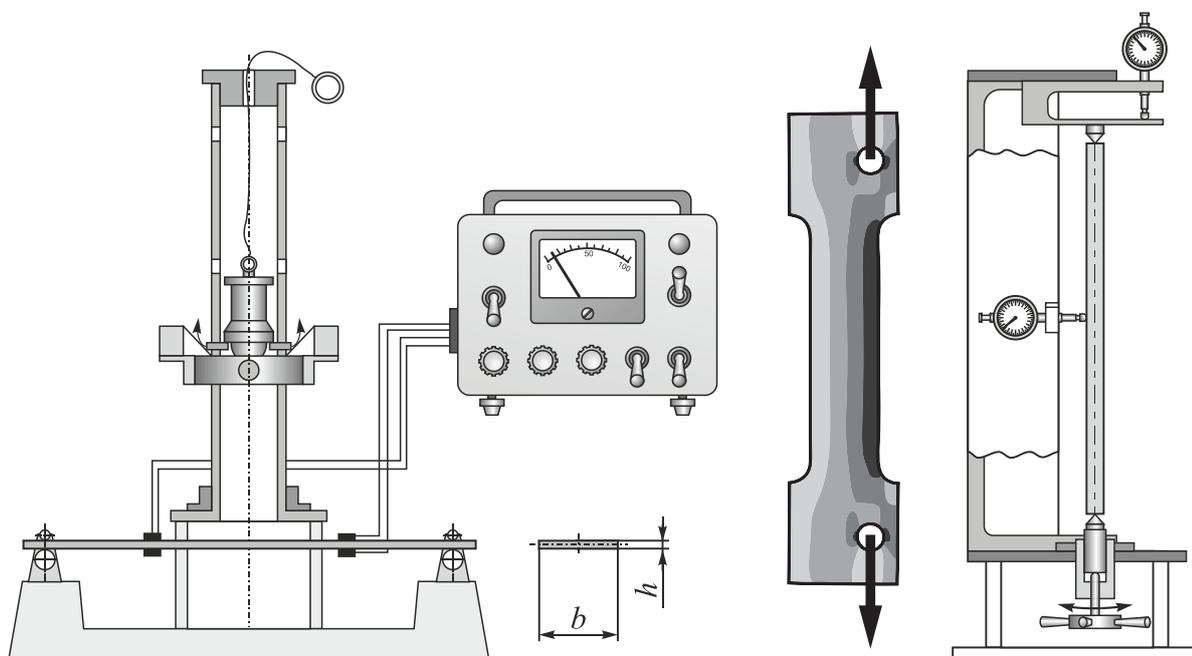


Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»



Уфа 2010

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра сопротивления материалов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
«Сопротивление материалов»

Уфа 2010

УДК 539.3 (07)
ББК 30.121 (я7)
Ж59

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. каф. СМ Газизов Х. Ш.;

д-р техн. наук, проф. каф. ТМ Грешнов В. М.

Жернаков В. С., Ермоленко А. Н.

Лабораторный практикум по дисциплине «Сопrotивление материалов» / В. С. Жернаков, А. Н. Ермоленко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2010. – 123 с.

ISBN 978-5-4221-0123-8

Приводятся описания лабораторных работ, позволяющих изучить основы курса «Сопrotивление материалов». Предназначено для студентов механических специальностей.

Ил. 68. Библиогр. назв. 15.

УДК 539.3 (07)
ББК 30.121 (я7)

ISBN 978-5-4221-0123-8

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа №1 <i>Определение механических характеристик наноструктурных материалов при растяжении</i>	5
Лабораторная работа №2 <i>Определение механических характеристик наноструктурных материалов при сжатии и кручении</i>	22
Лабораторная работа №3 <i>Исследование усталостной прочности наноструктурных материалов при многоцикловом нагружении при изгибе с вращением</i>	34
Лабораторная работа №4 <i>Исследование усталостной прочности наноструктурных материалов при малоцикловом жестком и мягком нагружении</i>	42
Лабораторная работа №5 <i>Исследование напряжений и деформаций при действии ударной нагрузки</i>	53
Лабораторная работа №6 <i>Экспериментальная проверка теоремы о взаимности перемещений и о взаимности работ</i>	61
Лабораторная работа №7 <i>Определение деформаций в плоской статически неопределимой раме</i>	65
Лабораторная работа №8 <i>Устойчивость сжатых стержней</i>	71
Лабораторная работа №9 <i>Экспериментальные методы исследования напряжений и деформаций в элементах конструкций</i>	78
Лабораторная работа №10 <i>Экспериментальное определение напряжений при внецентренном растяжении пластины</i>	93
Лабораторная работа №11 <i>Экспериментальное определение напряжений и деформаций однопролетной балки прямоугольного сечения при поперечном изгибе</i>	97
Лабораторная работа №12 <i>Реализация метода конечных элементов на ЭВМ</i>	102
Лабораторная работа №13 <i>Практическое применение программного комплекса Ansys</i>	114
Список литературы	125

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка специалистов-технологов предполагает получение ими не только фундаментального образования по общим и специальным разделам математики и механики, но и освоение современных компьютерных технологий, применяемых при решении задач механики.

Методы математического моделирования, в том числе активно используемый в настоящее время метод конечных элементов, значительно расширили классы решаемых задач. В то же время подготовка специалистов немислима без экспериментальных методов, позволяющих им осознать тот факт, что за любой математической моделью среды, конструкции стоят обширные экспериментальные исследования, которые никогда не будут заменены методами компьютерного моделирования.

Предметное содержание дисциплины «Основы проектирования несущей (механической) системы электрохимических станков с приводами субмикронного и нанометрического копирования» требует комплексного обоснования показателей прочности, надежности, ресурса и безопасности.

Механические испытания являются неотъемлемой частью изучения прочности и жесткости элементов конструкций. Экспериментальное обоснование гипотез, проверка теоретических выводов и изучение процесса деформации вплоть до разрушения возможны в рамках курса лабораторных занятий, сопутствующих курсу.

Настоящее учебно-методическое пособие является руководством для проведения лабораторных занятий и подготовки к ним.

В описаниях работ указываются: цель опыта, постановка задачи, соответствующие теоретические данные, порядок проведения опыта, необходимые пояснения к пользованию аппаратурой и способы обработки результатов опыта. В отдельных случаях здесь же приводится описание применяемых приборов и машин, специальных установок и приспособлений. Рассмотрены принципиальные схемы наиболее распространенных агрегатов, их назначение, области применения, правила эксплуатации, точность и масштабы показаний.

Наряду со стандартным содержанием большое внимание уделено новым задачам и методам. Рекомендовано применение этих методов при статическом и динамическом нагружении.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение методики проведения статических испытаний на растяжение наноструктурных материалов в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) и исследовать процесс растяжения металлических образцов вплоть до их разрушения. Приобретение навыков определения механических характеристик материала и характеристик пластичности.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Во время испытаний образец подвергается воздействию осевой растягивающей силы при заданных скоростях нагружения. Основой для определения механических характеристик материала служит диаграмма растяжения, полученная на специализированной разрывной машине, путем записи показаний датчика силы и тензометров. При этом фиксируются значения силы, приложенной к образцу, и значения абсолютных деформаций образца.

Типы и размеры пропорциональных цилиндрических и плоских образцов выбираются в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88). На рис. 1.1, *а* показан эскиз образца круглого поперечного сечения, полученного точением, а на рис. 1.1, *б* – плоский образец. При изготовлении образцов принимают меры (охлаждение, соответствующие режимы обработки), исключая возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки.

Измерение поперечных размеров образцов до испытания проводят не менее, чем в трех местах: в средней части и на границах рабочей длины. Начальную расчетную длину l_0 с погрешностью до 1% ограничивают на рабочей длине образца рисками, маркерными точками или иным способом и измеряют штангенциркулем или другими измерительными средствами с погрешностью измерения до 0,1 мм.

Базовыми геометрическими характеристиками образца являются рабочая ($l_{\text{раб}}$) длина образца (расстояние, измеренное между ушире-

ниями образца под захваты испытательной машины), расчётная длина образца – l_0 , первоначальная площадь поперечного сечения – A_0 .

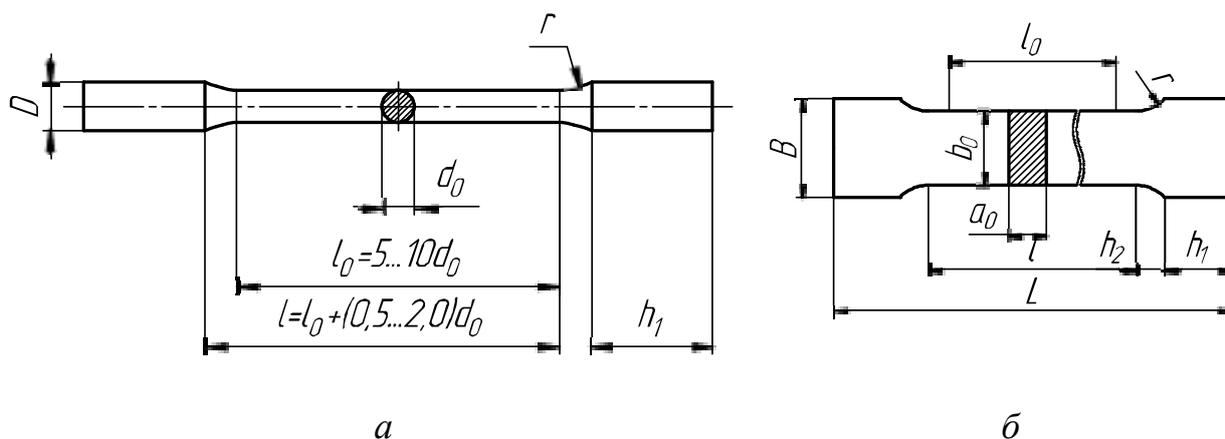


Рис. 1.1. Эскизы образцов для испытаний на растяжение

Испытания проводят на двух образцах, если иное количество не предусмотрено в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Преимущественно нагружение производят с фиксированной скоростью деформирования, составляющей $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. При определении физического предела текучести скорость деформирования должна составлять $2,5 \cdot 10^{-4} \div 2,5 \cdot 10^{-3}$. Поэтому в ряде случаев нагружение проводят с меньшей скоростью до превышения предела текучести, после чего увеличивают скорость нагружения.

В ходе проведения эксперимента испытательная машина сообщает образцу принудительное удлинение и регистрирует сопротивление образца. По полученным данным о силе деформирования и деформациях строится первичная диаграмма растяжения, в которой по оси ординат откладываются сила, а по оси абсцисс – соответствующие ей удлинения образца. Характер диаграммы растяжения существенно зависит от механических свойств испытуемого материала.

Для приёмно-сдаточных и экспертных испытаний на растяжение ограничиваются обычно изучением первичной диаграммы растяжения. По полученной диаграмме растяжения строится диаграмма деформирования в координатах «напряжения – относительная деформация». По данным диаграммам определяют механические характеристики материалов.

По результатам испытаний на одноосное растяжение материалы принято делить на пластичные и хрупкие. К пластичным относятся

материалы, разрушению которых предшествуют большие остаточные деформации, хрупкими называют материалы, разрушающиеся при малых остаточных деформациях. Характерными представителями пластичных материалов являются малоуглеродистая сталь, алюминий, наноструктурный титан (рис. 1.2, а), а хрупких – чугун (рис. 1.2, б), инструментальная сталь и стекло. Пластичные и хрупкие материалы отличаются также характером разрушения при растяжении. Пластичные материалы проявляют большее сопротивление отрыву частиц, чем сдвигу их друг относительно друга (и разрушаются, главным образом, от сдвига частиц в плоскостях действия наибольших касательных напряжений). Именно вследствие сдвига частиц увеличивается длина образца из пластичного материала при его растяжении, а место разрушения в шейке имеет вид кратера, стенки которого наклонены к оси образца под углом 45° . Дном этого кратера является поверхность первоначальной внутренней трещины, возникающей после образования шейки.

Хрупкие материалы, наоборот, обладают большим сопротивлением сдвигу, чем отрыву, и разрушаются при растяжении внезапно от отрыва частиц материала по плоскости поперечного сечения. Явления текучести, упрочнения и образования шейки на образцах из таких материалов перед разрывом не наблюдаются.

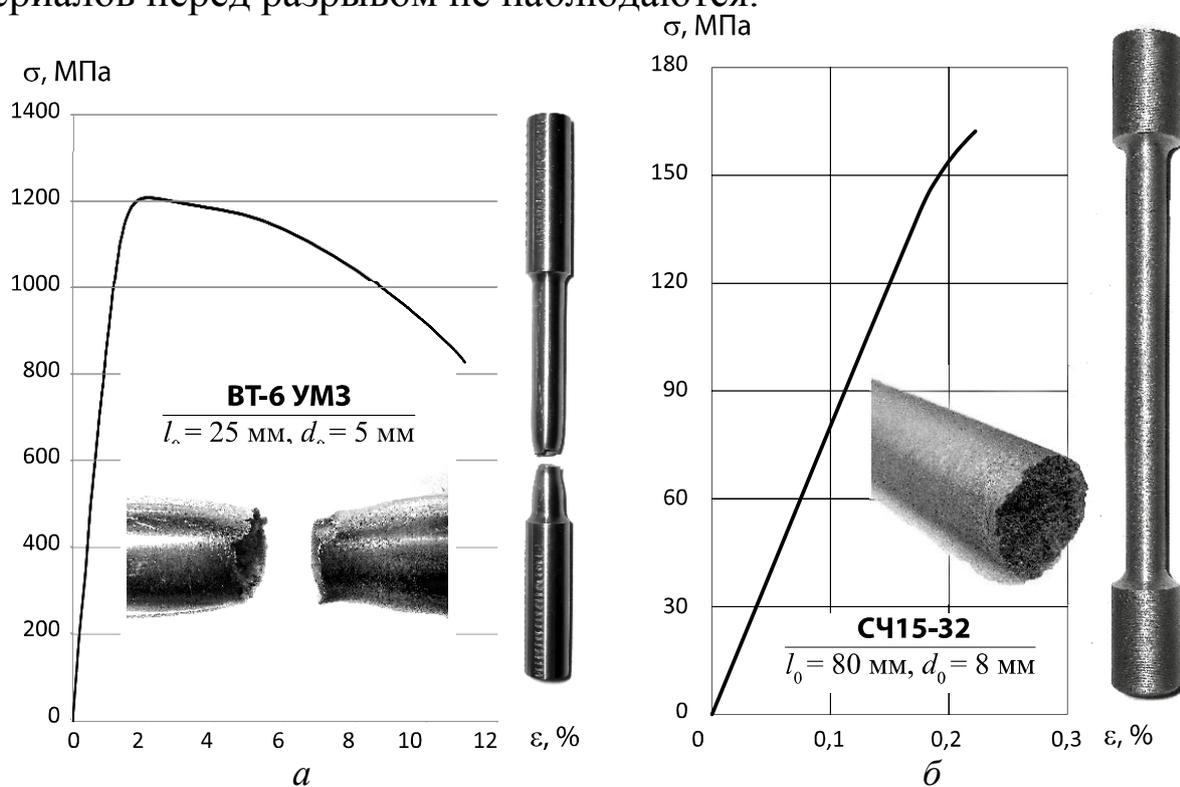


Рис. 1.2. Диаграммы деформирования наноструктурного титана и чугуна

Деление материалов на хрупкие и пластичные является условным, так как свойства материалов зависят от температуры, скорости деформирования и вида нагружения. Один и тот же материал в одних условиях ведет себя как хрупкий, в других – как пластичный. Например, мрамор при одноосном растяжении разрушается как хрупкий материал, а при всестороннем сжатию проявляет пластические свойства. Поэтому правильнее говорить о пластичном и хрупком характере разрушения материала. Первое происходит при больших, а второе при сравнительно малых остаточных деформациях.

Наиболее характерным представителем пластичного материала является малоуглеродистая сталь, диаграмма деформирования которой представлена на рис. 1.3. Рассмотрим характерные точки и участки диаграммы растяжения данного образца. От начала нагружения в точке O до определённого значения силы в точке A на диаграмме имеет место прямая пропорциональная зависимость между силой и удлинением, соответствующая отрезку OA . На данной стадии растяжения справедлив закон Гука:

$$\Delta l = \frac{l_0}{EA_0} F. \quad (1.1)$$

Напряжение, вызываемое действием силы $F_{\text{пц}}$ (точка A диаграммы), называется пределом пропорциональности – ему соответствуют первые признаки отклонения от линейной пропорциональной зависимости между напряжением и деформацией:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}. \quad (1.2)$$

При превышении данного предела нарушается выполнение закона Гука. При последующем увеличении силы до точки $B - F_y$ наблюдаются незначительные остаточные деформации после разгрузки образца 0,001–0,003%. Поэтому наибольшее напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторого значения, характеризуемого определенным допуском, устанавливаемым техническими условиями, называется пределом упругости:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}. \quad (1.3)$$

Последующее деформирование образца сопровождается существенным ростом пластических деформаций и отклонением от пропорциональной зависимости между силой и деформацией. При этом деформирование происходит под действием практически постоянной силы, точка *C* диаграммы соответствует силе F_T , а вызываемые ей напряжения называются физическим пределом текучести:

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}. \quad (1.4)$$

У малоуглеродистой стали наблюдается «зуб текучести», а затем площадка предела текучести. Явление «зуба» текучести связано с дислокационным механизмом деформации. На начальном участке плотность дислокаций является недостаточной для обеспечения более высокой степени деформации. После достижения точки верхнего предела текучести $\sigma_{ТВ}$ начинается интенсивное образование новых дислокаций, что приводит к падению напряжения. Дальнейшая деформация при пределе текучести происходит практически без роста напряжения.

Данная диаграмма является типичной для материалов с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК) с низкой исходной плотностью дислокаций. Для многих материалов, например, с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК), а также для материалов с высокой исходной плотностью дефектов, на диаграмме отсутствует явно выраженный предел текучести. В качестве предела текучести выбирается значение напряжения при остаточной деформации $\varepsilon_{0,2} = 0,2\%$ или иным значением допуска. В таком случае определяется условный предел текучести:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}, \quad (1.5)$$

где $F_{0,2}$ – сила, соответствующая остаточной деформации $\varepsilon_{0,2}$.

После стадии текучести материал снова приобретает способность увеличивать сопротивление дальнейшей деформации, начинается стадия деформационного упрочнения. Данная стадия сопровождается ростом напряжений и деформаций и носит название стадии упрочнения (*ABCD*).

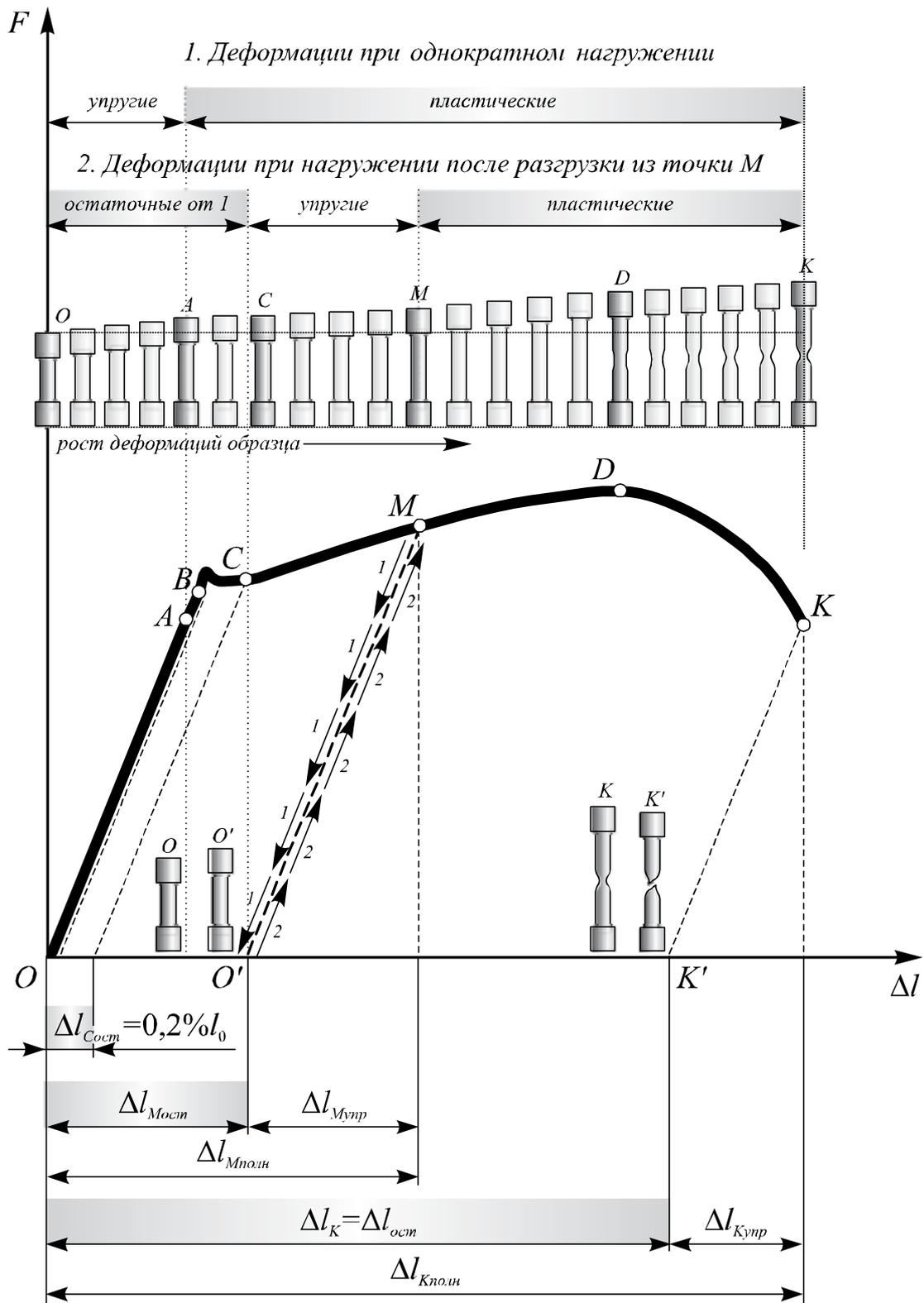


Рис. 1.3. Диаграмма растяжения для мягкой углеродистой стали:
 1 – Маршрут OACDK – первичное нагружение до разрушения;
 2 – Маршрут OACMO' – первичное нагружение до точки M и разгрузка в точку O';
 3 – O'MDK – повторное нагружение из точки O', после разгрузки из точки M. Условные обозначения: «ост» – остаточная, «упр» – упругая, «полн» – полная

Если на данной стадии нагружения произвести разгрузку образца из некоторой точки M , то линия разгрузки пойдет в точку O' по маршруту 1 (рис. 1.3). Кривая разгрузки проходит параллельно пропорциональному участку OA диаграммы, так как при разгрузке снимается только упругая составляющая деформации. Повторное нагружение пойдет по маршруту 2 из точки O' в точку M диаграммы.

Удлинение $\Delta l_{Mполн}$, полученное образцом до начала разгрузки, после полностью не исчезнет. Исчезнувшая часть удлинения на диаграмме отобразится отрезком $\Delta l_{Mупр}$, а оставшаяся – $\Delta l_{Mост}$. Полное удлинение образца за пределом пропорциональности состоит из двух частей – упругой и пластической:

$$\Delta l_{Mполн} = \Delta l_{Mупр} + \Delta l_{Mост}. \quad (1.6)$$

Видно, что после предварительного нагружения до точки M увеличивается пропорциональный участок диаграммы, а также повышается предел пропорциональности материала и условный предел текучести. Такое упрочнение металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазового состава в процессе пластической деформации, при температуре ниже температуры рекристаллизации называется наклепом. Наклеп сопровождается выходом на поверхность образца дефектов кристаллической решетки, увеличением прочности и твердости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера).

Точка D диаграммы соответствует максимальной силе F_{max} , после которой начинается местное сужение образца в виде шейки, т.е. появляется область сосредоточенной деформации. Величина напряжения, отвечающая наибольшей силе, предшествующей разрушению образца, называется пределом прочности или временным сопротивлением разрыву:

$$\sigma_{пч} = \sigma_B = \frac{F_{max}}{A_0}. \quad (1.7)$$

Расположение шейки зависит от однородности геометрических размеров образца и качества его поверхности. Как правило, шейка и, в конечном счете, место разрушения расположено в наиболее слабом сечении. Кроме того, важное значение имеет одноосность напряженного состояния (отсутствие перекосов образца в испытательной машине). Для пластичных материалов при испытании на растяжение

одноосное напряженное состояние сохраняется лишь до образования шейки.

Из-за образования шейки и локального уменьшения площади поперечного сечения образца происходит уменьшение силы, необходимой для дальнейшего деформирования. Участок DK диаграммы представляет собой стадию локального упрочнения материала, являющийся зоной местной текучести, так как пластические деформации продолжают интенсивно развиваться только в области шейки. В точке K диаграммы происходит разрушение образца, сила F_K вызывает напряжения в момент разрушения:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0}. \quad (1.8)$$

Определенное, таким образом, напряжение при разрыве образца является условным и не может быть использовано в качестве механической характеристики материала. Условность заключается в том, что получено оно делением силы в момент разрыва на первоначальную площадь поперечного сечения образца, а не на действительную площадь в момент разрушения, которая значительно меньше вследствие образования шейки.

После разрушения упругая составляющая полного удлинения в обеих частях образца исчезает (отрезок $\Delta l_{Kупр}$), разгрузка идет в точку K' . Оставшееся удлинение изображается отрезком $\Delta l_{Kост}$.

Для пластичных материалов характерно разрушение в шейке в плоскости скольжения, ориентированной приблизительно под углом 45° к продольной оси образца. В данной плоскости действуют максимальные касательные напряжения. В зависимости от пластичности материала данные площадки могут быть расположены либо по всей поверхности разрушения образца, либо локализованы ближе ко внешней поверхности (рис. 1.2, a), в последнем случае в средней части сечения имеет место хрупкий отрыв.

Полное удлинение, полученное образцом перед разрушением, уменьшится после разрыва, так как в частях образца исчезнут упругие деформации. Относительным удлинением после разрыва δ называют отношение в процентах приращения расчетной длины образца после разрыва к его первоначальной длине:

$$\delta = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} \cdot 100\%. \quad (1.9)$$

Относительное остаточное удлинение после разрыва характеризует пластичность материала. В зависимости от величины этого удлинения материалы делят на пластичные и хрупкие. К пластичным относят материалы с $\delta \geq 10\%$, к малопластичным – $5\% < \delta < 10\%$, хрупким – $\delta \leq 5\%$.

Относительное сужение образца после разрыва ψ определяется делением абсолютного уменьшения площади поперечного сечения в шейке на первоначальную площадь и выражается в процентах от начальной площади поперечного сечения:

$$\psi = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \cdot 100\%, \quad (1.10)$$

где A_1 – площадь поперечного сечения образца в шейке.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Механическая разрывная машина Instron 3382; оптический видеоэкстензометр Instron AVE; измерительные средства; персональный компьютер; программное обеспечение Instron Bluehill.

4. ЗАДАНИЕ

Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в исходные параметры испытания. Установить характер разрушения образцов при растяжении. Определить механические характеристики материала: модуль упругости E ; предел пропорциональности $\sigma_{ПЦ}$; физический или условный предел текучести – σ_T или $\sigma_{0,2}$; предел прочности σ_B ; напряжение при разрыве σ_K . Определить характеристики пластичности – относительное остаточное удлинение при разрыве δ ; относительное остаточное сужение ψ в шейке.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Методика определения механических характеристик и характеристик пластичности материалов.

Определение предела пропорциональности. Определение предела пропорциональности графическим способом проводится по начальному участку диаграммы растяжения. Для этого проводят прямую из начала координат (рис. 1.4, а), совпадающую с начальным ли-

нейным участком диаграммы растяжения. Затем на произвольном уровне проводят прямую AB , параллельную оси абсцисс, и на ней откладывают отрезок Kn , равный половине отрезка mK . Через точку n и начало координат проводят прямую On и параллельно ей проводят касательную CD к диаграмме растяжения. Точка касания определяет искомую силу $F_{\text{пц}}$.

Определение предела упругости можно также выполнить по данным, полученным на испытательных машинах с цифровой обработкой сигнала. В этом случае первоначально определяется модуль упругости, строится прямая, соответствующая пропорциональному участку диаграммы, последующее определение силы осуществляется смещением данной прямой в допусках 0,001-0,003% остаточной деформации.

Определение модуля упругости. Модуль упругости может быть определен графическим способом по начальному участку диаграммы растяжения. При наличии цифровой обработки сигнала наиболее распространенными методами в программном пакете, используемом с Instron 3382, являются *Автоматический модуль* и *Автоматическое определение модуля Юнга*.

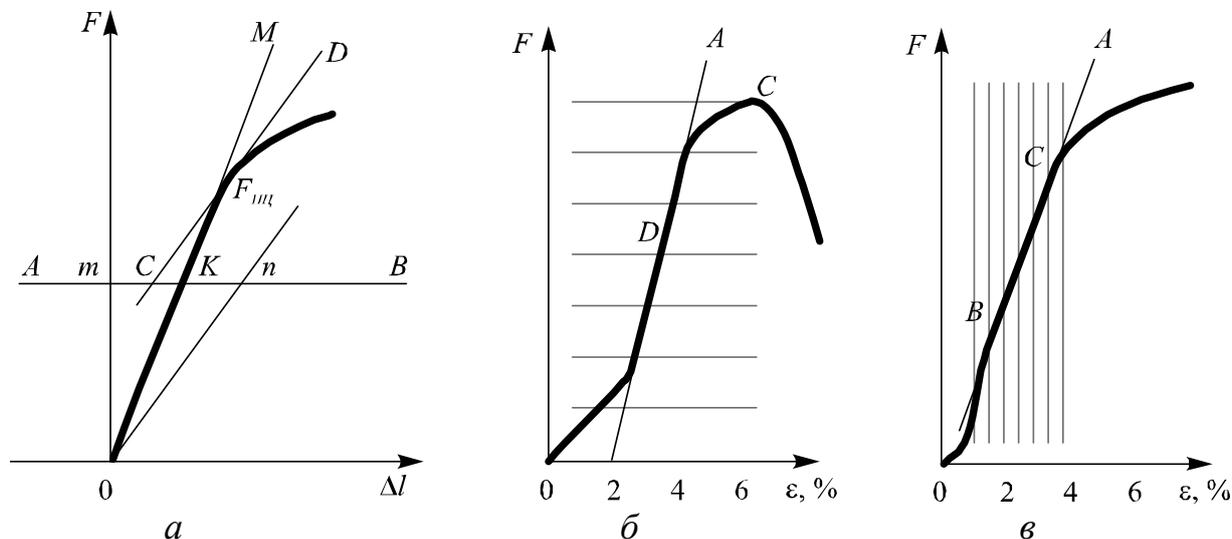


Рис. 1.4. Методы определения предела пропорциональности и модуля упругости

В первом случае (рис. 1.4, б) система исследует данные между первой точкой данных, которая больше или равна 2% от максимальной нагрузки, и значением максимальной нагрузки, разбивая данные по оси напряжения между начальным и конечным значениями на 6 рав-

ных областей. Во втором случае (рис. 1.4, в) система разбивает данные по оси деформации между начальным и конечным значениями на 6 равных областей. Далее в обоих случаях применяется алгоритм подбора методом наименьших квадратов по всем точкам в каждой области для определения угла наклона в каждой области и определяется пара последовательных областей, в которых имеется наивысшая сумма углов наклона, из которых выбирается наибольший угол наклона, и по этому значению рассчитывается модуль упругости.

Определение предела текучести. Физический предел текучести определяется по точкам на диаграмме (рис. 1.5, а), в которых угол наклона кривой уменьшается до нуля или становится отрицательным. Анализируя диаграмму, система определяет верхний (точка А) и нижний (точка В) пределы текучести.

Условный предел текучести (рис. 1.5, б) определяется смещением линии определенной для модуля упругости на заданное значение допуска остаточной пластической деформации (0,2%) и определяет интерполированную точку пересечения с диаграммой.

Определение предела прочности. Расчетный программный метод позволяет определить абсолютный пик на диаграмме растяжения (рис. 1.15, в). По полученному значению силы на всем интервале зарегистрированных значений силы на образце система ищет наибольшее значение силы и рассчитывает предел прочности.

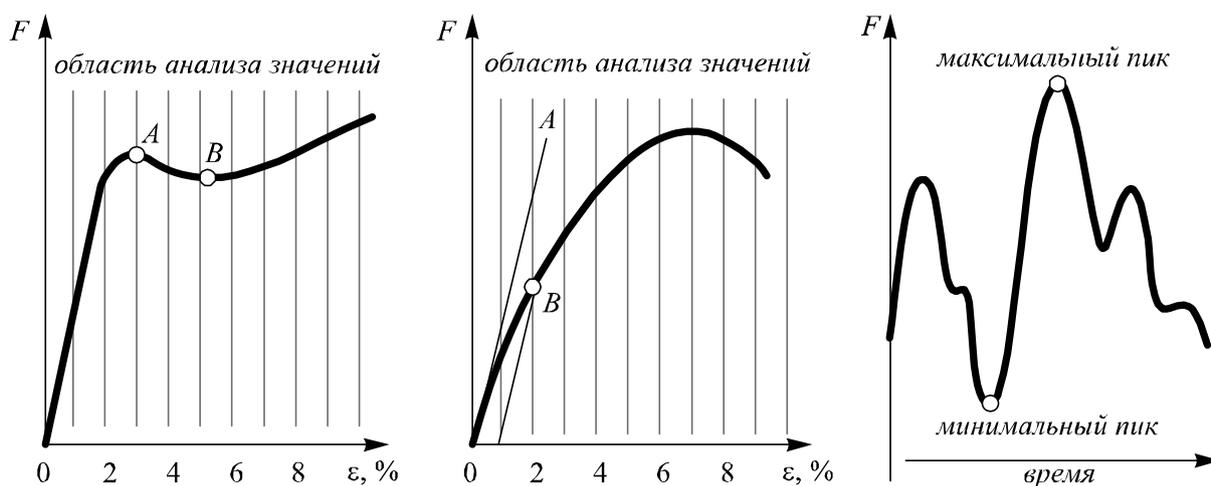


Рис. 1.5. Методы определения предела текучести и прочности

Определение относительного остаточного удлинения. С помощью штангенциркуля измеряется рабочая длина образца после разрушения, расчет производят по формуле (1.9). В случае использо-

вания оптического видеоэкстензометра фиксируется значение базы образца по маркерным точкам до испытания. После разрушения образца перемещают подвижную траверсу с помощью кнопок шагового перемещения, до момента касания половинок образцов (первые признаки появления незначительной сжимающей силы в показаниях канала датчика силы), измеряется базовая длина после разрушения с помощью видеоэкстензометра, данные заносятся в форму входных величин.

Определение относительного остаточного сужения. С помощью штангенциркуля измеряется диаметр образца в шейке и вычисляется площадь шейки, расчет производят по формуле (1.10).

Методика проведения испытания на растяжение. В настоящей работе используется двухколонная испытательная машина Instron 3382 с максимальной нагрузочной способностью 100 кН. На рис. 1.6 показан вид разрывной машины и ее основные узлы. Для управления испытаниями используется персональный компьютер, подключенный к блоку управления машины через сетевой контроллер по LAN-интерфейсу.

Испытательная машина оснащена датчиком силы Instron 2530-440 и механическими клиновыми захватами Instron 2716-002 с предельной нагрузочной способностью 100 кН. Для измерения продольных деформаций образца используется дополнительное оборудование – навесной экстензометр и бесконтактный видеоэкстензометр.

Основными узлами рамы испытательной машины являются стол, двигатель привода, две направляющие колонны и два вертикальных винта с шаровыми опорами. Верхняя подвижная траверса установлена на колоннах и винтах с шаровыми опорами. Датчик нагрузки установлен на подвижной траверсе. Узел привода сообщает крутящий момент от двигателя винту с шаровыми опорами и перемещает траверсу вверх или вниз относительно стоек.

После установки образца в захватах, траверсе сообщаются перемещения с заданной скоростью, что вызывает в образце растягивающую или сжимающую силу. Датчик нагрузки преобразует механическое воздействие силы в электрический сигнал, который передается системе управления для контроля и визуального отображения на дисплее.

Механическая цепь привода траверсы расположена внутри основания. Она содержит два винта с шаровыми опорами (по одному внутри каждой стойки), которые установлены в смазываемые под-

шипники на жесткой базовой балке внутри основания рамы. Два приводных шкива находятся внизу под балкой основания и установлены на конце каждого винта с шаровыми опорами. Серводвигатель постоянного тока приводит в движение винты с шаровыми опорами посредством ряда шкивов и зубчатых ремней. Зубчатые ремни между шкивами синхронизируют приводное усилие к винтам с шаровыми опорами и обеспечивают горизонтальное выравнивание подвижной траверсы. Шифратор, установленный на приводном двигателе, формирует информацию о положении траверсы для компьютера.

