чем раньше (рис. 2.3). В точке D усилие достигает максимального значения P_{\max} .

Наличие участка упрочнения (от конца площадки текучести до наивысшей точки диаграммы растяжения) объясняется микроструктурными изменениями материала: когда нагрузка на образец возрастает, микроскопические дефекты (линейные и точечные) группируются так, что развитие сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями, затрудняется, а потому сопротивление материала сдвигу начинает возрастать и приближаться к его сопротивлению отрыву.

При достижении усилия P_{\max} на образце появляется резкое местное сужение, так называемая шейка (рис. 2.4, б), быстрое уменьшение площади сечения которой вызывает падение нагрузки, и в момент, соответствующий точке K диаграммы, происходит разрыв образца по наименьшему сечению шейки.

До точки D диаграммы, соответствующей P_{\max} , каждая единица длины образца удлинилась примерно одинаково; точно так же во всех сечениях одинаково уменьшались поперечные размеры образца. С момента образования шейки вся деформация образца локализуется на малой длине ($l_{\text{ш}} \approx 2d_0$) в области шейки, а остальная часть образца практически не деформируется.

Абсциссы диаграммы растягивания OE , OF и FE , характеризующие способность образца деформироваться до наступления разрушения, соответствуют полному абсолютному удлинению образца $\Delta l_{\text{полн}}$, остаточному абсолютному удлинению $\Delta l_{\text{ост}}$ и абсолютному упругому удлинению $\Delta l_{\text{упр}}$. Для опреде-

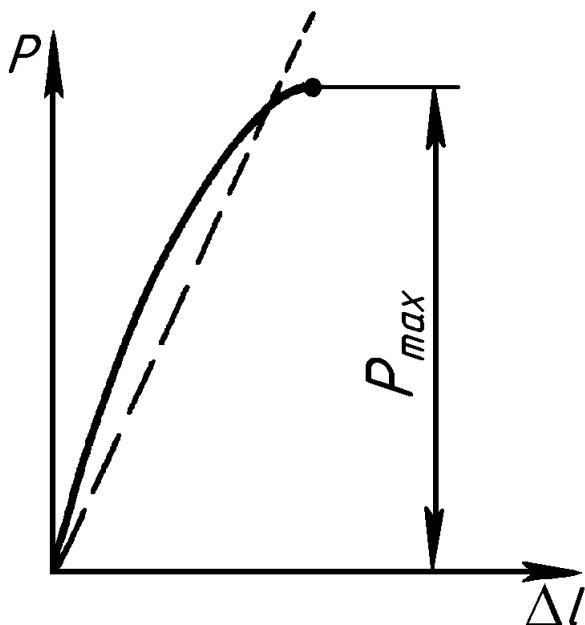


Рис. 2.5. Машинная диаграмма растяжения чугуна

ления упругой деформации в момент разрыва необходимо из точки K диаграммы провести прямую KF , параллельную прямолинейному участку OA , так как упругие деформации при разрыве также подчиняются закону Гука.

Хрупкие материалы, типичным представителем которых является чугун, дают диаграмму растяжения иного характера (рис. 2.5).

Чугун разрушается внезапно при весьма малых деформациях, составляющих порядка (0,5–0,6) % от расчетной длины образца l_0 , и без образования шейки. Диаграмма при этом не имеет явно выраженного прямолинейного участка (от-

клонение от закона Гука начинается очень рано), площадки текучести и зоны упрочнения.

При испытании на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только максимальную нагрузку P_{\max} . Обычно при практических расчетах для хрупких материалов отклонение от закона Гука не учитывают, т. е. криволинейную диаграмму заменяют условной прямолинейной.

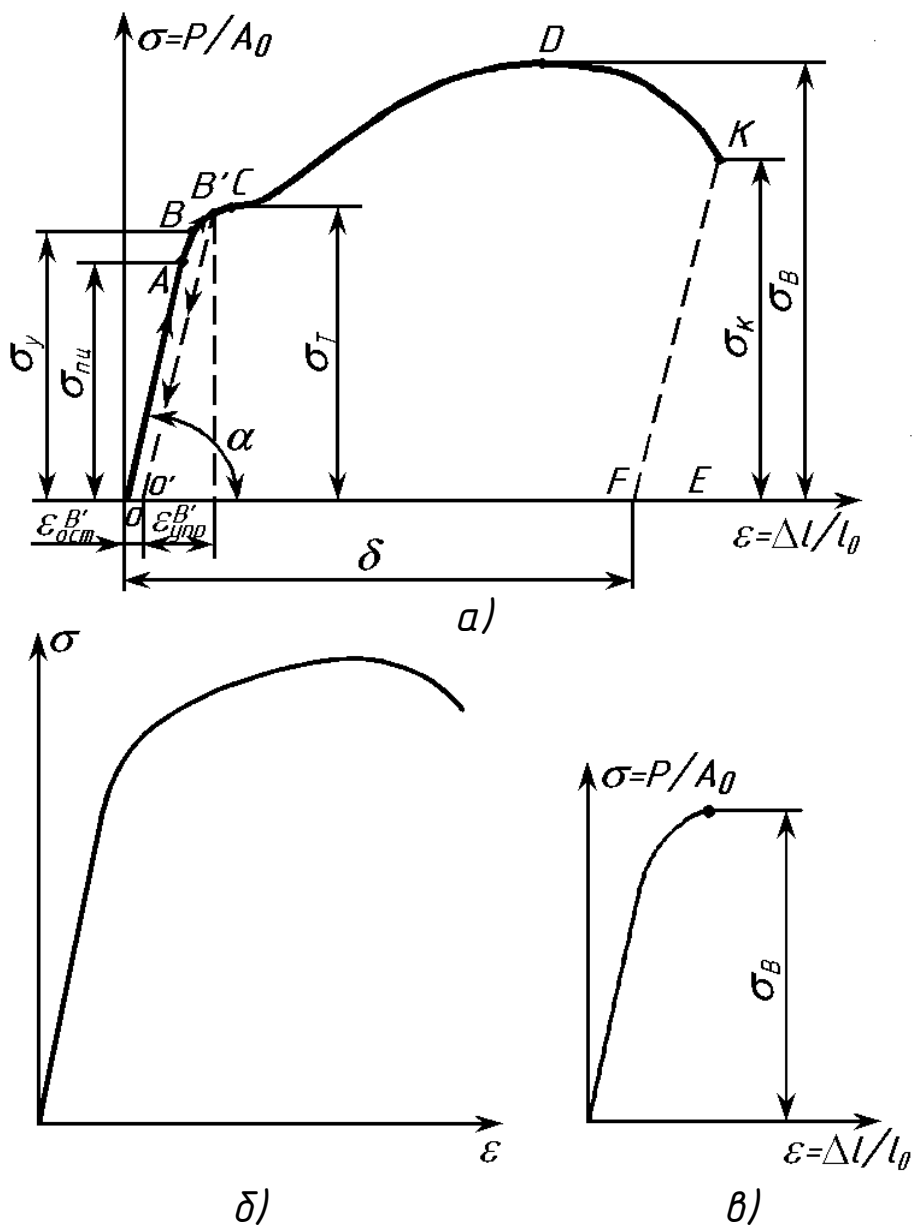


Рис. 2.6. Диаграммы условных напряжений малоуглеродистой стали (а), легированной стали (б), чугуна (в)

Диаграмма условных напряжений. Механические характеристики материалов. Ординаты машинной диаграммы $P - \Delta l$ (рис. 2.3) не являются качественными характеристиками материала, так как растягивающая образец сила зависит от площади сечения, а удлинение образца – от его длины.

Чтобы исключить влияние размеров образца и получить диаграмму, характеризующую поведение не образца, а самого материала и дать количественную оценку рассмотренным ранее свойствам, машинную диаграмму перестраивают в координатах $\sigma - \varepsilon$ путем деления ординат P на первоначальную площадь сечения образца A_0 и абсцисс Δl на l_0 (что равносильно изменению масштабов по обеим осям). Перестроенная таким образом диаграмма называется диаграммой условных напряжений (рис. 2.6). Такое название объясняется тем, что площадь образца в процессе испытания в действительности изменяется.

Как видно из рис. 2.3 и рис. 2.6, ординатам характерных точек машинной диаграммы растяжения $P_{\text{пц}}$ (усилию при пределе пропорциональности), P_y (усилию при пределе упругости), P_T (усилию, соответствующему пределу текучести), P_{max} (наибольшей разрушающей нагрузке) и P_k (усилию в момент отрыва образца) соответствуют следующие механические характеристики материала:

– предел пропорциональности

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{A_0}, \quad (2.1)$$

– предел упругости

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0}, \quad (2.2)$$

– предел текучести

$$\sigma_T = \frac{P_T}{A_0}, \quad (2.3)$$

– предел прочности

$$\sigma_B = \frac{P_B}{A_0}, \quad (2.4)$$

– напряжение в момент отрыва образца

$$\sigma_k = \frac{P_k}{A_0}. \quad (2.5)$$

Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ – наибольшее напряжение, после которого нарушается справедливость закона Гука $\sigma = E\varepsilon$, где E – модуль продольной упругости, или модуль упругости первого рода (для стали $E=(2,0 \div 2,2) \cdot 10^5$ МПа, для чугуна $E=(0,75 \div 1,6) \cdot 10^5$ МПа). При этом $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{tg } \alpha$, т. е. модуль E графически изображается тангенсом угла наклона к оси абсцисс прямолинейной части диаграммы условных напряжений (рис. 2.6).

Предел упругости σ_y – наибольшее напряжение, которое может выдержать материал, не обнаруживая остаточных деформаций при разгрузении.

Предел текучести σ_T – напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения растягивающей нагрузки. В тех случаях, когда на диаграмме отсутствует явно выраженная площадка текучести (рис. 2.6, б), σ_T определяется с допуском 0,2 %, как описано в п. 2.3.

Предел прочности (временное сопротивление) σ_B – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{\max} , предшествующей разрыву образца.

Механические характеристики $\sigma_{\text{пл}}$, σ_y , σ_T , σ_B называются характеристиками прочности материалов. При этом в практических расчетах оценка механических свойств преимущественно проводится по пределу текучести σ_T и пределу прочности σ_B .

Кроме перечисленных ранее характеристик прочности материала, при испытании на растяжение определяют также относительное удлинение после разрыва δ и относительное сужение после разрыва ψ :

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

где l_0 – первоначальная расчетная длина образца; l_k – конечная расчетная длина образца;

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

где $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ – начальная площадь поперечного сечения образца;

$A_k = \frac{\pi d_k^2}{4}$ – площадь поперечного сечения в наиболее тонком месте шейки после разрыва (рис. 2.4).

Механические характеристики δ и ψ являются характеристиками пластичности материала: чем они больше, тем материал пластичнее. Для сталей, например, $\delta = 8 - 45\%$, $\psi = 40 - 65\%$.

Проведение испытаний. До испытания проводят измерение размеров образца по рабочей части (l_0, d_0 с определением начальной площади поперечного сечения A_0) с погрешностью до 0,1 мм. На рабочей части образца наносят метки на расстоянии 5 или 10 мм друг от друга.

Благодаря меткам, можно определить деформацию как каждого 5 или 10-миллиметрового промежутка, так и всей рабочей длины образца. Затем образец устанавливают в захваты испытательной машины (рис. 2.7), после чего производится его растяжение.

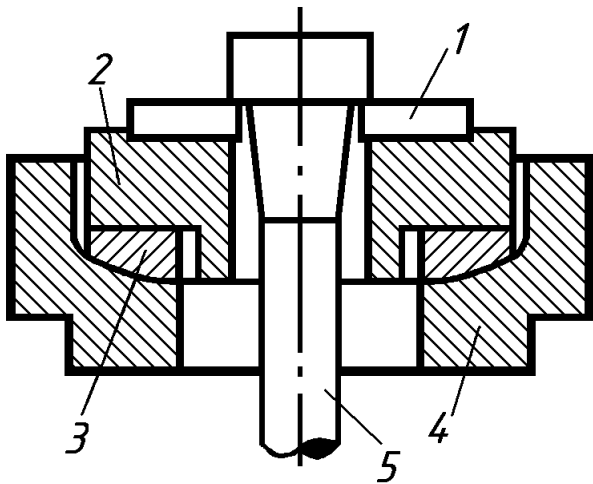


Рис. 2.7. Схема закрепления образца в испытательной машине:

- 1 – опорное разрезное кольцо;
- 2 – ступенчатая втулка;
- 3 – центрирующее шаровое кольцо;
- 4 – шаровая опора;
- 5 – образец

В процессе испытания по силоизмерителю машины или после испытания по машинной диаграмме растяжения определяют нагрузку P_T , соответствующую пределу текучести, и наибольшую разрушающую нагрузку P_{\max} . Зная P_T , P_{\max} и площадь A_0 , по формулам (2.3), (2.4) определяют прочностные характеристики σ_T и σ_B .

После испытания части разорванного образца плотно устанавливают по длине в специальном приспособлении и штангенциркулем измеряют диаметр в наиболее тонком месте шейки d_k и конечную расчетную длину l_k . Если разрыв образца имеет место в средней части расчетной длины, то измерение l_k производится между крайними рисками, как показано на рис. 2.8, а.

Если же разрыв происходит в крайней трети образца, то конечная длина расчетной его части определяется с отнесением места разрыва к середине. Например, на начальной расчетной длине образца укладывается N число интервалов (рис. 2.8, б, в). После разрыва крайнюю риску на короткой части разрушенного образца обозначим A , на длинной части образца – риску B , расстояние от которой до места разрыва близко по величине к расстоянию от места разрыва до риски A . Расстояние от A до B составляет n интервалов.

Если разность $(N - n)$ – число четное, то от риски B до риски B берется $(N - n)/2$ интервалов и конечная расчетная длина образца определяется по формуле

$$l_k = AB + 2BB.$$

Если разность $(N - n)/2$ – число нечетное, то от риски B до риски B' берется $(N - n - 1)/2$ интервалов, а до точки B'' берется $(N - n + 1)/2$ интервалов (в сумме $BB' + BB'' = N - n$). В этом случае расчетная длина образца l_k подсчитывается по формуле

$$l_k = AB + BB' + BB''.$$

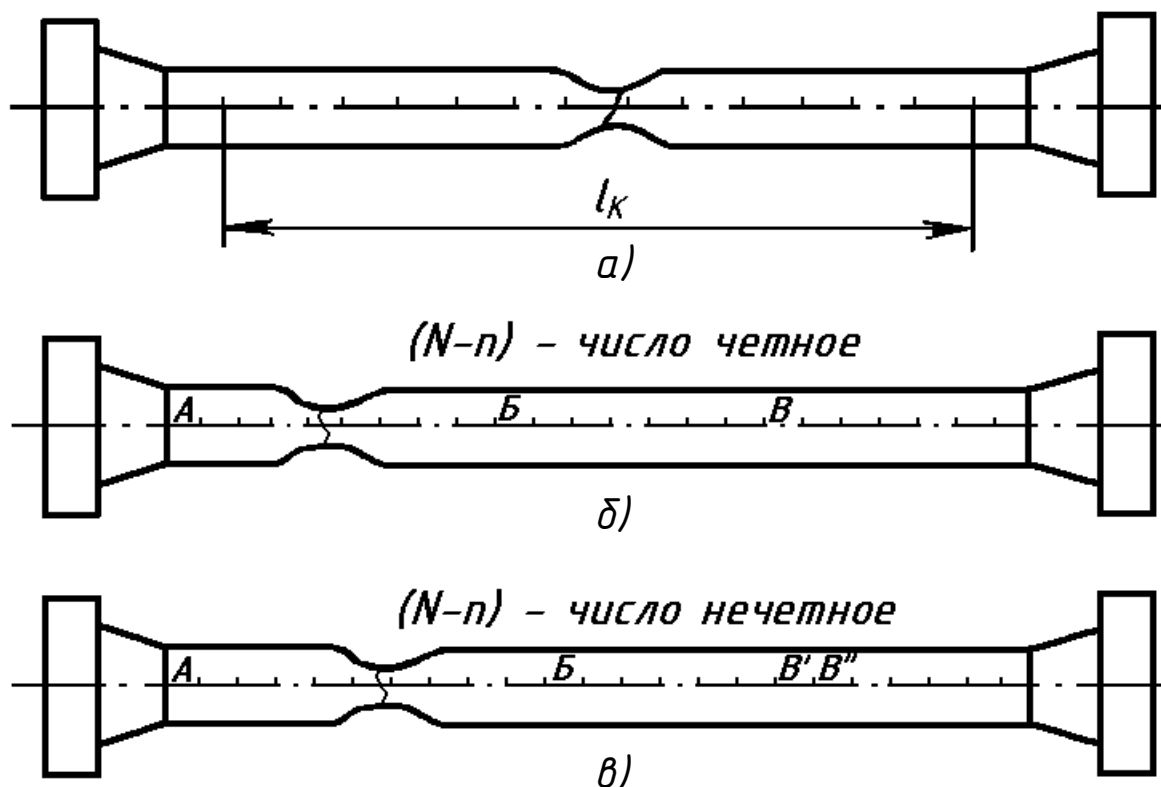


Рис. 2.8. Определение конечной расчетной длины при разрыве образца в средней части (а) и в крайней трети его расчетной длины (б, в)

Зная l_k и d_k , по формулам (2.6), (2.7) определяют характеристики пластичности материала при растяжении δ и ψ .

Методы испытания на растяжение предусмотрены ГОСТ 1497-84 (СТ СЭВ 471-77).

Вопросы для самопроверки

1. Какие образцы применяются для испытания материалов на растяжение?
2. Объясните принцип работы испытательной машины.
3. Какой вид имеет диаграмма растяжения для пластичного материала, для хрупкого материала?
4. В чем отличие диаграммы условных напряжений от машинной диаграммы растяжения?
5. Как определить долю упругих и остаточных деформаций при нагружении образца силой, превышающей P_y ?
6. Чем объясняется наличие участка упрочнения на диаграмме растяжения?
7. Как графически определить модуль продольной упругости E ?
8. Какие деформации называются упругими, остаточными?

9. Что такое предел пропорциональности?
10. Что такое предел упругости?
11. Что такое предел прочности (временное сопротивление разрыву)?
12. До какой точки диаграммы растяжения образец деформируется равномерно?
13. Какие механические характеристики определяют прочностные свойства материала?
14. Какие механические характеристики определяют пластические свойства материала?
15. Как найти расчетную длину образца после испытания?

2.2. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ*

Основная цель – изучение поведения пластичных и хрупких материалов, а также определение их механических характеристик при сжатии.

Образец. Для испытаний на сжатие применяются обычно образцы кубической формы или невысокие цилиндрические образцы с соотношением высоты к диаметру $h_0/d_0 = 1 \dots 3$. Использование более длинных образцов является нецелесообразным в связи с возникновением опасности продольного изгиба.

Испытательная машина. Испытания на сжатие выполняются на универсальной испытательной машине, конструкция и принцип работы которой даны в п. 2.1.

Проведение испытаний. Испытанию на сжатие в данной работе подвергаются образцы из малоуглеродистой стали, чугуна и дерева. Дерево как материал анизотропный, обладающий различными свойствами в разных направлениях, испытывается на сжатие вдоль и поперек волокон.

2.2.1. Сжатие пластичного материала (малоуглеродистой стали)

Цилиндрический образец устанавливается между параллельными плитами испытательной машины и постепенно нагружается непрерывно возрастающей силой P . Результаты испытания на сжатие можно представить в виде диаграммы сжатия (рис. 2.9, а), построенной в координатах: сила сжатия P и абсолютное укорочение Δl .

По внешнему виду диаграмма сжатия, как и для большинства пластичных материалов, примерно до предела текучести совпадает с диаграммой растяжения. Точка A диаграммы соответствует пределу пропорциональности материала, после которого отмечается небольшой участок, где наблюдается более быстрое возрастание деформаций. Однако многие материалы не имеют выраженной площадки текучести. Вследствие этого для них за предел текучести прини-

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 2.

мается условное напряжение, при котором остаточная деформация составляет 0,2 % от начальной высоты образца. При этом определение предела текучести осуществляется так же, как и в случае растяжения образца (см. п. 2.3). В дальнейшем кривая идет круто вверх из-за увеличения площади поперечного сечения образца и упрочнения материала.