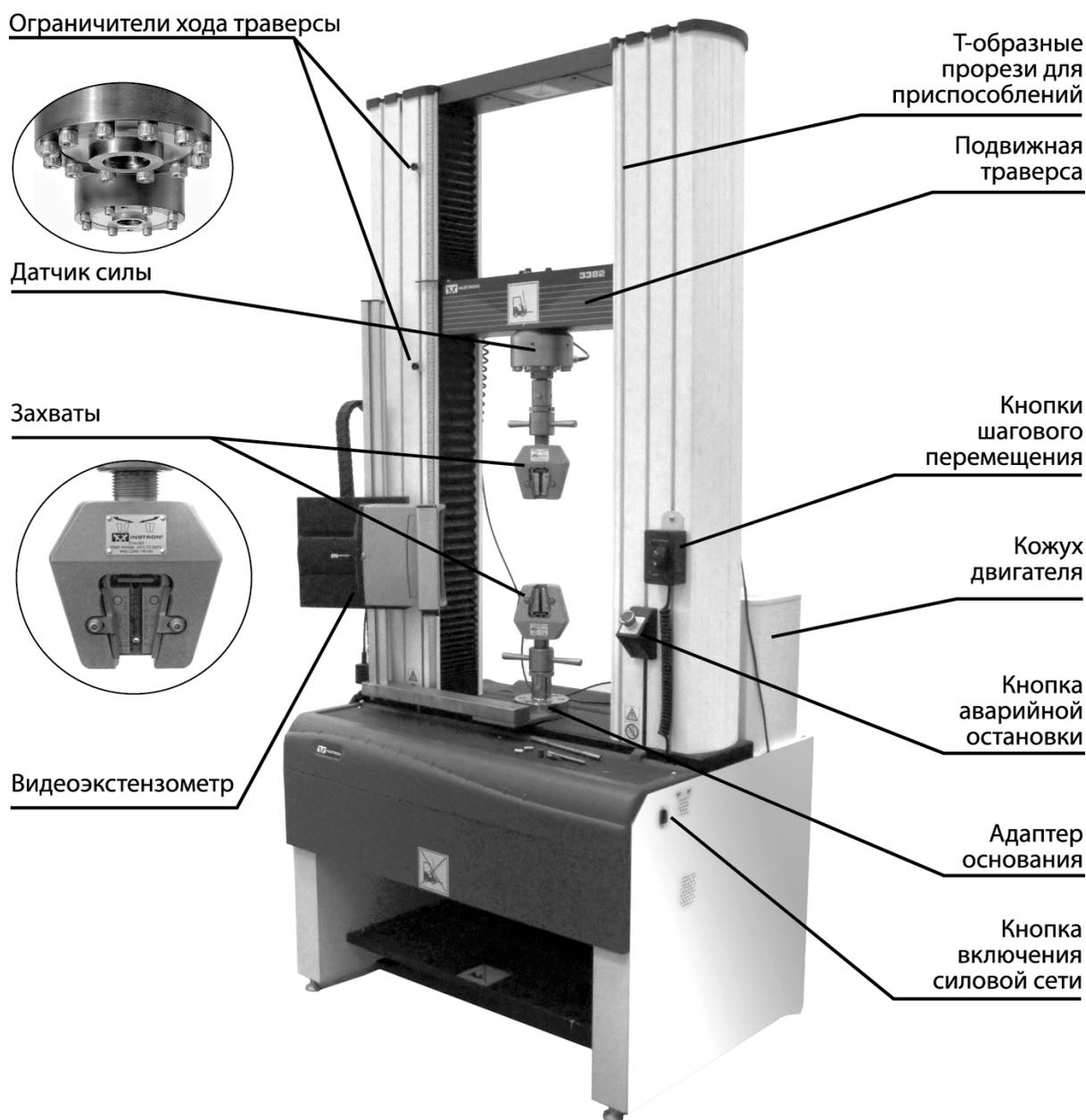


Рис. 1.6. Испытательная разрывная машина Instron 3382

Система контролируется замкнутым контуром сервоуправления. Скорость и направление движения траверсы определяются параметрами, задаваемыми на компьютере. При запуске испытания контроллер генерирует стартовый сигнал, который управляет движением траверсы в соответствии с установленными параметрами.

Внутри основания рамы имеется панель интерфейса рамы, которая обеспечивает сигнальный интерфейс между контроллером и компонентами рамы с регистрацией данных с минимальным интервалом до 50 мс. Микрочип контроллера содержит уникальный цифровой код для каждого типа рамы, что позволяет компьютеру распознать ее тип. Эта идентификация позволяет программе управления задать в электронном виде установки для пределов изменения нагрузок системы и значений автоматической калибровки.

Компьютер содержит плату цифровой связи, которая обеспечивает связь компьютера с нагрузочной рамой. Связь происходит через контроллер, встроенный в основание рамы. Контроллер получает сообщения от компьютера и посылает сообщение в нагрузочную раму для выполнения требуемой операции. При испытаниях контроллер получает данные от датчиков и посылает данные назад компьютеру, обеспечивая обратную связь.

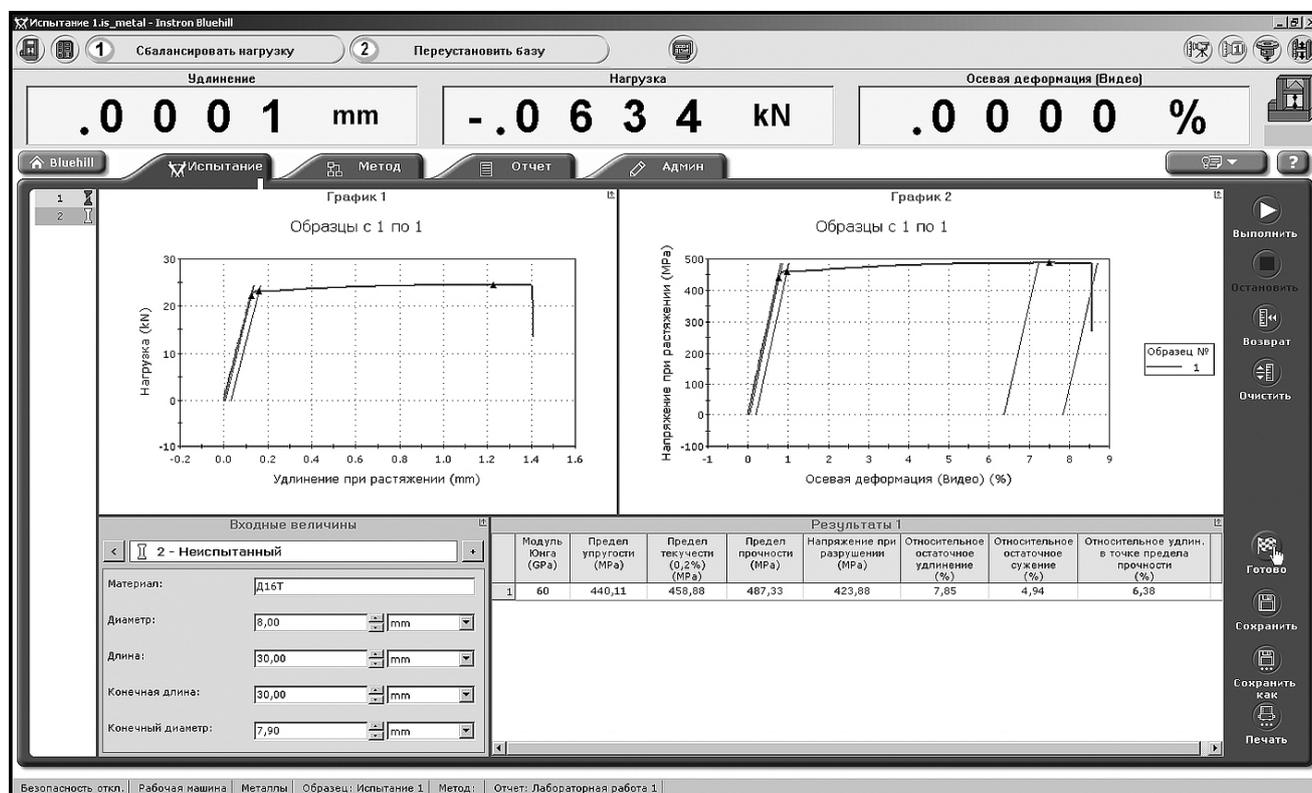


Рис. 1.7. Интерфейс программного обеспечения Bluehill для Instron

Испытания на растяжение могут быть проведены двумя способами – с контролем по силе или деформации. Преимущественно испытания проводят с заданной скоростью нагружения, при этом нагрузочной раме задается скорость деформирования. Проведение испытаний на растяжение на разрывной машине Instron возможно реализовать в трех вариантах: по скорости перемещения активной траверсы, с помощью навесного экстензометра и по оптическому видеоэкстензометру (интерфейс программы – рис. 1.7).

В случае когда деформации на диаграмме растяжения получают на основании показаний датчика хода траверсы, ошибка измерений будет наибольшей. В данном случае удлинение образца измеряется по числу оборотов шагового двигателя. На итоговую величину деформаций, определенных таким способом, будет влиять жесткость привода, траверсы и захватов. Поэтому данный способ не рекомендуется для испытаний, если в ходе эксперимента требуется определить характеристики пластичности, модуль упругости.

При использовании навесного экстензометра ошибка измерения деформации не превышает 0,2% от измеряемой величины. На итоговую ошибку получаемой величины деформаций могут влиять неточности позиционирования навесного тензометра, проскальзывание ножей относительно поверхности образца. Однако одним из самых главных недостатков данного способа является неполное измерение деформаций с помощью навесного тензодатчика до разрушения образца, так как деформации в зоне упрочнения и локального упрочнения измеряются по датчику оборотов шагового двигателя. Соответственно с помощью навесного тензометра достаточно точно определяется только упругий участок диаграммы деформирования, ее наклон в упругой области.

Наиболее совершенным методом является бесконтактное измерение деформаций с использованием оптического видеоэкстензометра. Деформации фиксируются по маркерным точкам, нанесенным на образец вплоть до разрушения образца. Погрешность измерений составляет $\pm 2,5$ мкм или 0,5% от измеряемой величины. Измерение деформаций с помощью видеоэкстензометра является наиболее предпочтительным, так как суммарная ошибка регистрации деформаций будет в данном случае наименьшей.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите механические характеристики материалов, определяемых при испытании на растяжение.
2. Назовите характеристики пластичности.
3. Как определяется физический предел текучести?
4. Как определяется условный предел текучести?
5. Как определяется предел прочности для пластичных и хрупких материалов?
6. Чем различается характер разрушения пластичных и хрупких материалов при растяжении?
7. Какие способы измерения деформаций используются на испытательной машине Instron 3382?
8. Какой способ измерения деформаций предпочтительнее для построения диаграммы деформирования материала?
9. Почему разгрузка образца на диаграмме растяжения проходит по линии, параллельной начальному прямолинейному участку диаграммы?
10. Какие механические характеристики определяют для хрупких материалов?
11. По каким признакам материалы делятся на хрупкие и пластичные?
12. Почему полученная диаграмма деформирования называется условной?
13. Как измеряется базовый диаметр образца?
14. Как измеряется базовая длина образца?
15. В чем разница между диаграммой растяжения и деформирования?
16. Какие особенности по установке образца необходимо учесть при использовании видеоэкстензометра?
17. Как регистрируются деформации с помощью видеоэкстензометра?
18. Какие типы образцов используются при испытании на растяжение?
19. Как изменяется скорость деформирования в ходе эксперимента?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

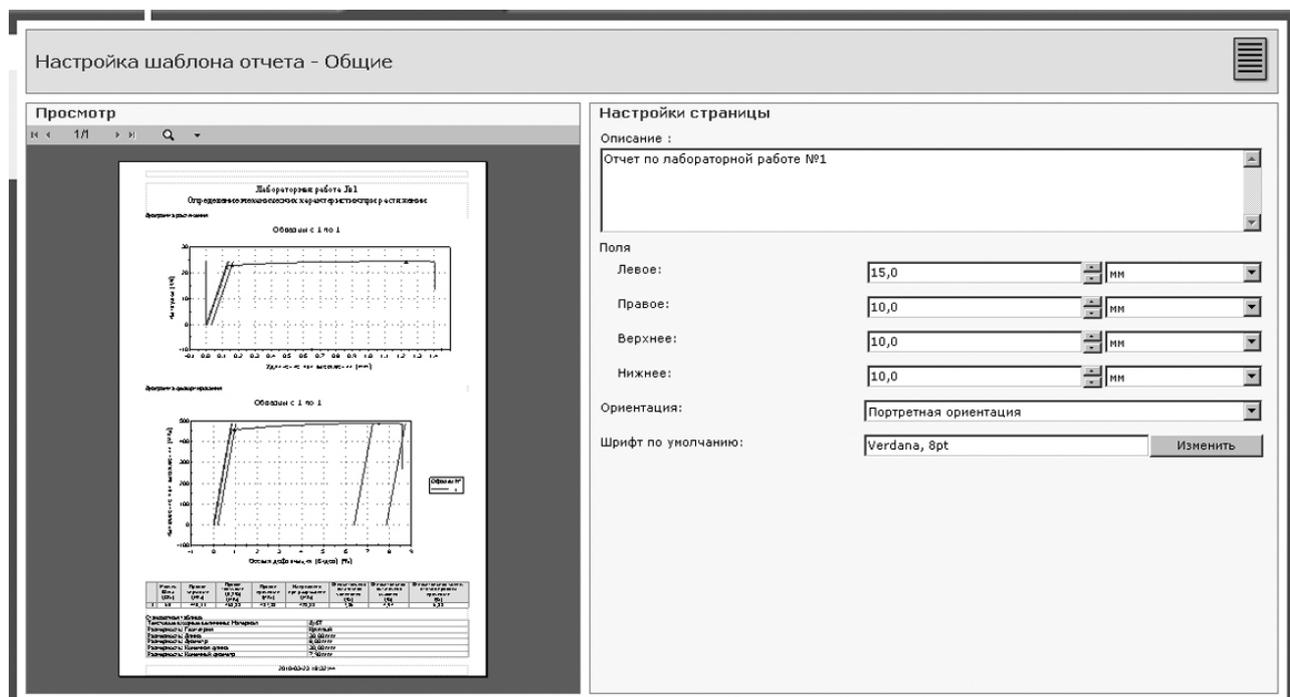


Рис. 1.8. Форма составления отчета по работе в программного обеспечения Bluehill

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Приводят диаграммы растяжения, деформирования образцов (рис. 1.8), значения рассчитанных механических характеристик материалов, характеристик пластичности. Характер разрушения материала показывают в виде эскизной зарисовки, либо в виде фотографического изображения. В заключении анализируют полученные результаты, проводят сравнение полученных величин с данными, полученными в исследованиях других авторов, либо справочной литературе, делают выводы по работе.

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЖАТИИ И КРУЧЕНИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Освоение методики проведения статических испытаний на сжатие материалов в соответствии с ГОСТ 25.503-97 и исследовать процесс сжатия образцов. Приобрести навыки определения механических характеристик материала при сжатии.

1.2. Освоение методики проведения статических испытаний на кручение материалов в соответствии с ГОСТ 3565-80 и исследовать процесс кручения образцов вплоть до их разрушения. Приобрести навыки определения механических характеристик материала при кручении.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Испытания на сжатие.

Для изучения поведения материалов при сжатии строятся диаграммы сжатия. Испытания проводят в соответствии с ГОСТ 25.503-97 на образцах четырех типов: цилиндрических и призматических (квадратных и прямоугольных) с гладкими торцами или торцевыми выточками. Испытания металлов на сжатие для определения пределов текучести, построения кривой упрочнения производят на образцах в виде цилиндров, высота которых равна их диаметру $d = h = 20$ мм, а для определения механических характеристик $d = h = 6$ мм. Для определения предела пропорциональности, упругости, модуля упругости высота образцов составляет $(3 \div 5)d_0$.

Для других материалов применяют образцы в виде кубиков. Стороны кубиков принимаются равными $a = 50$ мм для дерева и $200 \div 300$ мм для бетона.

Рассмотрим диаграммы сжатия стали и чугуна. Для наглядности изобразим их на одном рисунке с диаграммами растяжения этих материалов (рис. 2.1). В первой четверти изображены диаграммы растяжения, а в третьей – сжатия.

По-разному ведут себя пластичные и хрупкие материалы. В начале нагружения диаграммы напряжений при сжатии малоуглероди-

стой пластической стали Ст.3, так же как и диаграмма растяжения представляет собой наклонную прямую, потом диаграмма закругляется и переходит в участок с небольшим наклоном к горизонтали – участок текучести. При сжатии площадка текучести не получается столь ярко выраженной, как при растяжении.

Механические характеристики при сжатии сохраняют те же определения, что и при растяжении: $\sigma_{\text{пл}}^C$; $\sigma_{\text{в}}^C$ ($\sigma_{0,05}^C$); $\sigma_{\text{т}}^C$ ($\sigma_{0,2}^C$), $\sigma_{\text{в}}^C$. Углы наклона прямолинейных участков диаграммы при растяжении и сжатии одинаковы, значений, равны и модули упругости.

Стальной образец при сжатии укорачивается, площадь поперечного сечения увеличивается; сам образец вследствие трения на торцах принимает бочкообразную форму (рис. 2.2, а).

Образцы из других пластичных металлов (медь, алюминий) при сжатии деформируются так же, как стальные образцы, и имеют аналогичную диаграмму напряжений при сжатии.

Иначе ведут себя при испытании на сжатие хрупкие материалы. Диаграмма сжатия хрупкого материала по форме похожа на диаграмму растяжения чугуна. Эти диаграммы искривляются уже с самого начала и по достижении наибольшей нагрузки резко обрываются (рис. 2.1). Предел прочности на сжатие чугуна $\sigma_{\text{в}} = 500-1500$ МПа, т.е. в 4-5 раз больше, чем при растяжении. Разрушение образца происходит с образованием трещин по наклонным или продольным плоскостям (рис. 2.3, б).

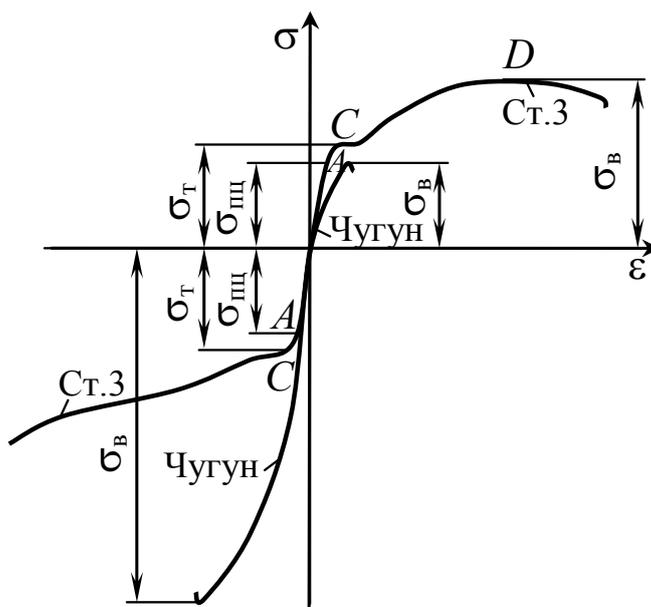


Рис. 2.1. Диаграммы сжатия и растяжения чугуна и стали

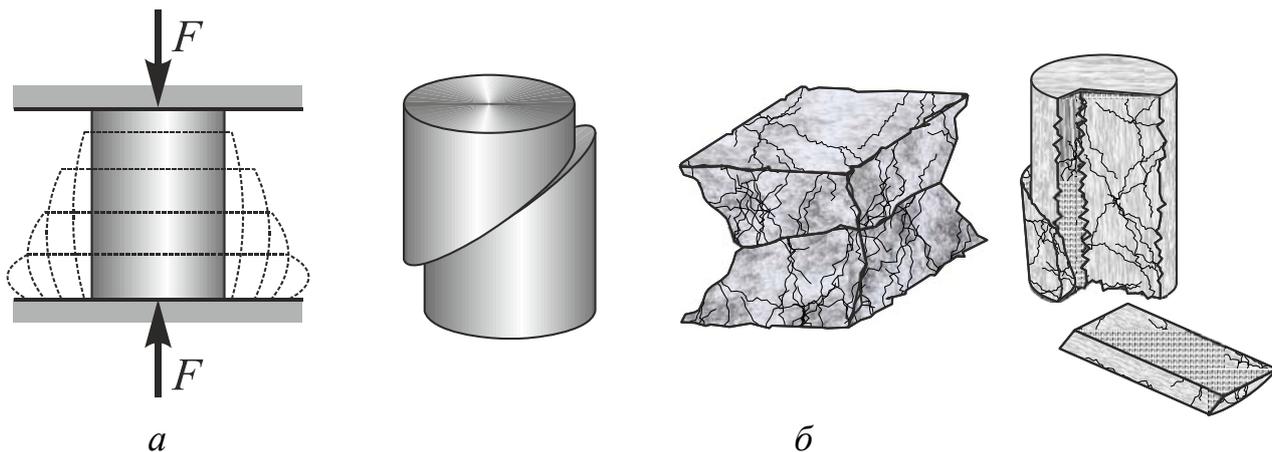


Рис. 2.2. Сжатие пластичного материала и разрушение образцов из хрупких материалов

Сопоставление предела прочности хрупких материалов при растяжении σ_B^P с пределом прочности при сжатии σ_B^C показывает, что эти материалы обладают, как правило, более высокими прочностными показателями при сжатии, нежели при растяжении. Отношение

$$k = \frac{\sigma_B^P}{\sigma_B^C} \quad (2.1)$$

для чугуна колеблется в пределах $0,2 \div 0,4$ для керамических материалов $k = 0,1 \div 0,2$.

У пластичных материалов прочностные характеристики при растяжении и сжатии сопоставляют по пределу текучести. Принято считать, что $\sigma_T^P \approx \sigma_T^C$.

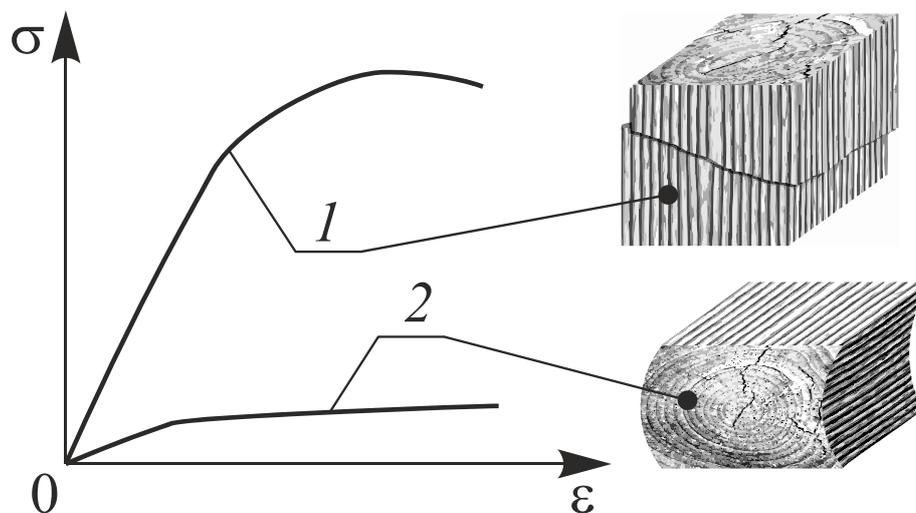


Рис. 2.3. Диаграммы напряжений дерева при сжатии и образцы:
1 – вдоль и 2 – поперек волокон

При испытании дерева на сжатие приходится учитывать, что дерево – материал анизотропный и по-разному работает вдоль (рис. 2.3, кривая 1) и поперек волокон (рис. 2.3, кривая 2). Многие породы дерева при сжатии вдоль волокон выдерживают значительные напряжения, например, предел прочности сосны достигает 40 – 80 МПа. В этом случае разрушение древесины происходит при сдвиге одной части кубика по другой (рис. 2.3). При сжатии дерева поперек волокон древесина не разрушается, а сильно прессуется (рис. 2.3).

2.2. Испытания на кручение.

Испытания на кручение проводят в соответствии с ГОСТ 3565-80. По результатам испытания образцов на кручение производят определение следующих механических характеристик: модуля сдвига G ; предела пропорциональности $\tau_{ПЦ}$, текучести τ_T , прочности $\tau_{ПЧ}$, максимального остаточного сдвига γ_{max} ; характера разрушения (срез или отрыв). Для испытания на кручение применяются стандартные цилиндрические образцы с расчетной длиной l_0 – 100 и 50 мм, диаметром в рабочей части $d_0 = 10$ мм (рис. 2.4), с головками на концах, для закрепления в захватах испытательной машины.

Измерение диаметра образца производится с погрешностью не более 0,01 мм, а его длины – с погрешностью не более 0,1 мм. Диаметр измеряется в трех сечениях рабочей части длины, разность между наибольшим и наименьшим диаметром не должна превышать 0,2% номинального значения диаметра.

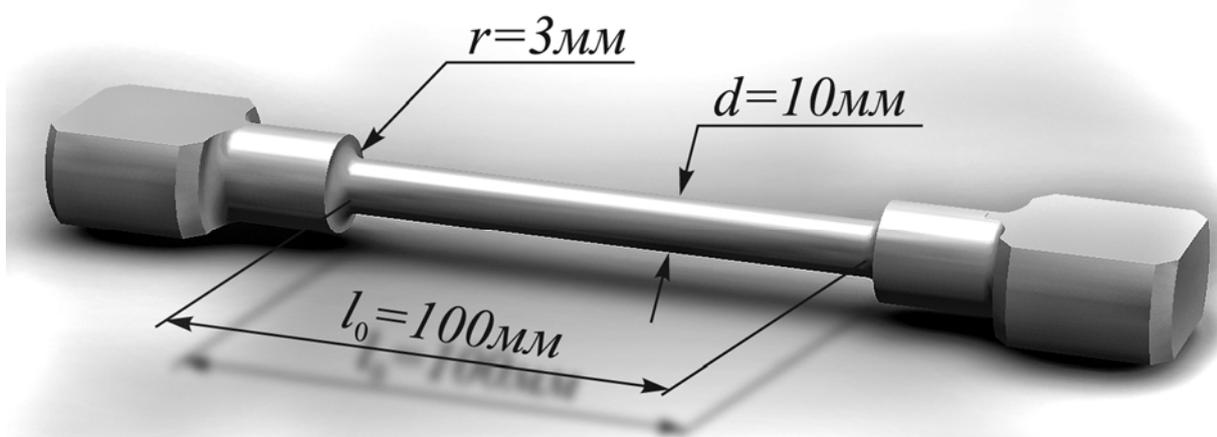


Рис. 2.4 Стандартный образец для испытаний на кручение

Допускается испытание других образцов с сохранением геометрического подобия, а также трубчатых образцов.

Механические характеристики материалов при кручении определяют с помощью диаграммы кручения (рис. 2.5). Диаграмма кручения при испытании образца записывается автоматически диаграммным аппаратом машины и выражает физическую зависимость деформаций от действующего крутящего момента. На диаграмме можно отметить три характерных участка.

Участок OA_1 – криволинейный участок, характеризующий наложение на деформации образца перемещений захватов машины вследствие обжатия головок образца и наличия зазоров в силовой системе самой машины.

Эти побочные перемещения снимаются путем продолжения прямой части диаграммы AA_1 до точки O_1 оси абсцисс, где размещается начало координат диаграммы.

Участок O_1A – прямолинейный участок, соответствующий линейной зависимости между крутящим моментом T и углом закручивания φ , т.е. закону Гука:

$$\varphi = \frac{Tl}{GI_p}, \quad (2.2)$$

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

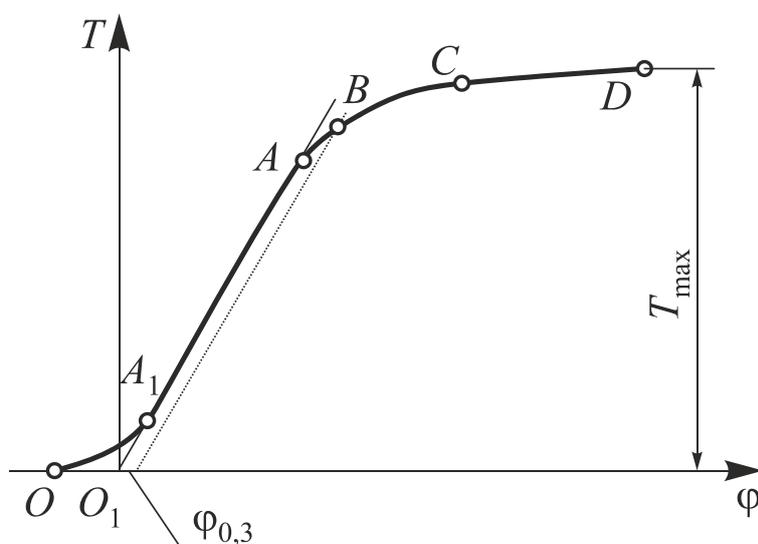


Рис. 2.5. Диаграмма кручения пластичного материала

Пока образец деформируется упруго (до точки A), касательные напряжения распределяются по сечению в зависимости от радиуса ρ линейно (рис. 2.6, a):

$$\tau = \frac{T}{I_p} \rho. \quad (2.3)$$

Предел пропорциональности при кручении $\tau_{\text{пл}}$ – наибольшая величина касательных напряжений, при которых соблюдается закон Гука, т.е. соблюдается линейная зависимость между углом закручивания φ и крутящим моментом T . Его определяют через величину касательных напряжений в периферийных точках поперечного сечения образца, соответствующих максимальному радиусу $\rho_{\text{max}} = d/2$:

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{пл}}}{W_p}, \quad (2.4)$$

где $T_{\text{пл}}$ – крутящий момент, соответствующий началу отклонения от линейной зависимости на диаграмме кручения в точке A , $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$ – полярный момент сопротивления.

На участке AB происходит развитие упругопластических деформаций в образце. После того, как напряжения в наружных точках поперечного сечения достигли предела текучести τ_T , в них начинают возникать пластические деформации, а внутренняя область остается в упругом состоянии (рис. 2.6, b).

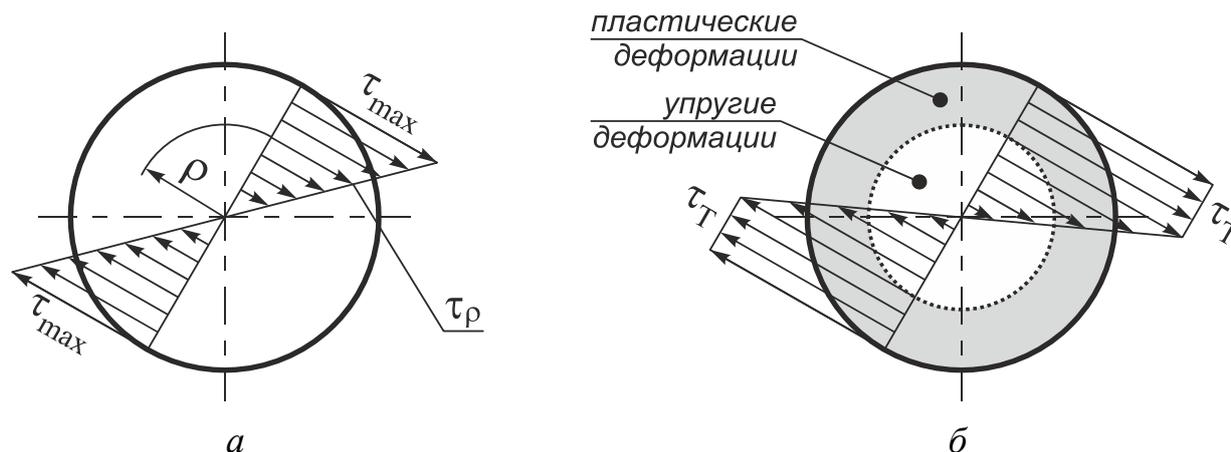


Рис. 2.6. Распределение напряжений в сечении при кручении

Участок BC характеризует наступление полной пластичности в сечениях, причем пластическое состояние распространяется последова-

тельно от поверхности к центру поперечного сечения (рис. 2.6, б). На участке CD , после достижения крутящим моментом максимального значения T_{\max} , происходит разрушение образца.

Физический предел текучести τ_T определяют, когда деформации остаточного сдвига происходят при постоянном значении крутящего момента, т.е. на диаграмме кручения есть площадка текучести.

Технический предел текучести $\tau_{0,3}$ определяют, когда на диаграмме кручения отсутствует выраженная площадка текучести. Критерием считается получение образцом остаточного сдвига, равного 0,3%. Для определения крутящего момента T_T , соответствующего техническому пределу текучести, вычисляют остаточный угол закручивания $\varphi_{0,3}$ по допуску на остаточный сдвиг $\gamma_T = 0,3\%$:

$$\varphi_{0,3} = \gamma_T \frac{2l}{d} = \frac{0,3}{100} \cdot \frac{2l}{d} \cdot 57,3^\circ = 0,344 \frac{l}{d}, [^\circ], \quad (2.5)$$

где l – длина рабочей части образца; d – диаметр рабочей части образца.

Величину предела текучести $\tau_{0,3}$ (либо τ_T) при кручении вычисляют по формуле:

$$\tau_{0,3} = \frac{T_T}{W_P}. \quad (2.6)$$

Условный предел прочности – касательное напряжение, соответствующее наибольшему крутящему моменту T_{\max} , предшествующего разрушению, определяют по формуле:

$$\tau_{\text{ПЧ}} = \frac{T_{\max}}{W_P}. \quad (2.7)$$

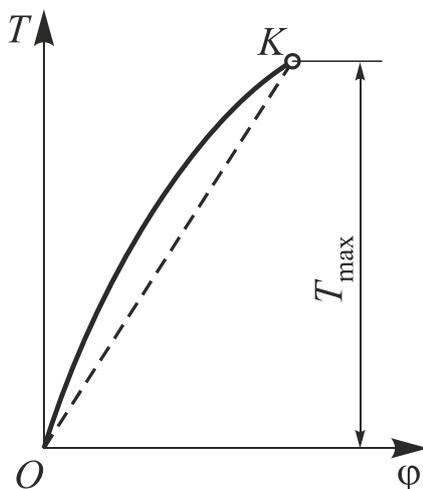


Рис. 2.7. Диаграмма кручения хрупкого материала

Диаграмма кручения хрупкого материала (например, чугуна) существенно отличается от диаграммы кручения пластичного материала.

Принципиальное различие состоит в том, что разрушение происходит без существенного развития остаточных деформаций. Часто диаграмма не имеет прямолинейного участка (рис. 2.7). По результатам испытания хрупкого материала на кручение определяется только предел прочности.

Для определения деформаций по закону Гука диаграмму спрямляют путем проведения хорды OK (рис. 2.7). Тогда полный угол закручивания будет только упругим.

Характер разрушения (сдвигом или отрывом) пластичных и хрупких материалов при кручении зависит от способности материала сопротивляться действию касательных или нормальных напряжений.

Рассмотрим, как распределяются нормальные и касательные напряжения при кручении (рис. 2.8, *a*). В поперечных и продольных сечениях образца при кручении действуют касательные напряжения, а нормальные напряжения равны нулю. Поэтому свободное кручение действительно является чистым сдвигом (рис. 2.8, *б*).

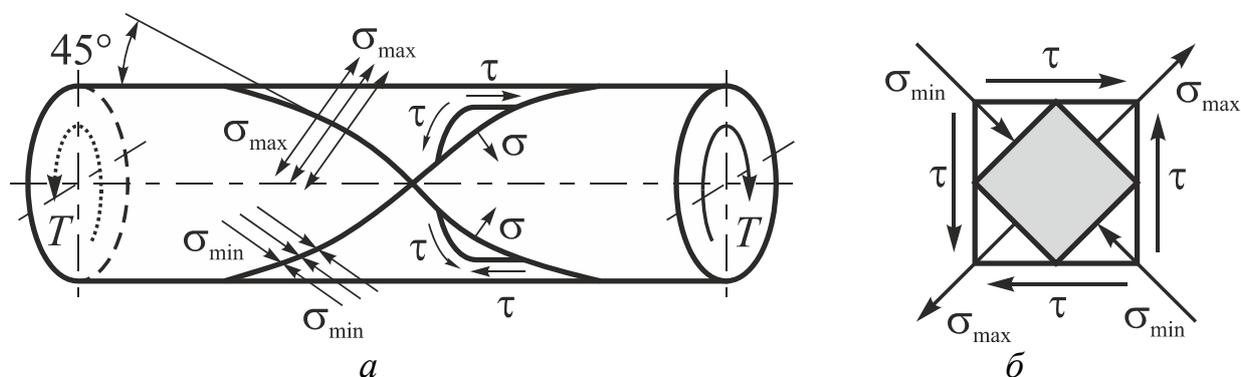


Рис. 2.8. Напряжения в стержне при кручении

В наклонных сечениях образца действуют как нормальные, так и касательные напряжения:

$$\sigma_{\alpha} = \tau \sin 2\alpha, \quad \tau_{\alpha} = \tau \cos 2\alpha, \quad (2.8)$$

где α – угол наклона косого сечения к поперечному сечению.