Увеличивающееся в процессе деформации поперечное сечение образца становится способным выдерживать все большую нагрузку. Образец принимает бочкообразную форму (из-за наличия сил трения на его торцах) и может быть сплюснен в тонкую пластинку, не обнаруживая признаков разрушения (рис. 2.9, а). В некоторых случаях, при недостаточной пластичности материала, на боковой поверхности образца появляются мелкие трещины. Довести образец из пластичного материала до разрушения практически не удается. Опыт приходится остановить, не определив величины наибольшей разрушающей нагрузки. Следовательно, предел прочности (временное сопротивление) при сжатии пластичных материалов не может быть определен. В этом случае обычно устанавливается только предел пропорциональности:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{A_0}.$$

Следует отметить, что при сжатии стали предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$, предел текучести $\sigma_{\text{т}}$, модуль упругости E приблизительно имеют такие же значения, как и при растяжении. Поэтому стали на сжатие испытывают значительно реже, чем на растяжение. На практике схемы сжатия используют преимущественно в технологических пробах для оценки деформационной способности полуфабрикатов и изделий. С помощью проб по появлению трещин определяют годность или негодность материала после деформации сжатием на заданную величину.

2.2.2. Сжатие хрупкого материала (чугуна)

Цилиндрический образец ($h_0/d_0=1,5$) после обмера устанавливается между плитами пресса, и его подвергают статическому нагружению. Диаграмма сжатия при этом будет иметь вид, показанный на рис. 2.9, б. На диаграмме сжатия, как и на диаграмме растяжения (см. рис. 2.5), отсутствует прямолинейный участок. Разрушение происходит внезапно при нагрузке P_{max} с появлением ряда наклонных трещин, направленных примерно под углом 45° к оси образца. Такой характер разрушения объясняется действием касательных напряжений, возникающих в наклонных площадках при сжатии.

Таким образом, при сжатии хрупких материалов и при их растяжении можно определить лишь предел прочности

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0}.$$

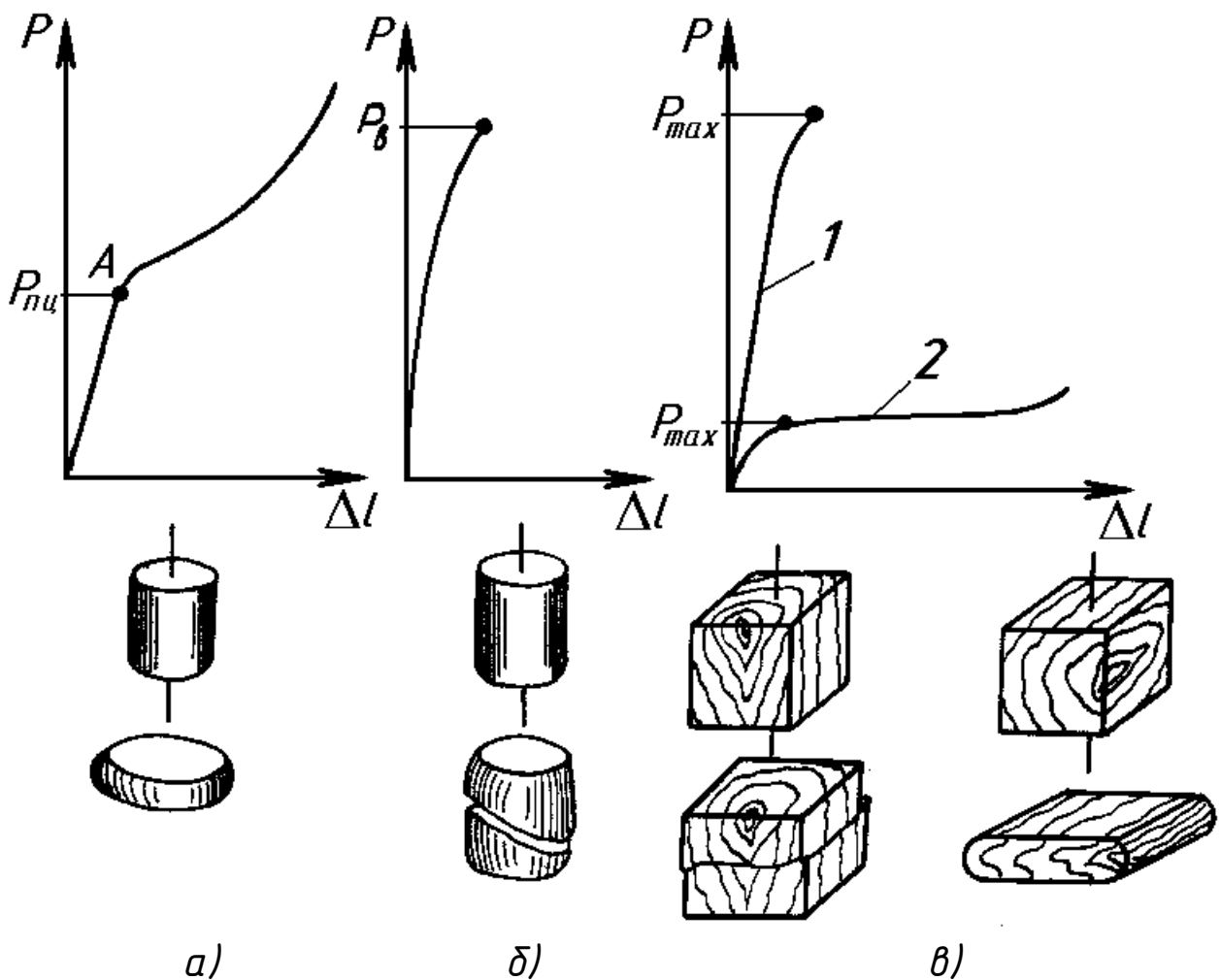


Рис. 2.9. Диаграммы сжатия и характер разрушения образцов из малоуглеродистой стали (а), чугуна (б) и дерева вдоль и поперек волокон (в)

Различие между диаграммами сжатия и растяжения чугуна заключается лишь в том, что нагрузка, соответствующая пределу прочности при сжатии, в 3–5 раз превышает нагрузку, соответствующую пределу прочности при растяжении, и соответственно $(\sigma_{в})_с > (\sigma_{в})_р$, т.е. чугун лучше сопротивляется сжатию, чем растяжению.

Характер деформации образца и причины его разрушения для хрупкого материала во многом зависят от влияния сил трения между образцом и опорными поверхностями машины. Путем периодической парафиновой смазки торцов образца в процессе испытания можно практически полностью устранить силы трения. При этом образец в течение всего испытания не принимает бочкообразную форму, остается цилиндрическим и разрушается по плоскостям, параллельным диаметральной плоскости образца из-за недопустимо больших растягивающих деформаций.

2.2.3. Сжатие анизотропного материала (дерева)

Для испытания изготавливаются образцы кубической формы, которые испытывают вдоль и поперек волокон, что изображено на диаграмме (рис. 2.9, в). Из диаграммы видно, что образец, испытанный вдоль волокон (кривая 1), до разрушения претерпевает сравнительно небольшие остаточные деформации. После достижения наибольшего значения сжимающей силы P_{\max} начинается разрушение образца с последующим падением нагрузки. В процессе разрушения дерево расслаивается, волокна отделяются одно от другого и переламываются, на боковой поверхности кубика образуются поперечные складки и продольные трещины.

По результатам испытания определяется только предел прочности:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\max}}{A_0}.$$

При испытании на сжатие поперек волокон диаграмма имеет другой характер (кривая 2). Сначала линия диаграммы идет по наклонной прямой до нагрузки $P_{\text{пл}}$. Затем вычерчивается слабо изогнутая кривая (кубик быстро деформируется почти без увеличения нагрузки), которая, если древесина не имеет пороков, может пойти вверх после того, как образец будет достаточно спрессован.

Значительный рост деформации без увеличения нагрузки позволяет считать, что грузоподъемность образца уже исчерпана. Поэтому за разрушающую нагрузку P_{\max} (соответствующую пределу прочности $\sigma_{\text{в}}$) условно принимается такая нагрузка, при которой кубик сжимается на 1/3 своей первоначальной высоты.

Прочность дерева при сжатии поперек волокон обычно в 8–10 раз меньше, чем вдоль волокон. Эти свойства дерева следует учитывать, располагая его при проектировании конструкций так, чтобы сжимающие усилия действовали по направлению наибольшего сопротивления, т. е. вдоль волокон.

Вопросы для самопроверки

1. *Какие образцы применяются при испытании материалов на сжатие?*
2. *Какие механические характеристики определяются при испытании на сжатие?*
3. *Каково различие между диаграммами растяжения и сжатия пластичного материала?*
4. *Каково различие между диаграммами растяжения и сжатия хрупкого материала?*
5. *В каких направлениях производятся испытания деревянных образцов на сжатие?*

6. Каково различие между диаграммами сжатия древесины вдоль и поперек волокон?
7. Какая нагрузка принимается за разрушающую при сжатии дерева поперек волокон?
8. Во сколько раз предел прочности дерева при сжатии вдоль волокон больше, чем поперек волокон?

2.3. ИСПЫТАНИЕ СТАЛИ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ СИЛ*

Основная цель – исследование процесса растяжения металлического образца вплоть до его разрыва и определение следующих механических характеристик материала: предела текучести σ_T и пропорциональности $\sigma_{пц}$; предела прочности σ_B , напряжения при разрыве S_K , относительного удлинения при разрыве δ , относительного сужения образца ψ , удельной работы a , затрачиваемой на разрыв.

2.3.1. Пресс А. Г. Гагарина и диаграмма сил

Пресс А. Г. Гагарина применяется для испытаний как на сжатие, так и на растяжение. При испытании на растяжение используется приспособление, называемое реверсором. Образец (рис. 2.10) устанавливается в реверсор как показано на рис. 2.11.

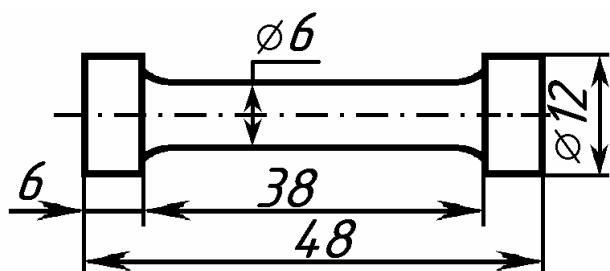


Рис. 2.10. Образец для испытания

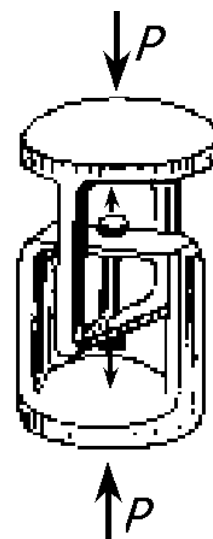


Рис. 2.11. Реверсор

При этом сжимающая сила прессы, действующая сверху и снизу на упорные поверхности реверсора, будет растягивать образец. Существуют также реверсоры для испытаний на срез и на скручивание.

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 4.

Схема пресса изображена на рис. 2.12. При помощи мотора или руки диаграммный аппарат 1 приводится во вращательное движение вокруг своей оси. При этом поступательно выдвигается винт 5, который нажимает на образец 2, установленный в реверсор. Сила нажатия винта передается через образец на короткое плечо рычага 3. На другом плече рычага помещается уравновешивающий груз 4, подвешенный к тележке, которая может передвигаться по рычагу. Передвижение тележки происходит автоматически при помощи пружинных часовых механизмов 6 и 7, каждый из которых может подключаться к бесконечной цепи 8, передвигающей тележку с грузом; механизм 6 двигает тележку влево, а механизм 7 – вправо. Если нагрузка возрастает, то длинное плечо рычага 3 поднимается и один из усиков регулятора 9 прижимается к маховику механизма 6 и затормаживает его. В это время механизм 7 отодвигает груз 4 вправо до тех пор, пока рычаг не опустится; тогда происходит затормаживание механизма 7 (и механизм 6 начинает отодвигать груз в обратную сторону). Таким образом, всякое опускание или поднятие рычага тотчас приостанавливается соответствующим перемещением уравновешивающего груза. На рычаге 3 имеется шкала нагрузок, при дальнейшем увеличении нагрузки процесс повторяется. Пресс А. Г. Гагарина относится к обширному классу испытательных машин, имеющих винтовой силовозбудитель и рычажный силоизмеритель. От других машин этого класса пресс А. Г. Гагарина выгодно отличается тем, что имеет приспособление для автоматического уравновешивания нагрузки.

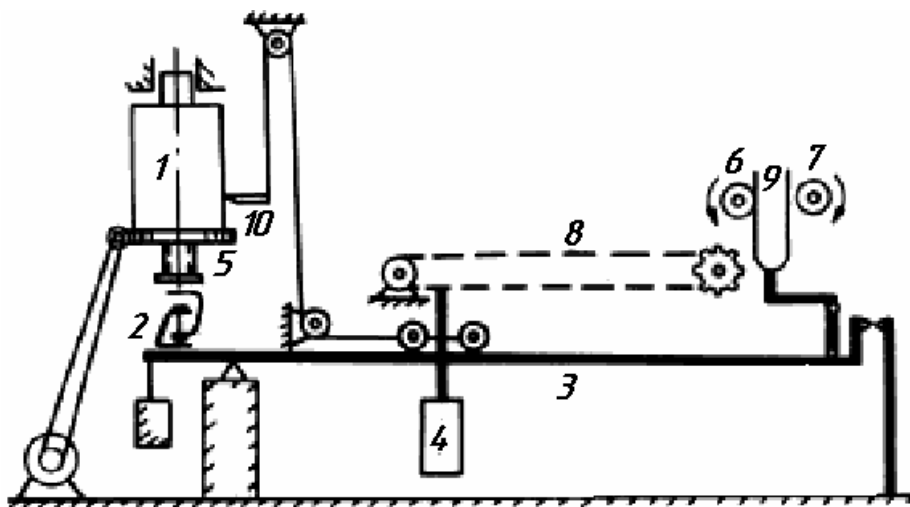


Рис. 2.12. Схема пресса А. Г. Гагарина

Диаграмма растяжения (диаграмма сил). Перо 10 (рис. 2.12), которое вычерчивает на барабане 1 диаграмму, передвигается по вертикали между направляющими. Положение пера определяется положением тележки с уравновешивающим грузом 4 на рычаге 3, так как оно подвешено на нитке, прикрепленной к тележке и, следовательно, перемещению тележки вдоль рычага соответствует такое же вертикальное перемещение пера. Таким образом, верти-

кальный масштаб диаграммы или масштаб нагрузок совпадает с масштабом шкалы рычага, составляя 100 кГ в 1 см либо 20 кГ в 1 см, в зависимости от величины груза 4. При проведении испытания во время лабораторных работ 1 см по оси ординат будет соответствовать нагрузке 100 кГ. Максимальная нагрузка 5 т.

Горизонтальный масштаб диаграммы, т. е. масштаб удлинения, зависит от скорости поворота барабана. Угол поворота диаграммного барабана пропорционален величине опускания винта, т. е. удлинению образца (если пренебречь деформацией реверсора); следовательно, при повороте барабана перо прочерчивает на поверхности барабана линию, горизонтальная проекция которой пропорциональна удлинению образца. Одному миллиметру удлинения образца соответствует 10 см по оси абсцисс на диаграмме, т.е. удлинения оказываются увеличенными в 100 раз (таким образом, 1 см по оси ординат будет соответствовать удлинению образца на 0,01 см).

Проведение испытания. Перед испытанием измеряют длину образца (с точностью до 0,1 мм) и его диаметр (с точностью до 0,01 мм). Затем образец закрепляют в реверсоре и включают испытательную машину. В процессе испытания

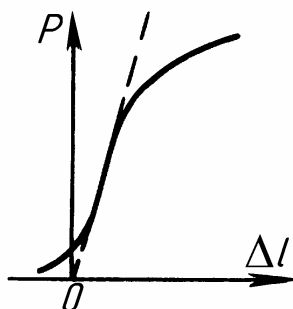


Рис. 2.13. Начальный участок диаграммы растяжения

на барабане автоматически вычерчивается диаграмма растяжения. Вследствие неполного контакта между головками образца и гнездами для них в реверсоре, в начале диаграммы получается криволинейный участок, который следует исключить, продолжив прямолинейный участок диаграммы до пересечения с осью абсцисс в точке O (рис. 2.13). При этом следует иметь в виду, что угол наклона прямолинейного участка диаграммы напряжений к оси ординат получается несколько завышенным, так как на деформацию образца накладываются упругие деформации колонн и реверсора.

2.3.2. Определение предела пропорциональности с допуском 50 %

Условный предел пропорциональности с допуском 50 % находится тогда, когда по диаграмме трудно точно определить точку, до которой сохраняется линейная зависимость между силой и удлинением образца.

Пределом пропорциональности с допуском 50% принято называть такое напряжение, при котором тангенс угла наклона касательной к диаграмме растяжения увеличивается на 50% по сравнению с тангенсом угла наклона прямолинейного участка диаграммы. Графически это выглядит следующим образом: на произвольной высоте проводят прямую AC (рис. 2.14), параллельную оси абсцисс, и откладывают на ней отрезок CD , равный половине AC . Тангенс угла наклона прямой OD к оси ординат будет, очевидно, на 50% больше тангенса

угла наклона прямолинейного участка диаграммы растяжения. Поэтому касательная к диаграмме NN , проведенная параллельно OD , определит точку K , координата которой будет соответствовать искомому пределу пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{пл}}}{A_0}.$$

2.3.3. Определение условного предела текучести с допуском 0,2 %

Условным пределом текучести с допуском 0,2 % называется такое напряжение, при котором в образце возникают остаточные удлинения, составляющие 0,2 % от первоначальной длины образца. Чтобы найти условный предел текучести, необходимо отложить в масштабе на оси абсцисс отрезок $OO_1 = 0,002 l_0$ и провести прямую O_1S параллельно прямой OA (рис. 2.15). Точка пересечения прямой с диаграммой напряжений определит нагрузку $(P_T)_{0,2}$, соответствующую условному пределу текучести:

$$(\sigma_T)_{0,2} = \frac{(P_T)_{0,2}}{A_0}.$$

Условный предел текучести находится в том случае, когда диаграмма напряжений не имеет явно выраженной площадки текучести.

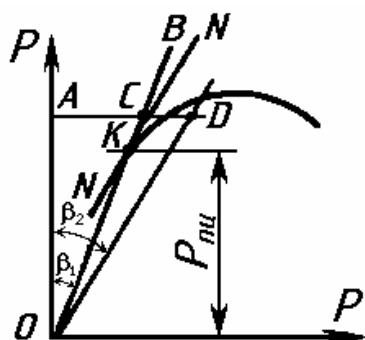


Рис. 2.14. Графическое определение условного предела пропорциональности

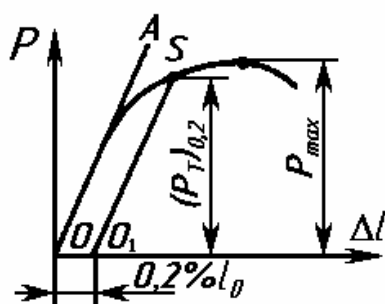


Рис. 2.15. Определение условного предела текучести

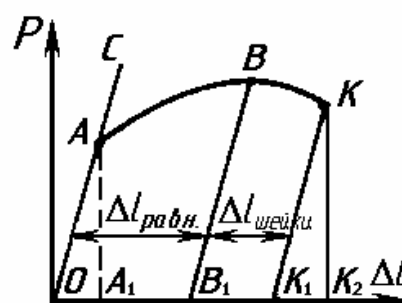


Рис. 2.16. Полная диаграмма растяжения

2.3.4. Определение предела прочности

Так как пределом прочности называется напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, выдерживаемой образцом во время испытания (см. п. 2.1), то

$$\sigma_B = \frac{P_{\text{max}}}{A_0},$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка на образец в процессе испытания, определяемая из диаграммы растяжения.

2.3.5. Определение относительной деформации 6-кратного и 10-кратного образцов

Рассмотрим характер деформации образца при растяжении. На рис. 2.16 отрезок OK_2 изображает полную деформацию образца Δl_0 . Сюда входят как остаточная, так и упругая деформация образца. Чтобы получить на диаграмме только остаточное удлинение, следует провести наклонную прямую KK_1 , параллельную OC , которая отсечет на оси абсцисс отрезок OK_1 , соответствующий остаточной деформации, и K_1K_2 , соответствующий упругой деформации образца при разрыве.