При $\alpha = \pm 45^{\circ}$ напряжения будут принимать экстремальные значения $\sigma_{\alpha} = \sigma_{\max, \min} = \pm \tau$, $\tau_{\alpha} = 0$.

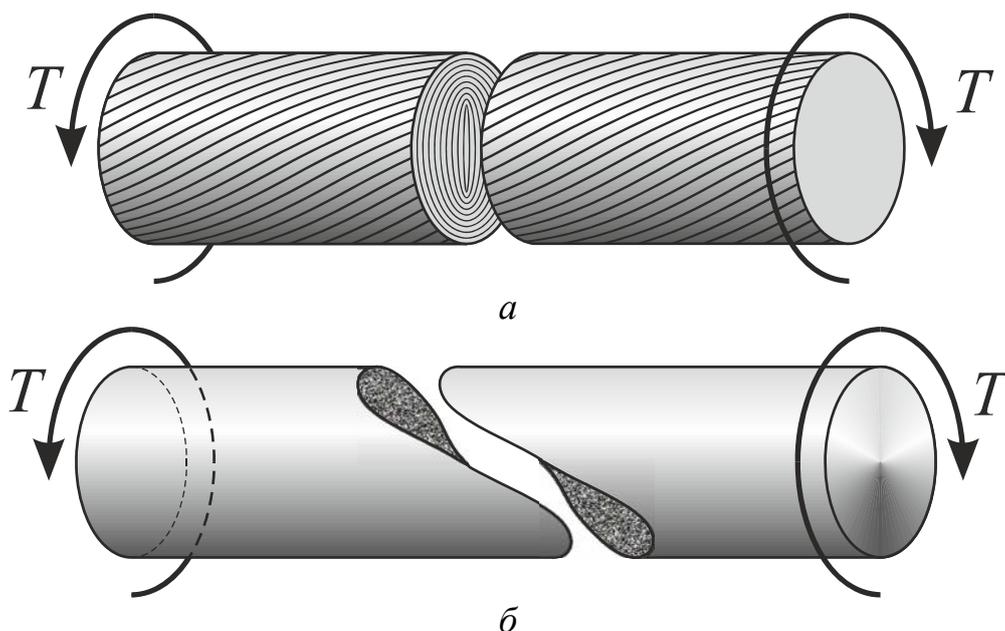


Рис. 2.9. Характер разрушения пластичного и хрупкого материала.

Пластичные материалы разрушаются срезом по площадке наибольших касательных напряжений, в плоскости, перпендикулярной продольной оси (рис. 2.9, *а* – на образце нанесены поперечные и продольные линии сетки). Хрупкие материалы разрушаются отрывом по площадкам наибольших нормальных напряжений (хрупкий излом – рис. 2.9, *б*), максимальные значения которых имеют место в сечениях, идущих по винтовой линии и пересекающих образующие под углом 45° .

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Механическая разрывная машина Instron 3382; механическая машина для испытаний на кручение МК-50; измерительные средства; устройства тензометрирования; персональный компьютер; программное обеспечение Instron Bluehill.

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в исходные параметры испытания. Установить характер разрушения образцов при сжатии. Определить механические характеристики материала: предел пропорциональности при сжатии $\sigma_{\text{пц}}^C$; физический или условный предел текучести – σ_T^C или $\sigma_{0,2}^C$ соответственно; предел прочности σ_B^C .

4.2. Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в журнал испытаний. Установить характер разрушения образцов при кручении. Определить механические характеристики: модуль сдвига при кручении G ; предел пропорциональности при кручении $\tau_{ПЦ}$; физический или условный предел текучести при кручении – τ_T или $\tau_{0,3}$ соответственно; условный предел прочности при кручении $\tau_{ПЦ}$; максимальный остаточный сдвиг при кручении γ_{max} .

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Испытание на сжатие.

Для испытания на сжатие используется разрывная машина Instron 3382. Методика определения и расчета механических характеристик описана в п. 3, лабораторной работы №1. Для проведения эксперимента разрывная машина оснащена плитами для испытаний на сжатие. На рис. 2.10, показана зона испытаний, с плитами на сжатие и установленным между ними стальным образцом.

Контроль деформаций образца осуществляется по каналу управления перемещением подвижной траверсы, если возможность использования датчиков измерения деформации отсутствует. Для каждого типа материалов используются предустановленные шаблоны методов испытаний.

Испытание пластичного материала прекращают в момент, когда его первоначальная высота уменьшится на $1/3$. Хрупкие материалы доводят до разрушения.

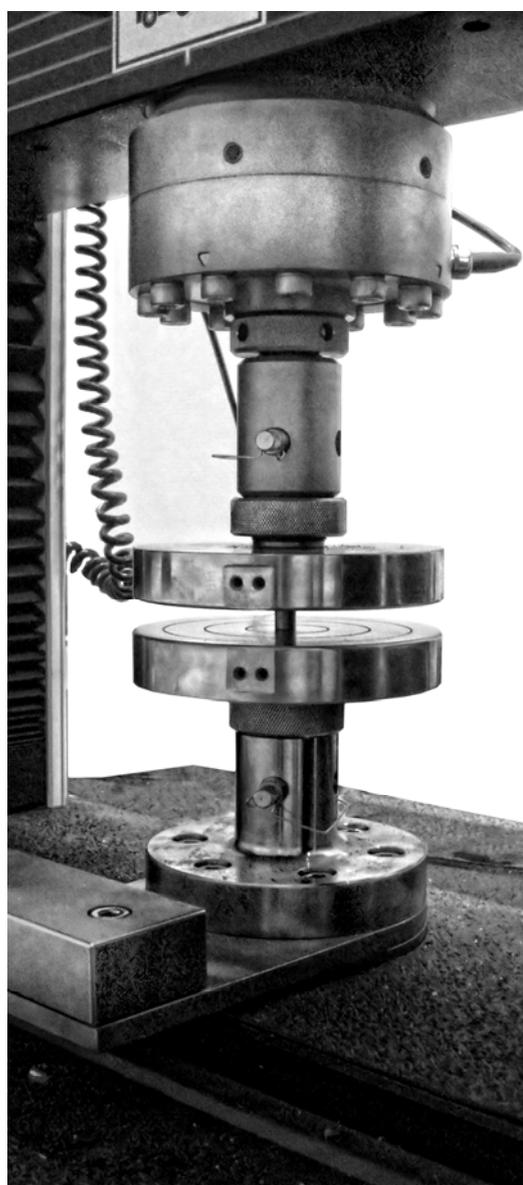


Рис. 2.10. Установка для испытаний на сжатие

5.2. Испытание на кручение.

Для испытаний на кручение применяется испытательная машина типа МК-50 с электронным силоизмерителем и диаграммным аппаратом с автоматической записью диаграммы кручения.

Машина имеет три диапазона измерения крутящего момента: от 0 до 100 Н·м, с ценой деления 1 Н·м; от 0 до 200 Н·м, с ценой деления 2 Н·м; от 0 до 500 Н·м, с ценой деления 5 Н·м. Масштаб записи угла закручивания: 1мм диаграммы соответствуют три диапазона угла закручивания $0,5^\circ$, 1° , 5° .

Обмер образцов осуществляется следующим образом: измерение диаметров производится с погрешностью не более 0,01 мм, а длина – с погрешностью не более 0,1 мм.

Образец закрепляют в захватах машины с обеспечением необходимого центрирования. Устанавливается необходимый масштаб углов закручивания.

Закладывают диаграммную бумагу на барабан записывающего устройства. Включают привод нагружающего устройства, плавно нагружая образец, наблюдают за ходом записи диаграммы и фиксируют по шкале силоизмерителя наибольшую величину крутящего момента.

Доводят образец до разрушения и выключают привод нагружающего устройства. Записанную диаграмму кручения обрабатывают, определяя начало координат, проводят оси T и φ ; определяют характерные точки диаграммы (см. рис. 2.5 и 2.7) и соответствующие величины крутящих моментов; затем рассчитывают механические характеристики по формулам (2. 4) – (2.7). Полученные результаты заносят в отчет по лабораторной работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите механические характеристики материалов, определяемых при испытании на сжатие, кручение.

2. Как определяется предел прочности для пластичных и хрупких материалов при сжатии, кручении?

3. Чем различается характер разрушения пластичных и хрупких материалов при сжатии, кручении?

4. Какие способы измерения деформаций при испытаниях на сжатие используются на испытательной машине Instron 3382?

5. Какие образцы используются при испытании на сжатие, кручение?

6. Почему при испытании на сжатие цилиндрического образца из пластичного материала он приобретает бочкообразную форму?

7. В чем разница в характере разрушения пластического и хрупкого материала при испытании на сжатие?

8. В чем проявляется анизотропия свойств деревянного образца при испытании на сжатие?

9. Назовите характерные участки и точки диаграммы кручения.

10. В чем состоит отличие истинных механических характеристик от условных?

11. Под действием каких напряжений разрушаются пластичные и хрупкие материалы?

12. В чем состоит принципиальное отличие диаграмм кручения пластичных и хрупких материалов?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

Текстовую часть отчета подразделяют на две части – испытания на сжатие и испытания на кручение. В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Приводят диаграммы сжатия, кручения образцов, значения рассчитанных механических характеристик материалов. Характер разрушения материала показывают в виде эскизной зарисовки либо в виде фотографического изображения. В заключении анализируют полученные результаты, проводят сравнение полученных величин с данными, полученными в исследованиях других авторов либо справочной литературе, делают выводы по работе.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ ПРИ ИЗГИБЕ С ВРАЩЕНИЕМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить методику определения количественных характеристик сопротивления усталости. Получение навыков проведения усталостных испытаний наноструктурных материалов при многоцикловом нагружении и использования машин для создания переменных напряжений. Получить навыки проведения эксперимента по определению долговечности образца из наноструктурного материала или элемента конструкции.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

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

На рис. 3.1, *a* изображен асимметричный цикл переменных напряжений, где σ_{\max} – наибольшие напряжения цикла; σ_{\min} – наименьшие напряжения цикла; σ_m – средние напряжения цикла; σ_a – амплитудные напряжения цикла.

Отношение $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ называется коэффициентом асимметрии цикла. Любой цикл (рис. 3.1, *б*) может быть представлен как результат наложения постоянного напряжения σ_m на изменяющееся напряжение с амплитудой σ_a .

Режим испытания материалов на усталость под действием циклических нагрузок (напряжений) заданной амплитуды называют мяг-

ким, режим испытаний, когда постоянной является амплитуда деформации – жестким.

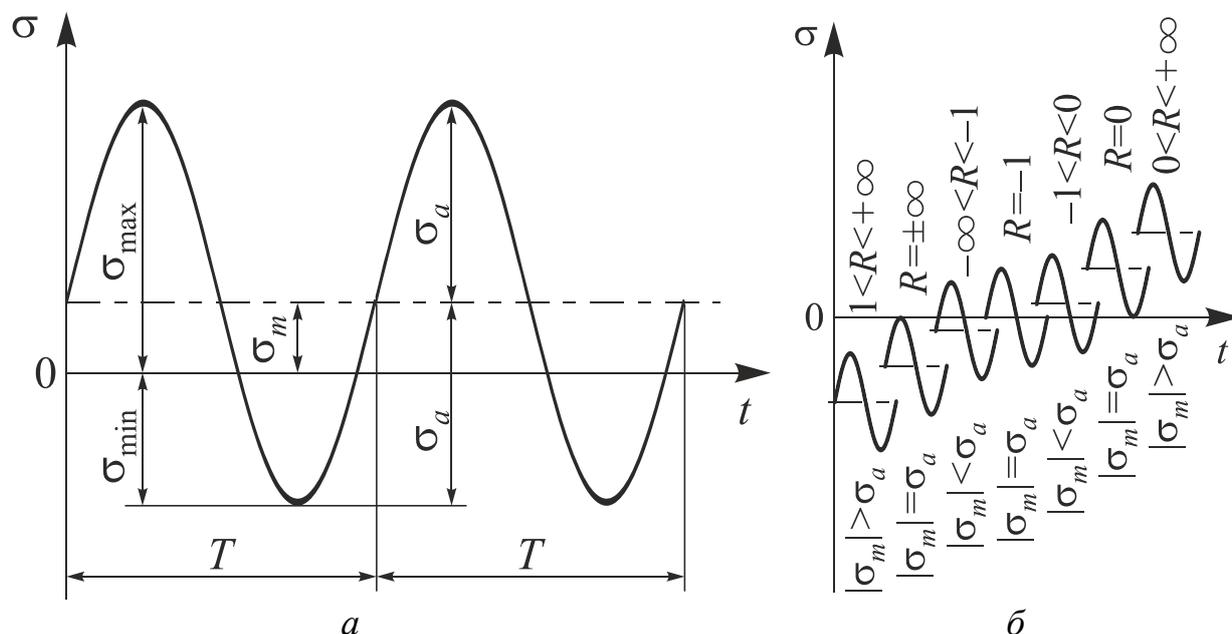


Рис. 3.1. Циклы переменного нагружения

Механизм процесса усталостного разрушения металлов тесно связан со структурной неоднородностью материала, заключающейся в случайных вариациях размеров и очертаний отдельных зерен, направлении их кристаллографических плоскостей, в наличии различных фаз, включений, дефектов кристаллической решетки и т.д. Вследствие данной неоднородности при переменных напряжениях, даже не превышающих предел пропорциональности, в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах возникает переменная пластическая деформация, которая связана с циклическими деформациями сдвига по определенным кристаллографическим плоскостям. Первые мини-сдвиги появляются в отдельных зернах уже на ранних стадиях нагружения, составляющих по числу циклов $1 \div 10\%$ от общей долговечности образца до разрушения.

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

лась первая трещина и откуда началось ее развитие, называют фокусом усталостного излома.

На рис. 3.2 приведена схема усталостного излома, на которой показаны основные характерные зоны и признаки, позволяющие отличить усталостный излом от других видов излома (хрупкого, вязкого в условиях статического разрушения и др.). Обычно фокус излома располагается на поверхности в местах концентрации напряжений или поверхностных дефектов в виде царапин, трещин и т. п. При наличии внутренних дефектов и при поверхностном упрочнении фокус излома может располагаться и на некоторой глубине от поверхности.

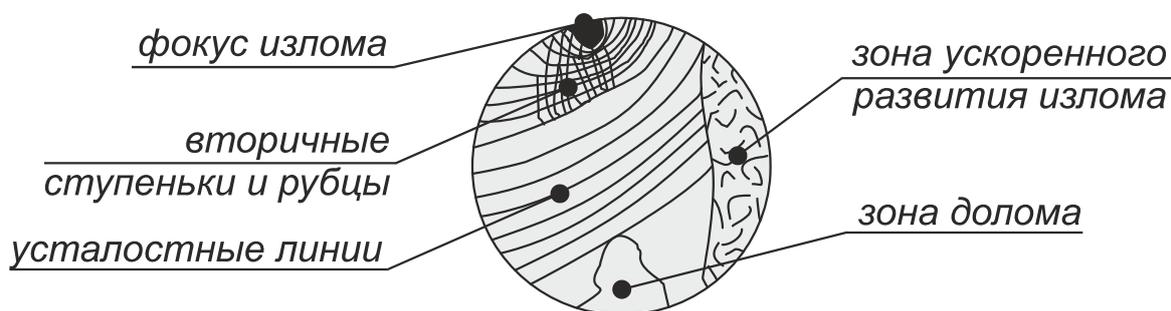


Рис. 3.2. Схема усталостного излома

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

Характер изменения напряжений во времени при стандартных испытаниях близок к гармоническому. Напряжения являются суммой постоянного (среднего напряжения) и напряжения, меняющегося по синусоиде с амплитудой σ_a (рис. 3.1, а). Циклом напряжений называют совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения.

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

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

Чтобы получить характеристики сопротивления усталости согласно ГОСТ 25.502-79 необходимо провести испытания не менее 10 одинаковых образцов. На рис. 3.3 представлена схема машины для испытаний при консольном изгибе с вращением.

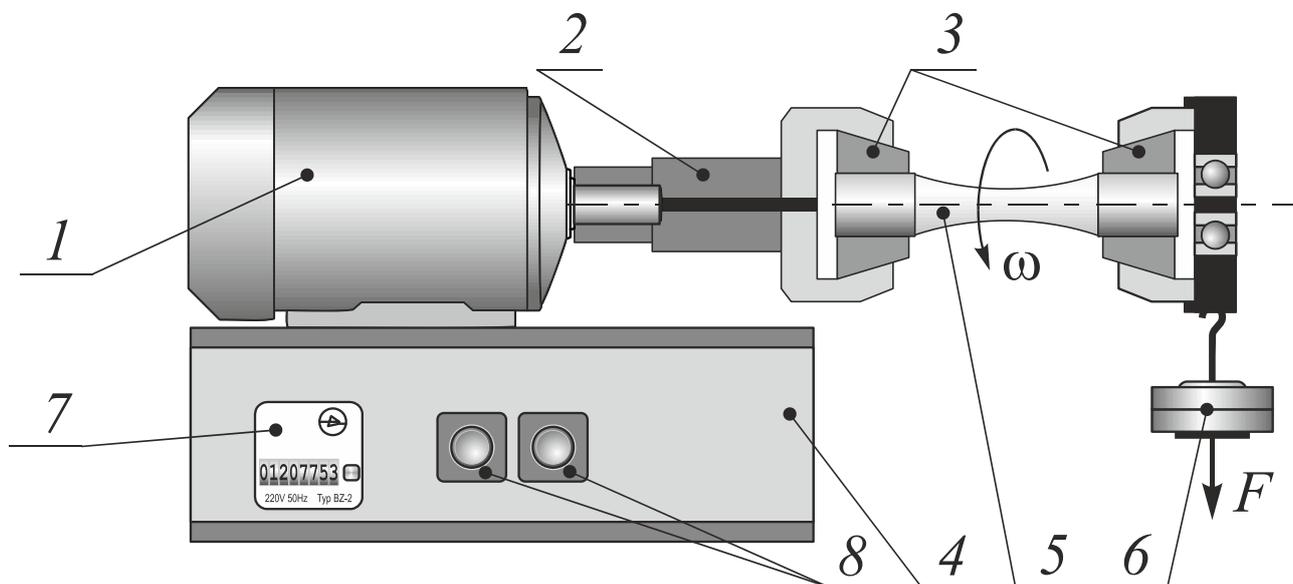


Рис. 3.3. Схема установки для консольного изгиба с вращением:

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

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

На рис. 3.4, а представлена кривая усталости (кривая Веллера) и на рис. 3.4, б представлена кривая усталости лабораторных образцов из легированной стали при изгибе с вращением.

Образец № 6 (рис. 3.4, б) при $\sigma_a = 35 \text{ кг/мм}^2$ проработал без разрушения 10^7 циклов (чему соответствует непрерывная работа усталостной машины в течение 56 часов при частоте вращения шпинделя $n = 3000 \text{ об/мин}$). В процессе более длительных испытаний было установлено, что в условиях нормальных температур и отсутствия коррозии образцы из сталей малой и средней прочности ($\sigma_{\text{пч}} < 100 \div 120 \text{ кгс/мм}^2$), титановые сплавы не разрушаются при $N = 10^7$, не разрушаются и далее. Поэтому испытания этих образцов можно прекратить при $N = 10^7$ циклов в том случае, если они не разрушились. Соответствующая точка на графике в этом случае снабжается стрелкой.

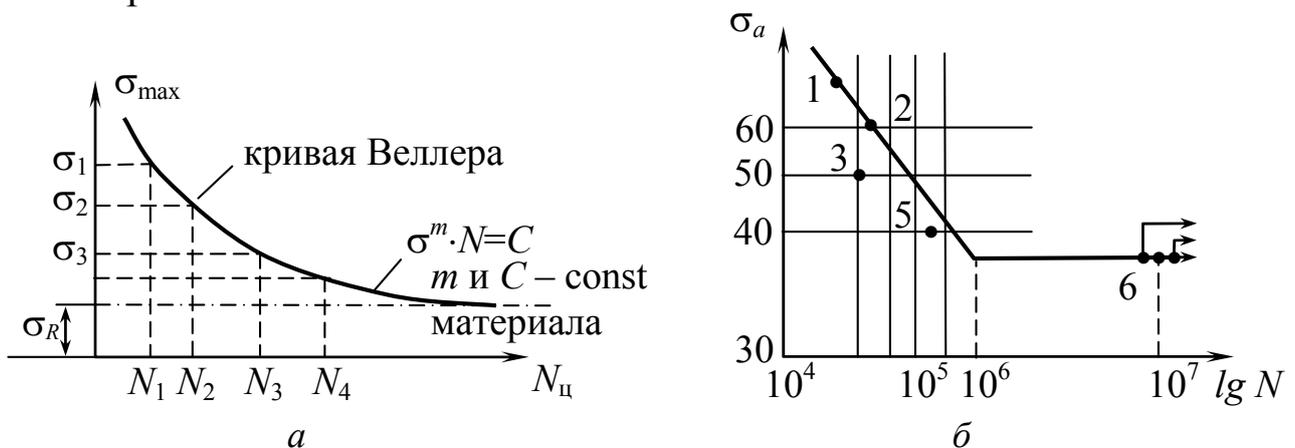


Рис. 3.4. Кривые усталости

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

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

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

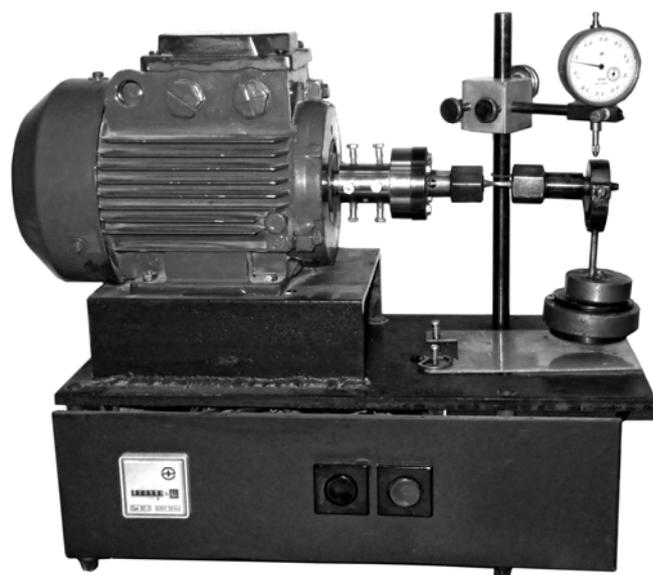
Сервогидравлическая разрывная машина Instron 8801; установки для консольного изгиба с вращением; измерительные средства; устройства тензометрирования; персональный компьютер; программное обеспечение Instron Bluehill, Instron DAX, Fasttrack Console.

4. ЗАДАНИЕ

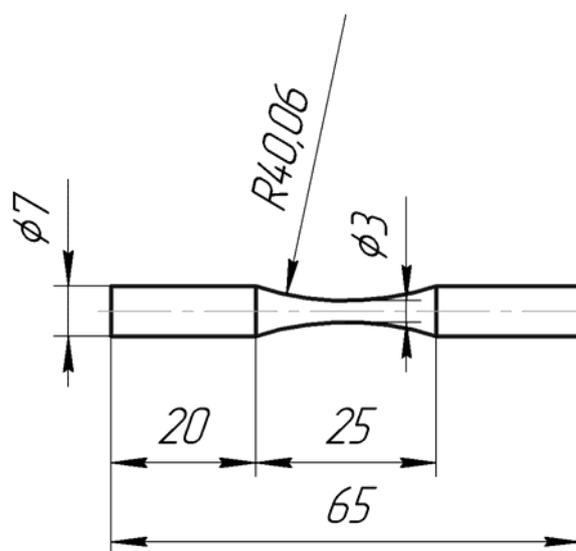
Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в журнал испытаний. Установить характер разрушения образцов при многоцикловом нагружении. Определить характеристики сопротивления усталости.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для многоцикловых испытаний на изгиб с вращением спроектирована установка. Принципиальная схема функционирования и составных элементов данной установки показана на рис. 3.5, *а*. Образец устанавливают в цанговые захваты машины, после чего его центрируют. Для измерения радиального биения на станине смонтирована штанга с индикатором часового типа. Установленный образец проворачивают и измеряют величину отклонения, выбирая радиальные отклонения компенсирующими пластинками.



а – установка для усталостных испытаний



б – гладкие образцы для усталостных испытаний

Рис. 3.5.

Испытания образцов проводятся в условиях изгиба с вращением с частотой $f=50$ Гц, при симметричном цикле нагружения и базе испытаний $N_6=10^7$ в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Вид гладких образцов представлен на рис. 3.5. Рабочую поверхность цилиндрических гладких образцов для усталостных испытаний подвергают шли-

фовке и механической полировке с обеспечением шероховатости $Ra0,63$ мкм.

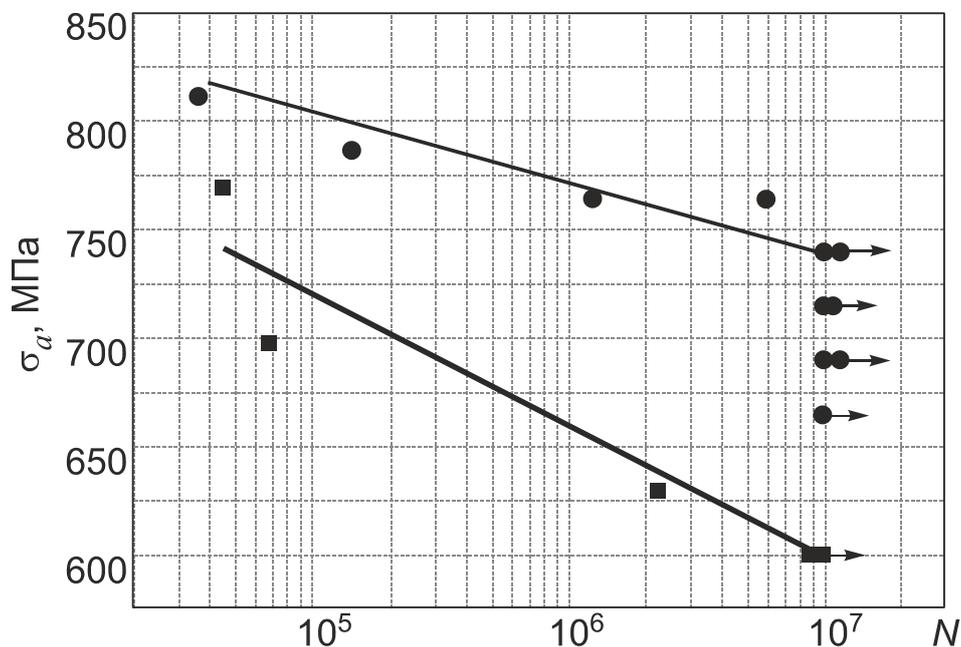


Рис. 3.6. Результаты усталостных испытаний гладких образцов:
● – УМЗ Ti-6Al-4V ELI, ■ – крупнозернистый титан

По результатам испытаний строятся кривые усталости. Пример усталостных испытаний ультрамелкозернистого сплава и его крупнозернистого состояния после горячей прокатки приведены на рис. 3.6. Усталостные испытания гладких образцов из УМЗ Ti-6Al-4V были проведены на прутках, полученных по отработанной для этого сплава технологии, включающей равноканальное угловое прессование, теплую экструзию и отжиг при 500°C , 2 часа. Образцы достигли предела выносливости 740 МПа после 10^7 циклов испытаний.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под усталостью материала?
2. Что понимается под выносливостью материала?
3. Какие характеристики применяются для оценки сопротивления усталости?
4. Что представляет собой предел выносливости?
5. В чем разница между мягким и жестким нагружением?
6. Как выбирается база испытаний?

7. В каких случаях кривая усталости не имеет выраженного горизонтального участка?
8. Каковы основные параметры цикла нагружения?
9. Понятие кривой усталости, ее параметры.
10. Каковы основные схемы нагружения образцов при усталостных испытаниях? Виды образцов?
11. Методика определения предела выносливости.
12. Принцип установки для испытаний на многоцикловую усталость при консольном изгибе с вращением.

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

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

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ ЖЕСТКОМ И МЯГКОМ НАГРУЖЕНИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Если многоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании, то малоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании.

Сопротивление малоциклового усталости Н. И. Марин назвал статической выносливостью, так как малоцикловая усталость реализуется в технике, как правило, при статическом или квазистатическом циклическом нагружениях. Им было разработано представление о малоциклового усталости как о процессе накопления знакопеременных локальных пластических деформаций и изучено влияние на статическую выносливость условий нагружения и конструктивно-технологических факторов, характерных для самолетостроения, а также рассмотрен ряд методических вопросов.

Жесткое нагружение реализуется в конструкциях не только в виде циклов температурных напряжений. Условия жесткого нагружения характерны для работы материала в зоне концентрации напряжений подавляющего большинства элементов авиаконструкций. В этих зонах предел упругости часто превышает, результатом чего являются пластическая деформация и внутренние остаточные напряжения, образующиеся при разгрузке из-за действия упругодеформированных материалов элемента на небольшие участки пластически деформированного металла. Эти остаточные напряжения имеют знак,

обратный напряжением от внешней нагрузки. Поэтому и при мягком циклическом нагружении элемента конструкции реализуется жесткое нагружение небольших наиболее напряженных участков материала в зонах концентрации напряжений. Так работает большинство потенциально опасных (в отношении усталости) элементов планера самолета.

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

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

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

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

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

Процессы образования и развития трещин малоциклового нагружения в общем случае протекают на фоне накопления однонаправленных и циклических пластических деформаций, причем описание ведется на основе соответствующих критериев малоциклового разрушения. Нестационарность упругопластических деформаций при малоцикловом нагружении определяет условия достижения предель-

ных состояний элементов конструкций и соответственно их несущую способность.

При обычной усталости в качестве характеристики нагруженности используются переменные напряжения цикла. Переменные деформации, возникающие при действии переменных напряжений в упругой области, однозначно определяются соотношением

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \sigma_a, \quad (4.1)$$

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

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

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

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

$$\varepsilon_a = f(\sigma_a) \quad (4.2)$$

имеет значительно более сложный характер, а для материалов с отсутствующим или очень малым упрочнением она практически не является однозначной. На рис. 4.6, а показаны два цикла деформаций с переменным напряжением

$$\sigma_{a1} = \sigma_{a2} = \sigma_T. \quad (4.3)$$

Для материала с пластическим упрочнением (рис. 4.6, б) наибольшие изменения амплитуды переменных напряжений (от σ_{a1} до σ_{a2}) приводят к значительным изменениям амплитуды переменных пластических деформаций (циклы $0BB_1A_1AB$ и $0CC_1\theta_10C$). Указанные соотношения обосновывают целесообразность использования при анализе малоцикловой усталости переменных деформаций в качестве характеристик нагруженности. Для пластически упрочняющихся материалов возможно описание малоцикловой усталости с помощью переменных напряжений.

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

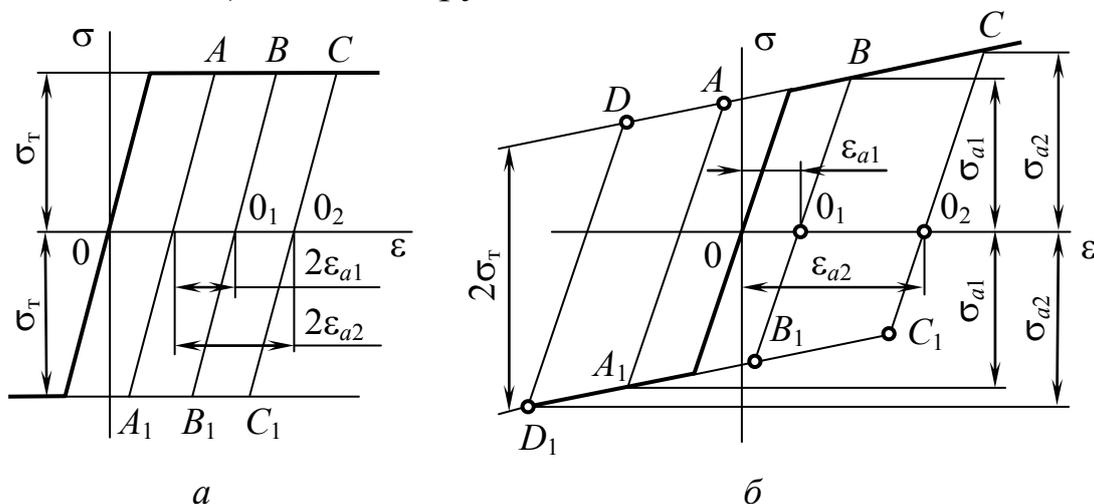


Рис. 4.6. Циклы напряжений и деформаций на диаграммах деформирования

Если получить серию таких стабилизированных петель гистерезиса, соответствующих разным размахам деформации цикла, можно построить диаграмму циклического деформирования, представляющую собой геометрическое место вершин петель гистерезиса (рис. 4.7).

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

Диаграммы циклического деформирования некоторых материалов сохраняются стабильными в течение всего циклического нагружения. Такие материалы называют циклически стабильными. Для многих материалов эти диаграммы могут изменяться с изменением числа циклов. Если кривые деформирования становятся по мере наработки круче, материал принято считать упрочняющимся, если отложе – разупрочняющимся. Это свойство

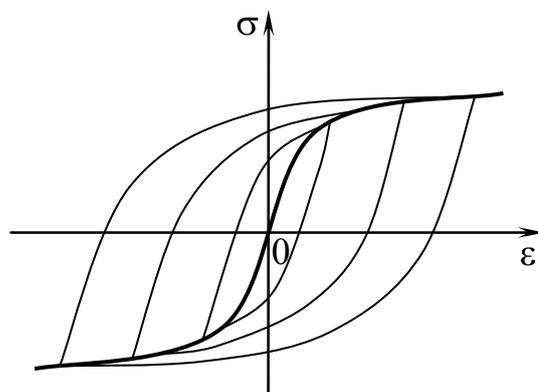


Рис. 4.7. Диаграмма циклического деформирования

сплава в сильной степени определяется химическим составом, структурой, текстурой, степенью нагартовки и т.п., а также температурными условиями циклического нагружения.

Большинство алюминиевых сплавов являются упрочняющимися, такие сплавы, как 30ХГСА после отжига, углеродистые стали, стабильные к разупрочняющимся сплавам относятся многие легированные стали, в частности 30ХГСА после нормализации или закалки.

Для циклически упрочняющегося материала характерно уменьшение ширины петли гистерезиса и увеличение циклического напряжения (рис. 4.8, *а*) для циклически разупрочняющегося материала характерно расширение петли гистерезиса и снижение циклического напряжения (рис. 4.8, *б*).

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

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

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

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

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

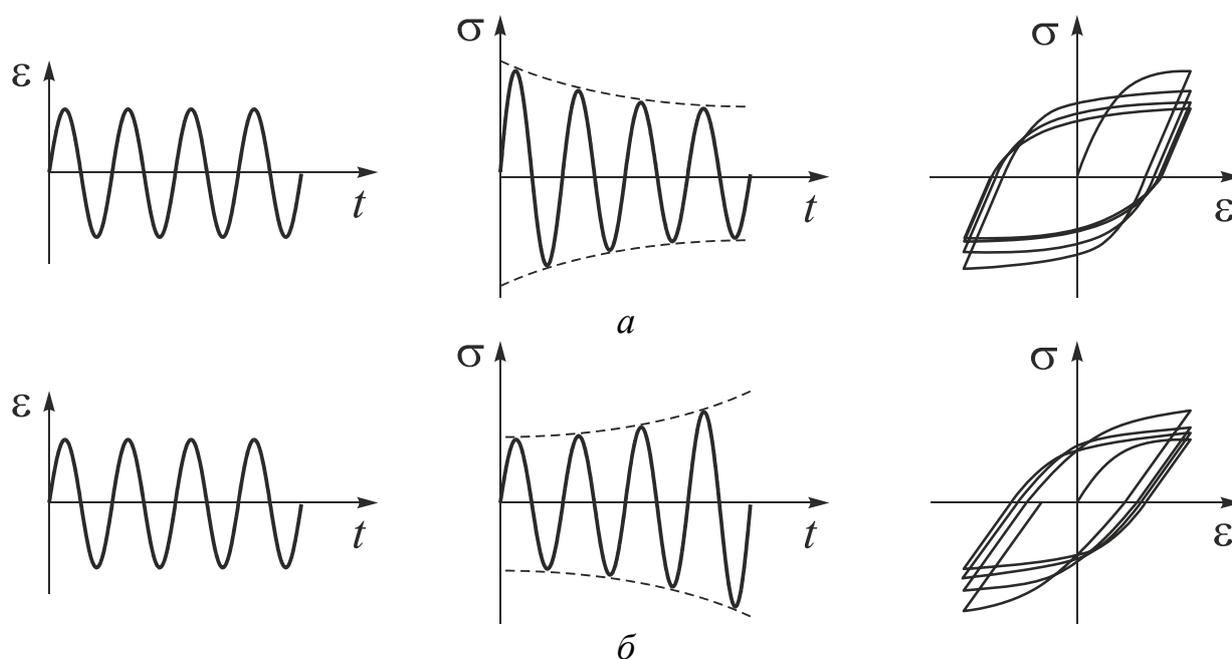


Рис. 4.8. Диаграмма циклического деформирования:
a – циклически упрочняющийся материал;
б – циклически разупрочняющийся материал

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

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min} = 2\varepsilon_a. \quad (4.4)$$

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

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

Обычно результаты испытаний на малоцикловую усталость графически изображаются в виде зависимости логарифма амплитуды деформации или размаха деформации от логарифма числа циклов до разрушения. Причем было показано, что долговечность в большей степени определяется полной деформацией, а не пластической, осо-

бенно в области больших значений долговечности из диапазона малоциклового усталости.

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

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Сервогидравлическая разрывная машина Instron 8801 (рис. 4.9); измерительные средства; устройства тензометрирования; персональный компьютер; программное обеспечение Instron Bluehill, Instron DAX, Fasttrack Console.

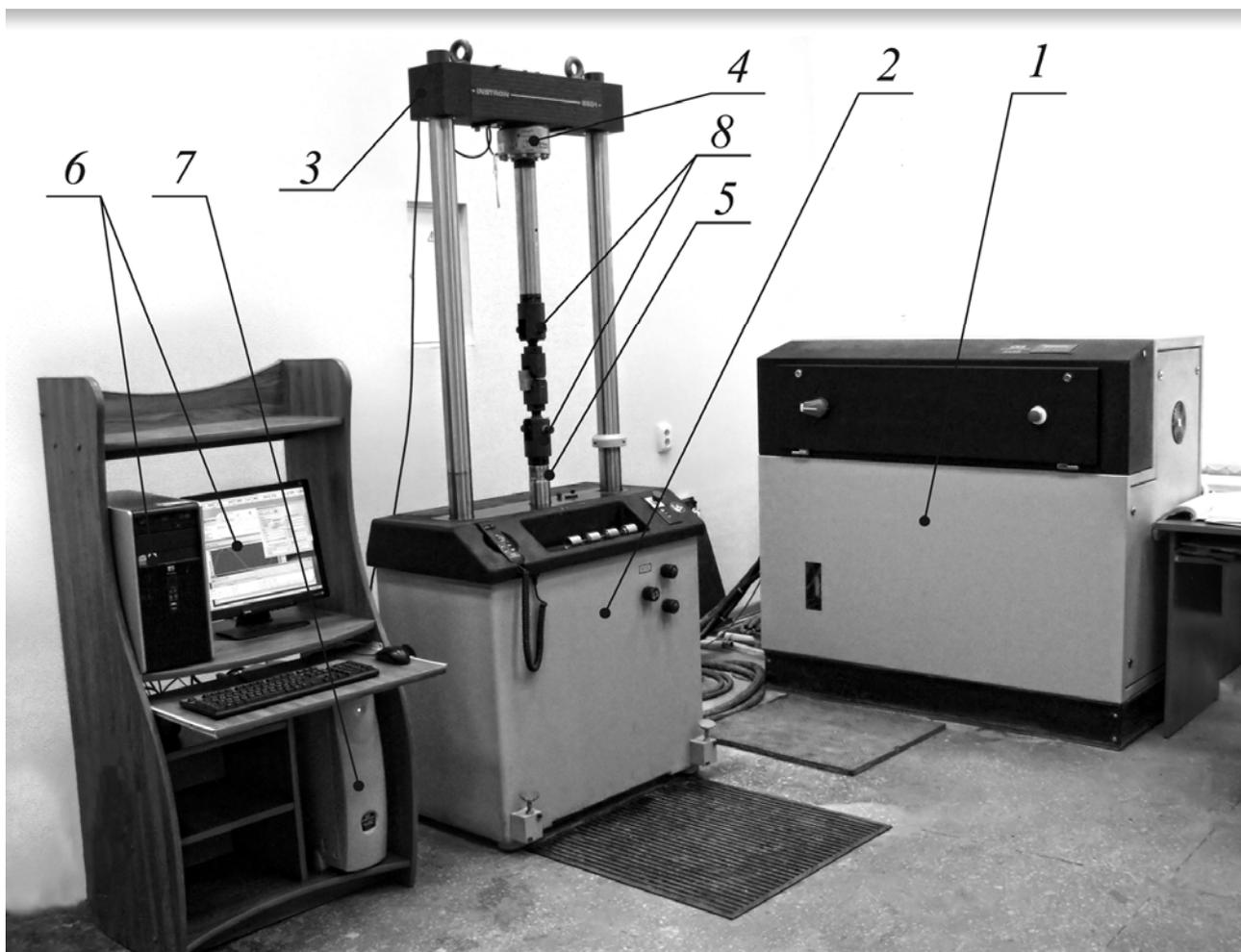


Рис. 4.9. Испытательная машина Instron 8802: 1 – маслостанция, 2 – нагрузочная рама, неподвижная траверса, 3 – неподвижная (перемещаемая) траверса, 4 – датчик силы, 5 – подвижная траверса, 6 – персональный компьютер с программным обеспечением для управления испытаниями, 7 – контроллер рамы и маслостанции, 8 – захваты

4. ЗАДАНИЕ

Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образцов в журнал испытаний. Установить характер разрушения образцов при малоцикловом жестком и мягком нагружении. Определить характеристики сопротивления малоциклового усталости.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Экспериментальное определение характеристик сопротивления малоциклового усталости проводят на разрывной гидравлической машине Instron 8802 с максимальной нагрузочной способностью 100 кН (рис. 4.9).

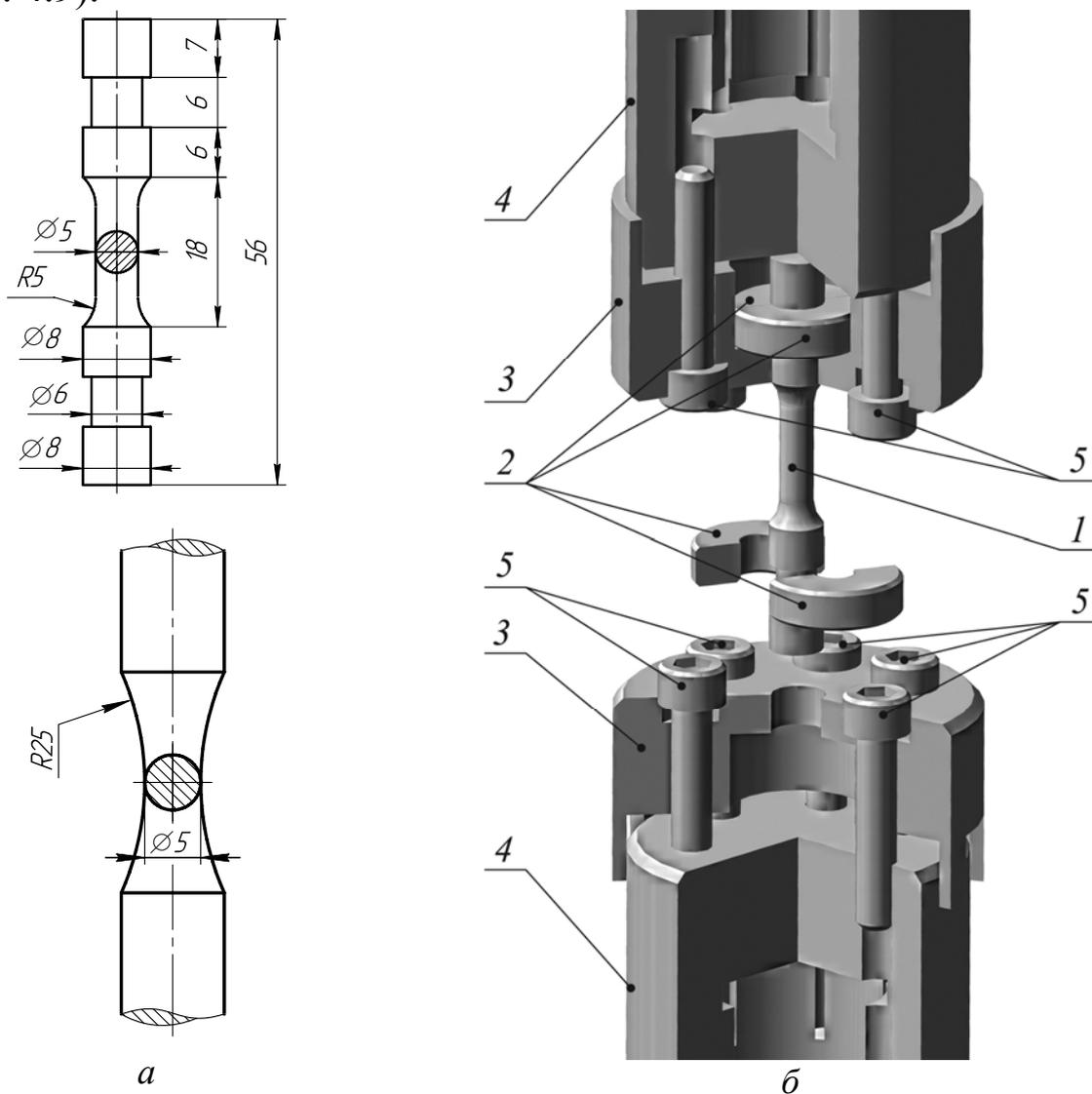


Рис. 4.10. Образцы для малоцикловых испытаний (а) и оснастка (б) для закрепления образцов в захватах испытательной машины: 1 – образец, 2 – сухарики, 3 – крышки, 4 – переходники, 5 – винты

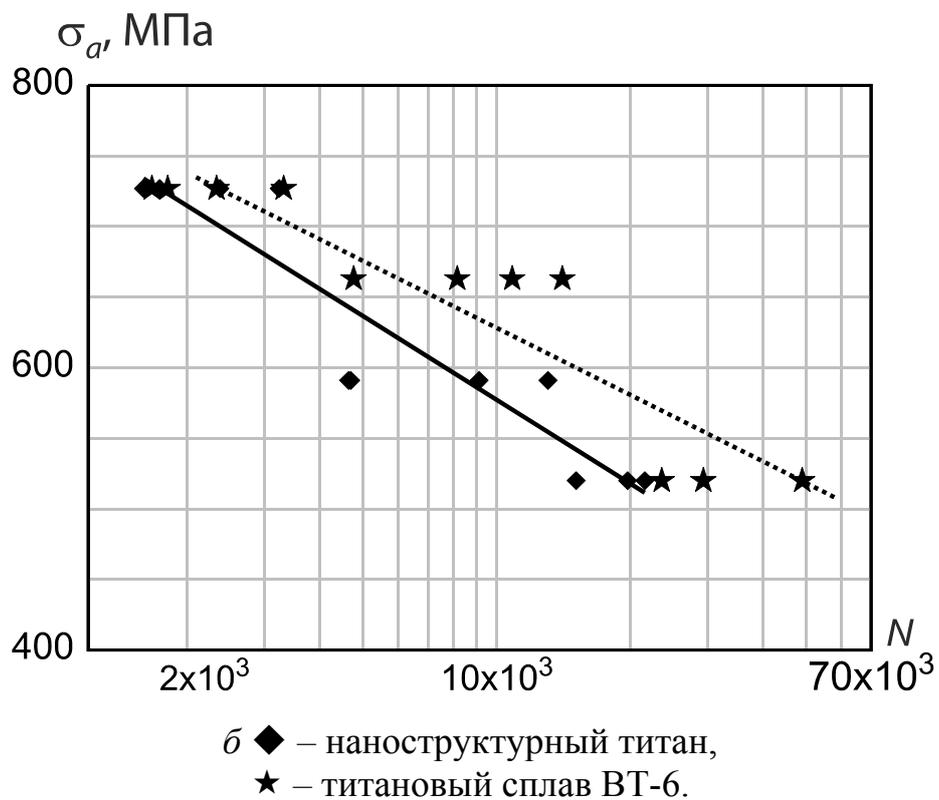
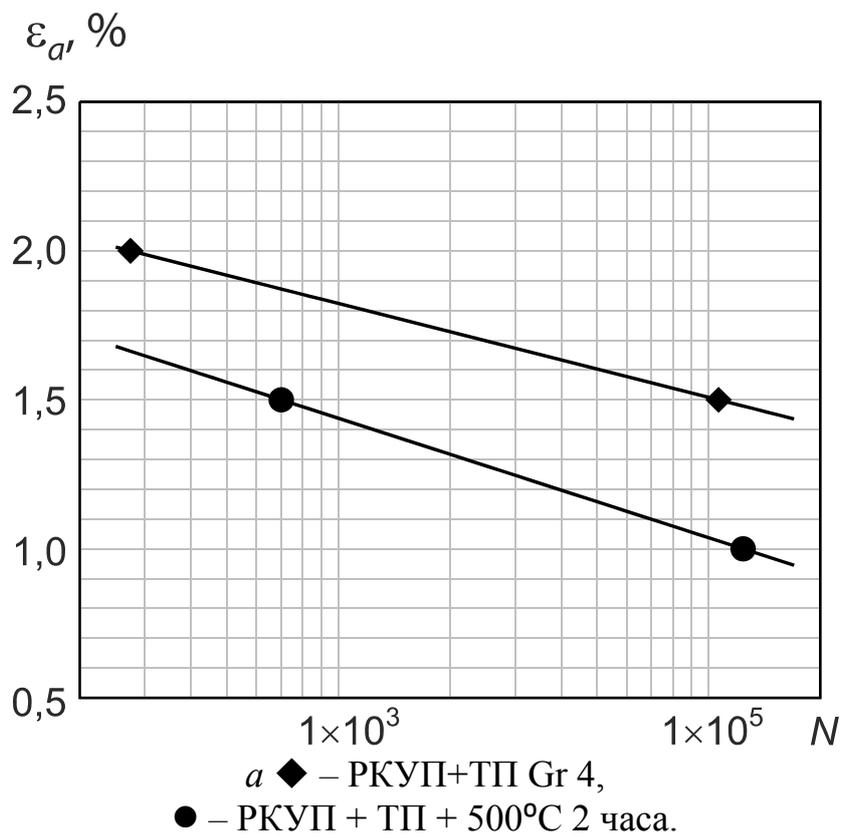


Рис. 4.11. Результаты малоцикловых испытаний при жестком и мягком нагружении

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

Форма и размеры головок образцов зависят от способа их крепления в захватах испытательных машин. Переходную часть образца выбирают с учетом достижения минимальной концентрации напряжений и деформаций в переходных зонах.

При склонности цилиндрических образцов к потере устойчивости, изменению формы или разрушению в переходных зонах рекомендуется использовать корсетные образцы. Допускается также применять цилиндрические образцы с укороченной рабочей частью (рис. 4.10, *а*).

Основным видом испытаний на малоцикловую усталость является растяжение-сжатие, основным типом нагружения – жесткое нагружение. Испытания проводят до момента образования поверхностной трещины размером 5-10 % от диаметра образца, определяемой с помощью оптического метода или другими способами. Допускается проводить испытания до окончательного разрушения без фиксации появления трещины, когда стадия распространения трещины на заданном режиме не превышает 10 % общей долговечности. Конструктивное оформление узла испытаний для жесткого нагружения показано на рис. 4.10, *б*.

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

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

Результаты испытаний при жестком нагружении образцов из наноструктурного титана показаны на рис. 4.11, *а*. Испытания проводились в условиях симметричного цикла растяжения-сжатия. На рис. 4.11, *б* приведены результаты испытаний шпилек из наноструктурного чистого титана в сравнении со сплавом ВТ-6 при мягком нагружении, в условиях пульсирующего цикла нагружения.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

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

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение методики проведения испытаний на удар, теоретическое определение нормальных напряжений и деформаций балки прямоугольного сечения при ударно-действующей нагрузке, коэффициента динамичности и сравнение с экспериментальным значением напряжений и деформации коэффициента динамичности. Приобретение навыков получения коэффициента динамичности с помощью тензодатчиков (омических датчиков).

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

До сих пор во всех рассмотренных лабораторных работах предполагалось, что действующие нагрузки статические, т.е. медленно изменяются с течением времени. Но при проектировании машин мы часто встречаемся с деталями, совершающими сложные перемещения, на которые действуют динамические нагрузки, возникающие в результате появления значительных ускорений.

Корпус летательного аппарата подвергается на старте действию силы тяги, вызывающей в течение короткого промежутка времени значительные продольные сжимающие усилия. Конструкция летательного аппарата испытывает динамические нагрузки при резких изменениях режима полета, удар при посадке, а также волновые нагрузки.

К динамическому виду нагрузки относится ударная нагрузка. Примерами ударно действующих нагрузок являются действия падающей бабы на забиваемую сваю, молота на отковываемую деталь и наковальню, взрыв пороха в стволе ружья и т.д. Кроме этого, на детали машин могут действовать ударные нагрузки вследствие наличия зазоров в местах сопряжения деталей. Во всех этих случаях возможна потеря прочности, если расчет проведен без учёта скорости нагружения.

Методы расчета деталей машин на ударную нагрузку весьма сложны. Расчёты на прочность, жёсткость при ударной нагрузке относятся к наиболее сложным задачам механики. Поэтому задачи эти

решаются в основном приближенными методами. Среди приближенных методов расчёта наибольшее распространение получил энергетический метод, который не дает высокой точности, но в то же время позволяет оценить порядок наибольших значений напряжений и деформаций.

Рассмотрим в качестве простейшего примера определение напряжения и деформации в бруске при осевом ударе.

Верхний конец стержня длиной l и с жесткостью поперечного сечения EA (рис. 5.1) закреплен неподвижно. Если поднять груз Q на высоту H и отпустить его, то он упадет на выступ. Под действием удара стержень получит динамическое удлинение – Δl_{δ} .

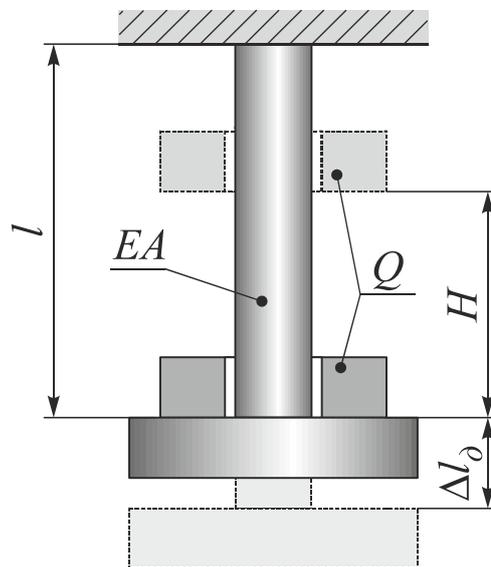


Рис. 5.1. Осевой удар

В предположении, что возникающие в стержне напряжения не превышают предела упругости, можно определить данное удлинение. Работа, производимая грузом при его движении вниз вместе с выступом, будет $Q\Delta l_{\delta}$. Тогда полная работа, произведенная грузом, будет $QH + Q\Delta l_{\delta}$. Если пренебречь массой стержня и рассеянием энергии, происходящем при ударе, то вся работа идет на растяжение стержня. Известно, что работа по деформации стержня $\Delta l_{\delta}^2 EA / 2l$. Следовательно, для определения Δl_{δ} можно составить уравнение:

$$Q(H + \Delta l_{\delta}) = \frac{\Delta l_{\delta}^2 EA}{2l}. \quad (5.1)$$

Раскрыв скобки и разделив все члены на $EA/2l$, получим:

$$\Delta l_{\delta}^2 - \frac{2Ql}{EA} \Delta l_{\delta} - \frac{2QHl}{EA} = 0. \quad (5.2)$$

Так как удлинение стержня от статически приложенной силы $\Delta l_{cm} = \frac{Ql}{EA}$, то формулу (5.2) можно переписать в следующем виде:

$$\Delta l_{\delta}^2 - 2\Delta l_{cm} \Delta l_{\delta} - 2\Delta l_{cm} H = 0,$$

откуда:

$$\Delta l_{\delta} = \Delta l_{cm} + \sqrt{\Delta l_{cm}^2 + 2\Delta l_{cm} H}. \quad (5.3)$$

Формулу (5.3) можно представить в следующем виде:

$$\Delta l_{\delta} = \Delta l_{cm} K_{\delta}. \quad (5.4)$$

где K_{δ} – коэффициент динамичности:

$$K_{\delta} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta l_{cm}}}. \quad (5.5)$$

После удара напряжение в стержне согласно закону Гука будет:

$$\sigma_{\delta} = E\varepsilon_{\delta} = E \frac{\Delta l_{cm} K_{\delta}}{l} = E\varepsilon_{cm} K_{\delta} = \sigma_{cm} K_{\delta}. \quad (5.6)$$

Таким образом, если известно значение коэффициента динамичности, то по выражениям (5.4) и (5.6) можно определить динамические перемещения и напряжения.

Значение коэффициента динамичности (5.5) зависит от высоты падения груза и жесткости стержня. Если груз Q не падает с высоты, а прикладывается внезапно, то $H = 0$, а из формулы (5.5) получим $K_{\delta} = 2$. Напряжение при мгновенном приложении силы окажется вдвое больше статического $\sigma_{\delta} = 2\sigma_{cm}$.

Выражение (5.3) справедливо также и для определения величины удлинения стержня при изгибающем ударе (рис. 5.2).

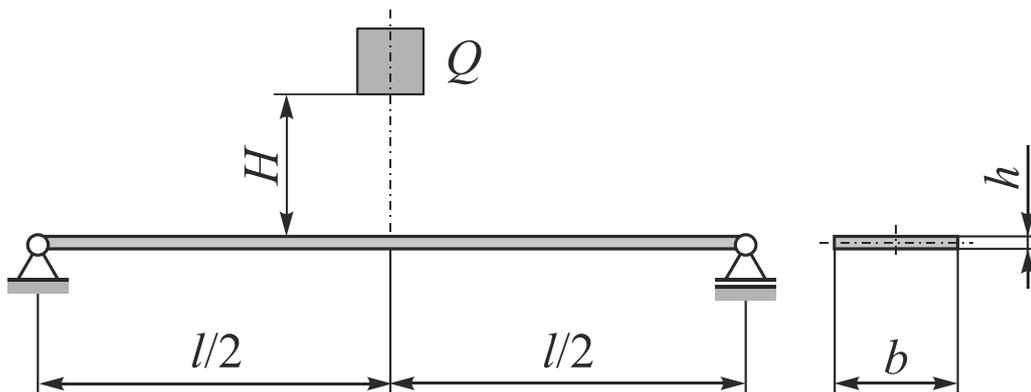


Рис. 5.2. Изгибающий удар

Максимальное динамическое напряжение будет больше статического во столько раз, во сколько динамическая деформация наружных волокон балки больше, чем статической, т.е. $K_{\delta} = \varepsilon_{\delta}/\varepsilon_{cm}$.

В настоящей работе экспериментально и теоретически определяются напряжения и коэффициент динамичности для изгибающего удара путем замера деформаций волокон балки ε_{cm} и ε_{δ} . Так как при изгибе продольные волокна балки испытывают растяжение или сжатие, то зная ε_{cm} и ε_{δ} , можно определить $\sigma_{cm} = \varepsilon_{cm}E$ и $\sigma_{\delta} = \varepsilon_{\delta}E$, а $\varepsilon_{\delta} = \varepsilon_{cm}K_{\delta}$ и

$$K_{\delta} = \frac{\varepsilon_{\delta}}{\varepsilon_{cm}} = \frac{\sigma_{\delta}}{\sigma_{cm}}.$$

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка для испытания на изгибающий удар; измерительные средства; устройства тензометрирования.

4. ЗАДАНИЕ

Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии образца в журнал испытаний. Определить нормальные напряжения в сечениях, где установлены тензодатчики, рассчитать коэффициент динамичности для различных высот падения груза.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Экспериментальное определение K_{δ} производится на установке, конструктивная схема которой представлена на рис. 5.3. Образец представляет собой металлическую гибкую балку шириной b и толщиной h , шарнирно прикрепленную к опорам. На образце установлены тензодатчики для замера деформаций при прогибе балки. Груз весом 170 г поднимается с помощью нити последовательно на 3 уровня высоты H : $H_1 = 14$ см, $H_2 = 24$ см, $H_3 = 34$ см, где он фиксируется с помощью двух электромагнитных реле.

Измерение статических и динамических деформаций осуществляется с помощью прибора, принцип работы которого заключается в следующем: прибор преобразует кратковременные деформации балки с наклеенными на нее тензодатчиками, в разбалансировку мостовой схемы, в которую включены эти тензодатчики. Возникающий при ударе сигнал разбаланса на выходе мостовой схемы (питаемой от генератора переменного напряжения) усиливается, детектируется и запоминается электронной схемой, имеющей определенную постоянную времени и выходной стрелочный индикатор.

Определение линейных деформаций ϵ при помощи проволочных датчиков сопротивления приведено подробно в описании лабораторной работы № 9.

Экспериментальное определение нормальных напряжений в поперечном сечении балки производится по величине линейной деформации в направлении продольной оси.

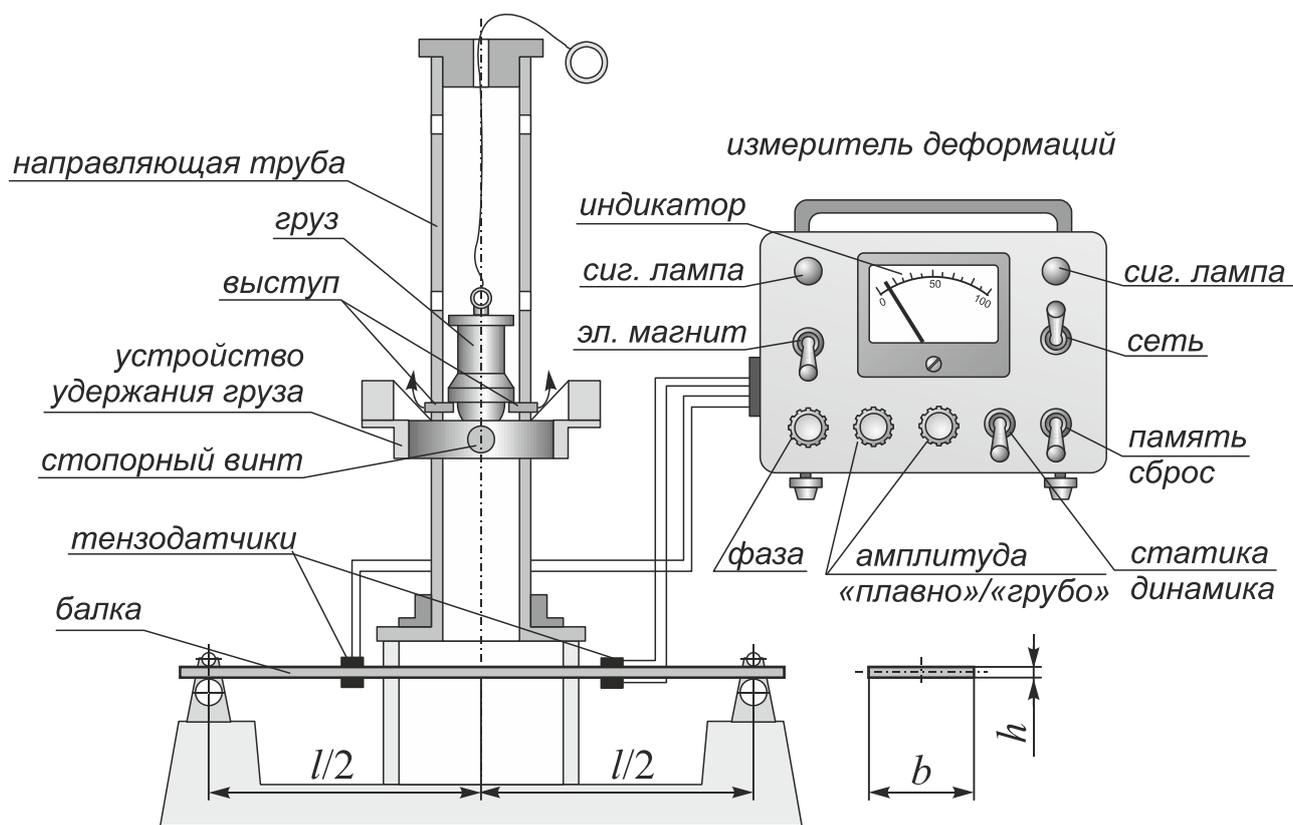


Рис. 5.3. Установка для проведения эксперимента

Для этого необходимо измерить высоту сечения балки h , ширину b , длину пролета l , расстояние тензорезисторов от опор a , вычислить необходимые геометрические характеристики.

Установить тумблеры «сеть», «эл. магнит», «статика/динамика» и «память/сброс» в нижнее положение, а ручки потенциометров «фаза», «амплитуда плавно» и «амплитуда грубо» в среднее положение (белая точка на ручках должна находиться в верхнем положении). Подключить шнур питания в электросеть 220 В, включить тумблер «сеть», при этом должна загореться сигнальная лампа. Прибор готов к работе после прогрева в течение 15 мин. Убедиться, что исследуемая балка освобождена от груза, в противном случае включить тумб-

лер «эл. магнит», при этом загорится сигнальная лампа. За кольцо приподнять груз выше устройства удержания груза на заданной высоте, отключить «эл. магнит» и плавно отпустить груз на удерживающее устройство.

Предварительная настройка. Потенциометром «амплитуда грубо» установить стрелку индикатора в минимальное положение, затем потенциометром «фаза» уменьшить показания индикатора. Операцию настройки повторить несколько раз в указанной последовательности, пока стрелка индикатора не будет установлена на нуль или близкое к нулю положение.

Окончательная настройка. Тумблер «статика/динамика» перевести в положение «статика». Потенциометрами «амплитуда плавно», а затем «фаза» уменьшить показания индикатора. Операцию повторить несколько раз в указанной последовательности, пока стрелка индикатора не будет установлена на нуль. Прибор готов к измерениям.

Придерживая груз за кольцо, включить «эл. магнит» и плавно отпустить груз на балку, которая прогнется под действием силы. Записать показания индикатора. Повторить опыт. Если после снятия нагрузки с балки индикатор находится в отличном от нуля положении, произвести дополнительную регулировку.

Убедиться, что груз находится на балке и включить «эл. магнит». Отпустив стопорный винт, установить устройство удержания груза на высоту H_1 таким образом, чтобы выступы, расположенные в нижней части подвижных планок электромагнитов, находились по центру отверстий, имеющих в направляющей трубе. Затянуть винт и зафиксировать груз на этой высоте. Если стрелка индикатора находится в отличном от нуля положении, произвести дополнительную регулировку.

Перевести переключатель «статика/динамика» в положение «дин.», переключатель «память/сброс» в положение «память» и включить «эл. магнит». Падение груза вызовет кратковременную динамическую деформацию балки, которая зафиксируется индикатором. Записать показания в таблицу наблюдений журнала. Повторить опыт. Для этого необходимо вновь зафиксировать груз на высоте H_1 . Перевести переключатель «память/сброс» на несколько секунд в положение «сброс», убедиться, что стрелка индикатора возвратилась на нуль, и вновь перевести в положение «память». Затем включить «эл. магнит» и записать показания индикатора.

Аналогично повторить опыт для высоты H_2 и H_3 .

После окончания опытов зафиксировать груз и отключить тумблер «сеть». По результатам опытов вычислить динамические напряжения, соответствующие определенной высоте падения груза, и вычислить экспериментальное значение коэффициента динамичности K_d .

Найти в процентах величину расхождения между теоретическим и экспериментальными значениями коэффициента динамичности для каждой высоты падения груза.

Обработка и анализ результатов. По формуле (5.5) теоретически определяем для трех высот значение коэффициента динамичности и записываем в таблицу наблюдений, в которой также приведены выражения, необходимые для вычислений. В сечении, где наклеены тензодатчики (рис. 3.4), определяем нормальные напряжения $\sigma_{ст}^T$ по

формуле $\sigma_{ст}^T = \frac{Ql}{8W} = \frac{Ql}{8 \frac{bh^2}{6}}$. Величины экспериментальных напряжений

вычисляют по формуле для статических нагрузок $\sigma_{ст}^{\text{э}} = KEn_{ст}$, где $K = 10^{-6}$, а для динамических нагрузок $\sigma_{д}^{\text{э}} = K_1En_{д}$, где $K_1 = 2 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, зная, что $K_d^{\text{э}} = \frac{\sigma_{д}^{\text{э}}}{\sigma_{ст}^{\text{э}}}$, можно вычислить значение коэф-

фициента динамичности для различных высот и сопоставить с результатами теоретических расчетов (рис. 5.4).

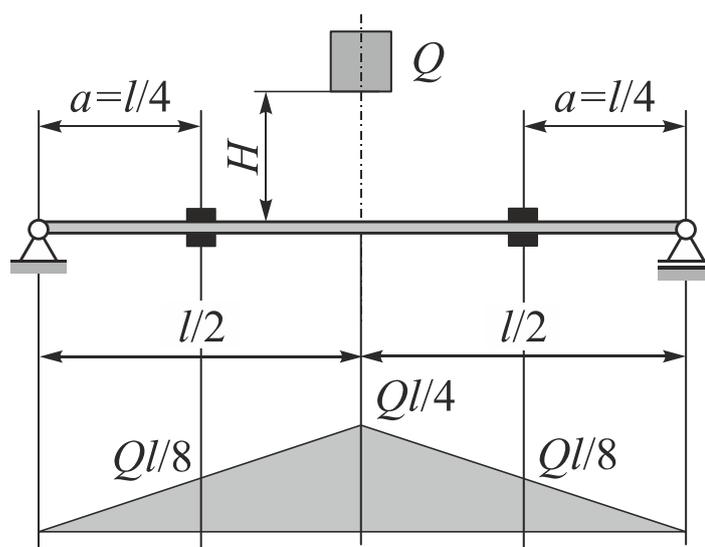


Рис. 5.4. Расчетная схема балки с тензодатчиками

Сопоставляя результаты экспериментальными теоретических расчетов, определяют величину погрешности и указывают наиболее вероятные причины погрешностей эксперимента.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются динамические напряжения и деформации при ударе от статических?
2. Как теоретически определяется коэффициент динамичности при ударе?
3. Как меняется значение коэффициента динамичности по длине балки?
4. От чего зависит коэффициент динамичности при ударе?
5. Как экспериментально определяется коэффициент динамичности?
6. Каков принцип работы прибора, применяемого в данной работе для замера деформаций?
7. Каков порядок выполнения работы?
8. Укажите наиболее вероятные причины погрешностей эксперимента.

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания. Приводят вычисления коэффициента динамичности, нормальных напряжений в балке. Заполняют таблицу полученных в ходе эксперимента данных, производят необходимые вычисления и сопоставляют полученные в ходе эксперимента данные с расчетными. В заключении анализируют полученные результаты, дают заключение о погрешности, делают выводы по работе.

Лабораторная работа №6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И О ВЗАИМНОСТИ РАБОТ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для представления возможных перемещений рассмотрим процесс нагружения балки двумя силами F и P , приложенными в различной последовательности (рис. 6.1).

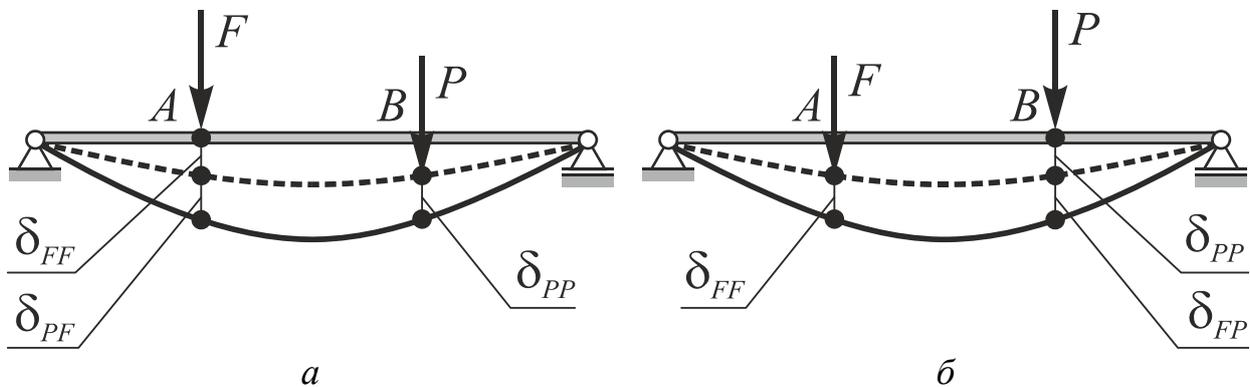


Рис. 6.1. Последовательность нагружения балки.