Остаточное удлинение можно найти также непосредственно, измерив длину образца до и после разрыва:

$$\Delta l = l_1 - l_0.$$

После испытаний 6-кратного образца определяют абсолютное остаточное удлинение 10-кратного образца ($l_0 = 10d_0$) такого же диаметра:

$$\Delta l_{10} = (\Delta l_{\text{равн}})_{10} + (\Delta l_{\text{шейки}})_{10},$$

где $(\Delta l_{\text{равн}})_{10}$ – равномерная деформация образца вплоть до разрушающей нагрузки (см. отрезок OB_1 на рис. 2.16); $(\Delta l_{\text{шейки}})_{10}$ – деформация, соответствующая образованию шейки (отрезок B_1K_1 на рис. 2.16).

Деформация $(\Delta l_{\text{равн}})_{10}$ 10-кратного образца будет во столько раз больше соответствующей деформации 6-кратного образца, во сколько начальная его длина больше длины 6-кратного образца, т. е.

$$(\Delta l_{\text{равн}})_{10} = (\Delta l_{\text{равн}})_6 \cdot \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6} = OB_1 \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6};$$

$(\Delta l_{\text{шейки}})$ зависит только от диаметра образца, который у обоих образцов одинаков, поэтому

$$(\Delta l_{\text{шейки}})_{10} = (\Delta l_{\text{шейки}})_6 = B_1K_1.$$

Замерив в масштабе отрезки OB_1 и B_1K_1 на диаграмме растяжения, найдем

$$(\Delta l_0)_{10} = OB_1 \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6} + B_1K_1 = (\Delta l_{\text{равн}})_6 \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6} + \Delta l_{\text{шейки}}.$$

Относительное удлинение образцов определим по формулам:

$$\delta_6 = \frac{(\Delta l)_6}{(l_0)_6} \cdot 100\% ; \quad \delta_{10} = \frac{(\Delta l)_{10}}{(l_0)_{10}} \cdot 100\% .$$

2.3.6. Определение относительного сужения поперечного сечения после разрыва образца

Относительное сужение определяется следующим образом:

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

где A_0 и A_1 – площади поперечного сечения образца до испытания и после разрыва соответственно.

2.3.7. Определение полной и удельной работ, затраченных на деформацию образца

Площадь диаграммы OAA_1O (рис. 2.16) выражает работу деформации в пределах упругости; площадь $OAKK_1O$ – работу, затраченную на образование пластической деформации; площадь $OAKK_2O$ – полную работу деформации до разрыва (1 см² площади диаграммы соответствует работе деформации в 1 кГ·см).

Полная работа, затраченная на разрыв образца, отнесенная к единице его объема, называется удельной работой деформации,

$$a = \frac{W}{V} ,$$

где V – объем средней, цилиндрической части образца, W – работа, затраченная на разрыв образца.

Удельная работа разрыва характеризует способность материала поглощать энергию при разрыве, вязкость материала и сопротивляемость его динамическому воздействию.

2.3.8. Построение диаграммы истинных напряжений

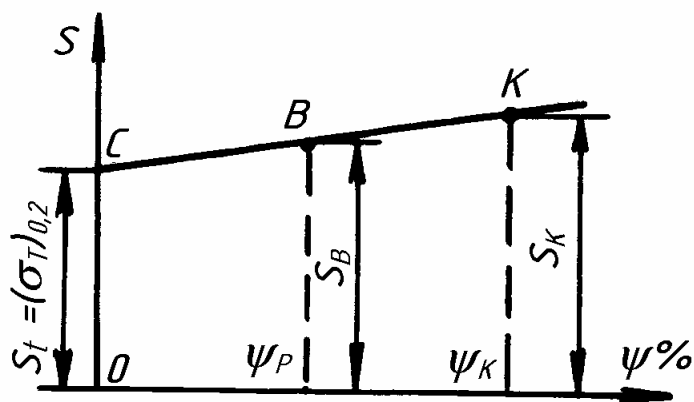
Истинная диаграмма растяжения строится в координатах: истинное напряжение – истинная деформация. Истинное напряжение S представляет отношение растягивающего усилия P_t (определяемого по диаграмме растяжения) к площади поперечного сечения в данный момент испытания, т. е.

$$S = \frac{P_t}{A_t} .$$

$$\text{Истинная деформация } \psi_t = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \cdot 100\% .$$

Для построения истинной диаграммы напряжений необходимо рассмотреть три точки, соответствующие пределу текучести, пределу прочности и моменту разрыва.

При пределе текучести поперечное сечение образца меняется незначительно, поэтому можно принять, что в этом случае



$$A_t \approx A_0; \psi_t = 0;$$

$$S_t = \sigma_t = (\sigma_t)_{0,2}.$$

Чтобы определить площадь сечения образца в момент, когда нагрузка достигает P_{\max} , необходимо измерить диаметр образца после разрыва в средней части между головкой и местом разрыва (на более длинной части образца) и подсчитать площадь сечения A_p . Истинный предел прочности и относительное поперечное сужение для этой точки будут равны:

Рис. 2.17. Диаграмма истинных напряжений

прочности и относительное поперечное сужение для этой точки будут равны:

$$S_B = \frac{P_{\max}}{A_0}; \quad \psi_p = \frac{A_0 - A_p}{A_0} \cdot 100\%.$$

Истинное напряжение и относительное поперечное сужение при разрыве найдем по формулам:

$$S_K = \frac{P_K}{A_K}; \quad \psi_K = \frac{A_0 - A_K}{A_0} \cdot 100\%,$$

где P_K – нагрузка при разрыве образца (конечная); A_K – площадь сечения образца в месте шейки.

Соединим три точки $C, B,$ и K и получим диаграмму истинных напряжений (рис. 2.17).

Вопросы для самопроверки

1. Какие образцы принимаются при испытании на прессе Гагарина?
2. Каковы преимущества прессы Гагарина перед универсальными машинами?
3. Каким образом на прессе Гагарина можно проводить испытания на растяжение, изгиб, кручение?
4. Какой масштаб по вертикали и горизонтали имеет диаграмма, полученная на прессе Гагарина?
5. Как определить условный предел пропорциональности с допуском 50%, 100% и условный предел текучести с допуском 0,2%?
6. В чем отличие истинного напряжения от условного?
7. Как построить диаграмму истинных напряжений?

8. Какие составляющие имеют абсолютное остаточное удлинение образца после разрыва?
9. Как найти работу, затраченную на деформацию образца в пределах упругости, для образования пластической деформации, до разрушения?
10. Как вычислить удельную работу деформации?
11. Как найти относительное удлинение 10-кратного образца?

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ СТАЛИ НА СРЕЗ И СРАВНЕНИЕ ЕГО С ПРЕДЕЛОМ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАЗРЫВЕ*

Основная цель – определение предела прочности стали при срезе и сравнение его с пределом прочности при разрыве.

Образцы. Для испытания на срез применяется стальной цилиндрический образец.

Испытательная машина. Испытания на срез выполняются на универсальной испытательной машине, конструкция и принцип работы которой даны в п. 2.1.

Проведение испытания. Стальной цилиндрический образец 1 с площадью поперечного сечения A_0 после обмера устанавливается в приспособление (рис. 2.18), состоящее из корпуса 2 с расточенными в нем гнездами для колец 3 и накладок 4, посредством которых осуществляется передача усилия на образец. После сборки приспособление устанавливается в испытательную машину и загружается. При этом условно считают, что в зоне среза возникают только касательные напряжения, равномерно распределенные по сечению (в действительности в зоне разрушения появляются и нормальные напряжения изгиба и сжатия, что подтверждается формой образца после разрушения).

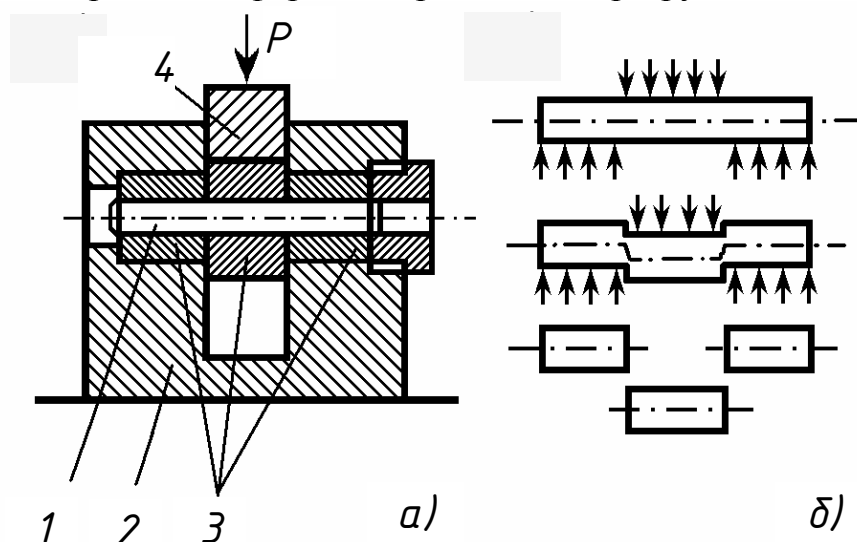


Рис. 2.18. Приспособление для проведения испытаний (а) и схема загрузки образца (б) при срезе

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 3.

Так как в данном приспособлении сдвиг под нагрузкой происходит по двум плоскостям, то предел прочности при срезе через разрушающую образец нагрузку находится по формуле

$$\tau_{\text{в}} = \frac{P_{\text{max}}}{2A_0}.$$

Для определения предела прочности материала образца на разрыв используют экспериментальное соотношение между пределом прочности стали и твердостью по Бринелю (см. п. 4.1):

$$\sigma_{\text{в}} \approx 3,53\text{НВ [МПа]}.$$

По окончании испытания находят отношение $\tau_{\text{в}}/\sigma_{\text{в}}$, которое для малоуглеродистой стали составляет 0,7 – 0,8.

Вопросы для самопроверки

- 1. Как определяется прочность на срез?*
- 2. В чем условность вычисляемого в работе предела прочности на срез?*
- 3. Как производятся испытания на срез металлического образца?*
- 4. Чему равно отношение $\tau_{\text{в}}/\sigma_{\text{в}}$ для малоуглеродистой стали?*

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОНСТАНТ МАТЕРИАЛА

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ПРИ ИСПЫТАНИИ МАТЕРИАЛА НА РАСТЯЖЕНИЕ*

Основная цель – определение упругих характеристик материала – модуля продольной упругости (модуля Юнга) и коэффициента Пуассона; ознакомление с принципами работы приборов для измерения малых деформаций – тензомерами.

Общие сведения. Для подавляющего большинства материалов в пределах упругого деформирования до предела пропорциональности между напряжениями и деформациями имеет место прямо пропорциональная зависимость (рис. 2.3), которая была установлена Р. Гуком. В условиях осевого растяжения (сжатия), когда только по двум граням выделенного из объема материала элемента действуют нормальные напряжения (рис. 3.1), наблюдается его линейное деформирование – продольное удлинение (укорочение) и изменение размеров поперечного сечения. При этом нормальное напряжение прямо пропорционально относительной продольной деформации:

$$\sigma = \varepsilon E.$$

Данная зависимость получила название закона Гука при растяжении-сжатии. Коэффициент E называется модулем продольной упругости. Как следует из приведенной зависимости, E численно равен тангенсу угла наклона прямолинейного участка диаграммы напряжений при растяжении (сжатии) к оси абсцисс (рис. 2.3). Чем больше величина E , тем меньше будет деформироваться материал под нагрузкой. Таким образом, модуль продольной упругости характеризует жесткость материала при растяжении-сжатии.

В условиях деформирования до предела пропорциональности отношение относительной поперечной деформации ε' к относительной продольной ε , как показал С. Пуассон, является для данного материала величиной постоянной:

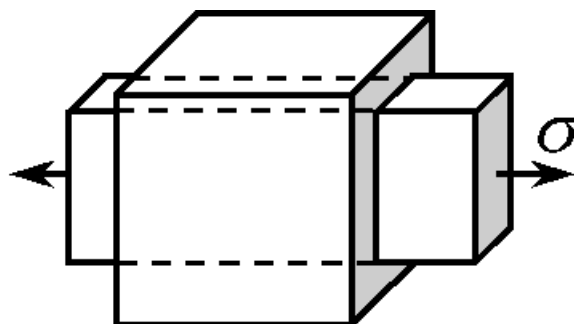


Рис. 3.1. Линейное деформирование элемента объема материала

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 6.

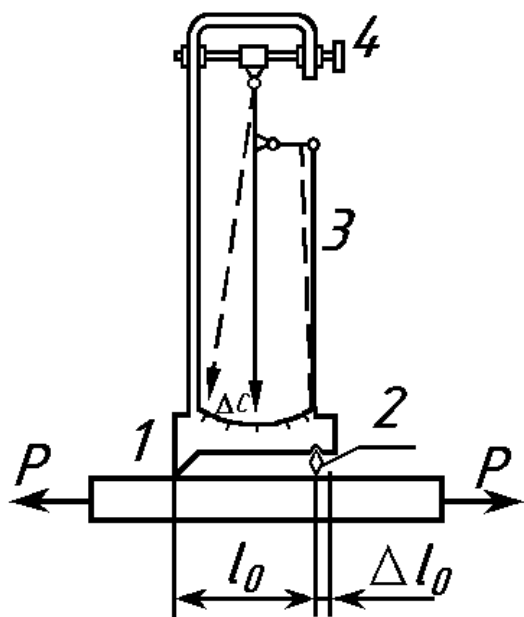


Рис. 3.2. Рычажный тензометр Гуггенбергера

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|.$$

Эта величина называется коэффициентом поперечной деформации, или коэффициентом Пуассона. Значение ν берется в указанной зависимости по абсолютной величине в связи с тем, что при удлинении образца наблюдается уменьшение его поперечных размеров (рис. 3.1).

Модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона являются достаточно стабильными физическими характеристиками материала, слабо зависящими от температуры, скорости нагружения и других внешних факторов, поэтому их условно называют упругими постоянными материала.

Приборы для измерения деформации – тензометры. Рычажный тензометр Гуггенбергера служит для непосредственного измерения линейной деформации при статическом нагружении и относится к механическим тензометрам (рис. 3.2). Жесткая рама прибора с неподвижным ножом 1 имеет паз, в который входит подвижная призма 2, соединенная системой рычагов 3 со стрелкой прибора. Для установки стрелки в рабочее положение служит установочный винт 4. Для замера деформации тензометр с помощью специальной струбины прижимается к испытываемому образцу. В процессе растяжения (сжатия) образца длина его участка l_0 , заключенного между подвижной и неподвижной призмами (база прибора), увеличивается (уменьшается) на величину Δl_0 , при этом происходит поворот призмы 2 вокруг ее верхнего конца и вместе с этим за счет системы рычагов 3 происходит отклонение стрелки по шкале прибора на величину ΔC . Абсолютная линейная деформация Δl_0 связана с величиной ΔC отношением:

$$\Delta l_0 = \frac{\Delta C}{K},$$

где K – коэффициент увеличения тензометра. Величина K изменяется в пределах 1000 – 1200 и указывается в паспорте прибора.

Относительная деформация в месте установки тензометра определяется по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{1}{K l_0} \cdot \Delta C = n \cdot \Delta C,$$

где n – цена деления шкалы прибора в величинах относительной деформации.

Тензорезисторы. Для измерения деформации применяют такие приборы – датчики, в которых используется взаимосвязь между деформацией, воспринимаемой датчиком, и какой-либо электрической его характеристикой (ёмкостью, индуктивностью, сопротивлением). Наибольшее распространение в практике получили тензометры омического сопротивления – тензорезисторы, или тензодатчики. Тензорезисторы служат для измерения относительной деформации на поверхности детали как при статических, так и при динамических нагрузках.

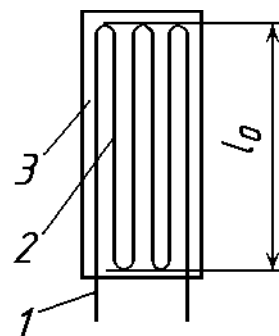


Рис. 3.3. Тензорезистор

Тензорезистор (рис. 3.3) представляет собой тонкую константановую или нихромовую проволоку или фольгу 2, вклеенную в виде петель между двумя полосками тонкой бумаги 3. К концам проволоки припаивают два медных проводника 1. База тензорезистора l_0 может колебаться от 3 до 50 мм, сопротивление – от 50 до 500 Ом.

Тензорезистор наклеивается на поверхность детали так, чтобы размер базы l_0 совпадал с направлением, вдоль которого измеряется деформация. При совместном деформировании детали и датчика изменяется длина и площадь сечения проволоки тензорезистора, что приводит к изменению его омического сопротивления. Исследования показывают, что относительная величина изменения сопротивления проволоки пропорциональна ее относительному удлинению:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \epsilon,$$

где K – коэффициент тензочувствительности, зависящий от материала проволоки (для константана $K = 2 \div 2,4$). Для датчика K зависит и от качества его наклейки на деталь. Таким образом, определение деформации при помощи тензорезистора сводится к измерению изменения его сопротивления.

Для измерения изменения сопротивления тензорезистора на практике широкое применение получила мостовая схема его включения (рис. 3.4), позволяющая регистрировать малые изменения сопротивления датчика по изменению величины тока в измерительной диагонали. Мостовая схема составляется из четырех сопротивлений: R_a – рабочий (активный) тензорезистор, наклеенный на исследуемую деталь; R_k – компенсационный тензорезистор (такой же, как и рабочий); R_1, R_2 – равные сопротивления, в качестве которых могут использоваться тензорезисторы, переменные сопротивления, реохорды. Условием отсутствия тока в

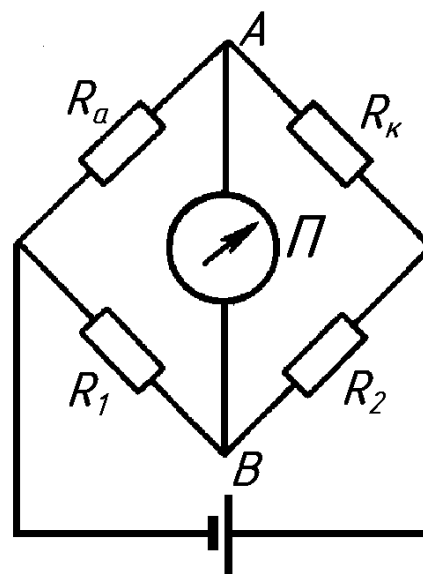


Рис. 3.4. Мостовая схема включения тензорезистора

измерительной диагонали АВ на гальванометре П (условием баланса моста) является равенство:

$$R_a R_2 = R_l R_k.$$

При деформировании активного тензорезистора вместе с деталью его сопротивление изменяется на величину ΔR , условие баланса моста нарушается и через диагональ потечет ток, регистрируемый гальванометром. Величина тока будет пропорциональна изменению сопротивления тензорезистора, а следовательно, и деформации детали.

Компенсационный тензорезистор служит для компенсации изменения сопротивления рабочего датчика вследствие изменения температуры. В отличие от рабочего тензорезистора компенсационный наклеивается на ненагруженную пластинку, выполненную из того же материала, что и исследуемая деталь. Так как рабочий и компенсационный датчики включены в разные плечи моста, то его баланс при изменении температуры не меняется.

Величина относительной линейной деформации в месте наклейки рабочего тензорезистора определяется по изменению показаний гальванометра ΔC :

$$\varepsilon = n \Delta C,$$

где n – цена деления прибора в величинах относительной деформации, определяемая опытным путем (тарировкой прибора).

На практике для измерения деформаций с помощью тензорезисторов используются специальные приборы как стрелочного типа, имеющие измерительную шкалу (ИД), так и цифровые (ИДЦ, ЦТМ, СИИТ). Приборы рассчитаны на работу по полумостовой схеме, когда сопротивления R_1 и R_2 моделируются прибором. Показания приборов в единицах относительной деформации соответствуют коэффициенту тензочувствительности $K = 2$. В случае K , отличным от 2, величина деформации определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{2}{K} n \Delta C.$$

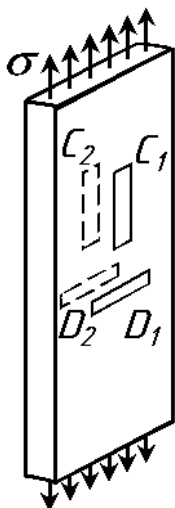


Рис. 3.5. Образец с тензомерами

Описание лабораторной установки и проведение испытаний. Испытания проводятся на плоском образце прямоугольного поперечного сечения на испытательной машине, создающей растягивающую нагрузку. Для измерения деформаций используются рычажные тензомеры Гуггенбергера и тензорезисторы, которые располагаются попарно в продольном C_1 , C_2 и поперечном D_1 , D_2 направлениях на противоположных гранях образца для устранения влияния его изгиба. Испытания проводят при нагрузках, не превышающих усилия, соответствующего пределу пропорциональности (рис. 3.5):

$$P_{\max} < A \cdot \sigma_{\text{пц}},$$

где A – площадь поперечного сечения образца;
 $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности материала.

Нагружение осуществляется ступенями $\Delta P = 1000$ кГ, начиная с нагрузки $P_0 = 500$ кГ, необходимой для устойчивой работы машины и устранения зазоров в нагружающем устройстве. По разности отсчетов, взятых с приборов, которые измеряют деформацию в продольном ($\Delta C_1, \Delta C_2$) и поперечном ($\Delta D_1, \Delta D_2$) направлениях, вычисляют среднюю относительную продольную и поперечную деформации, соответствующие нагрузке ΔP :

$$\varepsilon = n \Delta C, \quad \varepsilon' = n \Delta D,$$

где $\Delta C = \frac{\Delta C_1 + \Delta C_2}{2}$; $\Delta D = \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{2}$; n – цена деления прибора в величинах относительной деформации.

Величины $\Delta C, \Delta D$ принимаются осредненными по нескольким замерам.

По найденным деформациям определяются модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta P}{A\varepsilon}; \quad \nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|.$$

Вопросы для самопроверки

1. *Что такое E, ν , какие свойства материала они характеризуют?*
2. *Какой величины не должна превышать нагрузка при определении E ?*
3. *Для какого материала E больше: для стали или резины?*
4. *Если для стали E в 2 раза больше, чем для меди, то для какого из этих материалов будет наблюдаться большая деформация при одинаковых напряжениях?*
5. *Какая деформация, абсолютная или относительная, измеряется с помощью рычажного тензометра?*
6. *Что такое коэффициент увеличения рычажного тензометра?*
7. *Как связаны между собой изменение сопротивления проводника и изменение его длины?*
8. *Что такое коэффициент тензочувствительности тензодатчика?*
9. *Для чего нужен компенсационный тензодатчик?*
10. *Какая величина регистрируется прибором при мостовой схеме включения тензодатчика? Как по показаниям прибора определить относительную деформацию детали?*
11. *Для чего на образце устанавливаются по два тензометра с каждой стороны?*
12. *Как можно определить коэффициент Пуассона при испытании бруса на изгиб?*

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА*

Основная цель – проверка закона Гука при кручении и определение модуля сдвига.

Общие сведения. Угол закручивания стержня в пределах упругих деформаций связан с нагрузкой, т.е. с крутящим моментом, линейной зависимостью. Для вала круглого сечения угол закручивания определяют по формуле:

$$\varphi = \frac{M_{кр} l}{GI_p},$$

где l – длина вала; $M_{кр}$ – крутящий момент; G – модуль упругости материала при сдвиге (или просто модуль сдвига); I_p – полярный момент инерции площади поперечного сечения вала (для сплошного вала диаметром d , $I_p = \pi d^4/32$).

Указанная пропорциональность между нагрузкой и деформацией наблюдается в начальной стадии кручения образца; затем пропорциональность нарушается, и наступает быстрое увеличение угла закручивания при незначительном увеличении крутящего момента. Шейка на образце при этом не образуется. На рис. 3.6, *а* представлена диаграмма кручения для малоуглеродистой стали, на рис.3.6, *б* – диаграмма для чугунного образца примерно тех же размеров. Из диаграмм видно, что чугун не подчиняется закону пропорциональности.

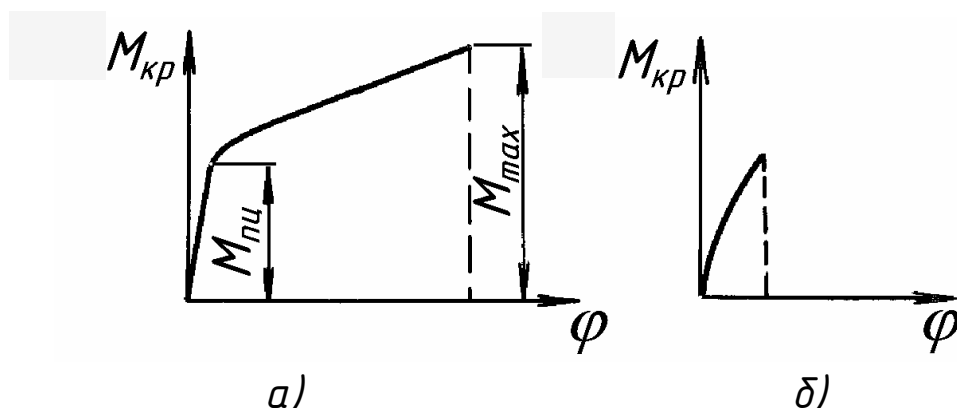


Рис. 3.6. Диаграмма кручения образцов:
а – из малоуглеродистой стали; *б* – из чугуна

Для определения модуля сдвига материала G необходимо измерить величину $M_{кр}$ и соответствующий ей угол закручивания φ .

Модуль G связан с модулем продольной упругости E и коэффициентом Пуассона ν следующим соотношением:

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

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 8.

Проведение испытания. Для определения угла закручивания используется прибор конструкции Н. Г. Токаря (рис. 3.7).

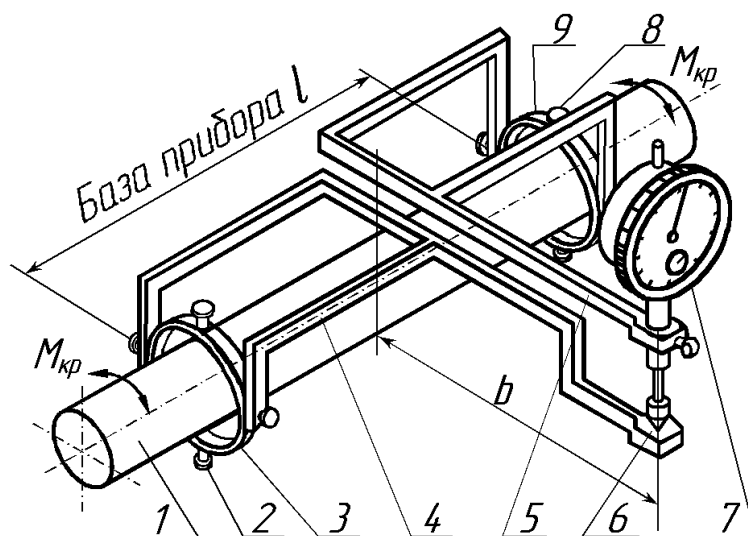


Рис. 3.7. Схема прибора конструкции Н. Г. Токаря для определения угла закручивания

При испытании применяется образец круглого поперечного сечения с головками по концам. Головки образца закрепляются в зажимах испытательной машины. На образце 1 при помощи винтов 2 установлено кольцо 3 с рычагом 4, имеющим опорную поверхность для индикатора 7, который крепится на рычаге правого кольца 9. Правое кольцо 9 винтами 8 закреплено на расстоянии l (база прибора) от левого кольца.

Приложение крутящего момента вызывает относительное закручивание сечений, где укреплены кольца, на угол φ (рис. 3.8). Одновременно рычаг b прибора длиной b повернется, а стрелка индикатора переместится на x делений. Взаимный угол закручивания рассматриваемых сечений легко вычисляется по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi \approx \varphi = x/b.$$

Для предварительного обжатия концов стержня в захватах дается начальная нагрузка M_0 . При этой нагрузке снимается первый отсчет по индикатору. Затем даются приращения крутящему моменту на величину $\Delta M_{кр}$, снова снимаются отсчеты по индикатору, подсчитываются разности и приращения углов закручивания $\Delta\varphi = \Delta x/b$ на этой ступени нагрузки. Таких ступеней нагрузки следует иметь несколько. Результаты измерений заносятся в таблицу.

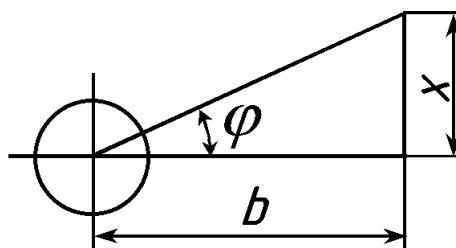


Рис. 3.8. Схема замера угла закручивания

Для установления характера зависимости между крутящим моментом и углом закручивания строят по опытным данным график $M_{кр}(\varphi)$. Полученные на графике точки при тщательном проведении опыта ложатся примерно на одну прямую, что доказывает прямую зависимость между крутящим моментом и вызываемой им деформацией. Этим подтверждается справедливость закона Гука при кручении:

$$\tau = G \gamma,$$

где τ – касательное напряжение; γ – угол закручивания; G – модуль сдвига, характеризующий способность материала сопротивляться упругому деформированию-сдвигу.

Пользуясь формулой для угла закручивания, определяют величину модуля сдвига при кручении:

$$G = \frac{\Delta M_{кр} l}{\Delta \varphi I_p}.$$

Найденное значение следует сравнить с величиной G , вычисленной по теоретической зависимости между тремя упругими постоянными, приведенной ранее.

Необходимые значения E и ν берут из соответствующих таблиц или определяют опытным путем при растяжении образца данного материала (см. п. 3.1).

Вопросы для самопроверки

- 1. Чем выражается деформация сдвига?*
- 2. Запишите закон Гука при сдвиге, объясните его суть.*
- 3. Что характеризует модуль сдвига?*
- 4. Как опытным путем измерить взаимный угол поворота сечений при кручении бруса?*
- 5. Определяется ли непосредственно из опыта величина модуля сдвига G или же вычисляется на основании опытных данных?*
- 6. Какие физические постоянные (кроме G) характеризуют упругие свойства изотропного тела, и имеется ли между ними связь?*

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ, УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ И ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ*

Основная цель – определение значения твёрдости материала по Бринеллю и Роквеллу.

Общие сведения. Под твёрдостью понимают свойство материала сопротивляться проникновению в него более твёрдого наконечника (индентора), не получающего остаточных деформаций. Испытания на твёрдость имеют большое распространение в промышленности, так как они дают возможность изучать свойства материала не только на опытных образцах, но и на готовых конструкциях и деталях. К тому же имеется возможность по результатам испытаний на твёрдость определить величину предела прочности материала без проведения испытаний материала на растяжение.

Наибольшее распространение получили статические методы:

- а) *метод Бринелля* – вдавливание стального закалённого шарика;
- б) *метод Роквелла* – вдавливание стального шарика при контроле мягких материалов или алмазного конуса при испытании твёрдых;
- в) *метод Виккерса* – вдавливание алмазной пирамиды.

Они регламентированы соответствующими ГОСТами. Здесь рассматриваются только наиболее распространённые методы, к которым относятся: метод измерения твёрдости по Бринеллю (ГОСТ 9012-59) и метод измерения твёрдости по Роквеллу (ГОСТ 9013-59).

4.1.1. Метод измерения твёрдости по Бринеллю

Сущность метода заключается во вдавливании шарика (стального или из твёрдого сплава) в образец или изделие под воздействием нагрузки P , приложенной перпендикулярно поверхности образца, в течение определённого времени и измерении диаметра отпечатка d после снятия нагрузки (рис. 4.1.). Диаметр образующегося сферического отпечатка d измеряется лупой-компаратором (с помощью микроскопа).

Твёрдость по Бринеллю (НВ) численно равна напряжению, выраженному отношением приложенной нагрузки P к площади поверхности A сферического отпечатка диаметром d (размерность при обозначении твёрдости опускается).

Для случая измерения нагрузки в килограммах

$$\text{НВ} = \frac{P}{A}. \quad (4.1)$$

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 5.

Для случая измерения нагрузки в ньютонах

$$HB = 0,102 \frac{P}{A}, \quad (4.2)$$

где
$$A = \frac{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}{2} = \frac{\pi D^2}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right),$$

φ – угол вдавливания, т. е. угол между двумя радиусами шарика, проведёнными к концам отпечатка.

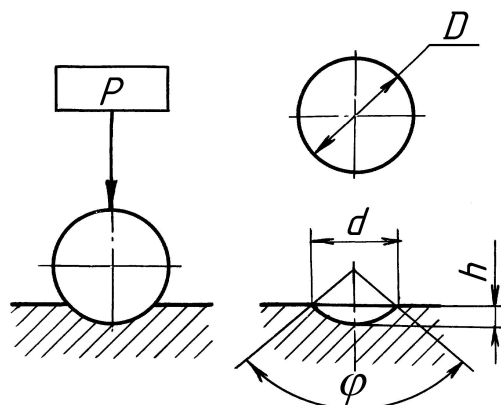


Рис. 4.1. Схема вдавливания шарика в образец или изделие

Согласно формулам (4.1) и (4.2), для получения одинаковой твёрдости при использовании шариков различных диаметров (ГОСТ допускает применение диаметром 1,0; 2,0; 2,5; 5,0 и 10 мм) необходимо, чтобы угол вдавливания φ (рис. 4.1) оставался неизменным при постоянном отношении нагрузки к квадрату диаметра шарика, которое обозначается через

$$K = \frac{0,102P}{D^2}, \text{ Н/мм}^2 \quad \left(K = \frac{P}{D^2}, \text{ кг/мм}^2 \right).$$

Для выбора значений K при испытании различных материалов рекомендуется пользоваться данными табл. 4.1. Определившись значением K и диаметром шарика D , используемого при испытаниях, выбирают нагрузку P согласно данным табл. 4.2.

Таблица 4.1

Значения коэффициента K

Металлы и сплавы	K	HB
Железо, сталь, чугун и другие высокопрочные сплавы	30	от 96 до 450
Титан и его сплавы	15	50 220
Алюминий, медь, никель и их сплавы	10	32 200
Магний и его сплавы	5	16 100
Подшипниковые сплавы	2,5	8 50
Олово, свинец	1	3,2 20

Согласно ГОСТ, твёрдость по Бринеллю при использовании шарика $D = 10$ мм под нагрузкой $P = 29420$ Н (3000 кГ) с продолжительностью выдержки под нагрузкой от 10 до 15 секунд обозначается цифрами, характеризующими величину твёрдости, и буквами НВ, например: 185 НВ. При других условиях испытания после букв НВ указывается условие испытания в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки под нагрузкой, например: 185 НВ 5/750/20 – твёрдость по Бринеллю, определённая с применением шарика $D = 5$ мм, при нагрузке 750 кГ и продолжительности выдержки под нагрузкой 20 с. Размерность числа твёрдости во всех случаях опускается.

Диаметр шарика и нагрузку следует выбирать так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах $0,25D < d < 0,6D$. При несоблюдении этих требований необходимо изменить условия испытаний (D и P).

Твёрдость НВ для многих материалов связана с пределами прочности эмпирическими зависимостями, например, для сталей $\sigma_b = (2,94 - 3,53)$ НВ, МПа.

Следует иметь в виду, что по Бринеллю нельзя определять твёрдость очень мягких ($HV < 8$) и очень твёрдых материалов ($HV > 450$). В мягких материалах шарик погрузится очень глубоко, диаметр отпечатка будет близок к диаметру шарика D и перестанет служить критерием твёрдости. Наоборот, если твёрдость материала будет очень большой, величина отпечатка получится маленькой и края его будут столь нечёткими, что не удастся точно измерить диаметр отпечатка, к тому же шарик может получить остаточную деформацию, искажающую результаты испытания.

Таблица 4.2

Значение нагрузки P

Диаметр шарика, мм	Нагрузка P , Н (кГ), для $K=0,102P/D^2$, (P/D^2)					
	30	15	10	5	2,5	1
1,000	294,2 (30)	–	98,07 (10)	49,03 (5)	24,52 (2,5)	98,807 (1)
2,000	1177 (120)	–	392,3 (40)	196,1 (20)	98,07 (10)	39,23 (4)
2,500	1839 (187,5)	–	612,9 (62,5)	306,0 (31,2)	153,0 (15,6)	60,80 (6,2)
5,000	7355 (750)	–	2452 (250)	1226 (125)	612,9 (62,5)	245,2 (25)
10,000	29420 (3000)	14710 (1500)	9807 (1000)	4903 (500)	2452 (250)	980,7 (100)

Условия испытаний и требования к образцам. Минимальная толщина образца должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка и вычисляться по формуле $S \geq 10h$:

$$S \geq 10 \cdot \frac{0,102P}{\pi D HVB} \quad (P \text{ выражена в Н});$$

$$S \geq 10 \cdot \frac{P}{\pi D HVB} \quad (P \text{ выражена в кГ}).$$

На практике минимальная толщина образца или изделия определяется по таблице, приведённой в приложении 2 ГОСТ 9012-59.

При испытании на твёрдость особое значение имеет качество поверхности. Чем меньше глубина вдавливания индентора (или нагрузка), тем выше должна быть чистота поверхности. Немаловажно также, чтобы в процессе подготовки поверхности не изменялись свойства поверхностного слоя (вследствие наклёпа или разогрева при шлифовании или полировке).

Требования к качеству вдавливаемого шарика, условиям приложения силы и качеству испытываемой поверхности регламентируются ГОСТом. Продолжительность выдержки под нагрузкой должна быть от 10 до 15 с для черных металлов, для цветных металлов и сплавов – от 10 до 180 с, в зависимости от

материала и его твёрдости, и должна быть указана в нормативно-технической документации. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее $4d$, а расстояние от центра отпечатка до края образца (изделия) – не менее $2,5d$; для металлов с твёрдостью менее 35HVB расстояния должны быть $6d$ и $3d$ соответственно.

Число твёрдости может быть найдено по формуле (4.1) или (4.2). Для быстрого определения числа твёрдости, в зависимости от диаметра шарика D , испытательной нагрузки P , величины K , пользуются специальными таблицами (см. табл. 4.3), заменяющими вычисления по указанным формулам, приведёнными в приложении 2 ГОСТ 9012-59 [5].

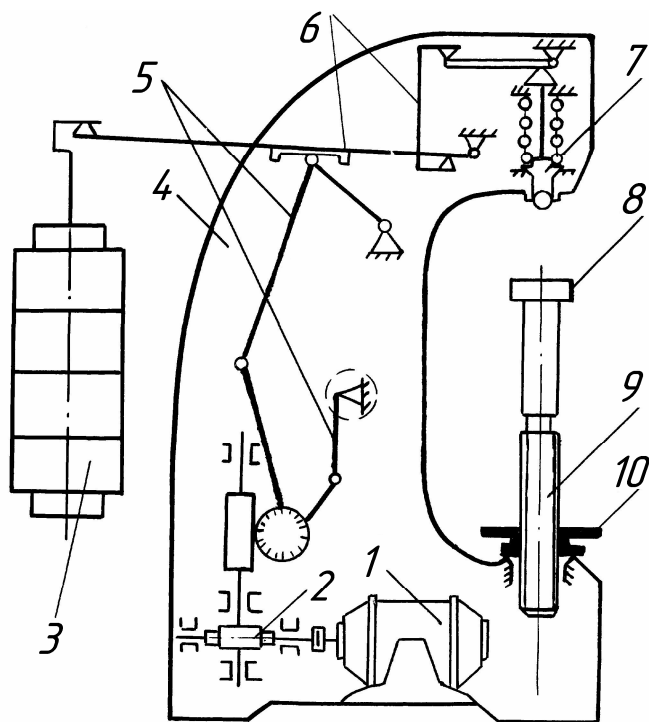


Рис. 4.2. Прибор для измерения твёрдости металлов ТШ-2М

Прибор для измерения твёрдости металлов ТШ – 2М (тип ТБ). Он предназначен для измерения твёрдости металлов по методу Бринелля. Принципиальная схема прибора изображена на рис. 4.2. Механизм подъемного столика 8, на который помещается образец, состоит из пары винт-маховик 9, 10. Испытания осуществляются с помощью механизма, приводимого в работу электродвигателем 1, включение которого производится нажатием пусковой кнопки, расположенной на левой стороне станины 4. От двигателя через червячный редуктор 2 вращение передаётся на кривошипно-шатунный механизм нагружения 5. Шатун опускается, и освобождённая рычажная система нагружения 6 с грузами 3 передаёт через оправку 7 с шариком на конце заданную нагрузку образцу. Механизм нагружения возвращается в исходное положение механизмом переключения вращения ротора электродвигателя. Электродвигатель при этом автоматически отключается.