Пусть на балку в первом случае действует сила F (рис. 6.1, a), приложенная статически от нуля до конечного значения. При этом вертикальное перемещение точки приложения силы δ_{FF} будет действительным перемещением.

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

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

Рассмотрим теперь понятие о действительной и возможной работе силы. Действительная работа внешней силы F равна половине произведения силы на перемещение точки ее приложения по направлению силы. Эта работа переходит в потенциальную энергию деформации системы

$$U_F = \frac{1}{2} F \delta_{FF}. \quad (6.1)$$

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

$$W_F = F \delta_{PF}. \quad (6.2)$$

Выражение для полной работы при последовательном нагружении балки силой F , а затем силой P (рис. 6.1, *a*) будет

$$U_1 = F \frac{\delta_{FF}}{2} + F \delta_{PF} + P \frac{\delta_{PP}}{2}. \quad (6.3)$$

Если изменить порядок приложения сил, а именно сначала приложить силу P , а затем силу F (рис. 6.1, *б*), то получим следующее выражение для полной работы:

$$U_2 = P \frac{\delta_{PP}}{2} + P \delta_{FP} + F \frac{\delta_{FF}}{2}. \quad (6.4)$$

От порядка приложения сил величина работы не меняется. Приравнявая 6.3 и 6.4, получим:

$$F \delta_{PF} = P \delta_{FP}. \quad (6.5)$$

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

В случае равенства сил $F = P$ теорема о взаимности возможных работ преобразуется в теорему о взаимности возможных перемещений (теорему Максвелла): перемещение точки приложения первой силы по ее направлению, вызванное действием второй силы, равно перемещению точки приложения второй силы по ее направлению, вызванному действием первой силы. Преобразуя 6.5, можно записать:

$$\delta_{PF} = \delta_{FP}. \quad (6.6)$$

Теоремы о взаимности работ и перемещений имеют большое значение в общей теории исследования напряженного и деформированного состояния стержней, пластинок, оболочек и других расчет-

ных объектов. Их применение существенно упрощает решение многих задач механики, а также производство опытов по определению перемещений.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка для испытаний на изгиб; измерительные средства; устройства тензометрирования.

4. ЗАДАНИЕ

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

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

На рис. 6.2 представлена конструктивная схема экспериментальной установки. Стальная балка 2 прямоугольного сечения расположена на опорах 3, установленных на станине 1. В точках A и B балки с помощью подвесок 6, 7 прикладываются силы F и P . В этих же точках установлены индикаторы часового типа 4, 5. Цена одного деления индикатора 0,01 мм.

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

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

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

Полученные в результате эксперимента величины возможных перемещений подставляют в зависимость 6.5. Отличие левой и правой частей этого равенства не должно составлять более 5%. В случае равенства сил F и P величины возможных перемещений не должны отличаться более 5%.

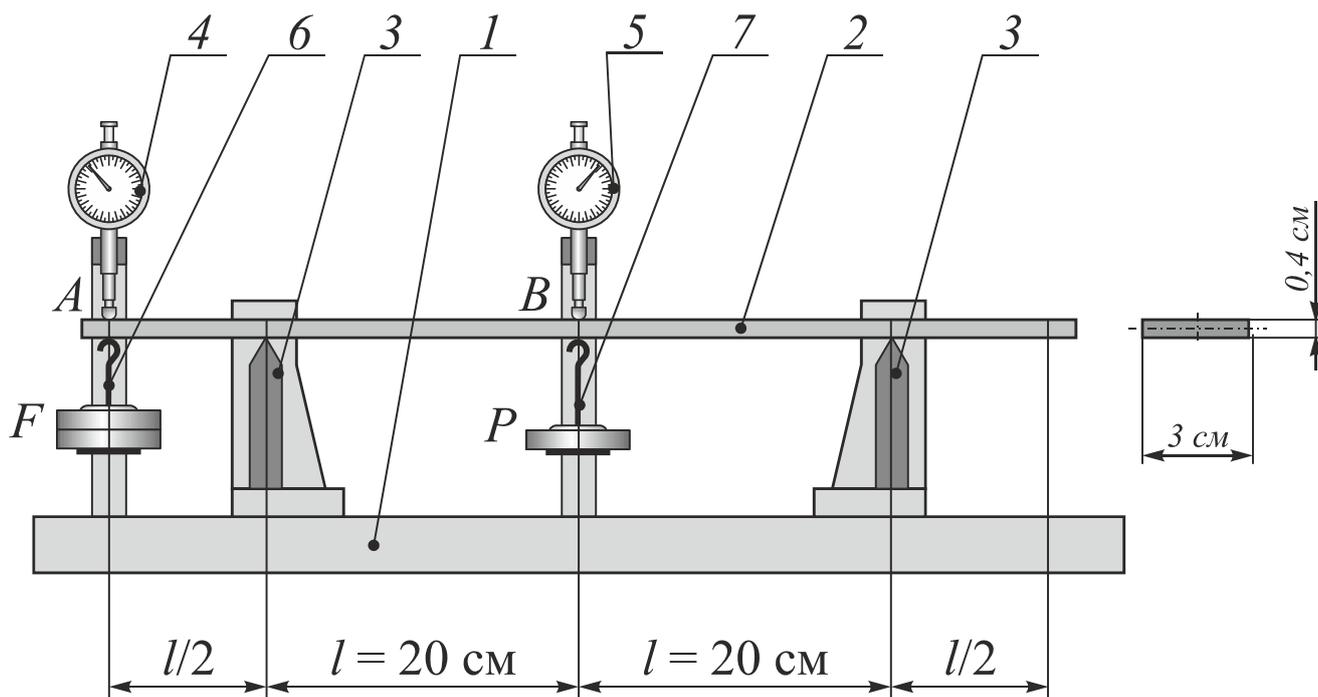


Рис. 6.2. Схема установки

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, вычисления перемещений при различных последовательностях нагружения балки. Заполняют таблицу полученных данных. В заключении анализируют полученные результаты, сопоставляют расчетные и экспериментальные данные, дают заключение о погрешности метода, делают выводы по работе.

Лабораторная работа №7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ПЛОСКОЙ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В практике конструирования современных машин и сооружений часто встречаются системы, которые при расчёте на прочность и жёсткость представляют собой статически неопределимые задачи.

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

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

На рис. 7.1, *a* показана прямоугольная рама, состоящая из стержней постоянной жёсткости и нагруженная сосредоточенными силами. Данная рама имеет шесть связей, следовательно, система трижды статически неопределима, причем в качестве «лишних» связей можно принять внутренние связи. Действительно равновесие рамы не нарушится, если разрезать раму в любом сечении, т.е. снять три внутренние связи.

Геометрически схема рамы симметрична. Наличие симметрии может значительно облегчить раскрытие статической неопределимости, так как вследствие симметрии некоторые перемещения из числа входящих в уравнение перемещений оказываются равными нулю. По-

этому в поперечном сечении, расположенном на оси прямой симметрии, заведомо отсутствует поперечная сила. Чтобы использовать это обстоятельство, необходимо, выбирая основную систему, принять за «лишние» связи внутренние связи в сечении на оси симметрии. Схема (рис. 7.1, а) заданной рамы симметрична геометрически и по нагрузке. На рис. 7.1, б показаны основная и эквивалентная системы. Условия перемещений, записанные в канонической форме, следующие:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1F} = 0. \quad (7.1)$$

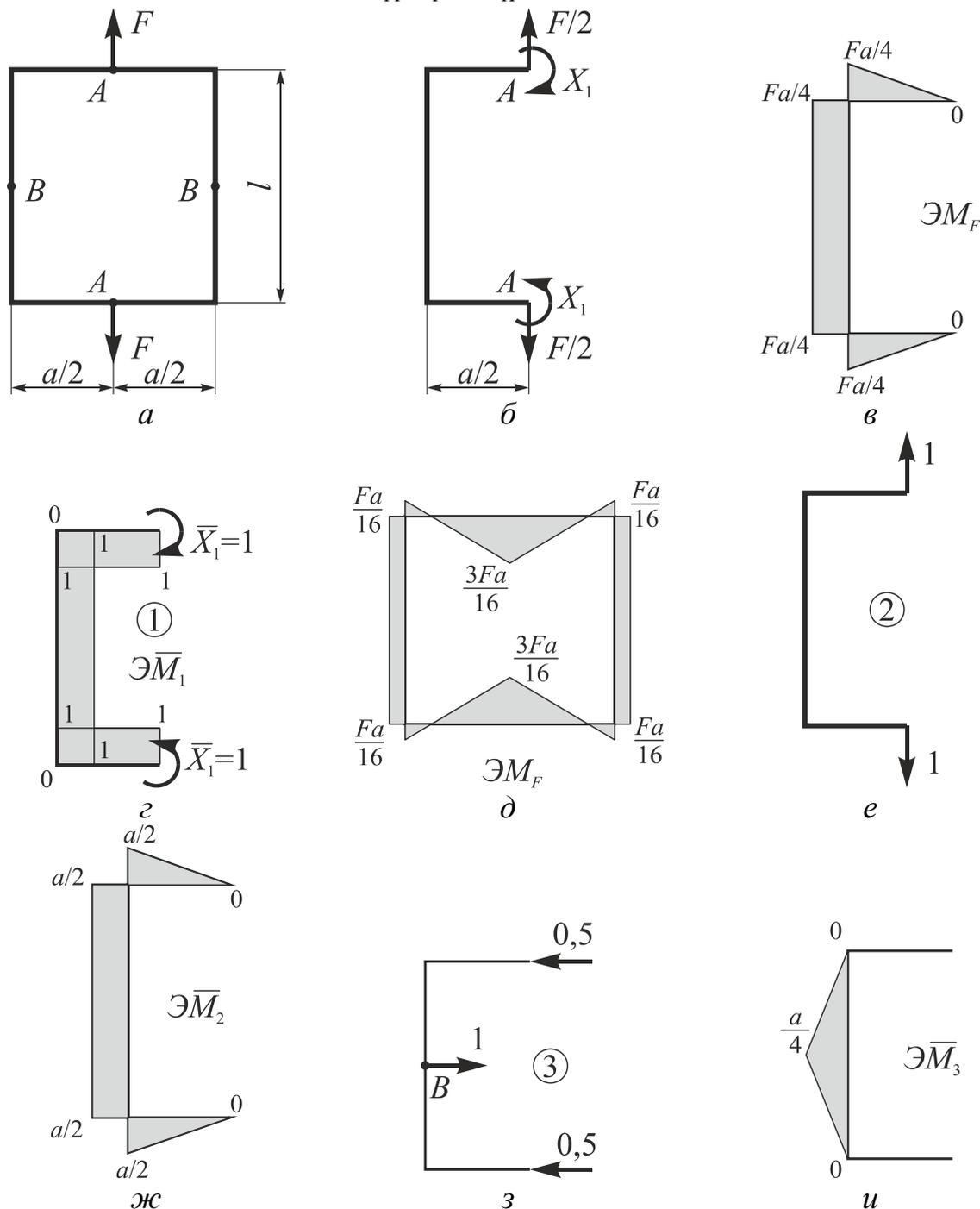


Рис. 7.1. Расчетные схемы квадратного контура, эпюры

Для вычисления перемещений, входящих в эти уравнения, построены эпюры изгибающих моментов от заданной нагрузки и единичных нагрузений (рис. 7.1, в, з). Применяя правило Верещагина, получим величины перемещений (при $a = l$) $\delta_{11} = \frac{2a}{EI}$, $\Delta_{1F} = -\frac{3Fa^2}{8EI}$.

Тогда $X_1 = \frac{3Fa}{16EI}$. Суммарная эпюра изгибающих моментов показана на рис. 7.1, д.

Для определения увеличения расстояния между точками приложения сил A , приложим к основной системе в этих точках единичные силы (рис. 7.1, е). Перемножая суммарную эпюру и эпюру от единичной силы (рис. 7.1, ж), получим искомое перемещение. Практически более удобно перемножить единичную эпюру отдельно на эпюру от заданных сил и от силового фактора X_1 , а затем полученные результаты алгебраически сложить. Тогда искомое увеличение расстояния AA :

$$\Delta_{A-A} = \frac{5Fa^3}{192EI}. \quad (7.2)$$

Для определения увеличения расстояния по сечению $B-B$, построим единичное состояние (рис. 7.1, з), приложив в этих точках единичные силы, и построим единичные эпюры (рис. 7.1, и). Увеличения расстояния между точками B будет:

$$\Delta_{B-B} = \frac{Fa^3}{64EI}. \quad (7.3)$$

В качестве второго примера рассмотрим кольцевую раму, нагруженную двумя силами F (рис. 7.2, а). Рама три раза статически неопределима, но условия симметрии позволяют сократить число «лишних» неизвестных до одного. Разрежем раму по сечению AB (рис. 7.2, б). Рама симметрична относительно линии действия сил. Поэтому $N_A = N_B = \frac{F}{2}$ и $M_A = M_B$. Обозначим неизвестный момент через X_1 . В итоге получаем эквивалентную систему, показанную на рис. 7.2, в. В сечении с угловой координатой φ момент от заданной силы F будет:

$$M_F = \frac{FR}{2}(1 - \cos \varphi). \quad (7.4)$$

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

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

Тогда

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

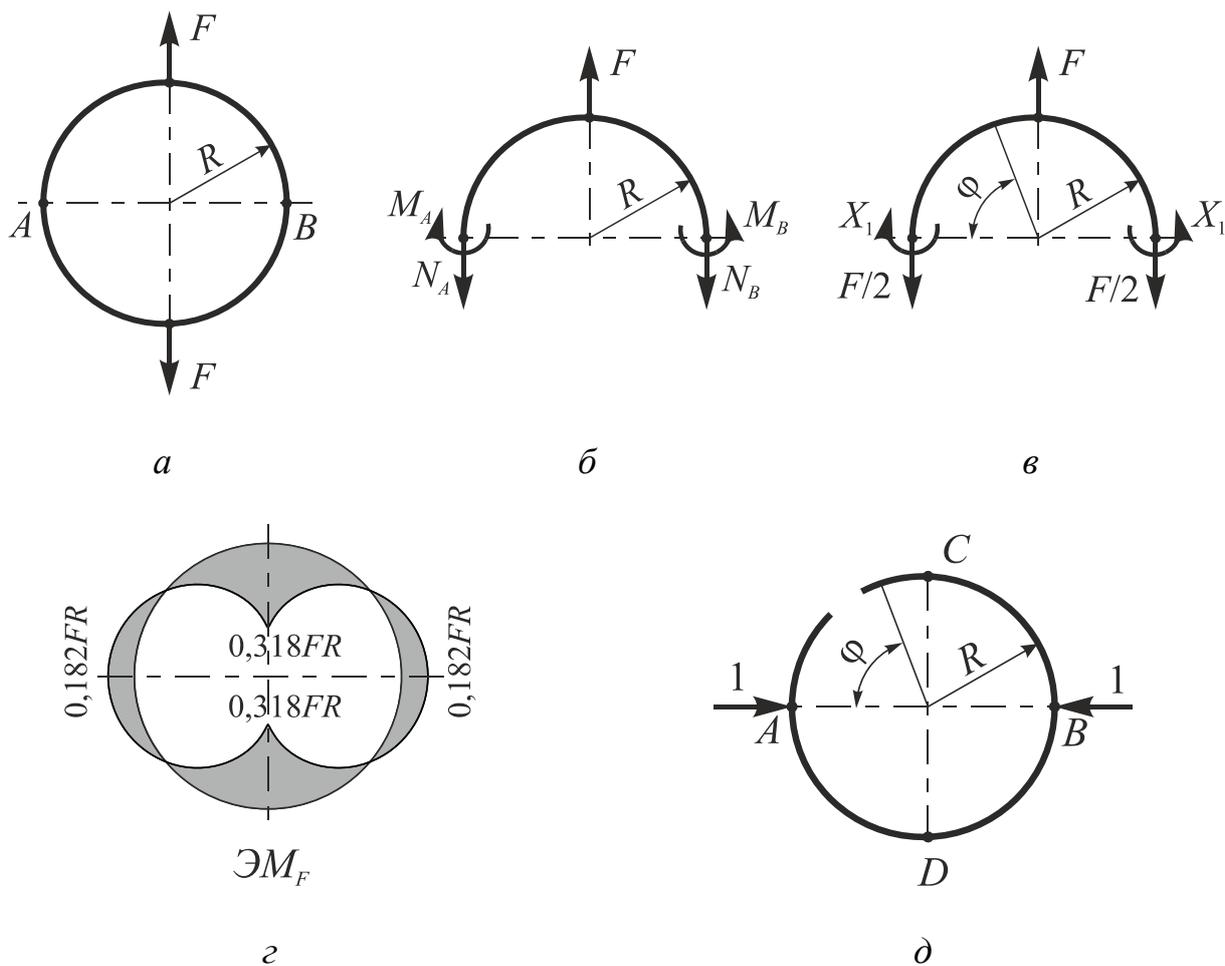


Рис. 7.2. Расчетные схемы квадратного контура, эпюры

Суммарная эпюра изгибающих моментов показана на рис. 7.2, д. Определим, насколько уменьшится расстояние AB рамы при ее нагружении силой F . Изгибающий момент в произвольном сечении в зависимости от угла φ :

$$M = FR \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \cos \varphi \right). \quad (7.5)$$

Разрезаем раму в произвольном сечении и в точках A и B прикладываем единичные силы противоположного направления (рис. 7.2, δ). В сечении с текущим углом φ действует изгибающий момент $M_1 = R \sin \varphi$. Тогда получим уменьшение диаметра AB :

$$\Delta_{AB} = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{MM_1 R d\varphi}{EI} = \frac{FR^3}{EI} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \right). \quad (7.6)$$

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка для испытаний статически неопределимых контуров; измерительные средства; устройства тензометрирования.

4. ЗАДАНИЕ

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

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Эксперимент проводится на образцах двух типов рам, показанных на рис. 7.3. Нагружение кольца осуществляется через шарнирные узлы, хвостовики которых устанавливаются в клиновые захваты разрывной машины. Измерение величины уменьшения горизонтального диаметра производится с помощью индикатора часового типа, закрепленного на стойке параллельно диаметральной плоскости.

Прежде чем начать измерения перемещений, раму нагружают небольшой силой с целью выбора зазоров в сочленениях. Затем устанавливают индикатор на нулевую отметку и производят ступенчатое нагружение равными интервалами. Величины допускаемых нагрузок должны соответствовать паспорту установки. После каждой ступени нагружения записывают в лабораторный журнал показания индикатора.

Результаты эксперимента сопоставляют с данными расчета, полученными по формулам 7.3, 7.6. Затем вычисляют погрешность и дают краткое заключение о проделанной работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

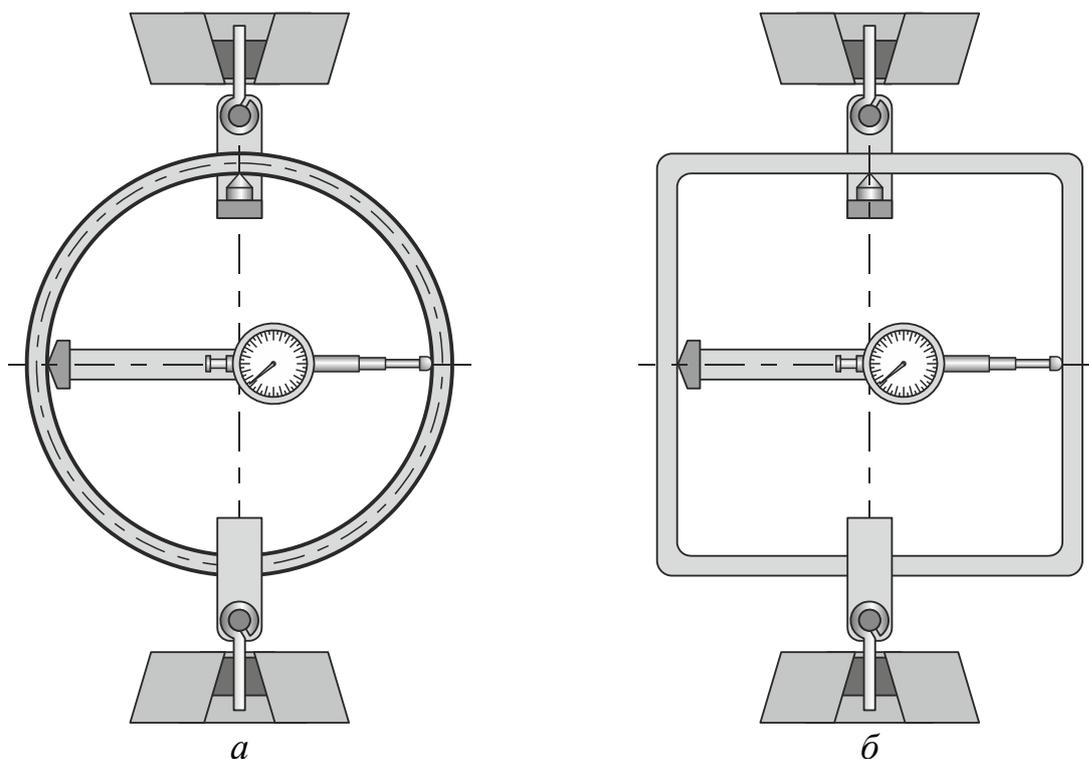


Рис. 7.3. Схема установки

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

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

Лабораторная работа №8

УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В подавляющем большинстве случаев поперечные размеры стержней определяются из условия прочности. Однако разрушение стержня может произойти не только потому, что будет нарушена прочность, но и оттого, что стержень не сохранит формы, приданной ему конструктором.

Наиболее типичным примером является работа стержня, сжатого силами F . Простейшие опыты показывают, что не всегда возможно разрушить стержень путём доведения напряжений сжатия до предела текучести или до предела прочности материала.

Если подвергнуть продольному сжатию тонкую линейку, то она может сломаться, изогнувшись; перед изломом сжимающие силы будут значительно меньше тех, которые вызвали бы разрушение при простом сжатии.

Разрушение линейки произойдет потому, что она не сохраняет приданную ей форму прямолинейного, сжатого стержня, а искривится, что вызовет появление изгибающих моментов, а стало быть, добавочные напряжения от изгиба.

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

Возьмём достаточно длинный по сравнению с его поперечными размерами стержень, шарнирно-прикреплённый к опорам (рис. 8.1), и нагрузим его постепенно возрастающей центральной силой F . Пока сила сравнительно невелика, стержень сохраняет прямолинейную форму. При попытках отклонить его в сторону, он после

ряда колебаний возвращается к прямолинейной форме (рис. 8.1, *a*).

Наконец, можно довести силу F до такой величины, при которой стержень после небольшого отклонения его в сторону уже не выпрямится, а останется искривленным. Попытки выпрямить стержень, не снимая силы F , не удаются. При этом значении силы F прямолинейная форма равновесия стержня перестает быть устойчивой, а значение силы, соответствующее этому случаю, называется критическим $F_{кр}$, (рис. 8.1, *б*).

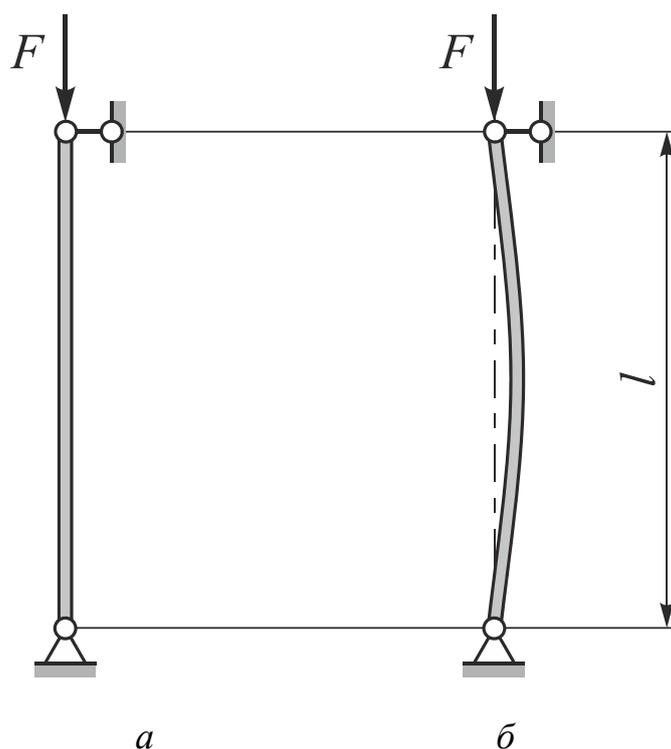


Рис. 8.1. Потеря устойчивости продольно сжатым стержнем

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

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

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

Рассмотрим прямой стержень постоянного поперечного сечения, шарнирно опертый по концам и нагрузкам его центральной продоль-

ной силой $F = F_{кр}$. В этом случае стержень получит весьма небольшие искривления в плоскости наименьшей жесткости (рис.8.2, а).

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

$$M(z) = -Fy. \quad (8.1)$$

Дифференциальное уравнение принимает вид

$$EI_x y'' = -Fy. \quad (8.2)$$

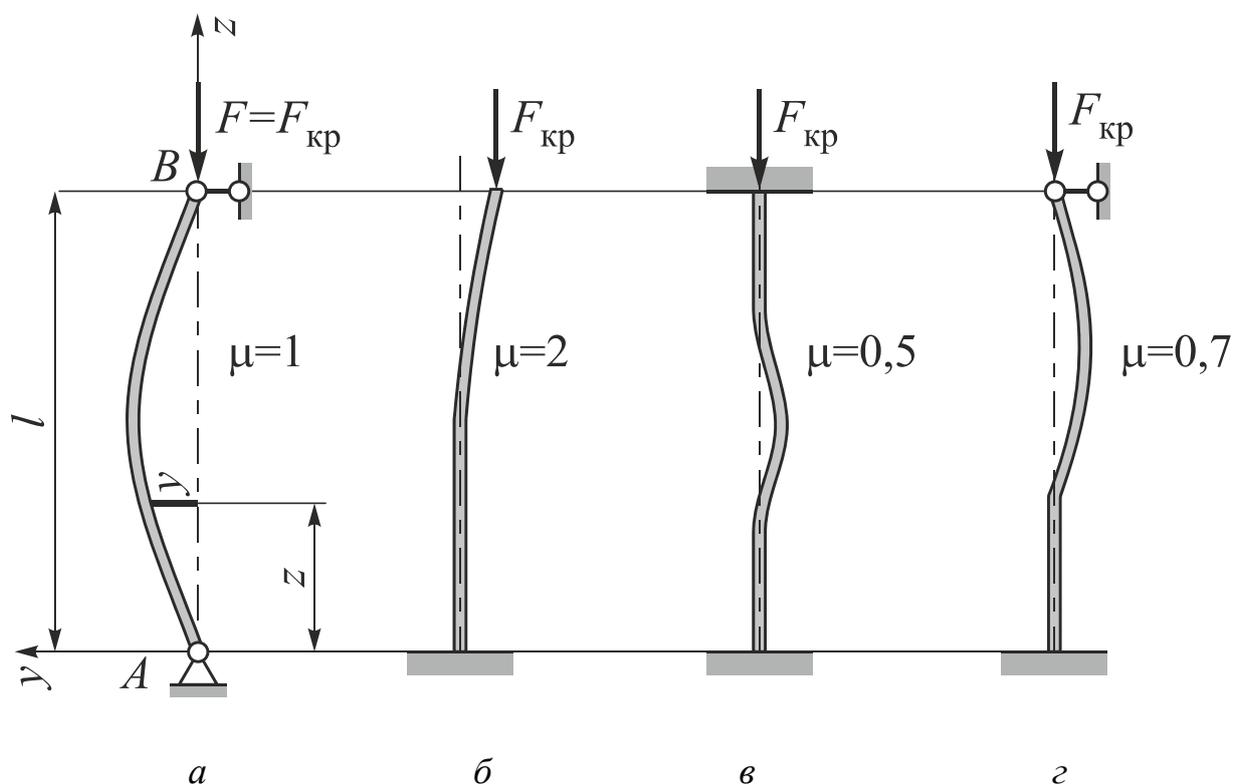


Рис. 8.2. Варианты закрепления и характер потери устойчивости

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

водим уравнение к виду:

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

Общий интеграл этого уравнения имеет вид:

$$y = C_1 \sin kz + C_2 \cos kz. \quad (8.3)$$

Граничные условия на концах стержня AB таковы, что в точке A при $z = 0$ прогиб $y = 0$, и в точке B при $z = l$ прогиб $y = 0$. Из первого

условия следует, что $C_2 = 0$. Применяя второе условие, получаем $C_1 \sin kl = 0$, откуда следует, что C_1 или kl равны нулю. Но $C_1 \neq 0$, следовательно, $\sin kl = 0$, что соответствует $kl = n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. Тогда критическая сила принимает ряд значений:

$$F_{кр} = \frac{n\pi^2 EI_x}{l^2}. \quad (8.4)$$

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

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2}. \quad (8.5)$$

Полученная зависимость носит название формулы Эйлера для продольно сжатого стержня с шарнирно опертыми концами. Если повторить весь ход рассуждений для стержней, имеющих иные способы закрепления (рис. 8.2, б, в, г), то значения критической силы будут иные. Можно преобразовать формулу Эйлера, введя в нее коэффициент, учитывающий способ закрепления μ . Тогда можно записать:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI_x}{(\mu l)^2}. \quad (8.6)$$

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка для испытаний статически неопределимых контуров; измерительные средства; устройства тензометрирования.

4. ЗАДАНИЕ

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

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка для проведения эксперимента состоит из сварной станины, вертикально установленной на основании. В нижней части станины установлена подвижная пиноль с центровым наконечником. Осевое перемещение пиноли осуществляется винтовой парой. В верхней части станины установлен силоизмеритель, представляющий собой стальную скобу, деформации которой регистрируются индика-

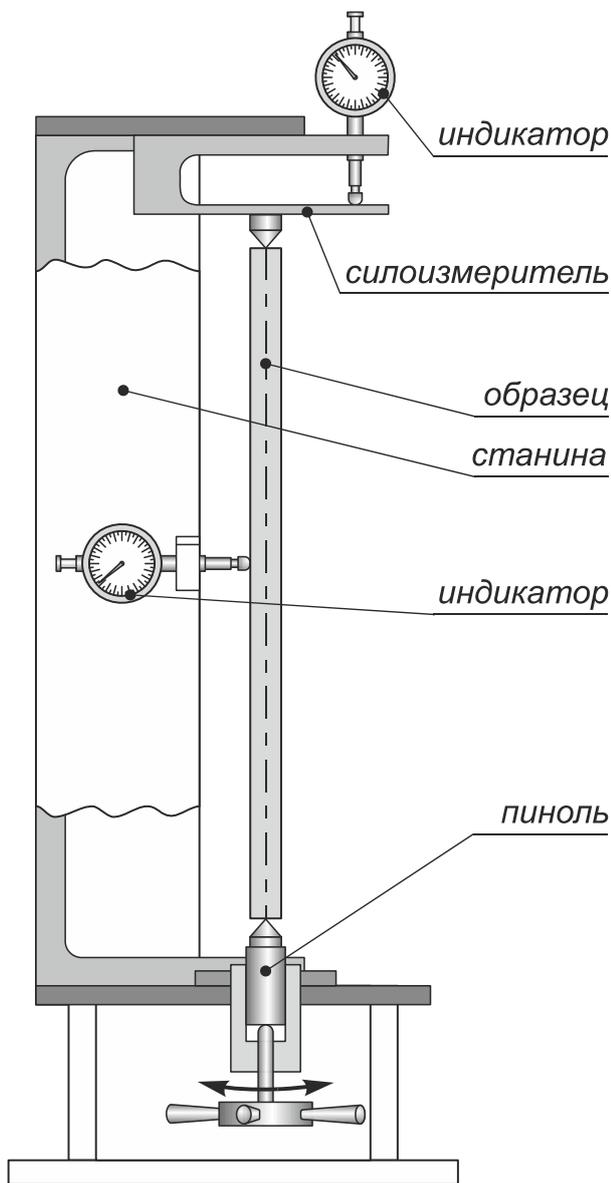


Рис. 8.3. Схема установки

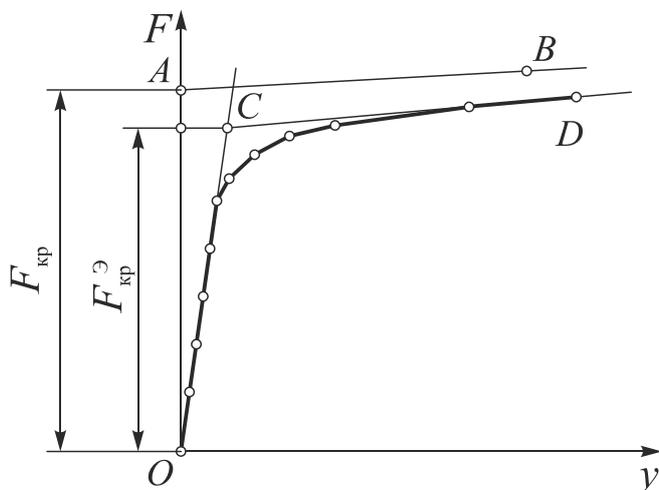


Рис. 8.4. График зависимости прогиба от осевой силы

тором часового типа. Величина силы, приложенной к скобе силоизмерителя, пропорциональна показаниям индикатора. Определение нагрузки производится с помощью тарировочного графика. Измеряемое усилие прикладывается к центральному наконечнику.

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

Нагружение образца нужно вести очень плавно равными ступенями. Контроль ступеней нагрузки ведут по индикатору силоизмерителя. Рекомендуемые ступени нагружения — 10 делений шкалы индикатора. Начальное нагружение образца нежелательно. Момент касания образца с наконечниками нагружающего устройства определяют легкими поворотами штурвала, при этом смещение стрелки индикатора не должно превышать одного деления.

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

Применение двух индикаторов обусловлено только необходимостью уравнивания действия пружин индикаторов.

Формулы 8.1, 8.2 получены в предположении, что стержень идеально прямой, а сила приложена строго по его оси. Реальные стержни всегда имеют некоторую начальную кривизну, а силу невозможно приложить строго по оси стержня. Поэтому реальный стержень будет незначительно изгибаться уже при малых осевых нагрузках. Величина критической силы будет несколько меньше расчетной.

На рис. 8.4 показаны зависимости прогиба от величины осевого усилия. Линия *OAB* соответствует идеальным условиям. В этом случае прогибы стержня до достижения критической силы отсутствуют (отрезок *OA*). При нагружении выше критической силы прогибы резко возрастают при незначительном приращении силы (отрезок *AB*).

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

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

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что характеризует критическая сила?
2. Как теоретически определить величину критической силы в общем случае закрепления концов стержня?

3. Как влияют реальные условия нагружения, эксплуатации на величину критической силы?
4. Какой физический смысл имеет коэффициент μ ?
5. Относительно какой оси сечения происходит изгиб стержня при потере устойчивости?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

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

Лабораторная работа №9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение методики тензометрирования машин, механизмов, агрегатов и технологического оборудования, необходимых для оценки напряженно-деформированного состояния элементов, деталей и узлов при эксплуатационных или специальных режимах работы.

Основные цели тензометрирования:

- получение навыков проверки расчетных схем при различных условиях работы деталей и узлов машин;
- установление фактических нагрузок и закономерностей их изменения;
- проверка соответствия напряженно-деформированного состояния расчётным данным.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для экспериментального определения, напряженно-деформированного состояния элементов машин применяются принципиально различные методы:

- рентгеновские;
- поляризационно-оптические (фотоупругости);
- муаровых полос;
- хрупких покрытий;
- с помощью тензометров;
- с помощью видеоэкстензометров.

В данной методической разработке рассмотрен наиболее часто используемый в машиностроении тензометрический метод с применением тензорезисторов.

2.1. Основы работы тензорезисторов

Действие тензорезисторов основано на принципе изменения электрического сопротивления проводников под действием деформаций.

Чувствительные элементы тензорезисторов (рис. 9.1) могут быть выполнены в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоки

(рис. 9.1, *а*) или фольги (рис. 9.1, *б*) и называются датчиками электро-тензометра.

Чувствительный элемент 4 приклеивается к основе 2 из изоляционного материала (бумага, пленка, ткань и др.) с помощью связующего 3 (клея, цемента), которые передают деформацию чувствительному элементу. Для электрического соединения тензорезистора с измерительными схемами имеются выводы 1. Длина чувствительного элемента называется базой тензометра.