Время выдержки образца под полной нагрузкой контролируют с помощью сигнальной лампы. Величина нагрузки, диаметр шарика и время испытания могут меняться путём регулирования пресса в зависимости от твёрдости материала образца.

Проведение испытания. Выбирается соответственный шариковый наконечник, закрепляют его в шариковой оправке 7, накладывают на подвеску требуемое количество грузов и устанавливают необходимую продолжительность выдержки образца под нагрузкой. Поскольку твёрдость материалов, испытываемых студентами в лаборатории, находится в пределах от $140 < \text{НВ} < 450$, то испытания проводятся при нагрузке $P=29240 \text{ Н}$ (3000 кг) и диаметре шарика $D = 10 \text{ мм}$. Образец кладётся на столик пресса 8 и с помощью маховика 10 до отказа поджимается к шариковой оправке 7. Нажимом на кнопку включается электродвигатель 1, вращение которого через редуктор 2 передаётся на образец (см. рис. 4.2). По окончании испытания, когда погаснет лампочка и включится электродвигатель, опускается столик, снимается образец и измеряется диаметр полученного отпечатка с помощью специальной лупы или микроскопа. На рис. 4.3 дано изображение отпечатка, видимое в лупу ($d = 4,25 \text{ мм}$).

Диаметр каждого отпечатка следует измерить дважды по двум взаимно перпендикулярным направлениям с точностью до сотых долей миллиметра и взять среднее из двух полученных измерений (разность измерений не должна превышать 2%). Число отпечатков каждый раз должно быть не менее трёх. По диаметру отпечатка находят число твёрдости по форму-

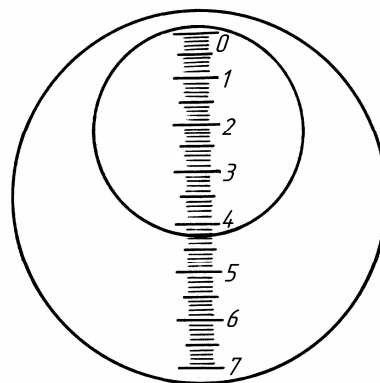


Рис. 4.3. Схема измерения отпечатка

ле (4.1) или (4.2), или по табл. 4.3. По числу определяют предел прочности материала. Для углеродистой стали $\sigma_B = 3,53$ НВ, МПа.

Таблица 4.3

Величины твёрдости по Бринеллю
при диаметре шарика $D=10$ мм, нагрузке $P=29420$ Н (3000 кг) и $K=30$

d , мм	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2,40	653	648	643	637	632	627	621	616	611	606
2,50	601	597	592	587	582	578	573	569	564	560
2,60	555	551	547	543	538	534	530	526	522	518
2,70	514	510	507	503	499	495	492	488	485	481
2,80	477	474	471	467	464	461	457	454	451	448
2,90	444	441	438	435	432	429	426	423	420	417
3,00	415	412	409	406	404	401	398	395	393	390
3,10	388	385	383	380	378	375	373	370	368	366
3,20	363	361	359	356	354	352	350	347	345	343
3,30	341	339	337	335	333	331	329	326	325	323
3,40	321	319	317	315	313	311	309	307	306	304
3,50	302	300	298	297	295	293	292	290	288	286
3,60	285	283	282	280	278	277	275	274	272	271
3,70	269	268	266	265	263	262	260	259	257	256
3,80	255	253	252	250	249	248	246	245	244	242
3,90	241	240	239	237	239	235	234	232	231	230
4,00	229	228	226	225	224	223	222	221	219	218
4,10	217	216	215	214	213	212	211	210	208	204
4,20	207	205	204	203	202	201	200	199	198	198
4,30	197	196	195	194	193	192	191	190	189	188
4,40	187	186	185	185	184	183	182	181	180	179
4,50	179	178	177	176	175	174	174	173	172	171
4,60	170	170	169	168	167	167	166	165	164	164
4,70	163	162	161	161	160	159	158	158	157	156
4,80	156	155	154	154	153	152	152	151	150	150
4,90	149	148	148	147	146	146	145	144	144	143
5,00	143	142	141	141	140	140	139	138	138	137
5,10	137	136	135	135	134	134	133	133	132	132
5,20	131	130	130	129	129	128	128	127	127	126
5,30	126	125	125	124	124	123	123	122	122	121
5,40	121	120	120	119	119	118	118	117	117	116
5,50	116	115	115	114	114	114	113	113	112	112
5,60	111	111	110	110	110	109	109	108	108	107
5,70	107	107	106	106	105	105	105	104	104	103
5,80	103	103	102	102	101	101	101	100	99,9	99,5
5,90	99,2	98,8	98,4	98,0	97,7	97,3	96,9	96,6	96,2	95,9
6,00	95,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—

4.1.2. Метод измерения твёрдости по Роквеллу

Сущность метода заключается во вдавливании наконечника с алмазным конусом или со стальным шариком в испытуемый образец (изделие) под действием последовательно прилагаемых предварительной (P_0) и основной (P_1) нагрузок и в измерении остаточной глубины проникновения этого наконечника (e) после снятия основной нагрузки (рис. 4.4).

При измерении твёрдости по Роквеллу применяют два типа стандартных наконечников:

- а) для материалов небольшой (средней) твёрдости – стальной шарик диаметром 1,588 мм (1/16 дюйма);
- б) для материалов с высокой твёрдостью (с твёрдостью по Бринеллю $HV > 230$) – алмазный наконечник, представляющий собой конус с углом $\alpha = 120^\circ$ и радиусом закругления при вершине $R = 0,2$ мм.

При испытании по Роквеллу сначала прикладывается малая (предварительная нагрузка) $P_0 = 98$ Н (10 кг) для надёжного прижатия наконечника к образцу. Затем дополнительно прикладывается дополнительная нагрузка P_1 , которая в сумме с предварительной нагрузкой составляют общую нагрузку P , прикладываемую к испытуемому образцу ($P_0 + P_1 = P$). При отсчёте числа твёрдости нагрузка P уменьшается до P_0 .

Таким образом, твёрдость по Роквеллу характеризуется разницей между максимальной глубиной проникновения в материал наконечника (выраженной в делениях шкалы прибора) и остаточной глубиной его проникновения после снятия основной нагрузки (рис. 4.4).

При испытании по Бринеллю более твёрдому материалу соответствует и большее число твёрдости. Чтобы это условие выполнялось и при определении твёрдости по Роквеллу, вводят условную шкалу глубин, принимая за одно её деление глубину, равную 0,002 мм. При испытании алмазным конусом предельная глубина внедрения составляет 0,2 мм, или $0,2/0,002 = 100$ делений, при испытании шариком – 0,26 мм, или $0,26/0,002 = 130$ делений.

Замеры глубины проникновения осуществляют по шкале циферблата индикатора прибора. На циферблате нанесены числа твёрдости в условных единицах. Единица твёрдости по Роквеллу соответствует осевому перемещению наконечника на 0,002 мм (размерность при обозначении числа твёрдости опускается).

Прибор для измерения твёрдости по Роквеллу имеет шкалы A , B и C . Отсчёт по шкалам A и C (на циферблате индикатора прибора эти шкалы имеют чёрный цвет) производится при вдавливании в испытуемый образец алмазного наконечника. Отсчёт по шкале B (на циферблате индикатора эта шкала красного цвета) ведётся при вдавливании в образец стального шарика под действием соответствующих нагрузок, указанных в табл. 4.4.

Значения нагрузок вдавливаемого шарика

Нагрузка	Испытание по Роквеллу					
	Шкала С		Шкала А		Шкала В	
	Н	кГ	Н	кГ	Н	кГ
Предварительная нагрузка (P_0)	98	10	98	10	98	10
Основная нагрузка (P_1)	1373	140	490	50	883	90
Общая нагрузка (P)	1471	150	588	60	981	100

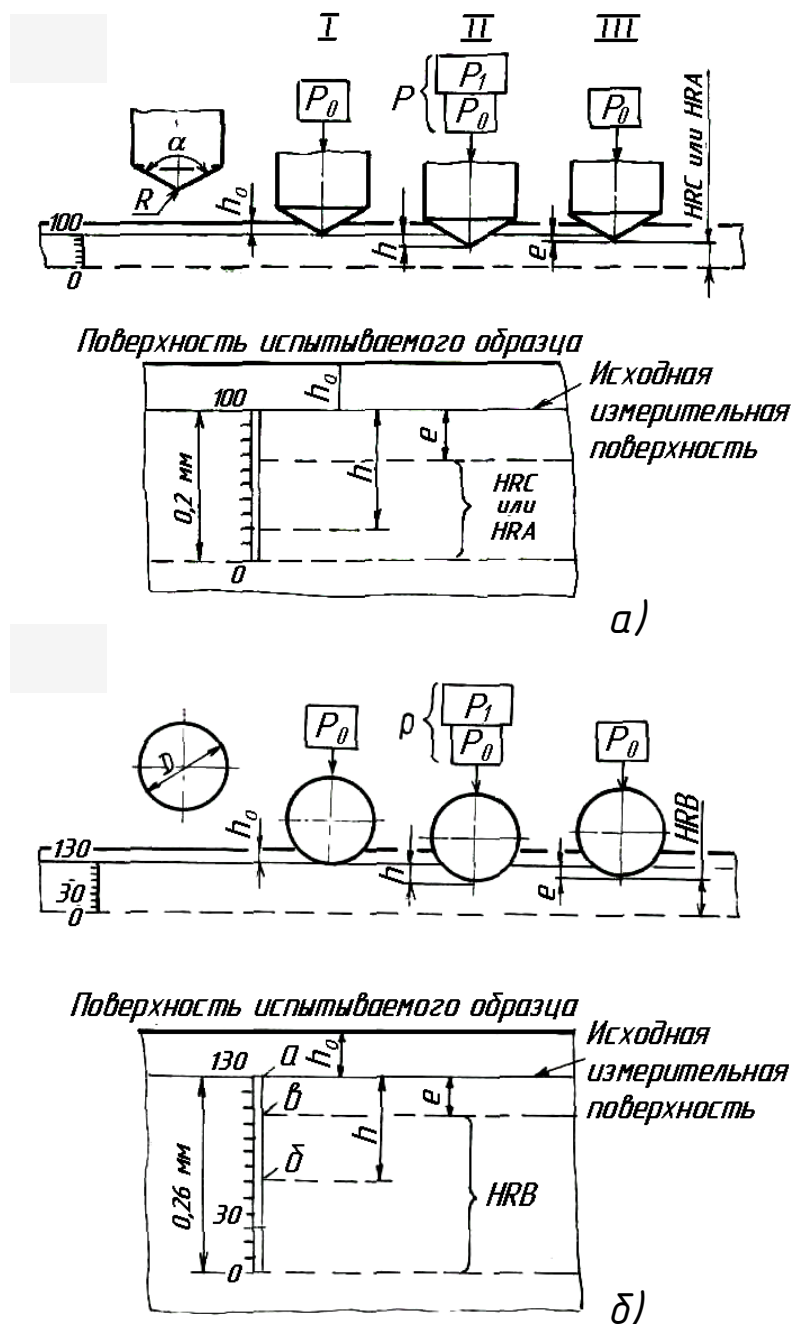


Рис. 4.4. Схемы внедрения алмазного (а) и шарикового (б) наконечников

Чем твёрже материал, тем меньше будет глубина проникновения наконечника в него. Чтобы при большей твёрдости материала получалось большее число твёрдости по Роквеллу, принято выражать его формулами:

а) при измерении по шкалам *A* и *C*:

$$HR = 100 - \frac{e}{0,002}, \text{ (см. рис. 4.4, а)}$$

где e – остаточная глубина проникновения наконечника;

б) при измерении по шкале *B*:

$$HR = 130 - \frac{e}{0,002}, \text{ (см. рис. 4.4, б)}$$

Символ HR сопровождается буквой, указывающей на шкалу, по которой проводились испытания, например: HRA, HRB или HRC.

Шкалу A применяют для испытания твёрдых сплавов, тонкого листового материала и для определения твердости тонкого верхнего слоя поверхности.

Шкалу B используют для испытаний металлов средней твёрдости.

Шкала C служит для определения твёрдости термически обработанной стали.

Предельные числа твёрдости для соответствующих шкал приведены в табл. 4.5. При твёрдости менее HRC 20 алмаз слишком глубоко проникает в образец, а при твердости более HRC 67 – в алмазном конусе создаётся слишком большое давление. Аналогично объясняются и пределы применимости шкал A и B.

Таблица 4.5

Предельные числа твёрдости

Обозначение		Нагрузка, кГ, общая = (предварит. + основная)	Вид наконечника	Предел измерения твёрдости по Роквеллу HR	Примерная твёрдость по Бринеллю HB
шкалы	числа твёрдости				
B	HRB	100=(90+10)	шарик	25–100	60–230
C	HRC	150=(10+140)	алмазный конус	20–67	230–700
A	HRA	60=(10+50)	алмазный конус	78–85	свыше 700

Число твёрдости по Роквеллу можно перевести в число твёрдости по Бринеллю, пользуясь табличными данными (табл. 4.6) или эмпирическими формулами Петренко:

а) для чёрной шкалы

$$HB = \frac{1420000}{(100 - HRC)^2};$$

б) для красной шкалы

$$HB = \frac{7300}{130 - HRB}$$

Но следует иметь в виду, что перевод чисел Роквелла в числа Бринелля не совсем точен.

Результат испытаний по Бринеллю точнее испытаний по Роквеллу вследствие больших размеров получаемых отпечатков и, следовательно, меньшего влияния неоднородности материала и дефектов на поверхности. Однако метод Роквелла имеет следующие преимущества: незначительность повреждений поверхности испытуемого образца, возможность определения твёрдости тонкостенных деталей, а также твёрдости термически обработанных стальных поверхностей.

Таблица 4.6

Перевод чисел твёрдости по Роквеллу в числа твёрдости по Бринеллю

HRB	HB	HRB	HB	HRB	HB	HRB	HB	HRC	HB	HRC	HB
100	237	75	137	50	93	25	68	65	682	40	370
99	231	74	135	49	92	24	67	64	665	39	360
98	225	73	133	48	90	23	66	63	650	38	350
97	219	72	131	47	88	22	65	62	635	37	340
96	214	71	127	46	87	21	65	61	621	36	331
95	209	70	125	45	86	20	65	60	607	35	322
94	204	69	123	44	85	19	64	59	594	34	314
93	198	68	121	43	83	18	64	58	581	33	304
92	193	67	119	42	82	17	63	57	568	32	296
91	189	66	117	41	81	16	63	56	555	31	288
90	184	65	116	40	80	15	62	55	542	30	280
89	180	64	114	39	79	14	62	54	530	29	272
88	177	63	112	38	78	13	62	53	518	28	265
87	173	62	110	37	77	12	61	52	506	27	258
86	169	61	108	36	76	11	61	51	494	26	252
85	165	60	107	35	75	10	60	50	482	25	246
84	162	59	106	34	75	9	60	49	470	24	240
83	159	58	104	33	74	8	59	48	458	23	234
82	156	57	103	32	74	7	59	47	447	22	228
81	153	56	101	31	73	6	58	46	436		
80	150	55	100	30	72	5	58	45	425		
79	147	54	98	29	71	4	58	44	414		
78	144	53	97	28	71	3	58	43	403		
77	141	52	96	27	70	2	57	42	392		
76	138	51	95	26	69	-	57	41	381		

Условия испытания и требования к образцам. Толщина образца или глубина поверхностного слоя должна быть не менее чем в 8 раз больше величины e . После испытания на противоположной стороне образца не должно быть заметно следов деформации от отпечатка. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или от центра отпечатков до края образца должно составлять не менее 3 мм, если в нормативно-технической документации на металлопродукцию не установлены иные требования. Подготовка поверхности испытываемого образца, требования к наконечникам и условия проведения испытаний регламентируются ГОСТ 9013-59.

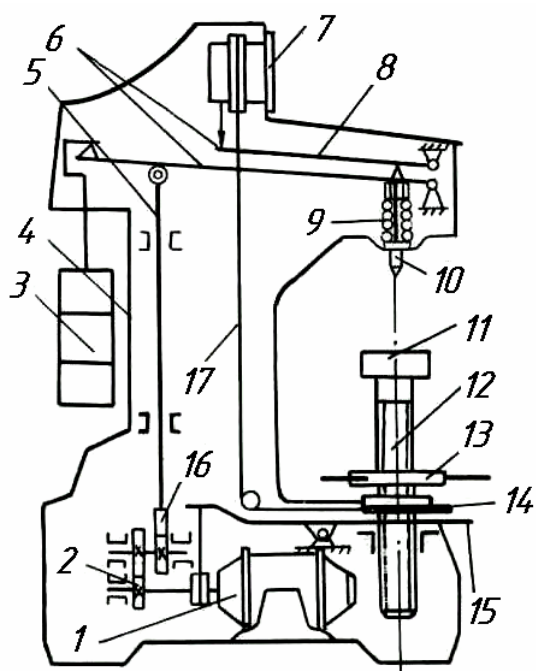


Рис. 4.5. Прибор для измерения твёрдости металлов ТК-2М

Прибор для измерения твёрдости металлов ТК-2М. Он предназначен для измерения твёрдости металлов и сплавов по методу вдавливания алмазного конуса или стального закалённого шарика под действием заданной нагрузки в течение определённого времени (метод Роквелла). Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 9013-59. Принципиальная схема прибора показана на рис. 4.5. Механизм 14 подъёмного столика 11 состоит из пары винт-маховик 12, 13. Испытание образца на твёрдость осуществляется с помощью механизма погружения, приводимого в действие электродвигателем 1. От двигателя через червячный редуктор 2 вращение передаётся кулачковому блоку 16, который через шток 5 опускает грузовой рычаг 6 с грузами 3 и передаёт нагрузку на образец

через наконечник 10 с шариком или алмазным конусом на конце. При повороте кулачкового блока 16 на один оборот шток 5 возвращает грузовой рычаг 6 в первоначальное положение, снимая с наконечника приложенную нагрузку (за счёт подвески 6 и пружины 9 на образец передаётся нагрузка, равная соответственно 60 и 10 кГ; нагрузка в 100 или 150 кГ передаётся на образец за счёт сменных грузов 3).

Включение привода нагружения осуществляется педалью 15, а включение электродвигателя – выключателем, установленным на правой стороне корпуса прибора 4.

Фиксирование глубины проникновения наконечника в образец осуществляется индикатором 7, который приводится в движение рычагом 8. Точная установка индикатора на ноль достигается маховичком 14, который управляет шкалой индикатора 7 через трос 17.

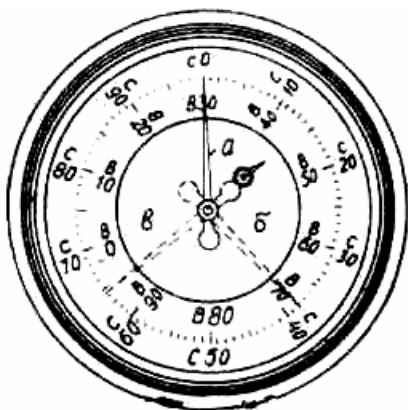


Рис. 4.6. Индикатор прессы Роквелла (ТК-2)

Проведение испытания. Испытуемый образец (см. рис. 4.5) помещают на подъёмный столик 11. Согласно выжидаемой твёрдости, выбирают тип наконечника и устанавливают соответствующие грузы 3. (В лаборатории кафедры испытания проводятся для материалов средней твёрдости путём вдавливания стального шарика – отсчёты снимаются по красной шкале *B*). Вращением маховичка 13 поднимается столик с образцом до соприкосновения с наконечником. Затем продолжают медленно вращать маховик подъёмного столика до тех пор, пока малая стрелка индикатора не станет против красной точки, а большая примерно вертикально.

При таком положении стрелок пружина 9 сжимается и создаёт дополнительную нагрузку на образец $P_0=10$ кГ.

После этого при помощи маховичка 14 управления шкалой индикатора совмещают тридцатое деление красной шкалы (соответствующее отметки 130 условной шкалы глубин) с концом большой стрелки индикатора (положение «а» на рис. 4.6). Нажатием педали 15 включают механизм нагружения прибора: вначале прикладывается полная нагрузка (она соответствует положению стрелки «б»), происходит выдержка под нагрузкой, а затем полная нагрузка снижается до предварительной нагрузки P_0 . Положение стрелки при этой нагрузке (положение «в» на рис. 4.6) соответствует числу твёрдости по Роквеллу (на рис. 4.6 HRB = 94). После определения числа твёрдости, вращением маховика 13 в обратном направлении освобождают образец. Должно быть сделано не менее трех испытаний, которые рекомендуется проводить на одном участке образца. Расстояние от центра отпечатка до края образца или до центра другого отпечатка должно быть не менее 4 мм. Не следует также проводить вдавливание наконечника близко к отпечаткам, полученным по способу Бринелля.

Вопросы для самопроверки

1. *Что называется твёрдостью материала?*
2. *Сущность метода измерения твёрдости по Бринеллю.*
3. *Чему численно равна твёрдость по Бринеллю?*
4. *Что такое угол вдавливания?*
5. *Какие диаметры шариков для измерения твёрдости по Бринеллю допускает ГОСТ?*
6. *Какое соотношение в расчётных формулах обозначается через K ?*
7. *Какое значение может принимать величина K , и от чего она зависит?*

8. Как выбирается нагрузка P ?
9. Как обозначается твёрдость по Бринеллю?
10. В каких пределах может находиться диаметр отпечатка?
11. Какой может быть минимальной толщина образца?
12. Требования, предъявляемые к качеству поверхности образца.
13. Условия испытания (продолжительность выдержки; расстояние между центрами соседних отпечатков; точность замеров отпечатков; необходимое число отпечатков в методе Бринелля).
14. Сущность метода измерения твёрдости по Роквеллу.
15. Какие типы наконечников применяют при измерении твёрдости по Роквеллу?
16. Последовательность приложения нагрузок и измерения твёрдости по Роквеллу.
17. По каким шкалам производится отсчёт при вдавливании алмазного наконечника и стального шарика соответственно?
18. Почему меньшая глубина проникновения наконечника соответствует большей твёрдости материала?
19. Величины предварительной и основной нагрузок для шкал А, В и С.
20. Как обозначается твёрдость по Роквеллу, замеренная по шкале А, В и С?
21. Условия испытания (минимальная толщина образца; минимальное расстояние между центрами соседних отпечатков и от края образца) в методе Роквелла.

4.2. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ*

Основная цель – ознакомление с методом испытания материалов на ударный изгиб и определение полной работы K , затраченной при ударе (работа удара), или ударной вязкости KC , под которой понимают работу удара, отнесённую к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

Общие сведения. Для оценки свойств материала при динамических нагрузках недостаточно механических характеристик, определяемых при статических испытаниях. При больших скоростях нагружения, например, при ударе, увеличивается опасность хрупкого разрушения. Эта опасность особенно возрастает при наличии в детали различного рода надрезов (отверстия, галтели, канавки и пр.), которые вызывают концентрацию напряжений (неравномерное распределение напряжений). Надрез позволяет сосредоточить всю деформацию, поглощающую удар, в одном месте. Кроме того, наличие надреза ставит материал в более тяжёлые условия работы, так как надрез значительно ослабляет сечение и вызывает повышение напряжений от изгиба (вблизи дна надреза эти напряжения резко возрастают из-за концентрации напряжений).

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 7.

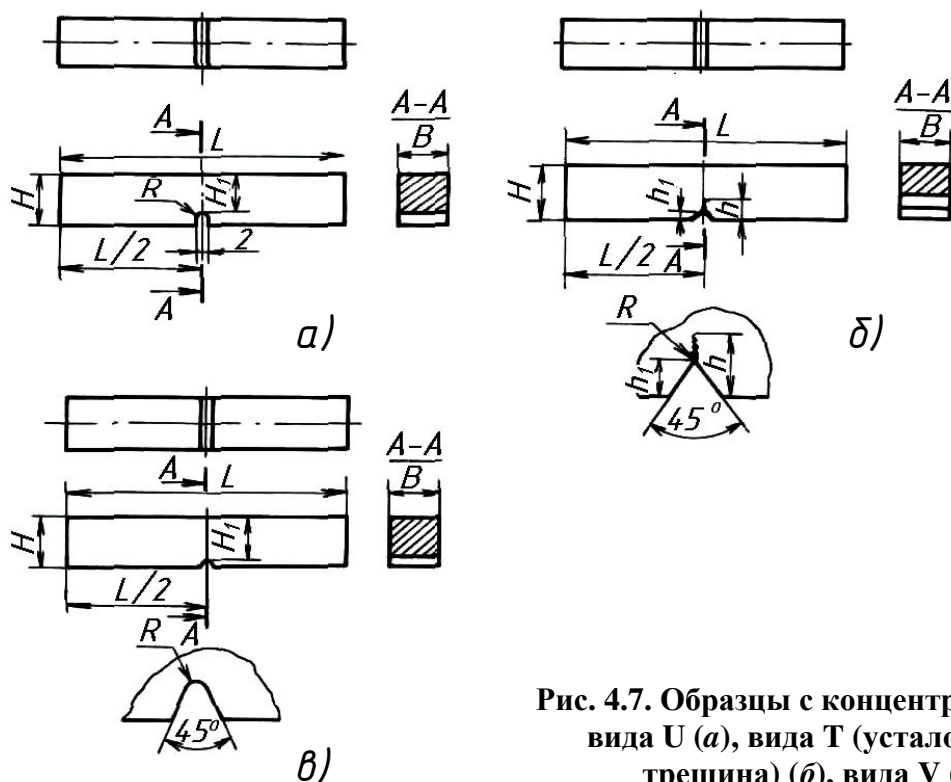


Рис. 4.7. Образцы с концентраторами: вида U (а), вида Т (усталостная трещина) (б), вида V (в)

В настоящее время применяют испытания на ударный изгиб образцов с концентраторами. Образцы устанавливаются на двух опорах и подвергаются воздействию ударной нагрузки падающего маятника. Разрушение происходит в плоскости надреза, и поэтому форма надреза и его размеры влияют на склонность материала к хрупкому разрушению. Испытания на ударный изгиб регламентированы ГОСТ 9454-78, который предусматривает использование 20 типов образцов, различающихся как собственными размерами, так и размерами концентраторов при трёх видах надрезов (рис. 4.7). Тип Т соответствует концентратору, содержащему усталостную трещину, которую получают в вершине начального надреза при циклическом изгибе образца в одной плоскости.

Работа удара. Она обозначается буквами (КУ, КV или КТ) и цифрами. Первая буква (К) – символ работы удара, вторая буква (U, V или T) – вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Например: КV⁻⁴⁰50/2/2 – работа удара, определённая на образце с концентратором вида V при температуре минус 40⁰С. Максимальная энергия маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм. Если испытания проводятся при комнатной температуре ($t=20 \pm 10^0$ С), то температура в обозначениях не проставляется.

Ударная вязкость (КС). Так называется отношение работы (K), необходимой для разрушения образца, к площади поперечного сечения A_0 в месте надреза. Вычисляется ударная вязкость по формуле

$$КС = \frac{K}{A_0}, \quad A_0 = H_1 B,$$

где H_1 – начальная высота рабочей части образца, м (см); B – начальная ширина образца, м (см); H_1 и B измеряются с погрешностью не более 0,00005 м (0,005 см). Площадь поперечного сечения округляют: при ширине образца 5 мм и менее – до третьей значащей цифры, при ширине образца более 5 мм – до второй значащей цифры. Значение КС записывается в протоколе с округлением до 1 (0,1) Дж/см² (кГ·м/см²), при КС > 10 (1) Дж/см² (кГ·м/см²) или до 0,1 (0,01) Дж/см² (кГ·м/см²) при КС < 10 (1) Дж/см² (кГ·м/см²).

Ударную вязкость обозначают сочетанием букв и цифр. Первые две буквы КС – символ ударной вязкости, третья буква – вид концентратора; первая цифра – максимальная энергия удара маятника, вторая – глубина концентратора и третья – ширина образца. Например:

КСТ⁺¹⁰⁰150/3/7,5 – ударная вязкость, определённая на образце с концентратором вида Т при температуре плюс 100⁰С. Максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Цифры не указывают при определении работы удара или ударной вязкости на копре с максимальной энергией удара маятника 294 (30) Дж (кГ·м), при ширине образца 10 мм, глубине концентратора 2 мм для концентраторов вида U и V и 3 мм для концентраторов вида Т.

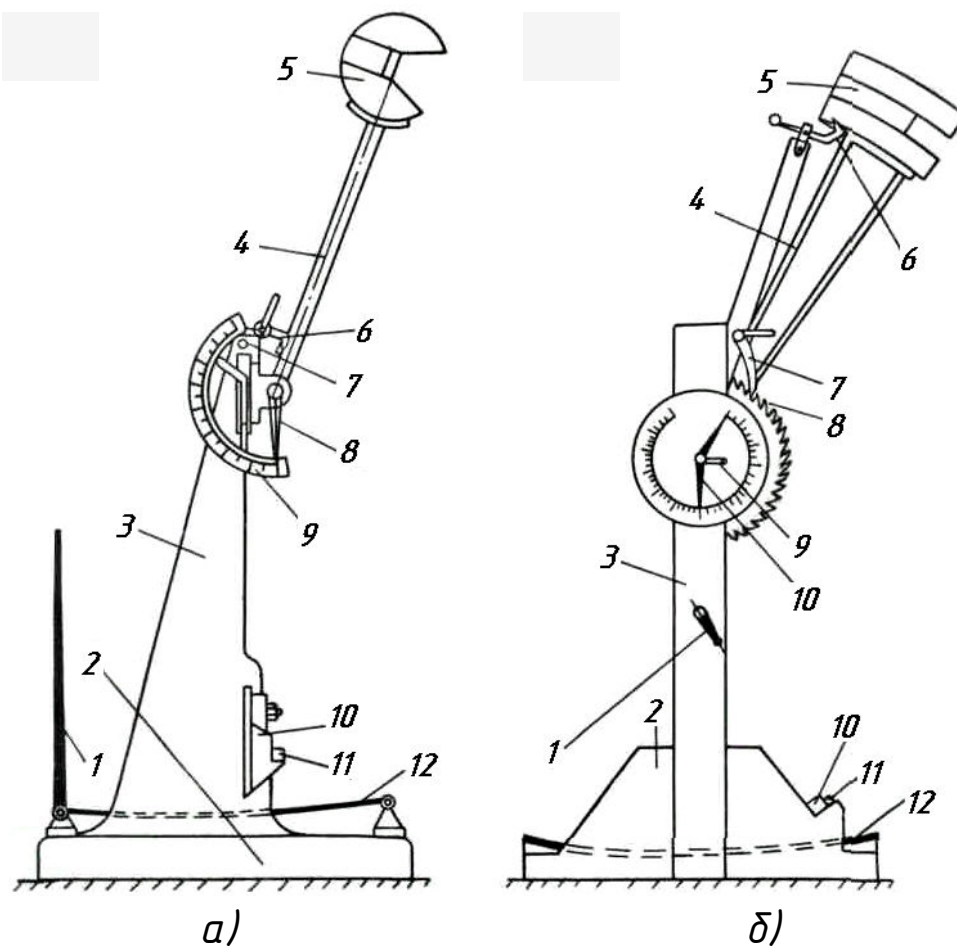


Рис. 4.8. Маятниковые копры для испытания на ударный изгиб: а – МК-15, б – МК-30А

Маятниковые копры. Для испытания материалов на ударный изгиб наибольшее распространение получили маятниковые копры. На рис. 4.8 показаны принципиальные схемы копров МК-15 и МК-30А. Цифра в маркировке копра показывает максимальную работу удара в кГ·м, которую может совершить копер при испытании образцов.

Копер состоит из чугунной станины в виде массивной плиты 2 с двумя вертикальными колоннами 3. В верхней части колонн на горизонтальной оси подвешен укрепленный в шарикоподшипниках маятник с грузом в виде стального плоского диска с вырезом 5, в котором закреплен стальной закаленный нож, служащий бойком при испытании (рис. 4.9). Внизу на уровне вертикально висящего маятника к колоннам станины прикреплены две стальные закаленные опоры 10, на которые помещают испытываемый образец 11. Под опорами между колоннами проходит тормозной ремень 12, который, прижимаясь к маятнику, качающемуся после удара, вызывает его торможение. Тормозной ремень приводится в действие или вручную специальной рукояткой 1 (копер МК-15), или автоматически рукояткой 1 (копер МК-30А).

Перед испытанием маятник поднимают на исходную высоту и удерживают его в этом положении защелкой 6 (в копре МК-30А эта высота зависит от того, в каком положении установлена защелка подъемной рамы 7 в храповике 8).

При испытании образца маятник освобождается от защелки 6, падая, ударяет образец, разрушает его и взлетает на некоторый угол, которым и определяется работа, затраченная на разрушение образца. Определение угла взлета маятника в копре МК-15 производится следующим образом. Стрелка 8, насаженная на оси маятника, свободно, но с некоторым трением в момент удара упирается в упор 7 у нулевого деления шкалы 9 (см. рис. 4.8, а). При взлете маятника стрелка остается неподвижной, а при обратном движении маятника, двигаясь, вследствие трения, вместе с маятником, показывает угол взлета маятника в градусах (рис. 4.10).

В копре МК-30А на оси маятника жестко закреплен поводок 9 (см. рис. 4.8, б). При прямом и обратном движении маятника поводок увлекает за собой соответственно одну или другую стрелку шкалы 10 и оставляет их в положении, фиксирующем работу (энергию) маятника до и после удара (перед на-

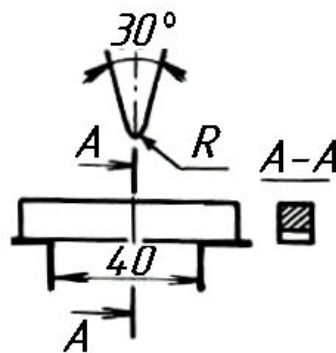


Рис. 4.9. Опоры и нож маятника

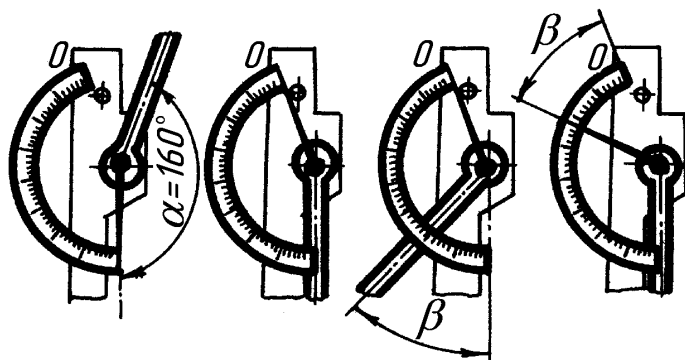


Рис. 4.10. Схема для определения угла взлета маятника

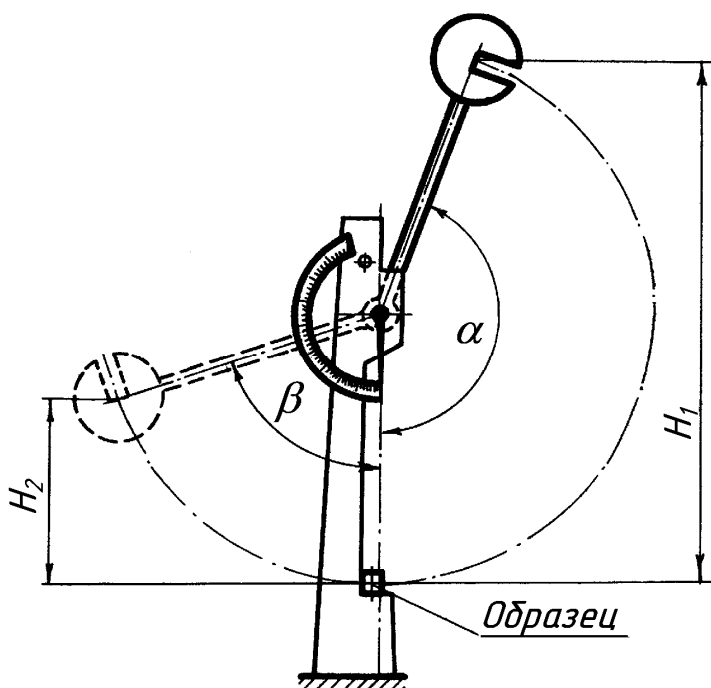


Рис. 4.11 Схема к определению энергии маятника до и после удара

мальной энергии удара применяемого маятника. Скорость движения маятника в момент удара, погрешность градуировки шкал копра, требования к термостатам, обеспечивающим равномерное охлаждение или нагрев образца, и термометры для измерения температуры контрольных образцов также регламентированы ГОСТ.

Проведение испытания. Разрушение образцов осуществляется на маятниковом копре (см. рис. 4.8, а). Испытуемый образец 11, размеры которого предварительно замеряют, устанавливают на опоры 10 надрезом в противоположную сторону от ножа маятника. Освобождение маятника производится с помощью рукоятки защелки. В копре МК-30А (рис. 4.8, б) маятник, пройдя нижнее положение и разрушив образец, поворачивает стрелку шкалы на угол, который соответствует энергии, сохранившейся в маятнике после разрушения образца. Работа, затраченная на разрушение образца, будет равна разности энергии маятника до и после удара.

В некоторых копрах (например, в МК-15) нет подъемной рамы, а шкала их проградуирована в градусах. В этом случае величина работы K , затраченная на излом образца, определяется как разность потенциальной энергии маятника в его положениях до и после удара (рис. 4.11) и вычисляется по формуле

$$K = Q(H_1 - H_2),$$

где Q – вес маятника; H_1 – высота его подъёма до удара; H_2 – высота его взлёта после удара.

Вводя соответствующие обозначения, получаем

чалом испытания необходимо проверить, чтобы при свободно висящем маятнике указатели стрелок совпадали с нулевым делением шкалы).

При записи значения максимальной энергии удара маятника, значения следует округлять соответственно до 5; 10; 50; 100; 150 и 300 Дж.

Маятниковые копры различаются максимальной энергией удара маятника: 4,9 (0,5); 9,8 (1,0); 49,0 (5,0); 98,0 (10,0); 147 (15); 294,0 (30) Дж (кГ·м).

Максимальная энергия удара маятника должна быть такой, чтобы значение работы удара составляло не менее 10% от макси-

$$H_1 = R + R \sin(\alpha - 90^\circ) = R(1 - \cos \alpha),$$

$$H_2 = R - R \cos \beta = R(1 - \cos \beta),$$

где R – длина маятника (расстояние от центра тяжести маятника до его оси вращения).

Тогда работа, затраченная маятником,

$$K = Q R \cos \beta = R (1 - \cos \beta).$$

Эту величину также можно определить из табл. 4.7 по углу β .

Таблица 4.7

Работа, затраченная на излом образца на маятниковом копре ($Q = 97.972$, $HR = 0.7945$)

β	K	β	K	β	K	β	K	β	K
0	150,98	32	139,16	64	107,27	96	65,01	128	25,22
1	150,97	33	138,43	65	106,04	97	63,66	129	24,16
2	150,94	34	137,68	66	104,80	98	62,31	130	23,11
3	150,88	35	136,91	67	103,56	99	60,97	131	22,08
4	150,80	36	136,12	68	102,30	100	59,63	132	21,06
5	150,69	37	135,31	69	101,04	101	58,29	133	20,06
6	150,56	38	134,42	70	99,77	102	56,96	134	19,07
7	150,40	39	133,64	71	98,49	103	55,64	135	18,10
8	150,23	40	132,77	72	97,20	104	54,31	136	17,13
9	150,03	41	131,89	73	95,90	105	53,00	137	16,22
10	149,80	42	130,99	74	94,60	106	51,69	138	15,30
11	149,55	43	130,07	75	93,29	107	50,39	139	14,40
12	149,28	44	129,14	76	91,98	108	49,09	140	13,52
13	148,99	45	128,19	77	90,65	109	47,80	141	12,65
14	148,67	46	127,22	78	89,33	110	46,52	142	11,81
15	148,33	47	126,23	79	87,99	111	45,25	143	10,98
16	147,97	48	125,23	80	86,66	112	43,99	144	10,17
17	147,58	49	124,21	81	85,32	113	42,73	145	9,38
18	147,18	50	123,18	82	83,98	114	41,49	146	8,61
19	146,74	51	122,13	83	82,63	115	40,25	147	7,86
20	146,29	52	121,70	84	81,28	116	39,02	148	7,13
21	145,82	53	119,99	85	79,92	117	37,80	149	6,42
22	145,32	54	118,90	86	78,57	118	36,60	150	5,73
23	144,80	55	171,79	87	77,22	119	35,41	151	5,07
24	144,25	56	116,67	88	75,86	120	34,23	152	4,42
25	143,69	57	115,54	89	74,50	121	33,06	153	3,79
26	143,11	58	114,39	90	73,14	122	31,90	154	3,18
27	142,50	59	113,24	91	71,79	123	30,75	155	2,60
28	141,87	60	112,06	92	70,43	124	29,62	156	2,04
29	141,22	61	110,88	93	69,07	125	28,50	157	1,49
30	140,55	62	109,69	94	67,72	126	27,39	158	0,97
31	139,87	63	108,48	95	66,36	127	26,30	159	0,48

Вопросы для самопроверки

1. Что такое работа удара?
2. Что такое ударная вязкость?
3. Чем вызвана необходимость проведения испытаний на ударный изгиб?
4. Роль надреза в образцах при испытаниях на ударный изгиб.
5. Какие виды надрезов в образцах предусматривает ГОСТ?
6. Дайте пример обозначения работы удара.
7. Как обозначается ударная вязкость?
8. В каких случаях не указываются цифры в обозначении ударной вязкости?
9. Устройство и принцип действия маятникового копра.
10. Порядок проведения испытания.