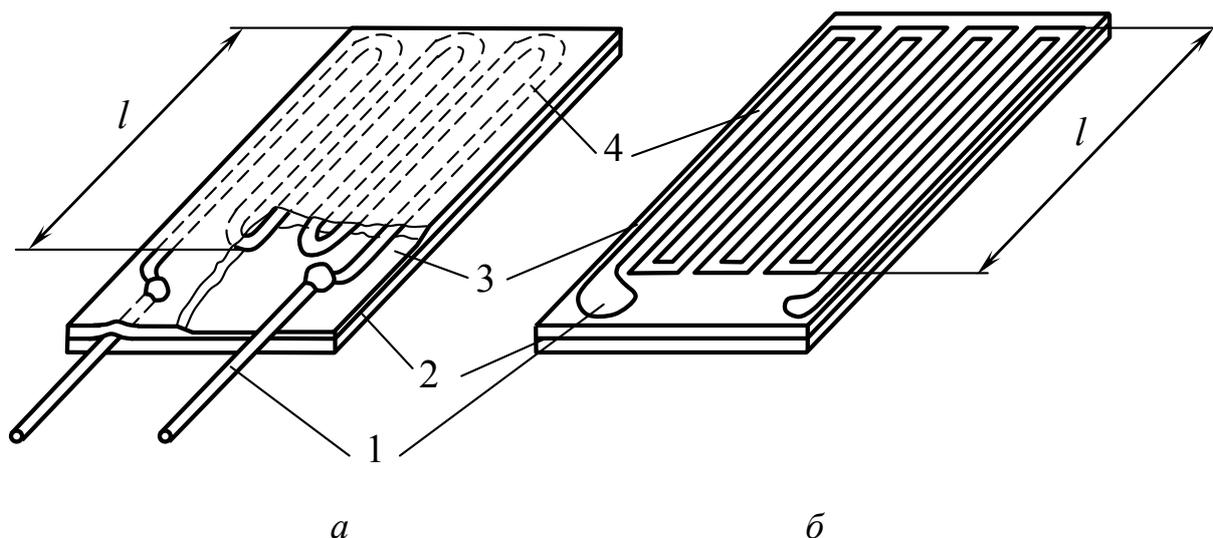


Рис. 9.1. Конструкция тензодатчиков: *а* – проволочного; *б* – фольгового

Датчик наклеивают на испытуемый образец или на поверхность детали в том месте, где необходимо измерить напряженно-деформированное состояние. При растяжении или сжатии материала в месте наклейки датчика проволока растягивается или сжимается, изменяя своё электрическое сопротивление, так как электрическое сопротивление датчика зависит от длины проводника и площади его сечения:

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (9.1)$$

где R – сопротивление проводника (проволоки) датчика, l – длина проводника (проволоки), ρ – удельное сопротивление материала проводника, A – площадь сечения проводника.

Вследствие растяжения или сжатия проволоки датчика меняется длина l и площадь сечения A , следовательно, как отмечалось выше, изменяется сопротивление R проводника (датчика). Итак, если меня-

ется длина датчика, в данном случае его база, на величину Δl , а площадь сечения – на ΔA , то сопротивление датчика изменится на величину ΔR .

Относительная деформация датчика и его сопротивление связаны линейной зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta R}{R}, \quad (9.2)$$

где ε – относительное удлинение, R – сопротивление датчика, обычно равное 100 или 200 Ом, ΔR – приращение сопротивления датчика, соответствующее деформации Δl , γ – безразмерная постоянная величина, называемая чувствительностью материала датчика.

2.2. Измерительные схемы

Для измерения изменения сопротивления тензодатчиков в процессе деформирования используются две схемы – потенциометрическая и мостовая (рис. 9.2). Фактически обе схемы позволяют измерять изменение не сопротивления, а изменение тока или напряжения.

Потенциометрическая схема включения тензодатчиков в электрическую цепь показана на рис. 9.2, а. В этой схеме тензодатчик R_x последовательно включен с балластным сопротивлением R_1 ; питание цепи осуществляется постоянным током от источника V_0 .

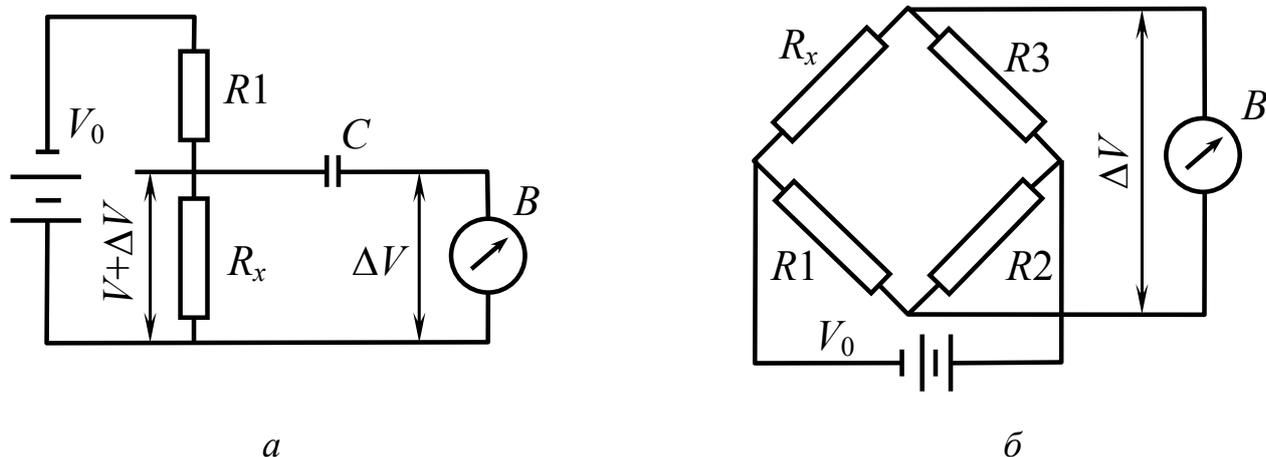


Рис. 9.2. Схема включения тензодатчиков:
а – потенциометрическая; б – мостовая

Если сопротивление R_x тензодатчика изменится, то на его концах, кроме постоянного напряжения V , появится переменная, составляющая ΔV , которая пропорциональна изменению сопротивления и

значительно меньше V . Для того чтобы на выходе схемы измерить только переменную составляющую напряжения, измерительный прибор B подключается к тензодатчику через конденсатор C .

Потенциометрическая схема может применяться в основном для измерения динамических деформаций, когда используются усилители переменного тока, реагирующие только на изменение ΔV .

Более широкое распространение в тензометрии получила мостовая схема, которая называется по имени ее создателя мостом Уинстона, (рис. 9.2, б). Мост состоит из четырех последовательно соединенных по замкнутому контуру сопротивлений $R_x, R1, R2, R3$. В одну диагональ моста включают источник питания V_0 , а в другую – прибор B . Каждое из сопротивлений моста может быть заменено тензодатчиками.

Допустим, тензодатчик будет представлен сопротивлением R_x . При $R_x = R1 = R2 = R3 = R$ мост находится в равновесии и на выходе $\Delta V = 0$, несмотря на наличие напряжения на входе.

Если сопротивление тензодатчика R_x изменится на величину ΔR_x , на выходе моста получим ΔV , пропорциональное величине деформации (ϵ_x).

Выходное напряжение моста весьма мало, и для получения электрического сигнала значительной величины необходимо использовать высокочувствительные усилители с большим коэффициентом усиления.

2.3. Принципиальная схема измерительной системы

Проведение тензометрических измерений при испытаниях деталей машин и элементов конструкций связано с использованием электроизмерительных приборов и аппаратуры. Рассмотрим измерительную систему, основанную на мостовой схеме включения датчиков (рис. 7.3). Система состоит из объекта исследования напряжений (например, образец, подвергаемый растяжению силами P); тарировочной балки; моста сопротивлений; усилителя и регистрирующего прибора. На образце и тарировочной балке наклеены одинаковые тензодатчики R_x и R_T , включенные в соответствующие плечи моста сопротивлений.

Перед началом проведения измерений регистрирующий прибор выводится на нулевую отметку с помощью регулировочного сопротивления моста R_p (балансировка моста).

Затем производится тарировка измерительной системы с помощью тарировочной балки.

Тарировочная балка представляет собой консольную балку равного сопротивления длиной l_T , толщиной h_T и шириной в заделке B_T . Относительное удлинение поверхностного слоя балки в любом сечении равно

$$\varepsilon_T = \frac{6P_T l_T}{E_T B_T h_T^2}, \quad (9.3)$$

где P_T – величина груза, приложенного к свободному концу балки, E_T – модуль упругости материала балки.

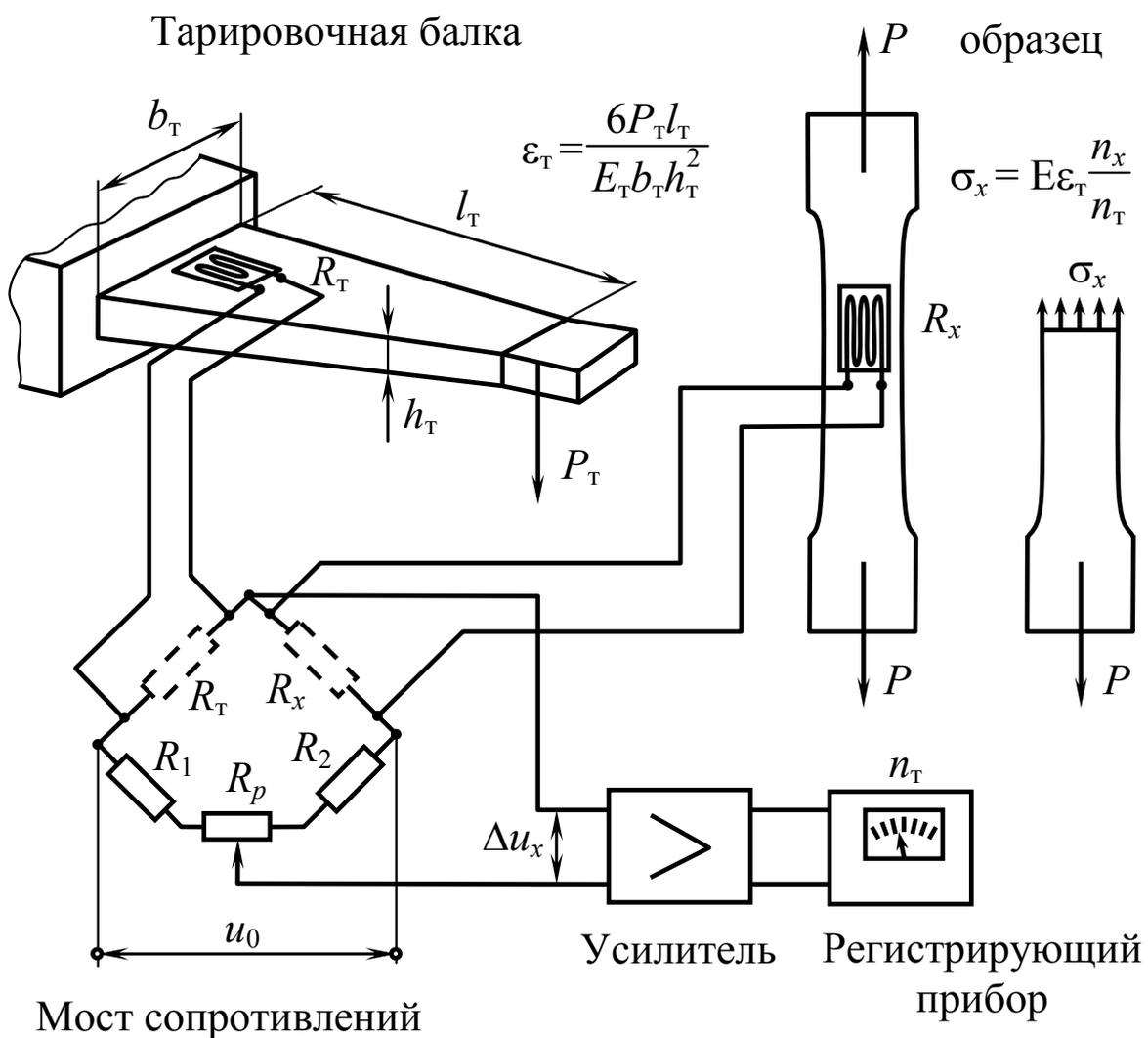


Рис. 9.3. Принципиальная схема измерительной системы

Следовательно, тензометр R_T , наклеенный на тарировочную балку при её нагружении силой P_T , будет иметь вполне определенную величину относительного удлинения.

Если тарировочная балка стальная ($E = 200$ ГПа) и $h_T = 0,6$ см; $l_T = 31$ см и $b_T = 6$ см, то при нагрузке $P_T = 0,03$ кН относительное удлинение тензодатчика R_T будет равно

$$\varepsilon_T = \frac{6 \cdot 3 \cdot 31}{2 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 0,6} = 1,3 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, при нагружении балки грузом P_T произойдет разбаланс моста, напряжение разбаланса Δu_x (рис. 7.3) увеличится и будет представлено на регистрирующем приборе величиной n_T , соответствующей относительному удлинению ε_T . Величину n_T заносят в протокол наблюдений. После проведения тарировки с тарировочной балки снимают груз P_T и устанавливают регистрирующий прибор на нулевую отметку.

Затем при нагружении образца силой P происходит удлинение тензодатчика R_x , разбаланс моста и регистрирующий прибор покажет величину n_x , соответствующую относительному удлинению образца ε_x .

Относительная деформация образца (с учетом, что ε_T соответствует n_T , а ε_x соответствует n_x):

$$\varepsilon_x = \varepsilon_T \frac{n_x}{n_T}. \quad (9.4)$$

Напряжение в образце $\sigma_x = E\varepsilon_x$ или

$$\sigma_x = E\varepsilon_T \frac{n_x}{n_T}, \quad (9.5)$$

где E – модуль упругости материала образца.

В соответствии с описанным принципом работают различные измерительные системы: например, тензосистемы типа ТА-5, 8АНЧ, СИИТ-3 и др. Ниже приводится краткая характеристика измерительных систем, применяемых в учебной лаборатории кафедры сопротивления материалов.

Система тензометрическая ТА-5 и 8АНЧ – 23. Тензоаппаратура предназначена для измерения статических и динамических напряжений и отличается от описанного выше принципа тем, что в ней реализовано несколько подобных каналов. Или говорят: многоканальная тензостанция, позволяющая одновременно измерять напряжения в

нескольких точках. На рис. 9.4 показана структурная схема этой системы.

На рисунке показан объект исследования напряжений, в четырех точках которого наклеены рабочие тензорезисторы $R_{д1}$, $R_{д2}$, $R_{д3}$ и $R_{д4}$. Такие же тензорезисторы наклеены на тарировочную балку $R_{т1}$, $R_{т2}$, $R_{т3}$ и $R_{т4}$. Рабочие и тарировочные тензорезисторы включены на вход усилителей, каждый в соответствующие каналы. Балластные и регулировочные сопротивления измерительного моста находятся внутри усилителей.

После усиления сигнал от тензорезисторов подается на регистрирующие приборы – это могут быть стрелочные микроамперметры либо шлейфовые осциллографы с записью на бумажной ленте.

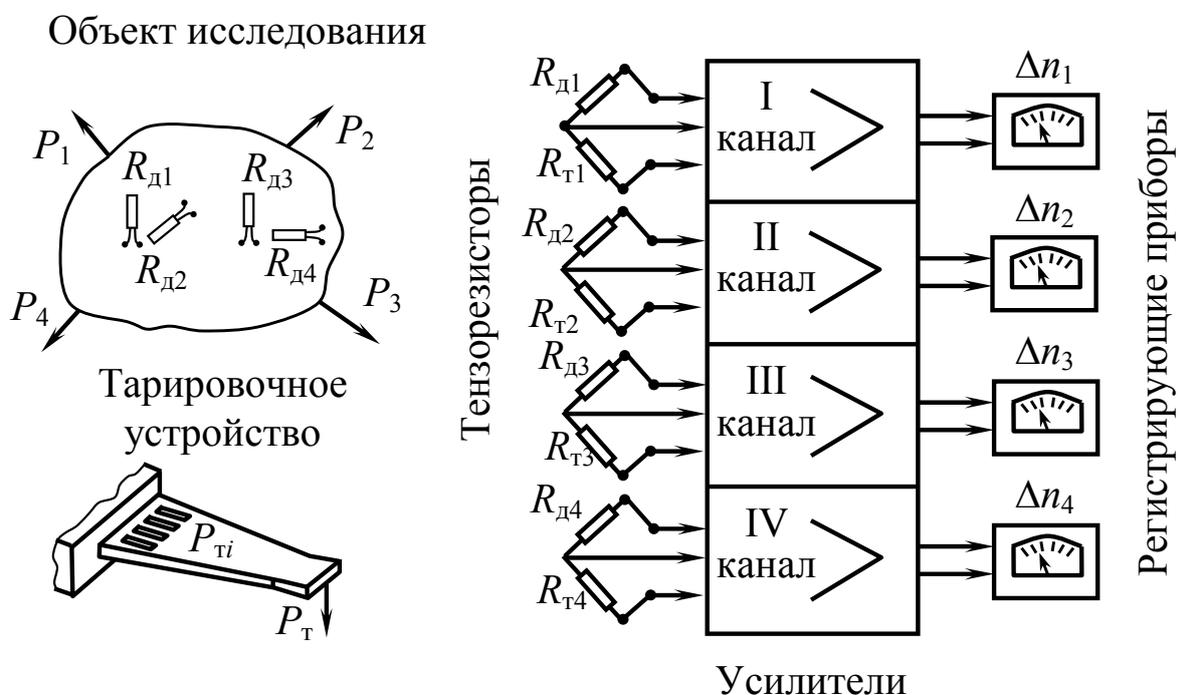


Рис. 9.4. Структурная схема многоканальной тензоаппаратуры типа ТА-5 и 8АНЧ-23

Последовательность работы с данной системой состоит из следующих операций:

1. Включить усилители в сеть и прогреть в течение 20-30 мин.
2. Произвести балансировку всех каналов, установив регистрирующие приборы на нулевую отметку.

3. Нагрузить тарировочную балку грузом $F_T = 3$ кг, предварительно рассчитав относительное тарировочное удлинение ε_T согласно (9.3).

4. Записать в протокол тарировочные показания всех приборов: $\Delta n_{T1}, \Delta n_{T2}, \Delta n_{T3}, \Delta n_{T4}$.

5. Снять тарировочный груз и уточнить нулевое положение регистрирующих приборов.

6. Нагрузить исследуемый объект необходимыми рабочими силами.

7. Занести в протокол наблюдений показания приборов: $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4$.

8. Вычислить относительные удлинения в точках исследуемого объекта $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ согласно (9.4) и затем напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ по формуле (9.5).

2.4. Оптический видеоэкстензометр

Оптический видеоэкстензометр (Advanced Video Extensometer (AVE)) фирмы Instron позволяет фиксировать относительные деформации образца в ходе испытаний. Основными элементами видеоэкстензометра являются (рис. 9.5) камера, светодиодный блок и контроллер. Изображение образца передается на цифровую камеру с ПЗС-матрицей высокого разрешения. В ходе эксперимента камера фиксирует изображение тестируемого образца, регистрация видеосигнала происходит каждые 20 мкс. Объектив камеры установлен на конце воздушной трубы постоянной плотности, которая представляет собой кожух с вентиляторами, установленными перед сотовыми рассеивателями воздушного потока. Данное устройство создает воздушную завесу, минимизирующую оптические искажения, создаваемые воздушными потоками перед камерой, и, таким образом, снижает влияние шумов на измерения.

После программной активации видеоэкстензометра образец освещается красными светодиодами, пульсирующими с высокой интенсивностью. Зажигание светодиодов совпадает со временем съемки кадра камерой. Светодиоды устройства подсветки испускают красный свет с длиной волны около 650 нм, а за ними установлен поляризационный фильтр, обеспечивающий поляризацию всего испускаемого

го света в одной плоскости. Пульсирование подсветки повышает качество режекции фонового света.

Электронная схема видеозкстензометра содержит трехступенчатый контур подавления мерцания, который добавляет дополнительные вспышки светодиодов на случай, если частота съемки камеры окажется ниже установленного уровня. Устройство подсветки прикреплено к каретке камеры и направлено на центральную линию нагрузочной цепи силовой рамы.

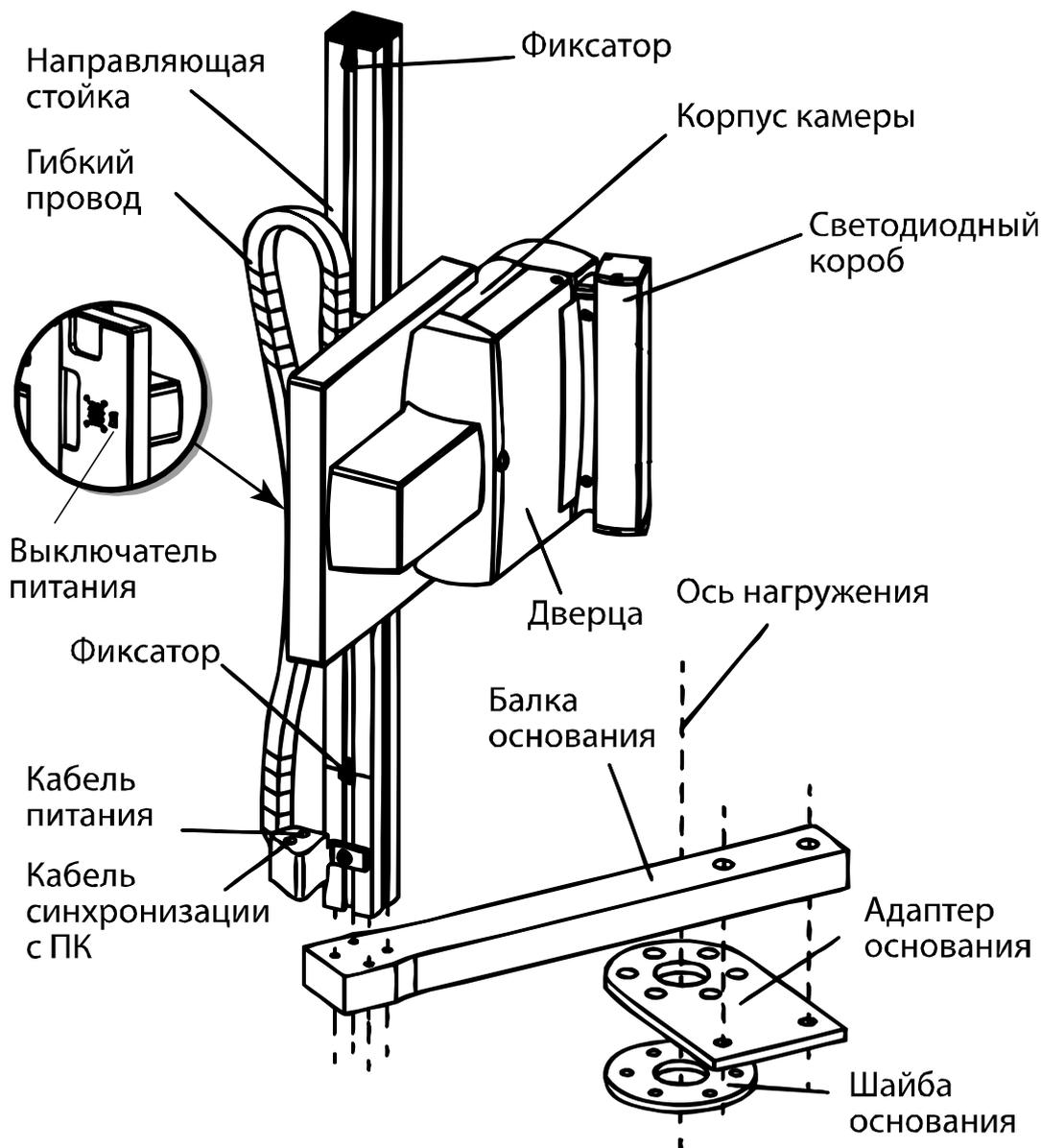


Рис. 9.5. Оптический видеозкстензометр

Поляризационный фильтр камеры установлен под углом 90° к поляризационному фильтру устройства подсветки, что позволяет уст-

ранить эффект насыщения на блестящих поверхностях. Среднее значение полосового фильтра камеры равно 650 нм; поэтому он пропускает только свет, длина волны которого равна длине волны света, испускаемого светодиодами. За счет этого свет всех других цветов режектируется, и уровень фонового освещения в зоне тестирования не влияет на ход испытаний.

Перед началом испытаний программа обнаружения меток при помощи нейронной сети ищет в изображении метки, совместимые с образами, имеющимися в библиотеке используемых меток. Обнаруженные программой метки отмечаются на активном дисплее красными прямоугольниками. Программа определяет положение идентифицированных меток и использует координаты метки в качестве координат центра области рассмотрения. Перед проведением тестирования производятся проверки допустимости уровня освещения образца и достаточной контрастности меток на фоне образца.

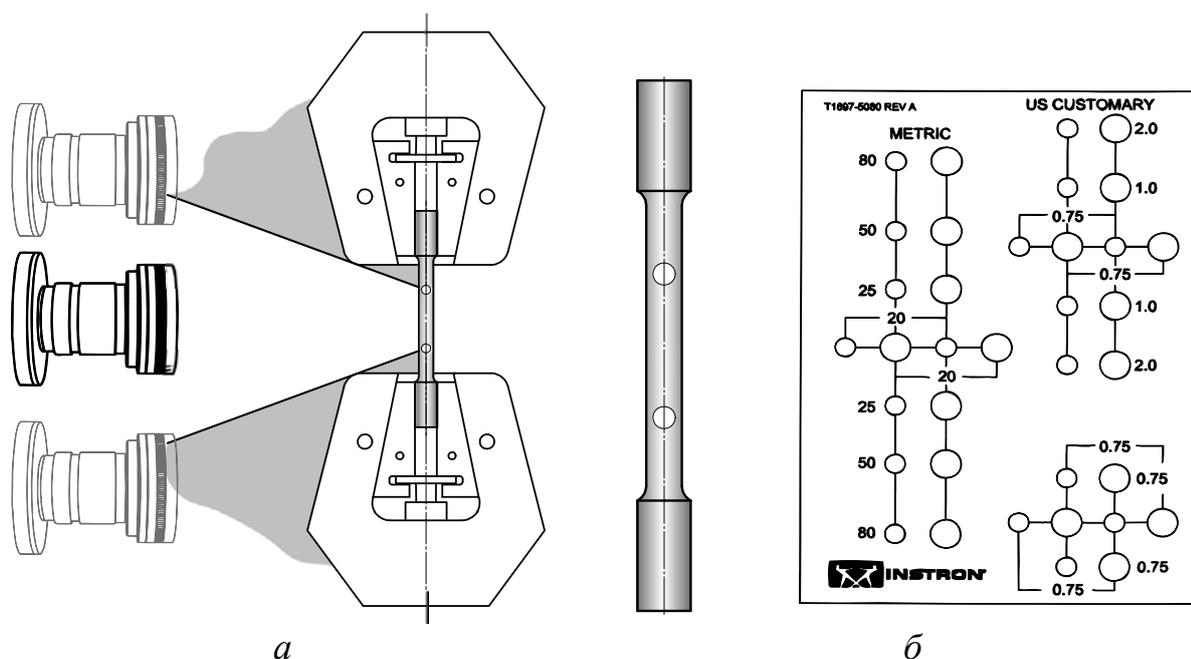


Рис. 9.6. Схема расположения видеоэкстензомера относительно образца, установленного в захваты; маркированный образец и трафарет

Тестирование проводится программным обеспечением Instron Bluehill 2. После начала тестирования обрабатываются только пиксели, находящиеся в непосредственной близости от меток. Изменения длины измерительной базы между метками отслеживаются с частотой съемки камеры. Величина деформации вычисляется по точным

значениям исходной и текущей длины измерительной базы и фиксируется в виде цифровых данных.

При некоторых условиях захват в процессе тестирования может заслонять отметку. Это может случиться в начале тестирования на растяжение или в конце тестирования на сжатие (рис. 9.6, *а*). Ситуаций, при которых может возникать затенение, следует избегать. При испытании на растяжение, если метки будут затенены, программный алгоритм не сможет определить положение заслоненной отметки, и процедура испытания не запустится. Важно, чтобы в начале испытания на растяжение и в конце испытания на сжатие камера «видела» маркерные отметки целиком (т. е. между отметкой и захватом или между отметкой и тенью должно оставаться пустое пространство).

Для нанесения меток на образец в комплекте с видеоэкстензометром поставляется универсальный маркировочный трафарет, упрощающий корректное нанесение маркировки (рис. 9.6, *б*).

Экстензометр измеряет деформацию, «отслеживая» положение двух контрастных меток, нанесенных на поверхность образца. Поскольку в свете подсветки поверхность образца обычно выглядит темной, рекомендуется использовать белые метки. Для использования функции автоматического обнаружения следует использовать закрашенные круглые (точечные) метки или метки в форме линий (в данном случае следует использовать функцию ручной установки области поля зрения, а метки могут быть нарисованы или изготовлены из клейкой ленты и наклеены). Для нанесения точечных меток можно использовать устройство для нанесения точечных меток (рис. 9.6, *б*). Экстензометр вычисляет величину деформации по положениям центров меток. Центр каждой метки определяется как точка посередине между ее краями (усредненная по области, определенной метками области поиска) или как геометрический центр круглой метки. Экстензометр отслеживает положение двух меток для каждого направления и вычисляет величину деформации по положению центров меток.

Рекомендуется использовать метки в форме круглых точек. Минимальный диаметр точечной метки – 2 мм, рекомендуемый диаметр точечной метки – 4 мм. Чем крупнее или меньше метки, тем больше времени требуется для обработки данных, что может привести к возникновению ошибок. Для меток в форме линий минимальная толщина должна составлять не менее 1 мм, рекомендуемая – 2 мм.

2.5 Навесной экстензометр

Контактный навесной экстензометр (рис. 9.7) предназначен для непосредственного измерения деформаций на измерительной базе образца. Экстензометр состоит из блока с тензодатчиком, устанавливаемым с помощью специализированных креплений (рис. 9.7) на образец, и блока контроллера, осуществляющего связь, интерпретацию и передачу измеренных величин через контроллер нагрузочной рамы к ПК. Измерительная база экстензометра (расстояние между ножами в нулевом положении) составляет 50 мм. Ход нижней подвижной ножки в направлении растяжения – 25 мм, в направлении сжатия – 2,5 мм.

Навесной тензодатчик может быть максимально использован только до достижения предела прочности пластичного материала, когда деформации распределяются по длине образца равномерно. После достижения определенной величины силы или напряжений тензометр необходимо снять и продолжить сбор информации по каналу перемещения траверсы нагрузочной рамы. На практике с целью предохранения навесного экстензометра от поломки снятие производят на стадии выхода за пропорциональный участок диаграммы деформирования.

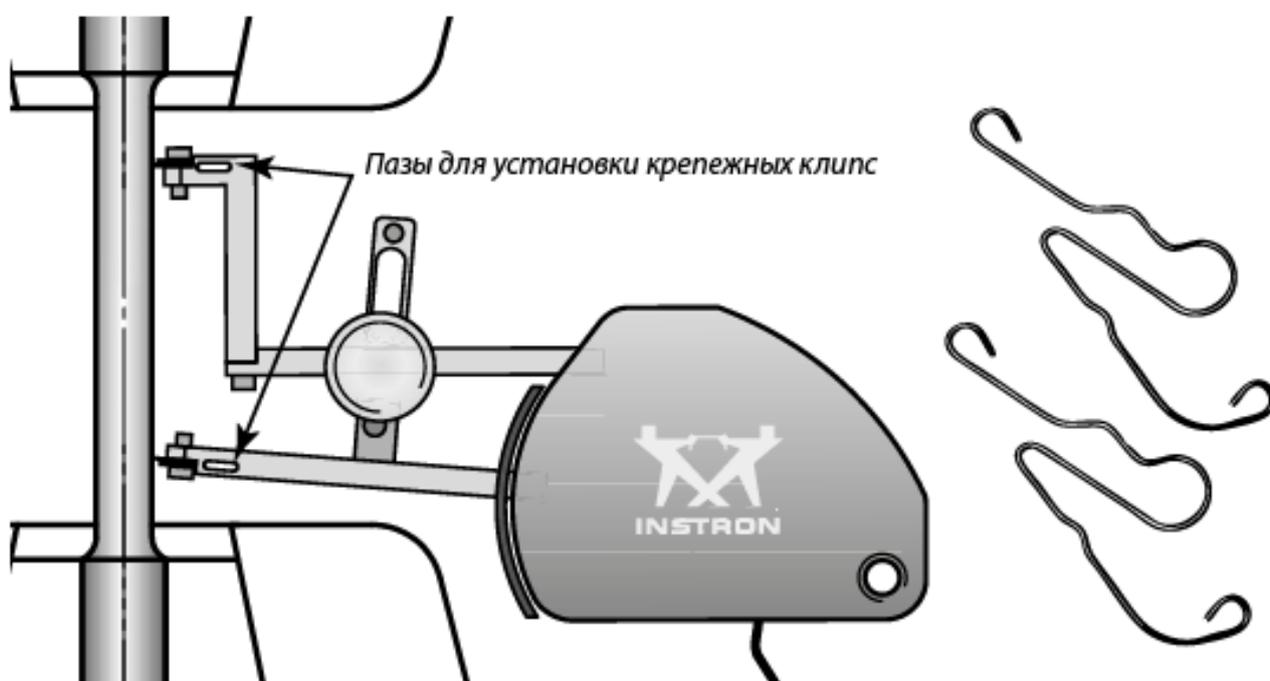


Рис. 9.7. Схема крепления навесного экстензометра на образце и прижимные клипсы

Для различных конфигураций образцов в комплекте экстензометра предусмотрены пружинные клипсы для крепления ножей (рис. 7.7). Экстензометр должен устанавливаться так, чтобы его ножки не задевали головки и клинья захватов.

Во время проведения испытаний недопустимо прикасаться к датчику, так как это может вызвать резкое перемещение траверсы и разрушение образца.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Механическая разрывная машина Instron 3382; измерительные средства; устройства тензометрирования; навесной экстензометр Instron; персональный компьютер; программное обеспечение Instron Bluehill.

4. ЗАДАНИЕ

Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии, эскизов образца, установки во входные параметры эксперимента и в журнал испытаний. Определить значения модуля Юнга при растяжении с помощью навесного экстензометра.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Применение схем тензометрирования, описанных в пп. 2.1-2.3, рассмотрено в лабораторных работах № 5, 6, 7, 8, 11. Пример использования оптического видеоэкстензометра, описанного в п. 2.4, показан в лабораторной работе № 1. Рассмотрим способ измерения деформаций с помощью навесного экстензометра, описанного в п. 2.5, для определения модуля упругости (модуля Юнга) при растяжении.

В данном эксперименте применяются цилиндрические точеные образцы. Рабочая длина образца l выбирается равной не менее $10d$. Концы образца имеют утолщения для установки в захваты разрывной испытательной машины. Измерение размеров образца производится штангенциркулем с точностью до $0,05$ мм.

До начала эксперимента необходимо определить наибольшую F нагрузку на образец с целью предупредить его повреждение пластическими деформациями. Величина этой нагрузки должна составлять не более $F_{\max} = 0,86\sigma_T A$, где σ_T – предел текучести материала образца; A – площадь поперечного сечения рабочей части образца.

На образец устанавливают навесной экстензометр с измерительной базой 50 мм (рис. 9.7). Экстензометр подключается к контроллеру силовой рамы разрывной машины Instron 3382. При нагружении образца осевой силой F рабочая длина получает приращение на величину Δl , регистрируемое навесным тензодатчиком, которое передается через контроллер рамы в ПК.

На силовой раме устанавливают ограничители хода траверсы, с целью предупреждения разрушения образца и повреждения тензодатчика. Нижний ограничитель необходимо установить непосредственно под планкой подвижной траверсы, а верхний на расстоянии 1-2 мм от планки (отмеряется по нанесенной на колонне машины шкале).

Навесной тензодатчик крепится к образцу с помощью клипс (рис. 9.7). Необходимый размер клипс для соответствующего диаметра образца можно выбрать по шаблонам в прилагаемом к экстензометру руководстве. В программном обеспечении Bluehill выбирают метод испытаний «Лабраб2_определение_E» и вводят имя файла испытаний. В указанном методе управление машиной осуществляется по показаниям навесного тензодатчика.

После нажатия на кнопку «выполнить» начнется перемещение активного захвата машины, на экране будут вычерчиваться диаграммы растяжения и деформирования. По окончании нагружения, система вернется в исходное состояние, а в окне результатов будут показаны значения модуля упругости, рассчитанные по имеющимся в программе алгоритмам (см. лабораторную работу №1, п. 3).