4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БРУСА ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ*

Основная цель – экспериментальная проверка теоретических формул для определения величин и направления главных напряжений в бруске при его изгибе с кручением; ознакомление с методикой определения на поверхности деталей величин деформаций с помощью тензометров – тензометрированием.

Общие сведения. Кроме испытаний материалов с целью определения их механических характеристик, в инженерной практике широкое распространение получили испытания конструкций с целью исследования напряженного состояния как конструкции в целом, так и ее отдельных узлов и деталей. Такие испытания позволяют оценить прочность конструкций, проверить точность теоретических расчетов.

К наиболее распространенным методам определения напряжений в конструкциях относится метод тензометрирования, который заключается в измерении с помощью тензометров (см. п. 3.1) величин деформаций на поверхности деталей с последующим вычислением на основе обобщенного закона Гука величин напряжений. В настоящее время в качестве тензометров преимущественно используются тензорезисторы, позволяющие автоматизировать процесс измерения деформаций.

На поверхности детали, где непосредственно не приложена внешняя нагрузка, имеет место плоское напряженное состояние. При экспериментальном исследовании напряженного состояния возможны три случая:

1. В исследуемой точке конструкции имеет место линейное напряженное состояние и известно направление напряжения σ (рис. 4.12, а).

* Материал параграфа используется при подготовке к лабораторной работе 9.

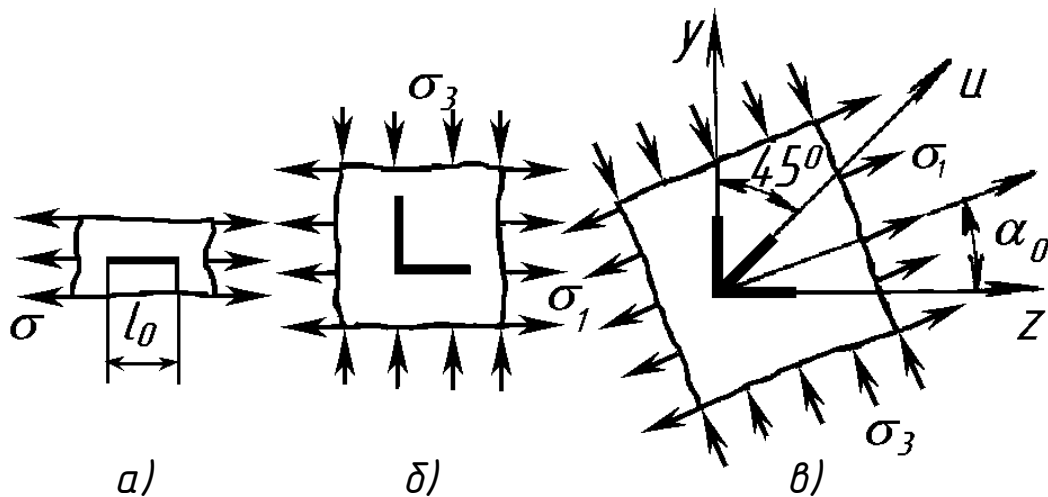


Рис. 4.12. Различные варианты установки тензометров

В этом случае для определения величины σ достаточно установить один тензометр с базой вдоль напряжений σ . Определив из опыта величину деформации ϵ при известном модуле продольной упругости E , значение σ находят согласно закону Гука:

$$\sigma = E\epsilon.$$

2. В исследуемой точке конструкции имеет место плоское напряженное состояние с известным направлением главных напряжений, к примеру, σ_1 и σ_3 (рис. 4.12, б). Для определения величин этих напряжений необходимо установить два тензометра, базы которых располагаются в направлении σ_1 и σ_3 . С помощью тензометров определяют величины главных деформаций ϵ_1 и ϵ_3 , после чего по соотношениям закона Гука при плоском напряженном состоянии находят значения главных напряжений:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_3),$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_3 + \nu\epsilon_1).$$

3. В исследуемой точке конструкции имеет место плоское напряженное состояние и не известно направление α_0 главных напряжений (рис. 4.12, в). В этом случае необходимо установить три тензометра в направлении осей z , y и под углом $\alpha = 45^\circ$ к ним (розетку тензометров).

Определив из опыта ϵ_z , ϵ_y , ϵ_u и используя зависимость

$$\epsilon_u = \epsilon_z \cos^2 \alpha + \epsilon_y \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \gamma_{zy} \sin 2\alpha,$$

вначале находят деформацию сдвига. При $\alpha = 45^\circ$

$$\gamma_{zy} = \epsilon_z + \epsilon_y - 2\epsilon_u. \quad (4.3)$$

Затем по обобщенному закону Гука определяют величину напряжений на двух взаимно перпендикулярных площадках:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_z + \nu\epsilon_y), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_y + \nu\epsilon_z), \\ \tau_{zy} &= G\gamma_{zy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{zy}.\end{aligned}\quad (4.4)$$

Величину и направление главных напряжений находят по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{гл}} &= \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2}, \\ \alpha_0 &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{2\tau_{zy}}{\sigma_z - \sigma_y} \right).\end{aligned}\quad (4.5)$$

Описание лабораторной установки. Исследуемая конструкция представляет собой образец в виде трубы 5 (рис. 4.13, а), закрепленной на жестком основании 4. К торцу свободного конца трубы прикреплена горизонтальная планка 6. Один конец ее соединен с тросиком 2, который перекинут через неподвижный блок 3. Другой ее конец и свободный конец тросика 2 соединены с подвесками для грузов 1 и 7. При наложении грузов на один конец планки 6 будет действовать сила P_2 , направленная вверх, а на другой – P_1 , направленная вниз. При $a_1 = a_2$ и $P_1 = P_2$ образец испытывает чистое кручение, при $P_1 \neq P_2$ – кручение с изгибом.

Для замера деформаций на поверхности образца наклеена розетка из трех тензорезисторов (рис. 4.13, б). (Описание работы тензорезисторов см. в п. 3.1).

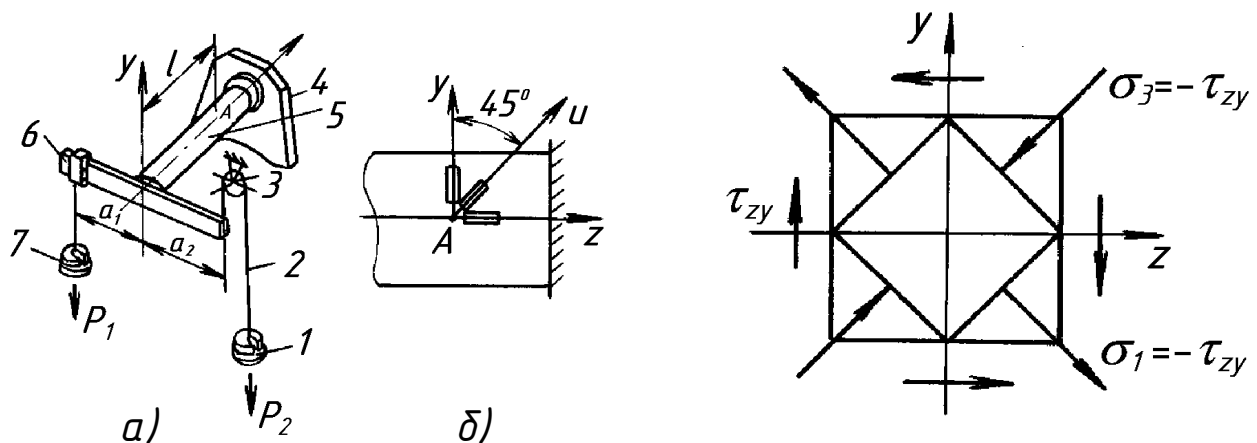


Рис. 4.13. Схема лабораторной установки

Рис. 4.14. Напряженное состояние бруса при его кручении

Проведение испытаний. На первом этапе испытаний ведется тарировка тензорезисторов и измерительного прибора, целью которой является определение цены деления показаний прибора в величинах относительной деформации – тарировочного коэффициента n . С этой целью проводится нагружение образца усилиями $P_1 = P_2 = P$, что создает условия чистого кручения бруса и в исследуемой точке, где установлены тензорезисторы, возникает состояние чистого сдвига (рис. 4.14).

При изменении нагрузки на величину $\Delta P = P_k - P_0$ от своего начального значения P_0 до конечного P_k , в исследуемой точке в направлении главного напряжения σ_1 возникает линейная относительная деформация, величина которой может быть определена по формуле

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_3) = \frac{1}{E}(\tau_{zy} + \nu\tau_{zy}) = \frac{\tau_{zy}(1+\nu)}{E} = \frac{M_z(1+\nu)}{W_p E}, \quad (4.6)$$

где $M_z = \Delta P \cdot 2a$ – крутящий момент, соответствующий приращению нагрузки на величину ΔP .

По показаниям прибора величина деформации определяется соотношением

$$\varepsilon_1 = n \Delta C_{cp}, \quad (4.7)$$

где ΔC_{cp} – средняя (по трем замерам) разность показаний прибора для тензорезистора с направлением u , соответствующая изменению нагрузки на ΔP .

Приравнявая (4.6) и (4.7), получим формулу для тарировочного коэффициента:

$$n = \frac{M_z(1+\nu)}{W_p E \Delta C_{cp}}.$$

На втором этапе брус загружают усилиями $P_1 \neq P_2$, что вызывает одновременно его изгиб и кручение. Для каждого из трех тензорезисторов с направлениями z , u по средней разности показаний прибора ΔC_{cp} (по трем измерениям), соответствующих изменению нагрузки, $\Delta P_1 = P_{1k} - P_{10}$, $\Delta P_2 = P_{2k} - P_{20}$ используя соотношение (4.7), определяют величины относительных линейных деформаций ε_z , ε_u .

По формулам (4.3) – (4.5) находят величины главных напряжений σ_1 и σ_3 и положение главных площадок α_0 . Полученные значения сравниваются с величинами, определенными теоретическими расчетами по известным значениям крутящего момента $M_z = (\Delta P_1 + \Delta P_2) a$ и изгибающего момента, $M_x = (\Delta P_1 - \Delta P_2) l$, где l – расстояние от торцевого сечения трубы до исследуемой точки:

$$\sigma_z = \frac{M}{W}; \quad \tau_{zy} = \frac{M_z}{W_p}; \quad \sigma_{гп} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2}; \quad \alpha_0 = \frac{1}{2} \arctg\left(-\frac{2\tau_{zy}}{\sigma_z}\right).$$

Результаты замеров и расчетов заносятся в таблицу.

Вопросы для самопроверки

- 1. Как следует устанавливать тензометры при линейном напряженном состоянии и при плоском, когда известно и не известно направление главных напряжений? Как в каждом из этих случаев определяются напряжения?*
- 2. Как следует установить тензометры для определения максимальных нормальных напряжений при растяжении, изгибе, кручении бруса?*
- 3. Какие физические характеристики материала должны быть известны при определении напряжений методом тензометрирования?*
- 4. Какая величина измеряется на конструкции при тензометрировании?*
- 5. Как с помощью тензометров определить деформацию сдвига?*
- 6. Как проводится в работе тарировка тензорезисторов? Можно ли осуществить тарировку при растяжении, изгибе бруса?*
- 7. Как определяются методом тензометрирования напряжения в бруске при его изгибе с кручением?*

5. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПЫТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Все экспериментальные исследования, проводимые в **лаборатории сопротивления материалов**, сопровождаются измерением различных физических величин. Измерить физическую величину – значит сравнить её с другой однородной величиной, принятой за единицу измерения.

Одним из основных требований к данным, получаемым в результате опыта, должна быть их сравнимость. Сравнить же можно лишь результаты, имеющие одинаковую точность. Отсюда появляется необходимость определения точности и надежности получаемых опытных данных. Отметим, что отсутствие знания погрешности результатов сводит ценность опыта к нулю. Степень точности результатов эксперимента зависит от употребляемых при измерениях машин и приборов, а также от общих методов измерений.

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЕЙ

При выполнении лабораторных работ имеют место два последовательных процесса: *измерения*, производимые во время работы, и *вычисления*, которые выполняются при обработке результатов.

С точки зрения общих приемов получения результатов измерений различают прямые и косвенные измерения физических величин.

К *прямым измерениям* относятся такие, результат которых получается непосредственно из опытных данных измерения. Примерами этих измерений являются: измерение длины посредством разделительной линейки, времени – посредством часов, массы – при помощи гирь на равноплечих весах, температуры – термометром и т. д.

Косвенными измерениями называют такие, результат которых получается на основании опытных данных прямых измерений нескольких величин, связанных с искомой величиной известной функциональной зависимостью. Как пример косвенного измерения можно привести определение плотности D тела, имеющего форму цилиндра, на основании прямых измерений его массы m , диаметра d и высоты h :

$$D = \frac{m}{\frac{\pi d^2}{4} h} .$$

Результат всякого измерения, с какой бы точностью оно ни выполнялось, дает не истинное значение измеряемой величины, а лишь приближенное, более или менее близкое к истинному значению.

Искажения, вносимые в результаты измерений из-за несовершенства измерительной аппаратуры, органов чувств наблюдателя, а также методов и усло-

вий измерения, называются погрешностями (ошибками) измерений; они указывают на степень достоверности полученного значения измеряемой величины.

Согласно общепринятой классификации, погрешности измерения делятся на три класса: а) систематические, б) случайные, в) промахи.

Систематическими называются погрешности, постоянные по величине и знаку или изменяющиеся по определенному закону. Примеры систематических погрешностей: погрешности мер от неточной их доводки; погрешности показаний измерительных приборов вследствие неправильной градуировки шкал; погрешности мер и измерительных приборов, вызываемые неправильной их установкой, изменением температуры и т. д.

Увеличение числа измерений не уменьшает влияния этих ошибок. Их можно исключить опытным путем, если ввести найденные из наблюдений поправки или расположить наблюдения определенным образом. Результаты измерений постольку правильны, поскольку они не искажены систематическими погрешностями, и тем правильнее, чем меньше эти погрешности.

Случайными называют неопределенные по своей величине и природе погрешности, в появлении которых не наблюдается какой-либо закономерности. Их наличие подтверждается тем, что в случае повторных измерений одной и той же величины в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью числовые результаты отличаются последними значащими цифрами. Случайные погрешности вызываются неточностью отсчетов, и причины их кроются как в несовершенстве наших органов чувств, так и в других обстоятельствах, сопровождающих измерения, которые трудно учесть.

Случайные погрешности не могут быть исключены опытным путем, но их влияние на результат может быть найдено по законам теории вероятностей. Многократное повторение одного и того же измерения уменьшает влияние случайных погрешностей.

Промахами называют погрешности, приводящие к явному искажению результатов измерений. Примеры промахов: неправильный отсчет по шкале измерительного прибора, неверная запись отсчетов, пропуски в наблюдениях, неправильные манипуляции с приборами и др. Наличие промахов определяет годность измерений. Наблюдения, содержащие промахи, должны быть отброшены, как не заслуживающие доверия.

5.2. АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТИ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В большинстве случаев при опытном определении какой-либо физической величины приходится произвести ряд отдельных измерений, а затем полученные численные значения подставить в формулу, служащую для определения искомой величины. Так, например, при определении модуля упругости при растяжении необходимо измерить абсолютное удлинение образца, длину образца

(базу), площадь его поперечного сечения, а также силу, вызвавшую данное упругое удлинение образца. Каждое отдельное измерение выполняется с определенной точностью, причем погрешность результата будет зависеть от степени точности отдельных измерений и от математических операций, которые производятся над ними. Оценивая погрешности опытного определения тех или иных величин, можно сравнивать опытные данные с теоретическими. Расхождение между опытными и теоретическими значениями исследуемой величины зависит как от погрешности опыта, так и от точности принятых в теоретическом выводе гипотез и допущений.

За характеристику степени точности какого-либо измерения проще всего принять абсолютную погрешность.

Абсолютной погрешностью определения какой-либо величины называют разность между точным (истинным) и приближенным, определенным путем измерения или опыта, значениями этой величины. Наибольшая возможная абсолютная погрешность называется пределом абсолютной погрешности. Он зависит от типа и конструкции измерительного прибора и может быть принят равным половине цены наименьшего его деления. Так, например, предел абсолютной погрешности измерения какого-либо линейного размера штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм составляет 0,05 мм. Если тензометр (прибор для измерения малых деформаций) имеет шкалу с делениями 1 мм и дает увеличение в K раз, то предел абсолютной погрешности измерения этим тензометром будет равен $\frac{0,5}{K}$ мм.

Значение абсолютной погрешности какого-либо измерения еще не характеризует качество последнего. Например, стержень длиной в 2 м измерен с точностью до 0,5 мм и толщина образца диаметром 2 см измерена с той же самой точностью. Очевидно, эти измерения неравноценны. Поэтому удобнее пользоваться понятием относительной погрешности.

Относительной погрешностью ϵ_N определения какой-либо величины N называют отношение абсолютной погрешности δN к точному значению данной величины:

$$\epsilon_N = \frac{\delta N}{N}. \quad (5.1)$$

Относительные погрешности величин принято выражать в процентах:

$$\epsilon_N \% = 100\epsilon_N = \frac{\delta N}{N} 100. \quad (5.2)$$

Из формулы (5.1) получим

$$\delta N = N\epsilon_N. \quad (5.3)$$

Таким образом, абсолютная погрешность какой-либо величины равна произведению этой величины на ее относительную погрешность.

Наибольшая возможная относительная погрешность называется пределом погрешности. Предел относительной погрешности $\epsilon_{N_{\max}}$ определения какой-либо величины равен отношению предела абсолютной погрешности δN_{\max} к самой величине N , т. е.

$$\epsilon_{N_{\max}} = \frac{\delta N_{\max}}{N}. \quad (5.4)$$

Из формулы (5.4) следует, что наибольшая возможная относительная погрешность будет тем меньше, чем меньше будет δN_{\max} и чем больше N .

Для уменьшения величины δN_{\max} следует применять возможно более точные и выверенные машины и приборы; при данных машинах и приборах величина δN_{\max} мало зависит от лица, проводящего опыт, а поэтому для понижения относительной погрешности следует увеличивать N . В ряде случаев это может быть достигнуто при проведении опыта увеличением интервала измерения силы или деформации, а если позволяет конструкция машины, то увеличением размеров испытываемого образца.

При проведении опытов иногда, например, для получения графической зависимости между силой и вызываемой ею деформацией, нагружение образца производится равными ступенями, при этом в формулу, служащую для определения искомой величины, подставляют средние значения приращения нагрузки и вызванной ею деформации. Если среднее приращение из n измерений определяемой величины за одну ступень равно $N_{\text{ср}}$, а предел абсолютной погрешности $\delta N_{\text{ср}}$, то предельна относительная погрешность. При этом $\epsilon_{\text{ср}}$ будет равен:

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{\delta N_{\text{ср}}}{n N_{\text{ср}}}. \quad (5.5)$$

Все задачи приближенного вычисления делятся на две группы. Первая определяет предел погрешности окончательного результата при известных погрешностях величин, входящих в данную формулу, вторая – необходимую степень точности отдельных величин, входящих в вычисляемую формулу, по заданной погрешности результата.

В первой группе задач известными являются приближенные числовые значения величин и их погрешности, и по этим данным определяется погрешность результата. Во второй группе – наперед задается погрешность окончательного результата и по ней требуется подобрать значения входящих в формулу величин с требуемой точностью.

В большинстве случаев для получения окончательного результата опыта надо с полученными числовыми значениями измеряемых величин произвести различные математические вычисления. Так как ошибки измерений достаточно малы, то для их вычисления можно пользоваться дифференциальным исчислением.

В общей теории ошибок доказываются следующие положения:

а) абсолютная погрешность результата вычисления функции многих независимых переменных равна сумме абсолютных величин всех частных дифференциалов этой функции;

б) относительная погрешность результата вычисления функции многих независимых переменных равна дифференциалу натурального логарифма этой функции, причем следует брать сумму абсолютных величин всех членов этого выражения.

Так, если величина N является функцией многих независимых переменных, то есть, если $N = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, то абсолютная δN и относительная ϵ_N погрешности функции N определяются следующими выражениями:

$$\delta N = \pm \left[\left| \frac{\partial N}{\partial x_1} dx_1 \right| + \left| \frac{\partial N}{\partial x_2} dx_2 \right| + \left| \frac{\partial N}{\partial x_3} dx_3 \right| + \dots + \left| \frac{\partial N}{\partial x_n} dx_n \right| \right], \quad (5.6)$$

$$\epsilon_N = \pm \frac{\delta N}{N} = \pm d \left[\ln f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \right]. \quad (5.7)$$

Из общих формул (5.6), (5.7) можно получить следующие правила для определения погрешностей результатов основных действий:

а) абсолютная погрешность алгебраической суммы равна сумме абсолютных погрешностей слагаемых;

б) относительная погрешность суммы равна относительной погрешности наименее точного из всех слагаемых;

в) относительная погрешность произведения равна сумме относительных погрешностей всех сомножителей;

г) относительная погрешность частного равна сумме относительных погрешностей делимого и делителя;

д) относительная погрешность степени равна показателю степени, умноженному на относительную погрешность основания. Это верно и для дробного показателя, то есть для случая извлечения корня.

Применяя эти теоремы, легко определить погрешность результата опыта.

Так, например, относительная погрешность величины

$$N = \frac{a \cdot b^m}{c \cdot \sqrt[n]{d}} \quad (5.8)$$

составит:

$$\epsilon_N = \frac{\delta N}{N} = \frac{\delta a}{a} + m \frac{\delta b}{b} + \frac{\delta c}{c} + \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta d}{d}. \quad (5.9)$$

Из формулы (5.9) видно, что возведение в степень увеличивает погрешность, а извлечение корня ее снижает.

В табл. 5.1 приведены значения абсолютных и относительных погрешностей при различных математических операциях.

Таблица 5.1

Значения абсолютных и относительных погрешностей

Математическая операция	П о г р е ш н о с т и	
	абсолютная	относительная
$N = a + b + c$	$\pm (\delta a + \delta b + \delta c)$	$\pm \frac{\delta a + \delta b + \delta c}{a + b + c}$
$N = a - b$	$\pm (\delta a + \delta b)$	$\pm \frac{\delta a + \delta b}{a - b}$
$N = a b$	$\pm (a \delta b + b \delta a)$	$\pm \left(\frac{\delta a}{a} + \frac{\delta b}{b} \right)$
$N = a^n$	$\pm n \cdot a^{n-1} \cdot \delta a$	$\pm n \frac{\delta a}{a}$
$N = \sqrt[n]{a}$	$\pm \frac{1}{n} a^{\frac{1}{n}-1} \cdot \delta a$	$\pm \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta a}{a}$
$N = \frac{a}{b}$	$\pm \frac{b \delta a + a \delta b}{b^2}$	$\pm \left(\frac{\delta a}{a} + \frac{\delta b}{b} \right)$
$N = \sin a$	$\pm \cos a \cdot \delta a$	$\pm \operatorname{ctg} a \cdot \delta a$
$N = \cos a$	$\pm \sin a \cdot \delta a$	$\pm \operatorname{tg} a \cdot \delta a$
$N = \operatorname{tg} a$	$\pm \frac{\delta a}{\cos^2 a}$	$\pm \frac{2 \delta a}{\sin 2a}$
$N = \operatorname{ctg} a$	$\pm \frac{\delta a}{\sin^2 a}$	$\pm \frac{2 \delta a}{\sin 2a}$

5.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

С точки зрения точности измерения могут быть выполнены техническими и лабораторными методами.

В технических методах измерение производится один раз, при этом погрешность измерения не превышает наперед заданного значения, определяемого погрешностью примененной измерительной аппаратуры.

В лабораторных методах измерений требуется более высокая точность измеряемой величины. В этом случае для повышения точности производят многократные измерения при одинаковых условиях опыта, исключают систематические погрешности и вычисляют среднее арифметическое из всех полученных значений, которое принимается за наиболее достоверное значение измеряемой величины в случае измерений одинаковой точности (постулат среднего арифметического). Далее, воспользовавшись теорией вероятности, производят оценку точности результата многократных измерений (учет случайных погрешностей).

Из возможности проведения измерений двумя методами вытекает и два метода производства оценки точности измерений: технический и лабораторный.

Оценка точности результата многократных прямых измерений. Определяют среднее арифметическое результата L :

$$L = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{n},$$

где $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ – результаты n отдельных измерений.

Надежность среднего значения L тем больше, чем меньше остаточные абсолютные погрешности отдельных измерений Δl_i :

$$\Delta l_i = l_i - L.$$

Оценку точности отдельных измерений принято характеризовать средней квадратичной абсолютной погрешностью σ ряда измерений:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 + \Delta l_3^2 + \dots + \Delta l_n^2}{n-1}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta l_i^2}{n-1}}.$$

В теории вероятностей доказывается, что значение предельной абсолютной погрешности отдельного измерения δ_{lim} не превышает 3σ . Если же предельная абсолютная погрешность $\delta_{\text{lim}} > 3\sigma$, то это измерение следует отнести к грубым погрешностям или промаху.

Для оценки точности результата нескольких отдельных прямых измерений принято пользоваться предельной абсолютной погрешностью λ_{lim} или вероятной погрешностью результата R . При этом

$$\lambda_{\text{lim}} \approx \Delta l_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{|\Delta l_1| + |\Delta l_2| + |\Delta l_3| + \dots + |\Delta l_n|}{n}.$$

Результат измерения записывают так:

$$L_0 = L \pm \lambda_{\text{lim}}.$$

Не приводя вывода, дадим конечную формулу для вероятности погрешности результата R :

$$R = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\sum \Delta l_i^2}{n(n-1)}}.$$

В этом случае результат измерений должен быть записан так:

$$L_0 = L \pm R.$$

Чем меньше R , тем надежнее результаты измерений, тем лучше можно считать себя гарантированным от случайных ошибок.

При достаточно большом числе измерений одной и той же величины можно свести вероятность ошибок до минимума.

Приведенными ранее формулами теории погрешностей можно пользоваться, если число измерений составляет не менее 5 – 10.

Оценка точности результата одного прямого измерения (технический метод). Если в процессе многократных измерений измерительный прибор (измерительная установка) дает одни и те же показания, то многократность измерений теряет смысл – достаточно провести измерение один раз. Это имеет место, очевидно тогда, когда абсолютная погрешность рабочего измерительного прибора будет больше, чем остаточные абсолютные погрешности отдельных измерений. Следовательно, абсолютная погрешность результата технического измерения не может быть больше, чем абсолютная погрешность рабочего измерительного прибора, которая указывается в его техническом паспорте. Предельная абсолютная погрешность результата технического измерения принимается равной абсолютной погрешности измерительного прибора или половине цены деления его шкалы.

Оценка точности результата косвенных измерений. Когда все измерения, нужные для определения искомой величины, закончены, необходимо на основании их вычислить окончательный результат. При этом нет никакого смысла выполнять вычисления выше предела точности непосредственно измерившихся величин. Таким образом, точностью измерения определяются и те способы, с помощью которых следует вести вычисление.

Значения предельной и абсолютной погрешности результата однократного косвенного измерения по известным погрешностям величин, входящих в данную формулу, определяются согласно табл. 5.1.

В случае проведения косвенных измерений лабораторным методом (многократные измерения), прежде всего оценивают точность каждого отдельного измерения, приняв за достоверное значение измеряемой величины среднее арифметическое из полученных результатов. Остаточные погрешности отдельных косвенных измерений не должны превышать предельной погрешности результата косвенного измерения, полученной техническим методом, то есть рассчитанной на основе учета погрешности измерительной аппаратуры.

Если остаточные погрешности отдельных косвенных измерений оказались больше предельной погрешности результата косвенного измерения, то в соответствующих измерениях имели место грубые погрешности или промахи, и эти измерения должны быть отброшены. Для получения достоверного значения измеряемой величины рекомендуется отдельные косвенные измерения проводить, видоизменяя постановку эксперимента.

В качестве примера найдем наибольшую возможную относительную погрешность определения модуля продольной упругости E стали по упругим удлинениям образца. Известно, что упругое удлинение Δl прямого стержня на основании закона Гука определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{P l}{E A},$$

отсюда получаем следующее выражение для модуля продольной упругости:

$$E = \frac{P l}{\Delta l A}, \quad (5.10)$$

где P – сила, вызывающая удлинение;

l – измеряемая длина образца, равная базе тензометра

A – начальная площадь, равная базе тензометра;

Подставляя в формулу (5.10) значения усилий и отсчеты по зеркальному прибору в начале и конце опыта, получим следующую формулу для определения модуля продольной упругости:

$$E = \frac{2K(P_k - P_n)l}{A[(C_{1к} + C_{2к}) - (C_{1н} + C_{2н})]} = \frac{2K\Delta Pl}{A\Delta C_{cp}}. \quad (5.11)$$

$$\text{Здесь } \Delta l = \frac{(C_{1к} + C_{2к}) - (C_{1н} + C_{2н})}{2K} = \frac{\Delta C_{cp}}{2K}, \quad (5.12)$$

$K = 500$ – увеличение зеркального прибора.

Опыт производился с круглым образцом $d=15,0$ мм; удлинение на базе $l=100$ мм замерялось с помощью зеркального прибора Мартенса; усилие, действующее на образец, определялось по шкале испытательной машины, цена деления которой равна 25 кг. Средняя сумма отсчетов по шкалам на ступень нагрузки $\Delta P=500$ кг равна $\Delta C_{cp}=14,1$ мм.

Начальная площадь поперечного сечения образца при диаметре $d = 15,0$ мм:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 15,0^2}{4} = 177 \text{ мм}^2.$$

Согласно формуле (5.11), значение модуля продольной упругости будет:

$$E = \frac{500 \cdot 100 \cdot 2 \cdot 500}{177 \cdot 14,1} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2.$$

Относительная погрешность $\frac{\delta E}{E}$ определения величины E , согласно (5.10),

выражается формулой:

$$\epsilon_E = \frac{\delta E}{E} = \frac{\delta P}{P} + \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \Delta l}{\Delta l} + \frac{\delta A}{A}.$$

Из формулы (5.12) следует, что абсолютная погрешность измерения Δl зависит от точности отсчета по шкале зеркального прибора и при четырех отсчетах составит $\delta \Delta l = 4\delta C$, где δC равна половине цены деления шкалы.

Если число ступеней загрузки равно n , то окончательная формула для определения относительной погрешности примет вид:

$$\varepsilon_E = \frac{\delta E}{E} = \frac{2\delta P}{nP} + \frac{\delta l}{l} + \frac{4\delta C}{\Delta C_{\text{cp}} n} + \frac{\delta A}{A}.$$

Нагрузка ΔP , соответствующая одной ступени загрузки, определяется как разность конечного и начального значения нагрузки $\Delta P = P_{\text{к}} - P_{\text{н}}$. Наибольшая абсолютная погрешность измерения силы равна половине цены деления шкалы и составляет 12,5 кг. Относительная погрешность измерения силы при двух отсчетах и числе ступеней загрузки $n = 5$ составит:

$$\frac{2\delta P}{nP} = \frac{2 \cdot 12,5}{5 \cdot 500} = 0,01.$$

Абсолютную погрешность расчетной длины образца (база зеркального тензометра) можно принять равной $\delta l = 0,1$ мм, тогда относительная погрешность измерения l равна

$$\frac{\delta l}{l} = \frac{0,1}{100} = 0,001.$$

Так как цена деления шкал прибора Мартенса составляет 1 мм, то абсолютная погрешность отсчета по шкалам зеркального прибора равна $\delta C = 0,5$ мм, при этом относительная погрешность отсчета будет:

$$\frac{4\delta C}{n\Delta C_{\text{cp}}} = \frac{4 \cdot 0,5}{5 \cdot 14,1} = 0,0284.$$

Принимая во внимание, что $A = \frac{\pi d^2}{4}$, относительная погрешность определения площади поперечного сечения образца составит:

$$\frac{\delta A}{A} = \frac{\delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\delta d}{d}.$$

Абсолютная погрешность приближенного значения π :

$$\delta \pi = 3,14159 - 3,14 = 0,0016.$$

Диаметр образца измеряется штангенциркулем с ценой деления, равной 0,1 мм, поэтому $\delta d = 0,05$ мм.

Тогда относительная погрешность определения площади поперечного сечения образца будет:

$$\frac{\delta A}{A} = 0,0005 + 0,0067 = 0,0072.$$

Наибольшая возможная относительная погрешность определения E , следовательно, равна:

$$\frac{\delta E}{E} = (0,01 + 0,001 + 0,0284 + 0,0072) 100 = 4,7\%.$$

Абсолютная погрешность определения E равна

$$\delta E = 0,047 \cdot 2 \cdot 10^4 = 0,09 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2.$$

Окончательный результат определения величины модуля записывается так:

$$E = (2 \pm 0,09) \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2,$$

т. е. истинное значение E лежит в пределах $1,91 \cdot 10^4 \div 2,09 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$.

В заключение отметим, что необходимо не только тщательно производить измерения, но также точно и своевременно их регистрировать, так как небрежности, допущенные при записи измерений, могут привести к грубым ошибкам и неправильным выводам при обработке результатов работы. На основании произведенных измерений, занесенных в бланк-отчет к лабораторным работам, производится окончательная обработка результатов измерений, вычисляются ошибки измерений, и составляется отчет по работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ «СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

Лаборатория сопротивления материалов НГТУ в настоящее время оборудована всеми необходимыми для испытания материалов и проведения научных исследований современными испытательными машинами. Они различаются следующими типами:

1. Разрывные машины, позволяющие прикладывать к образцу только растягивающие усилия.
2. Прессы для получения только сжимающих усилий.
3. Универсальные машины, создающие как растягивающую, так и сжимающую нагрузку и позволяющие проводить испытания на изгиб.
4. Машины, загружающие образец скручивающим моментом.
5. Машины, воспроизводящие динамические нагрузки.

Почти все машины состоят из следующих основных частей:

- собственно машины, предназначенной для деформирования образца (основание машины, подвижный и неподвижный захваты и т. д.);
- привода (электрического или электрогидравлического), предназначенного для создания усилия, действующего на испытываемый образец;
- силоизмерителя (маятникового или рычажного, с диаграммным аппаратом или без него), который регистрирует усилие, производящее деформирование образца.

В лаборатории установлено следующее оборудование:

1. Винтовые машины для испытаний на растяжение:
 - испытательная машина *ИМ-12А*^{*}, эта машина позволяет растягивать образец и строить в большом масштабе диаграмму сил,
 - испытательная машина *УМЭ-10Т*, имеет диаграммный аппарат с увеличением до 2000 раз.
2. Прессы, создающие только сжимающую нагрузку:
 - пресс инженера А. Г. Гагарина с максимальным сжимающим усилием 5 т; позволяет при испытании построить в большом масштабе диаграмму сил,
 - прибор для определения твердости материала по методу Бринелля (*ТШ-2М*),
 - прибор для определения твердости материала по методу Роквелла (*ТК-2М*).
3. Универсальные машины с электрогидравлическим приводом:

* Цифра у марки машины показывает максимальную нагрузку в тоннах, которую она может создать.

- гидравлическая машина системы *Amsler-50*,
 - испытательная машина *ГРМ-1-50*, эта машина позволяет создавать и циклическую нагрузку,
 - испытательная машина *УИМ-50*,
 - испытательная машина *ГМС-50*,
 - испытательная машина *ГМС-100*,
 - испытательная машина *СДМУ-30*, дает возможность одновременно растягивать, скручивать образец и подвергать его внутреннему давлению. Снабжена диаграммными аппаратами.
4. Универсальные машины с электромеханическим приводом:
- испытательная машина *УМ-0,05*,
 - испытательная машина *УМ-0,5*.
5. Машины для испытания на кручение:
- горизонтальная машина *КМ-50* (максимальный скручивающий момент 50 кГм),
 - вертикальная машина *КМ-50-1* (максимальный скручивающий момент 50 кГм).
6. Маятниковые копры для испытания на удар:
- маятниковый копер *МК-15* (максимальная работа, производимая копром 15 кГм),
 - маятниковый копер *МК-30А* (максимальная работа, производимая копром 30 кГм).
7. Машины, воспроизводящие динамическую нагрузку:
- испытательная машина *УКИТ-3000*, создающая знакопеременную нагрузку, меняющуюся по симметричному циклу.
8. Поляризационно-оптическая установка *FMB*.

Кроме этих машин, в лаборатории имеется много специальных установок, которые позволяют студентам изучать поведение элементов конструкций при различных деформациях, таких как нахождение в статически определимых и статически неопределимых балках и рамах реакций, напряжений и перемещений; изучение поведения тонкостенных балок открытого профиля при изгибном кручении и косом изгибе, и др.

Таким образом, имеющееся в лаборатории оборудование дает возможность осуществлять все испытания, которые обычно проводятся в подобных специализированных лабораториях: определять механические характеристики прочности и пластичности (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности, относительное остаточное удлинение, относительное поперечное сужение), находить упругие характеристики материала (модули упругости и коэффициент Пуассона), твердость материала и его ударную вязкость. Кроме того, в лаборатории можно исследовать напряженное состояние на образцах, моделях и элементах конструкций как во время учебных занятий, так и в процессе научных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Афанасьев А. М., Марьин В. А.** Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. – М.: Высш. шк., 1975.
2. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: Учеб. пособие / Под ред. Ю.В. Глявина / ГПИ. Горький, 1963.
3. **Глявин Ю. В., Ермаков В. А. и др.** Испытание материалов и элементов конструкций: Учеб. пособие / ГПИ. Горький, 1979.
4. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986.
5. ГОСТ 9012-59. Метод измерения твердости по Бринеллю. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
6. ГОСТ 9013-59. Метод измерения твердости по Роквеллу. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
7. ГОСТ 9454-78. Метод испытания на ударный изгиб. – М.: Изд-во стандартов, 1978.
8. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
9. **Степин П.А.** Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 1988.
10. **Потапов Б.В., Кисленков В.В., Кондратьев С.Ю., Анисимов М.И.** Механические испытания металлов: Лабораторный практикум. – Л.: ЛПИ, 1988.
11. РД 50-260-81. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
12. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983.
15. **Беляев Н. М.** Лабораторные работы по сопротивлению материалов. – М.: Гостехиздат, 1951.
16. **Тимошенко С. П.** История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями об истории теории упругости и теории сооружений. – М.: Гостехиздат, 1957.
17. **Шапошников Н. А.** Механические испытания материалов. – М.: Машгиз, 1954.
18. Механические испытания материалов: Лабораторный практикум / Сост.: А.Н. Гуцин, А.Г. Кипарисов и др. / НГТУ. Н. Новгород, 1992.
19. **Малинин Н.Н.** Кто есть кто в сопротивлении материалов. – М.: МГТУ, 2002.

Глявин Юрий Викторович
Кипарисов Алексей Глебович
Миронов Анатолий Алексеевич
Михеев Николай Николаевич
Жуков Александр Евгеньевич

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Редактор Е. В. Комарова
Компьютерный набор и верстка А. Е. Жуков

Подписано в печать 16.11.2005. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 1000 экз. Заказ 734.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603600, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.