Полученные данные необходимо сравнить со справочными для данного материала и сделать выводы о погрешностях измерений и расчетов.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные способы тензометрирования. В каких испытаниях целесообразно их применение?

2. Какие способы тензометрии позволяют регистрировать деформации вплоть до разрушения образца?

3. Сравните результаты определения модуля упругости, полученные с помощью оптического видеоэкстензометра и с помощью навесного экстензометра? В каком случае погрешность измерений будет больше?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания, приводят диаграмму деформирования с указанием прямолинейного участка, на котором определяется модуль упругости. Заполняют таблицу полученных в ходе эксперимента данных. В заключении анализируют полученные результаты, сопоставляют справочные данные с экспериментальными результатами, дают заключение о погрешности метода, делают выводы по работе.

Лабораторная работа №10

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНЫ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Наиболее просто получить деформацию изгиба с растяжением можно в том случае, когда продольная сила приложена не в центре тяжести поперечного сечения стержня, а с некоторым эксцентриситетом, относительно главных осей сечения (рис. 10.1, а).

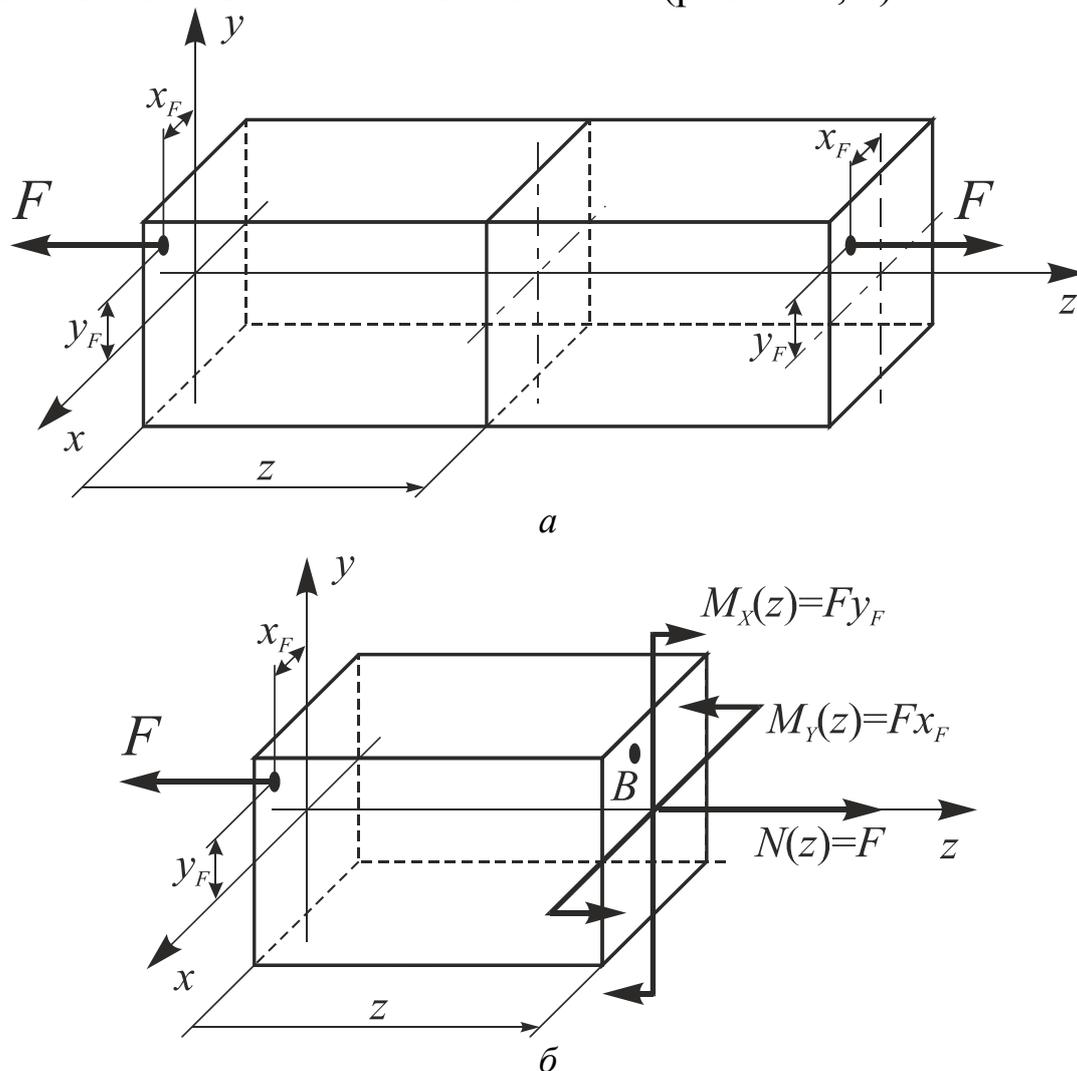


Рис. 10.1. Внецентренное приложение растягивающей силы

Если точка приложения силы имеет координаты x_F и y_F , то относительно главных осей сила F создает моменты $M_X = Fy_F$ и $M_Y = Fx_F$. Таким образом, внецентренное растяжение-сжатие оказывается родственным косому изгибу. В отличие от последнего, в поперечном сечении возникают не только изгибающие моменты, но и нормальная сила (рис. 10.1, б).

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

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_X y}{I_X} + \frac{M_Y x}{I_Y} = \frac{F}{A} + \frac{F y_F y}{I_X} + \frac{F x_F x}{I_Y}, \quad (10.1)$$

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

Уравнение нейтральной линии получим, приравняв напряжения нулю:

$$\sigma = \frac{1}{A} + \frac{y_F y}{I_X} + \frac{x_F x}{I_Y} = 0. \quad (10.2)$$

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

$$\sigma_{\max} = F \left(\frac{1}{A} + \frac{y_F y_1}{I_X} + \frac{x_F x_1}{I_Y} \right) = 0, \quad (10.3)$$

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

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Механическая разрывная машина Instron 3382 или P5; измерительные средства; устройства тензометрирования.

4. ЗАДАНИЕ

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

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Испытание проводится на разрывной машине. Образец представляет собой дюралевую пластину, размеры которой позволяют разместить четыре тензодатчика по ширине образца (рис. 10.2). Длина образца должна быть достаточной для того, чтобы влияние способа приложения сил можно было считать исключенным.

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

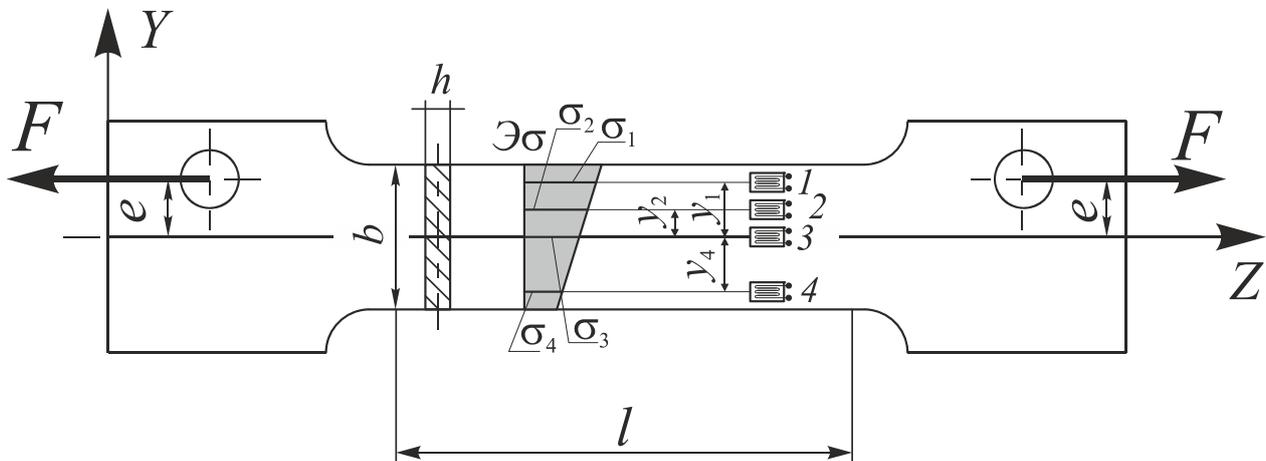


Рис. 10.2. Испытуемый образец с наклеенными тензодатчиками

После проведения необходимых измерений вычисляют теоретические напряжения в точках 1, 2, 3 и 4 по формуле 10.1, учитывая, что $y_F = e, x_F = 0, y_1 = -y_4, y_3 = 0$, тогда напряжения:

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

где $A = bh, I_x = hb^3/12$.

Измерить напряжения так, как это описано в рекомендациях к лабораторной работе №9. Для сопоставления результатов расчета и эксперимента эпюры напряжений строят в одинаковом масштабе на одном рисунке. Погрешность вычисляют для каждой точки, в которой вычислялось и измерялось напряжение.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

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

Лабораторная работа №11

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ОДНОПРОЛЕТНОЙ БАЛКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение методики экспериментального определения нормальных напряжений при плоском изгибе. Приобретение навыков определения напряжений с помощью тензодатчиков при изгибе.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Исследование нормальных напряжений в данной работе проводится на модели, показанной на рис. 11.1.

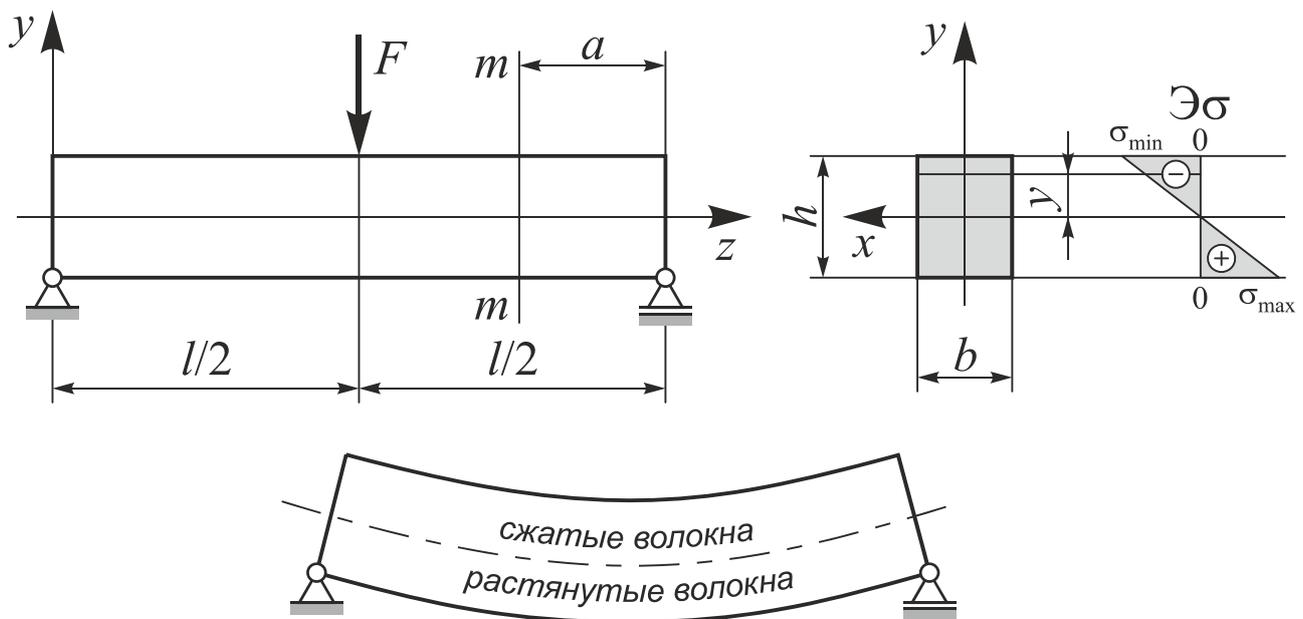


Рис. 11.1. Расчетная схема однопролетной балки при поперечном изгибе

Балка длиной l прямоугольного сечения высотой h и шириной b нагружена силой F , приложенной в середине пролета.

В произвольном сечении $t-t$ на расстоянии a от правой опоры действует изгибающий момент $M_{\text{и}} = F/2a$, который создает в верхних слоях балки сжимающие напряжения, в нижних слоях – растягивающие, между ними находится недеформируемый нейтральный слой. На основании гипотезы плоских сечений и линейной зависимости

между деформациями и напряжениями $\sigma = E\varepsilon$, последние вычисляются по формуле Навье:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y, \quad (11.1)$$

где σ – нормальные напряжения; M_x – изгибающий момент; I_x – момент инерции сечения относительно оси, проходящей через нейтральный слой; y – координата слоя, в котором определяется напряжение.

Согласно формуле Навье распределение напряжений в данном сечении зависит только от координаты y . Поэтому эпюра напряжений (рис. 11.1) прямая, пересекающая нейтральный слой, который совпадает с центром тяжести сечения. Максимальные по величине напряжения находятся в наиболее удаленных от нейтральной оси точках.

Конструктивная схема экспериментальной установки показана на рис. 11.2. Балка l прямоугольного сечения высотой $h = 10$ см, шириной $b = 6$ см опирается на две шарнирные опоры 2, установленные на массивном, стальном основании 3. Балку нагружают в середине пролета силой F с помощью шарикового наконечника 4.

На расстоянии a от опоры в сечении $m-m$ наклеены тензодатчики T_1, T_2, T_3 и T_4 на расстоянии: $|y_1| = 5$ см, $|y_2| = 2,5$ см, $|y_3| = 2,5$ см, $|y_4| = 5$ см от нейтральной оси.

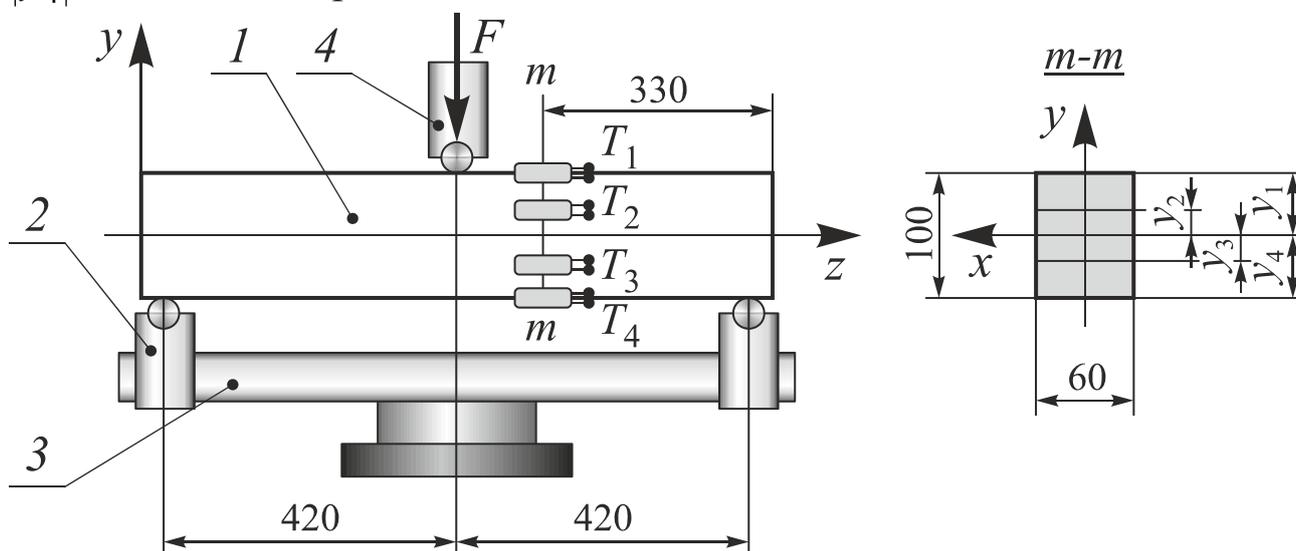


Рис. 11.2 Конструктивная схема экспериментальной установки

С помощью тензодатчиков определяют относительные деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и ε_4 в местах наклейки датчиков, а затем напряжения

$\sigma_1 = E \varepsilon_1$, $\sigma_2 = E \varepsilon_2$, $\sigma_3 = E \varepsilon_3$ и $\sigma_4 = E \varepsilon_4$. Балка изготовлена из дюралюминия, модуль упругости $E = 70 \text{ ГПа}$.

Подробное описание экспериментального метода измерения деформаций содержится в специальных методических указаниях к лабораторной работе №9. Блок-схема измерительной системы представлена на рис. 11.3.

Балка l с наклеенными на её поверхности тензодатчиками 2 нагружается силой F . Сигнал от тензодатчиков подается на тензоусилитель 3 и после усиления подается на показывающие приборы 5 . Тарировка измерительной системы осуществляется с помощью тарировочной балки 4 .

В качестве нагружающего устройства используется универсальная разрывная машина типа Р-5 мощностью 50 кН.

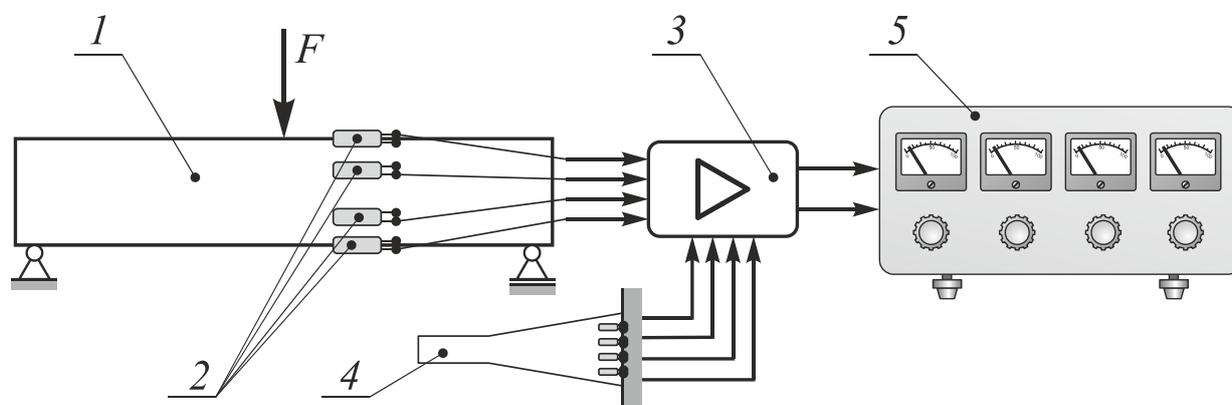


Рис. 11.3 Блок-схема измерительной системы

В измерительной системе можно применять любые типы тензоусилителей, например: четырехканальный типа ТА5 или 4АНЧ, восьмиканальный 8АНЧ и др.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Механическая разрывная машина Р5; тарировочная балка; измерительные средства; устройства тензометрирования.

4. ЗАДАНИЕ

Выполнить подготовку образцов к проведению испытаний, занести данные измерений геометрии, эскизов образца, установки во входные параметры эксперимента и в журнал испытаний. Определить значения напряжений в местах установки тензодатчиков при изгибе

балки, определить значения напряжений экспериментальным путем по показаниям тензодатчиков.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислить допускаемую нагрузку $[F]$, учитывая размеры и материал балки. Определить величину относительного удлинения ε_T тарировочной балки по формуле

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma F_T l_T}{E_T b_T h_T^2}.$$

Величины, входящие в формулу, взять по паспорту тарировочного устройства. Провести расчет нормальных напряжений в точках, где наклеены тензодатчики, по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_{1 \text{ расч}} &= -\frac{Fa}{2I_x} y_1, \quad \sigma_{2 \text{ расч}} = -\frac{Fa}{2I_x} y_2, \\ \sigma_{3 \text{ расч}} &= -\frac{Fa}{2I_x} y_3, \quad \sigma_{4 \text{ расч}} = -\frac{Fa}{2I_x} y_4.\end{aligned}$$

Величина нагрузки должна удовлетворять условию $F \leq [F]$. Нагрузить балку предварительной силой $F_0 = 0,1[F]$ с целью устранения зазоров в нагружающей системе.

Провести балансировку всех каналов тензоусилителя, установив стрелки показывающих приборов на нуль. Нагрузить тарировочную балку силой F_T и записать число делений показывающих приборов n_T . Провести балансировку всех каналов тензоусилителя.

Нагрузить исследуемую балку силой F и записать числа делений показания приборов n_δ . Результаты расчетов и наблюдений заносят в таблицу.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что дает использование гипотезы плоских сечений и гипотезы о ненадавливании волокон при выводе формулы нормальных напряжений при изгибе? Поясните модель стержня, отвечающую этим гипотезам.

2. Какая геометрическая характеристика определяет прочность по нормальным напряжениям при изгибе?

3. Как находится опасная точка в сечении при плоском изгибе?
4. Что такое балка равного сопротивления?
5. Для чего в работе используется тарировочная балка?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

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

Лабораторная работа №12

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭВМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение методики моделирования объектов с помощью конечных элементов. Получение навыков построения конечно-элементных моделей с помощью программного обеспечения Ansys.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Инженерные конструкции можно рассматривать как некоторую совокупность конструктивных элементов, соединенных в конечном числе узловых точек. Если известны соотношения между силами и перемещениями для каждого отдельного элемента, то, используя хорошо известные приемы механики, можно описать свойства и исследовать поведение конструкции в целом.

В сплошной среде число точек связи бесконечно, и именно это составляет основную трудность получения численных решений в теории упругости. Понятие конечных элементов, введенное впервые Тёрнером и др., представляет собой попытку преодолеть эту трудность путем разбиения сплошного тела на отдельные элементы, взаимодействующие между собой только в узловых точках, в которых вводятся фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов. Если такая идеализация допустима, то задача сводится к обычной задаче механики, которая может быть решена численно.

Метод конечных элементов применим и ко многим задачам иного типа, но и тогда основные свойства элемента выражаются в форме, принятой в механике.

На рис. 12.1 изображена двумерная конструкция, состоящая из отдельных частей, соединенных между собой в точках, пронумерованных от 1 до n . Соединения в узлах предполагаются шарнирными. Сначала допустим, что в результате расчета или на основе экспериментальных данных достоверно известны характеристики каждого элемента. Силы, возникающие в узлах 1 – 3 элемента a , однозначно определяются перемещениями этих узлов, действующей на элемент распределенной нагрузкой p и его начальной деформацией. Начальная деформация может быть обусловлена температурным воздейст-

вием, усадкой или несовершенством сборки. Силы и соответствующие им перемещения определяются компонентами U , V и u , v в какой-либо системе координат.

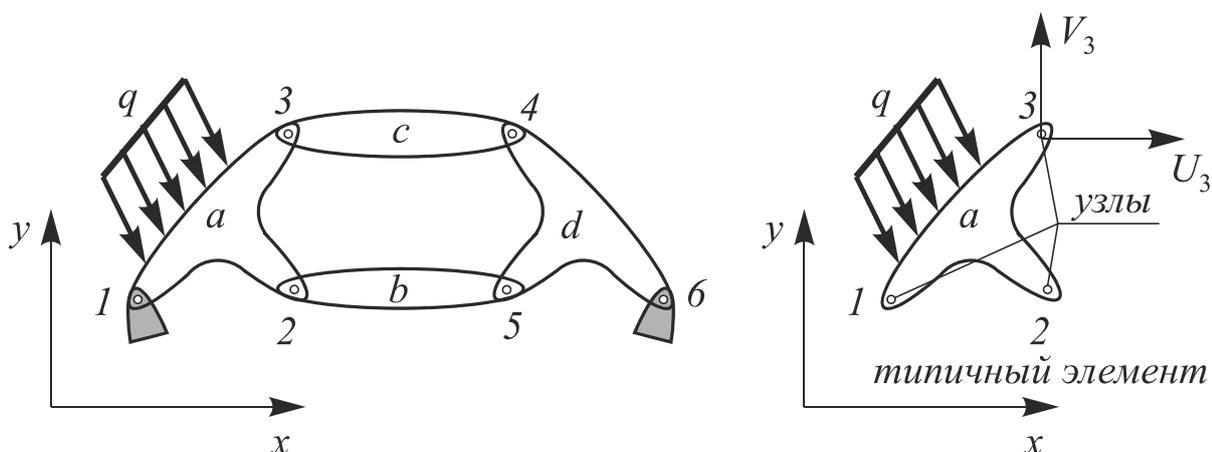


Рис. 12.1. Типичная конструкция, составленная из отдельных элементов

Записывая силы, действующие во всех (в трех для рассматриваемого случая) узлах элемента a , в виде матрицы, получим:

$$\{F\}^a = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ U_3 \\ V_3 \end{Bmatrix}, \quad (12.1)$$

а для соответствующих перемещений узлов:

$$\{\delta\}^a = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}. \quad (12.2)$$

Если предположить, что элемент упругий, то основные соотношения всегда могут быть записаны в виде:

$$\{F\}^a = [k]^a \{\delta\}^a + \{F\}_q^a + \{F\}_{\varepsilon_0}^a, \quad (12.3)$$

где $\{F\}_q^a$ – силы, уравнивающие действующие на элемент распределенные нагрузки, $\{F\}_{\varepsilon_0}^a$ – силы в узлах, обусловленные начальными деформациями, которые могут возникать, например, при изменении температуры без перемещения узлов. Первый член в этой формуле представляет собой силы, вызванные перемещениями узлов.

Предварительный расчет или эксперимент позволяет однозначно определить напряжения в любой заданной точке через узловые перемещения. Записывая эти напряжения в виде матрицы $\{\sigma\}^a$, получаем соотношение в форме:

$$\{\sigma\}^a = [S]^a \{\delta\}^a + \{\sigma\}_q^a + \{\sigma\}_{\varepsilon_0}^a, \quad (12.4)$$

где последние два члена – напряжения, обусловленные распределенными нагрузками, и начальные напряжения при отсутствии узловых перемещений. Матрица $[k]^a$ называется матрицей жесткости элемента, а $[S]^a$ – матрицей напряжения элемента.

Соотношения (12.3) и (12.4) проиллюстрированы на примере элемента с тремя узлами, в каждом из которых действуют только две компоненты силы. Ясно, что все рассуждения и определения справедливы и в более общем случае. Элемент b в рассматриваемом случае связан с соседними только в двух точках, хотя другие элементы могут иметь таких точек и больше. С другой стороны, если соединения элементов считать жесткими, то требуется рассматривать по три компоненты обобщенной силы и обобщенного перемещения, причем за третьи компоненты следует принять соответственно момент вращения и угол поворота. Для жесткого соединения в трехмерной конструкции число компонент в узле равняется шести. Таким образом, в общем случае:

$$\{F\}^a = \begin{Bmatrix} F_i \\ \vdots \\ F_m \end{Bmatrix} \text{ и } \{\delta\}^a = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \vdots \\ \delta_m \end{Bmatrix}, \quad (12.5)$$

где F_i и δ_i имеют одинаковое число компонент или степеней свободы.

Матрицы жесткости элемента всегда будут квадратными вида:

$$[k]^e = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{bmatrix}, \quad (12.6)$$

где k_{ii} и т. д. – также квадратные подматрицы размерности $l \times l$, а l – число компонент силы в рассматриваемых узлах.

Часто для различных инженерных целей требуется знание распределения напряжений и деформаций в упругой сплошной среде. Тогда предметом исследования являются двумерные задачи о плоском напряженном и плоском деформированном состояниях, задачи об осесимметричных телах, об изгибе пластин и оболочек и, наконец, исследование трехмерных твердых тел. Во всех случаях число связей между любым конечным элементом, ограниченным воображаемыми поверхностями, и соседними элементами бесконечно.

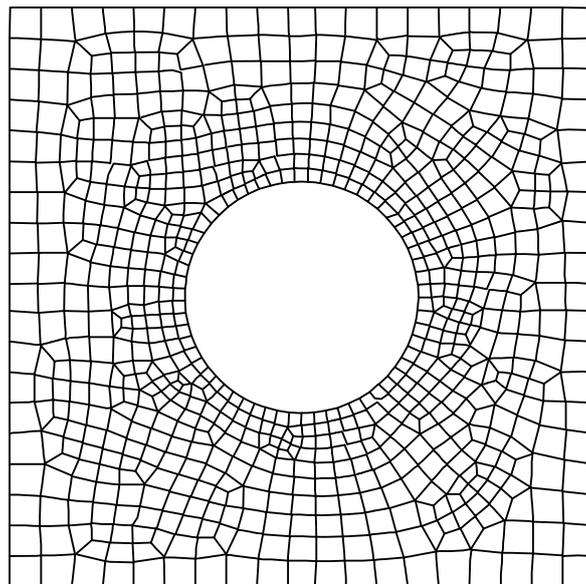


Рис. 12.2. Пластина с отверстием, разбитая на сетку конечных элементов

Для этого сплошная среда разделяется воображаемыми линиями или поверхностями на некоторое количество конечных элементов (рис. 12.2). Предполагается, что элементы связаны между собой в узловых точках, расположенных на их границах. Так же, как в обычных задачах строительной механики, основными неизвестными будут перемещения этих узловых точек. Выбирается система функция, однозначно определяющая перемещения внутри каждого конечного элемента через перемещения узловых точек. Функции перемещений од-

однозначно определяют деформации внутри элемента через узловые перемещения. Эти деформации при известных начальных деформациях и упругих свойствах элемента позволяют определить напряжения как внутри элемента, так и на его границах. Определяется система сил, сосредоточенных в узлах и уравнивающих напряжения на границе и некоторые распределенные нагрузки, а затем записывается соотношение для жесткостей в форме (12.3).

Далее могут быть использованы обычные методы решения задач механики, описанные ранее. Очевидно, что такой подход является приближенным. Во-первых, не всегда легко добиться, чтобы выбранные функции перемещений удовлетворяли требованиям непрерывности перемещений между смежными элементами. В результате на границах элементов могут нарушаться условия совместности (хотя в пределах каждого элемента эти условия, очевидно, удовлетворяются при однозначности функций перемещений). Во-вторых, сосредоточивая эквивалентные усилия в узлах, мы только в среднем удовлетворяем уравнениям равновесия. Обычно возникает локальное нарушение уравнений равновесия внутри элементов и на их границах.

Выбор формы элемента и функций перемещений для конкретных задач зависит от навыков инженера, и именно этим определяется точность приближенного решения.

Конечные элементы могут быть линейными (элементы первого порядка *h-Method*) или параболическими (элементы второго порядка *p-Method Struct.*) (рис. 12.3). Линейные элементы имеют прямые стороны и узлы только в углах. Таким образом, минимальное число узлов трехмерного элемента равно 4. Параболические элементы могут иметь промежуточный узел вдоль каждой из сторон. Именно благодаря этому стороны элемента могут быть криволинейными (параболическими). При равном количестве элементов параболические элементы дают большую точность вычислений, т. к. они более точно воспроизводят кри-

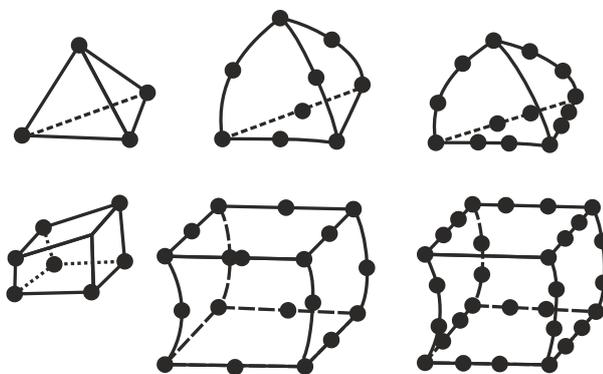


Рис. 12.3. Элементы 1, 2 и 3 порядка

волинейную геометрию модели и имеют более точные функции формы (аппроксимирующие функции).

Построение сетки конечных элементов. Одним из наиболее важных этапов в конечно-элементном анализе является построение на модели сетки из конечных элементов, т. е. разделение всей модели на маленькие кусочки (конечные элементы), связанные между собой в узлах.

В программном комплексе ANSYS имеется два основных метода построения сетки: построение упорядоченной сетки (рис. 12.4, *а*) и построение произвольной сетки (рис. 12.4, *б*).

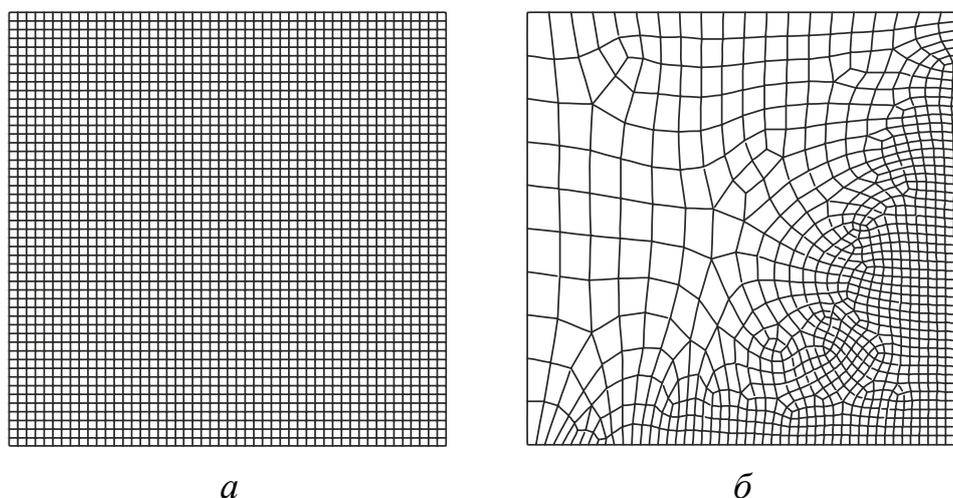


Рис. 12.4. Упорядоченная и произвольная сетки КЭ

Произвольная сетка строится автоматически, при этом соседние элементы могут существенно отличаться по размерам. Упорядоченная сетка строится путем деления геометрических элементов модели на некоторое число частей. В автоматически построенных сетках с большим числом элементов число узлов преобладает над числом элементов. Отношение между узлами и элементами, примерно, 2:1 для плоских произвольных сеток и 6:1 для произвольных трехмерных сеток с четырехгранными элементами.

Очевидно, что чем меньше линейный размер конечного элемента, тем большее количество элементов в модели, при этом время вычислений экспоненциально возрастает, а ошибки анализа уменьшаются. Однако, ошибки уменьшаются не до нуля, так как с увеличением числа элементов накапливаются ошибки округления в ЭВМ.

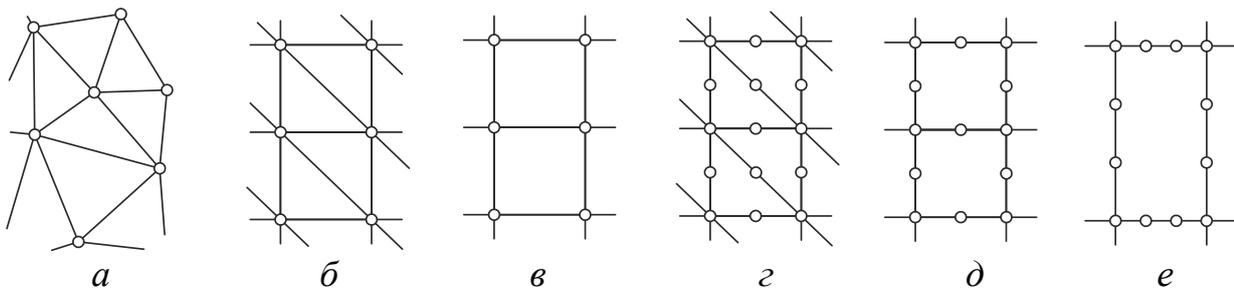


Рис. 12.5. Виды сеток конечных элементов

Практика расчетов с применением МКЭ позволяет дать следующие рекомендации (рис. 12.5):

- линейные элементы требуют более частой сетки, чем квадратичные элементы (с одним промежуточным узлом) или кубические (с двумя промежуточными узлами);
- упорядоченная сетка (рис. 12.5, б) является более предпочтительной, чем произвольная сетка (рис. 12.5, а);
- прямоугольная сетка с 4 узлами (рис. 12.5, в) более предпочтительна, чем сетка с треугольными элементами (рис. 12.5, б);
- сетка треугольных элементов с промежуточными узлами (рис. 12.5, г) имеет, по крайней мере, ту же самую точность, что и сетка прямоугольных элементов с 4 узлами (рис. 12.5, в);
- прямоугольная сетка с 8 узлами (рис. 12.5, д) является более предпочтительной, чем сетка треугольных элементов с 9 промежуточными узлами (рис. 12.5, г), несмотря на больший размер прямоугольных элементов;
- аппроксимация смещений кубическим полиномом (рис. 12.5, е) не требует более мелкой сетки.

Необходимо помнить, что МКЭ – приближенный метод, точность которого зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более частая сетка требуется там, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений. В то же время более редкая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными деформациями или напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса. В связи с этим исследователь должен уметь предвидеть области концентрации напряжений.

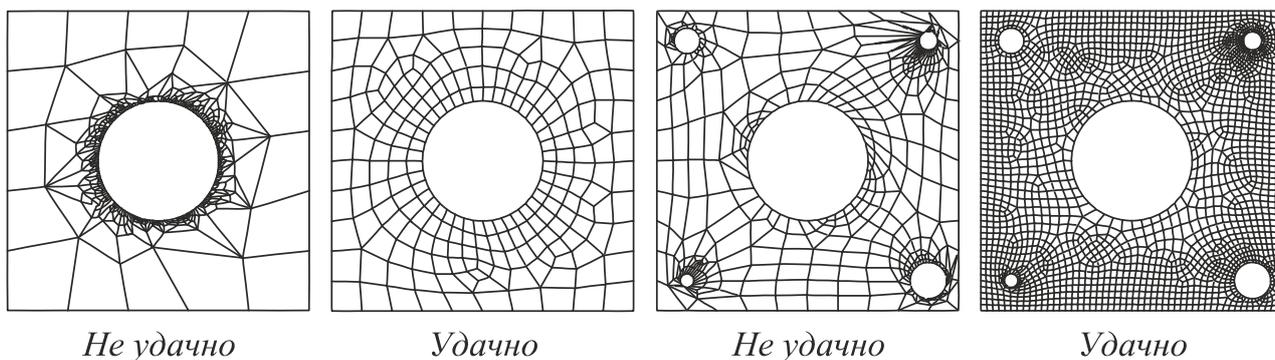


Рис. 12.6. Примеры разбиения области на сетку КЭ.

Форма конечных элементов также влияет на точность вычислений. С этой точки зрения следует избегать слишком узких и вытянутых элементов (рис. 12.6), так как элементы с одинаковыми, примерно, сторонами дают меньшую ошибку.

Существует большое количество разнообразных типов конечных элементов (в программе ANSYS их около 100). Задача разбиения тела на конечные элементы неоднозначна. В некоторых случаях (например, в случае расчета ферм) конструктивные элементы таковы, что совпадают с конечными элементами. Так, всю ферму можно моделировать линейными стержневыми элементами. Такими же элементами можно моделировать различного рода упругие конструктивные элементы (пружины, стержни, тяги и т. п.), а также системы трубопроводов. В этих случаях моделирование конструкции не представляет особого труда и состоит в выполнении некоторого объема работы по стандартным правилам. Гораздо сложнее выполнить эту операцию для двумерных или трехмерных областей. Здесь, прежде всего, нужно выбрать тип (или типы) конечных элементов, наилучшим образом аппроксимирующие исследуемую область. Плоские двумерные элементы применяются, в основном, для моделирования мембран, тонких пластин, тонкостенных оболочек и т. п. Объемные трехмерные элементы применяются при исследовании полей температур, деформаций, напряжений в массивных телах.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Персональные компьютеры; программное обеспечение для построения геометрических моделей; программный комплекс Ansys.

4. ЗАДАНИЕ

Подготовить геометрическую модель пластины с отверстием во внешнем САД-редакторе либо в геометрическом препроцессоре Ansys. Построить произвольную, упорядоченную сетки конечных элементов. Повторить построение конечно-элементной сетки для различных геометрических параметров модели.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для построения сетки конечных элементов необходимо первоначально построить геометрическую модель конструкции. Построение геометрической модели возможно как средствами графического процессора Ansys, так и с помощью сторонних программ Autodesk Autocad, АСКОН Компас-3D и т.п.

Построению модели в среде Ansys является затруднительным в случае сложной формы конструкции. Однако, использование графического процессора Ansys позволяет получить геометрическую модель без «дефектов», которые могут сопутствовать импорту геометрической модели из сторонних препроцессоров, через совместимые форматы графики.

Наиболее распространенным форматом, позволяющим импортировать модель в Ansys, является формат IGES (маска расширения файла *.igs). Такие файлы записывает большинство программ, предназначенных для САД-проектирования. К ключевым особенностям импорта из данного формата можно отнести следующее: система единиц измерения – большинство САД программ в качестве системных единиц размерности имеют миллиметры, в Ansys – это метры (необходимо корректировать при импорте); возможные дефекты в импортируемой модели – файл может быть записан некорректно САД-программой или неверно прочитан Ansys из-за ошибок совместимости, в таком случае в геометрии могут появиться несплошности и зазоры, что необходимо контролировать после импорта модели.

Рассмотрим построение геометрической модели пластины с отверстием в Ansys. Для начала необходимо сузить круг задач, решаемых в Ansys – пункт меню *Preferences*, в открывшейся вкладке ставим галочку напротив *Structural* и *h-Method*. Данная операция ограничивает типы конечных элементов, сугубо применимых к анализу напряженно-деформированного состояния, а также использует элементы первого порядка.

Для этого заходим в меню *Preprocessor* → *Modeling* → *Create* → *Keypoints* → *On WP* – создаем ключевые точки пластины, ее вершины. В открывшемся диалоговом окне вводим последовательно координаты узлов (например: 0,0 – нажимаем *Apply*; аналогично 0,0.20; 0.20,0.20; 0.20,0 – запятыми разделяются значения координат x , y , z , точками – дробная часть числа, по окончании ввода нажимаем *OK*). Результатом данной операции будет построение на плоскости XY – четырех точек. Затем заходим в меню *Preprocessor* → *Modeling* → *Create* → *Lines* → *By KP* – последовательно выделяя курсором ключевые точки, рисуем квадрат.

Далее необходимо построить отверстие в пластине. Для этого заходим в меню *Preprocessor* → *Modeling* → *Create* → *Circle* → *By Cntr and Rad* – создаем окружность по центру и радиусу (в открывшемся окошке вводим 0.1,0.1 – для обозначения координат центра окружности, нажимаем *OK* и вводим или с помощью мыши в рабочей области отрисовываем радиус окружности 0.05).

На данном этапе создан каркас геометрической модели. Далее необходимо сформировать плоскость, соответствующую заданной геометрии. Для этого заходим в меню *Preprocessor* → *Modeling* → *Create* → *Areas* → *Arbitrary* → *By Lines* – создаем площадь, последовательно выделяя все линии каркаса.

Геометрия пластины теперь готова. Необходимо приступить к созданию сетки. Но для начала необходимо выбрать тип конечных элементов. Заходим в меню *Preprocessor* → *Element Type* → *Add/Edit/Delete* – добавляем в решатель тип элементов, например *PLANE82*. Периодически сохраняем базу данных нажатием на кнопку *SAVE_DB*.

Для того чтобы сетка КЭ получилась достаточно равномерной, без существенных искажений формы элементов, необходимо обозначить характерные зоны конструкции и задать количество граней элементов в зонах концентраторов и иных ребер. Заходим в меню *Preprocessor* → *Meshing* → *SizeCtrls* → *GlbElmSzs* – задаем *Element edge length* 0.01, в нашем случае это соответствует 20 элементам вдоль сторон пластины. Если в зоне отверстия необходимо сгустить сетку так, чтобы линейный размер элемента был меньше, заходим в меню *Preprocessor* → *Meshing* → *SizeCtrls* → *By Lines*, выделяем сегменты окружности и задаем в окошке *Number of elements* значение, на кото-

рое необходимо их поделить. После этого можно разбить область на конечные элементы – меню *Preprocessor* → *Meshing* → *Mesh* → *Areas* → *Free* и выделяем пластину. Если результаты построения сетки неудовлетворительны, необходимо повторить шаги по назначению размеров и числа элементов и вновь построить сетку. Старую сетку можно не удалять, при этом в ходе построения сетки появится окошко, в котором программа задаст вопрос о перестроении сетки, на который необходимо дать положительный ответ.

В программе Ansys предусмотрен контроль за качеством построенной сетки. В случае, если элементы построенной сетки имеют недопустимые искажения, будет выдано предупреждение, а элементы неправильной формы будут подсвечены. В этом случае необходимо скорректировать параметры разбивки сетки и выполнить ее перестроение.

Если в ходе построения сетки или модели допускались исправления, новые построения, необходимо произвести оптимизацию расчетной модели, так как в этом случае в базе могут остаться пустые значения номеров ключевых точек, линий, площадей, объемов, узлов, элементов и т.д., что в случае больших решений будет приводить к снижению производительности расчета. Для этого заходим в меню *Preprocessor* → *Numbering Ctrl*s → *Compress Numbers* в появившемся диалоговом окне, в выпадающем списке поля *Label Item to be compressed* выбираем *All*. После этого сохраняем базу данных модели нажатием на кнопку *SAVE_DB*.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы элементов используются в программном обеспечении Ansys?
2. Какие требования предъявляются при разбиении на сетку конечных элементов?
3. Какие типы сеток являются наиболее предпочтительными?
4. Как осуществляется построение геометрической модели в Ansys?
5. В чем отличие произвольной и упорядоченной сетки?
6. Какая форма элемента может считаться удовлетворительной?
7. Почему увеличение числа счетных элементов не всегда приводит к увеличению точности производимых расчетов?

8. Целесообразно ли считать осесимметричную задачу в плоской постановке

9. В каких случаях целесообразно выполнять локальное сгущение конечно-элементной сетки?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания, изображения с исходной геометрией модели. Приводят изображения полученных конечно-элементных сеток. В заключении анализируют полученные результаты, оценивают качество полученных конечно-элементных сеток, делают выводы по работе.

Лабораторная работа №13

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение навыков работы, создания и расчета конечно-элементных моделей в программном комплексе Ansys. Освоение методики построения и расчета задачи при плоском напряженно-деформированном состоянии.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вычислительный комплекс Ansys позволяет решать краевые задачи практически во всех инженерных приложениях. В основе любого расчета на прочность лежит расчетная схема, включающая в себя геометрию конструкции и действующие на нее нагрузки (механические и температурные). В дальнейшем, в зависимости от конечных целей расчета, используя те или иные модели материала конструкции, определяются напряжения и деформации элементов конструкции. Затем на основе анализа поля напряжений устанавливается наиболее опасное сечение, при этом используются те или иные гипотезы прочности, а зависимости – от свойств материала и условий работы конструкции.

Теории упругости пластичности, теория пластин и оболочек и другие аналитические теории решают большое количество технических задач, связанных с исследованием напряженно-деформированного состояния твердых тел. Тем не менее, многие практически важные технические задачи не могут быть решены аналитически вследствие сложности геометрии конструкции и граничных условий.

В общем случае конструкция, изготовленная из реального материала, находящаяся под действием внешних нагрузок, может иметь много особенностей, включающих в себя несовершенство формы, несплошность и неоднородность свойств материала, особенности в характере внешнего нагружения и т.п. В практических условиях учесть все это невозможно.

Одной из идеализаций реального твердого тела является присвоение ему свойств однородности. Определенной идеализации под-

вергается также и понятие «внешней силы», которая в ряде случаев рассматривается как вектор силы, действующей на поверхность тела в определенной точке. Однако, в действительности, «сосредоточенных» сил не существует. Также идеализированным является понятие о точечном контакте двух твердых тел.

Таким образом, физическая модель может быть наделена лишь частью свойств реальной конструкции, за счет чего упрощается ее математическое описание. От того, насколько удачно выбрана физическая модель конструкции, зависит, в конечном итоге, трудоемкость расчета и точность его результатов.

Задание граничных условий – один из ответственных этапов конечно-элементного анализа. В программном комплексе Ansys граничные условия (перемещения и силы) прикладываются только к узлам. Максимальное число граничных условий, приложенных в узле, равно числу его степеней свободы.

Существуют два метода конечно-элементного анализа: *h*-метод (*h* – длина стороны конечного элемента) и *p*-метод (*p* – порядок полинома аппроксимирующей функции). Для повышения точности *h*-метод требует увеличения числа элементов. В соответствии с *p*-методом для увеличения точности надо повысить порядок полинома аппроксимирующей функции. Для получения достоверных результатов в зонах концентрации напряжений размер элементов должен быть меньше.

В программном комплексе Ansys можно выделить три основных составляющих: препроцессор, решатель и постпроцессор. В *препроцессоре* ставится условие задачи: выбирается метод решения задачи; строится геометрическая модель; выбирается тип конечных элементов, модель материала; создается конечно-элементная сетка; задаются граничные условия и т.п. *Решатель* обрабатывает заданную в препроцессоре модель, выполняет расчет компонент напряжений и деформаций и т.д. *Постпроцессор* позволяет визуализировать полученные в решателе результаты расчета, произвести постобработку решения.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Персональные компьютеры; программное обеспечение для построения геометрических моделей; программный комплекс Ansys.

4. ЗАДАНИЕ

Подготовить геометрическую модель пластины с отверстием во внешнем САД-редакторе либо в геометрическом препроцессоре Ansys. Построить произвольную, упорядоченную сетки конечных элементов. Повторить построение конечно-элементной сетки для различных геометрических параметров модели.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

В качестве примера расчета рассмотрим задачу о напряженно-деформированном состоянии пластины формой уголка (рис. 13.1, *а*), жестко закрепленной в сечении *A* и нагруженной силой *F* в сечении *B* (рис. 13.1, *б*). Геометрия пластины показана на эскизе, толщина пластины 10 мм. Предполагается, что пластина была выполнена в виде эскиза в стороннем САД-редакторе и экспортирована из него в формате IGES для последующего импорта в Ansys.

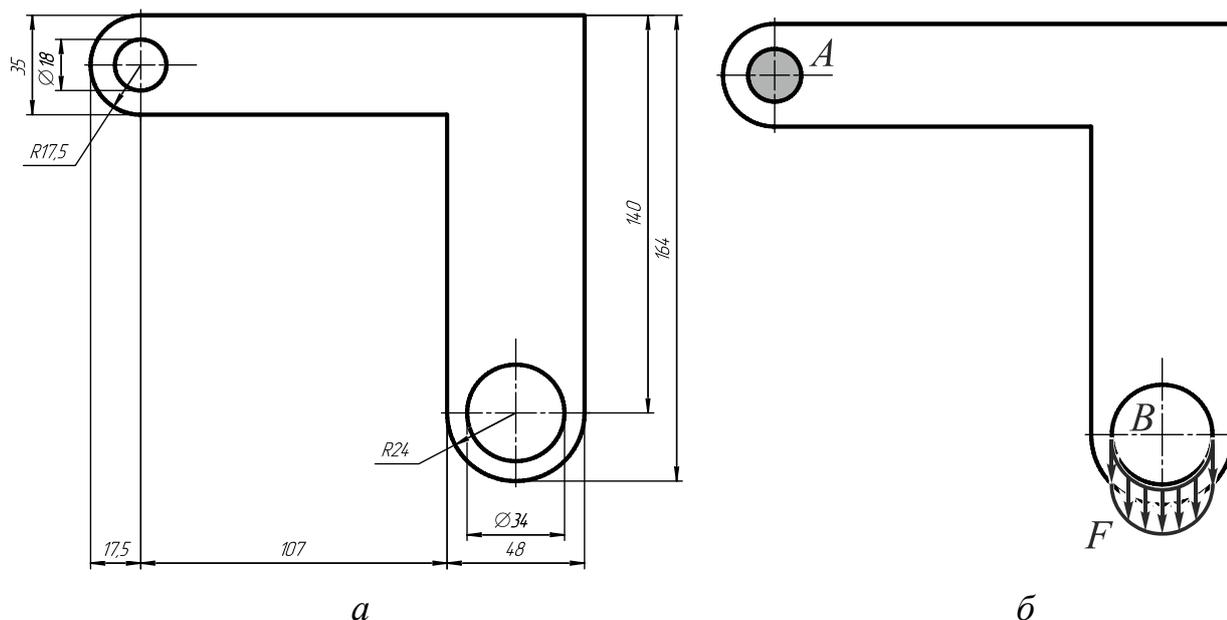


Рис. 13.1. Эскиз и расчетная схема пластины

5.1. Препроцессорная подготовка модели.

Запустить *Ansys/Multiphysics* по иконке в меню «Программы» через *Ansys Product Launcher* – меню **Пуск** → **Программы** → **ANSYS 12.0** → **ANSYS Product Launcher**. В открывшемся окне выбрать в Simulation Environment – ANSYS, в License – Ansys Multyphysics. В диалоговом окне File Management указать рабочую папку, в которой будут сохраняться все файлы, сопутствующие решению (Working

Directory), и имя задачи (Job Name). После этого запустить Ansys, нажав кнопку Run.

В главном меню Ansys (рис. 13.2) выбрать пункт настройки (Preferences). В открывшейся вкладке необходимо выбрать тип задачи Structural, в меню Discipline options – h-Method. Данные действия включают фильтр по типам отображаемых задач (типовых действий) и произведут выборку типов конечных элементов.

Для импорта модели заходим в меню **File** → **Import** → **IGES**, в открывшемся диалоговом окне проверяем настройки импорта файла (предварительно модель необходимо создать во внешнем САД-редакторе, например, КОМПАС-3D). Рекомендуется не изменять параметры импорта, если модель импортируется корректно. Далее в окне импорта выбрать импортируемый файл, нажать ОК (на экране появится геометрическая модель рис. 13.2).

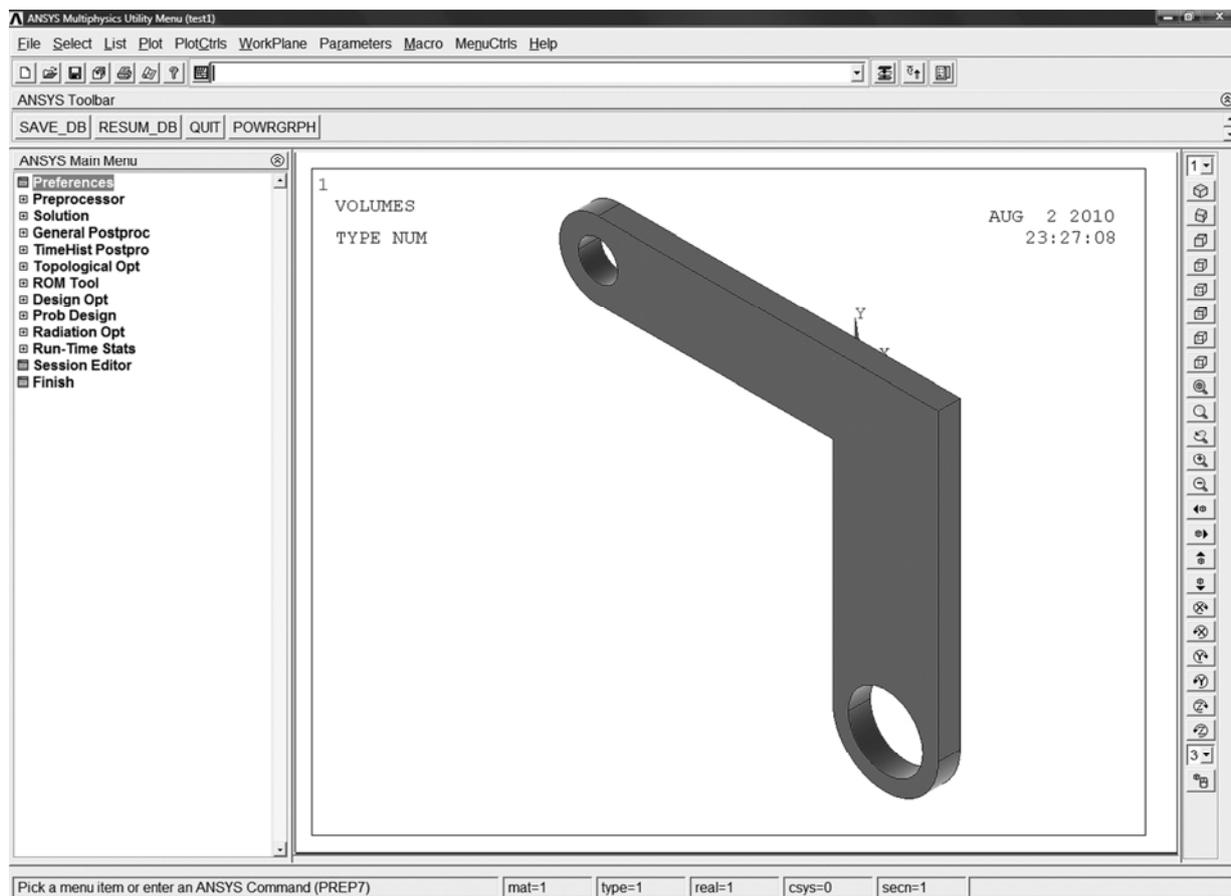


Рис. 13.2. Создание модели в Ansys

Выбор типа элементов. В данной задаче выбирается плоский четырехугольный 8-узловой элемент *PLANE82*: **Preprocessor** → **Ele-**

ment Type → **Add/Edit/Delete**. В открывшемся окне нажать Add (добавить новый тип элемента), выбрать Structural Mass → Solid → Quad 8node 82 (рис. 13.3), нажать ОК.

В окне Element Types выбрать Options (свойства элемента), выбрать для опции КЗ значение Plane strs w/thk (плосконапряженный элемент с указанием толщины), нажать ОК, затем Close.

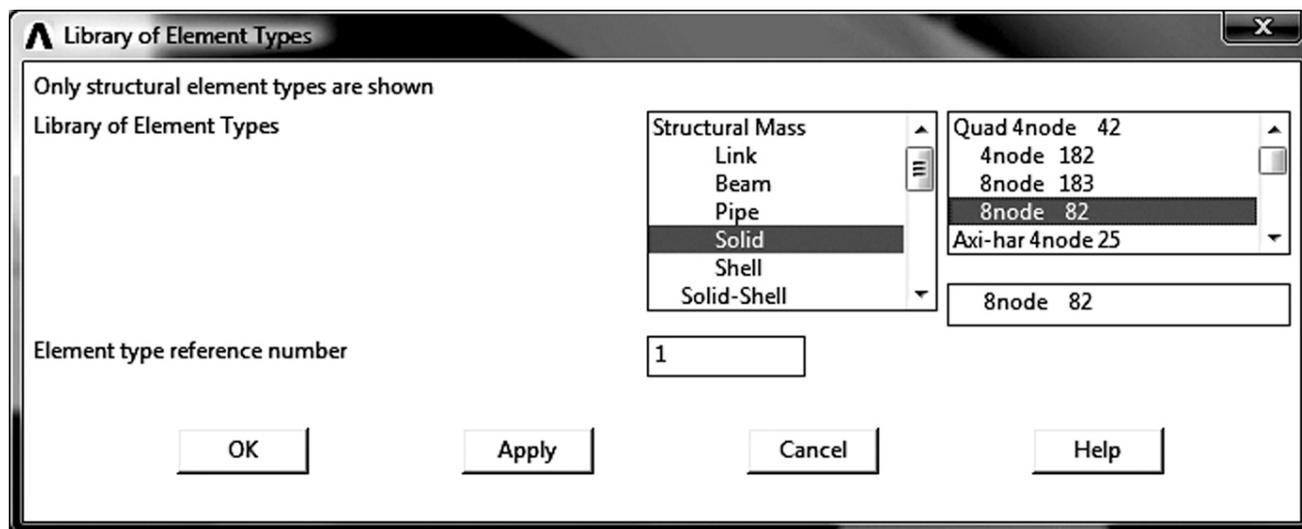


Рис. 13.3. Выбор типа элемента

Выбор параметров элементов. Параметры задаются для таких элементов, чьи свойства нельзя в полной мере описать положением их узлов (например, толщина плоских элементов и параметры поперечного сечения балочных элементов). В нашем случае для выбранного элемента PLANE82 необходимо дополнительно определить его толщину: **Preprocessor** → **Real Constants** → **Add/Edit/Delete**, нажать Add (добавить к существующему списку параметров), ОК (константы для элемента PLANE82). Ввести 0.01 для ТК (толщина 10мм), ОК и Close для закрытия окна Real Constants.

Свойства материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность) не зависят от геометрии элемента, поэтому для каждого типа используемых конечных элементов они должны задаваться отдельно. Кроме того, для одного и того же элемента могут быть заданы различные комбинации свойств материала. В зависимости от постановки задачи свойства материала могут быть линейные, нелинейные, анизотропные, температурно-зависимые и т.д. В данной работе задается изотропный материал с постоянными свойствами **Preprocessor** → **Material Props** → **Material Models** (рис. 13.4). В открыв-

шемся окне открываем **Structural** → **Linear** → **Elastic** → **Isotropic**, и в открывшемся окне задаем свойства EX (модуль Юнга) 205.e9, 0.27 в PRXY – коэффициент Пуассона; нажимаем ОК и закрываем окно моделей материала.

Построение областей. Импортированная геометрическая модель представляет собой лишь набор линий. Однако этого недостаточно для построения конечно-элементной сетки. Необходимо сначала определить области твердого тела. Создаем область модели уголка без отверстий, заходим в меню **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Arbitrary** → **By Lines** и выделяем последовательно все линии, ограничивающие внешний контур уголка. Полученная область закрасится голубым фоном. Затем строим области вырезов аналогичным способом, получатся еще две области в виде круга.

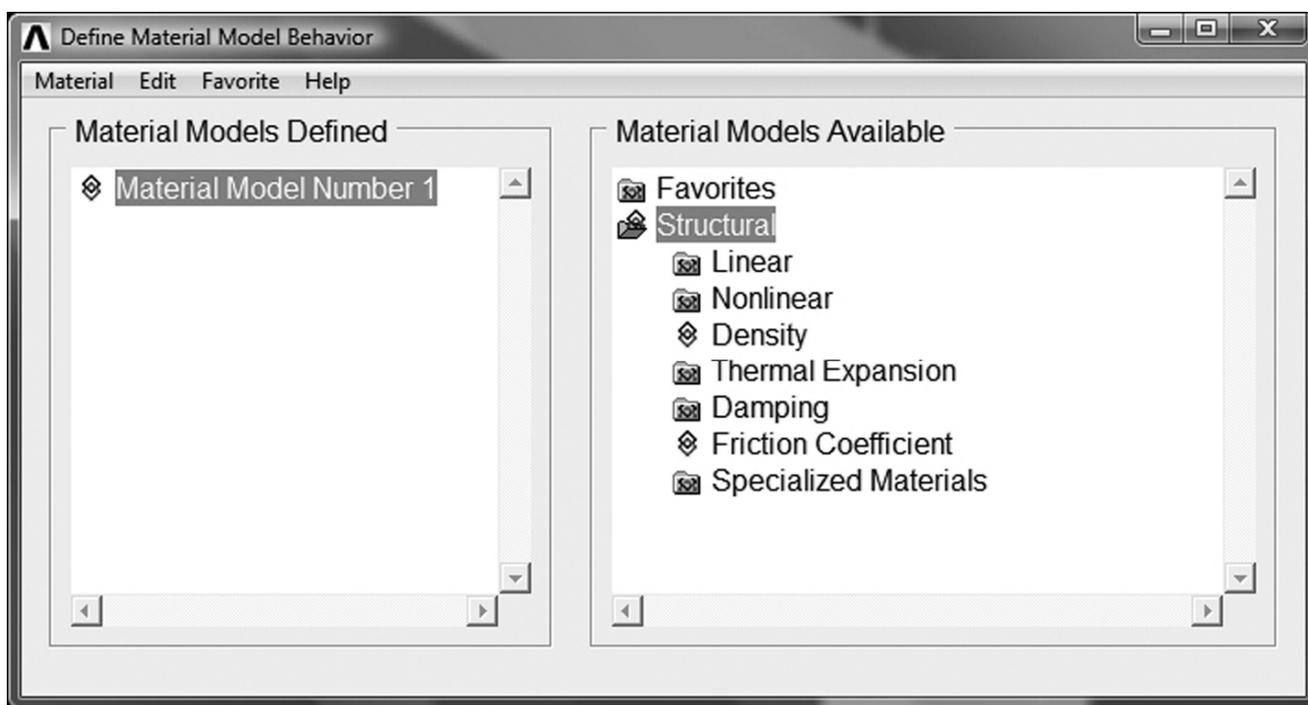


Рис. 13.4. Выбор модели материала

Последние необходимо «вычистить» из области тела уголка. Для этого заходим в меню **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Divide** → **Area by Area** выделяем область уголка, нажимаем ОК, затем выделяем круглые области и нажимаем ОК. Если в ходе выделения области были выделены неверно, с них можно снять выделение либо, выбрав в диалоговом окне опцию Unpick, снова выделить ненужную область, либо нажать в области построения правой

кнопкой мыши, курсор изменится на опцию снятия выделения. Если все сделано правильно, в рабочем окне отобразится область уголка с отверстиями.

Построение сетки. Установка рекомендуемого размера элементов **Preprocessor** → **Meshing** → **SizeCtrls** → **ManualSize** → **Global** → **Size** ввести в открывшемся окне в поле SIZE 0.01, нажать ОК.

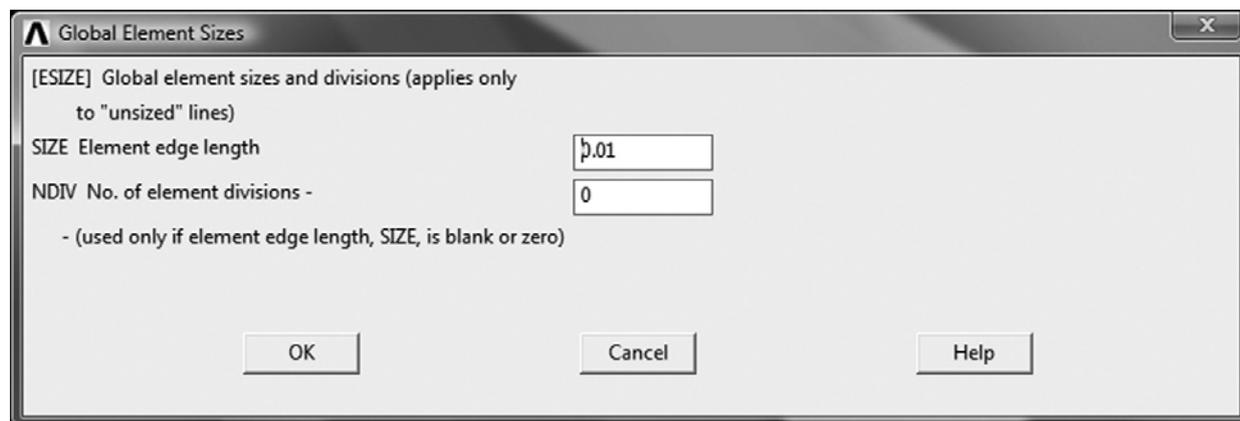


Рис. 13.5. Выбор модели материала

Если требуется «сгустить» сетку возле концентраторов – отверстий, необходимо специально указать линейный размер элементов в данных областях. Для этого **Preprocessor** → **Meshing** → **SizeCtrls** → **ManualSize** → **Lines** → **Picked Lines** выделяем линии, формирующие окружности и дуги в уголке, нажимаем ОК, в открывшемся диалоговом окне устанавливаем линейный размер грани элемента SIZE Element edge length, например, 0.05, нажимаем ОК (рис. 13.5). Выбранные линии будут разбиты на большее число сегментов, против заданного в глобальном статусе разбиения сетки.

Для построения сетки заходим в меню **Preprocessor** → **Meshing** → **Mesh** → **Areas** → **Free** и выделяем область. После этого будет сгенерирована конечно-элементная сетка (рис. 13.6). Если результаты построения сетки неудовлетворительны, необходимо изменить параметры разбиения и перестроить сетку.

5.2. Получение решения.

Этап решения начинается с задания граничных условий, а также указания метода и параметров расчета.

Задание граничных перемещений. Перемещения (*Displacements*) всех узлов на границе отверстия в сечении *A*, защемленного по кон-

туру, равны нулю. Однако мы не знаем нумерацию этих узлов, т.к. программа строила сетку автоматически. Поступим следующим образом, нам необходимо ограничить все перемещения в узлах по контуру отверстия, для этого заходим в *Preprocessor* → *Loads* → *Define Loads* → *Apply* → *Structural* → *Displacement* → *On Nodes* в отрывшемся диалоговом окне выбираем режим выделения объектов Circle (предварительно лучше увеличить масштаб отображения с помощью инструмента Лупа – Zoom Model) и рисуем окружность из центра отверстия так, чтобы она охватила все узлы ограничивающие контур отверстия, нажимаем ОК.

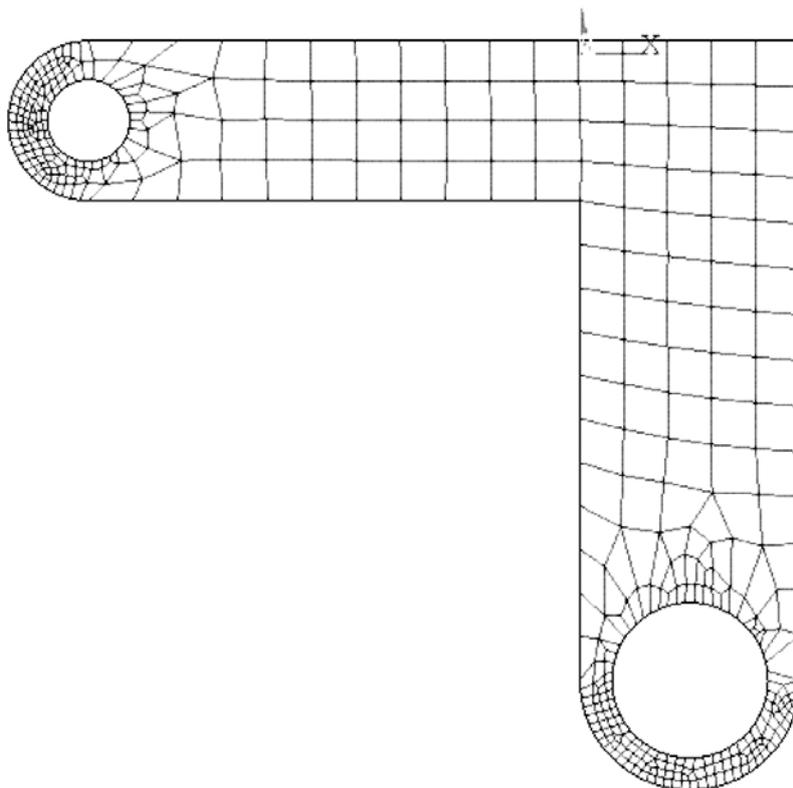


Рис. 13.6. Конечно-элементная модель

В открывшемся окне Apply U,ROT on Nodes выбираем в поле Lab2 DOFs to be constrained – All DOF, т.е. все степени свободы, в окошке VALUE Displacement value вводим значение 0 (нулевые перемещения). Сохраняем базу ANSYS Toolbar → SAVE_DB.

Задание давления на границе второго отверстия. Теперь необходимо приложить давление, постоянное вдоль нижней половины второго отверстия. Для этого заходим в меню *Preprocessor* → *Loads* → *Define Loads* → *Apply* → *Structural* → *Pressure* → *On Lines* и выделяем нижнюю линию (линии), образующие отверстие в сечении B,

в открывшемся диалоговом окне в поле VALUE Load PRES Value (значение давления) задаем 62.83e6 (62,83 МПа), нажимаем ОК. В нижнем отверстии отобразится вектор давления.

Уменьшение числа счетных единиц. Если в ходе построения производилась корректировка модели, это может привести к увеличению числа «пустых» областей, элементов, узлов и т.д., что может неблагоприятно отразиться на решении. Для этого в Ansys существует обработчик, позволяющий оптимизировать базу. Чтобы оптимизировать модель, заходим в меню *Preprocessor* → *Numbering Ctrl*s → *Compress Numbers*, в открывшемся диалоговом окне в поле Label Item to be compressed выбираем All и нажимаем ОК.

Запуск на счет. *Solution* → *Solve* → *Current LS* нажимаем ОК. Проанализировать появившееся сообщение в диалоговом информационном окне и закрыть его. После выполнения расчета появится сообщение Solution is done! Результаты расчета данного шага нагружения сохраняются в файле базы данных. Если задача предполагает несколько шагов нагружения, то в базе данных сохраняются результаты только текущего шага нагружения. Результаты расчета по всем шагам нагружения сохраняются в файле результатов.

5.3. Анализ результатов.

Результаты решения можно представить как в графической, так и в текстовой форме.

Вызов главного постпроцессора и чтение результатов. Выбирается первый (first) из нескольких (при пошаговом расчете) наборов выходных данных. Для данной задачи такой набор только один *General Postproc* → *Read Results* → *First Set*.

Для отображения деформированной формы модели *General Postproc* → *Plot Results* → *Deformed Shape*: выбрать Def + undeformed (показываются исходная и деформированная формы одновременно).

Отображение изолиний эквивалентных по Мизесу напряжений. При многоосном поле напряжений часто считается, что текучесть стали наступает, когда эквивалентные напряжения, рассчитанные по Мизесу, достигают предела текучести. Эквивалентные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения. Имея картину изолиний (рис. 11.5) эквивалентных напряжений, легко установить опасное сечение детали **General Postproc** → **Plot Results** → **Contour Plot** → **Element Solu**, в открывшемся окне выбираем **Stress** → **von Mises stress** (рис. 13.7).

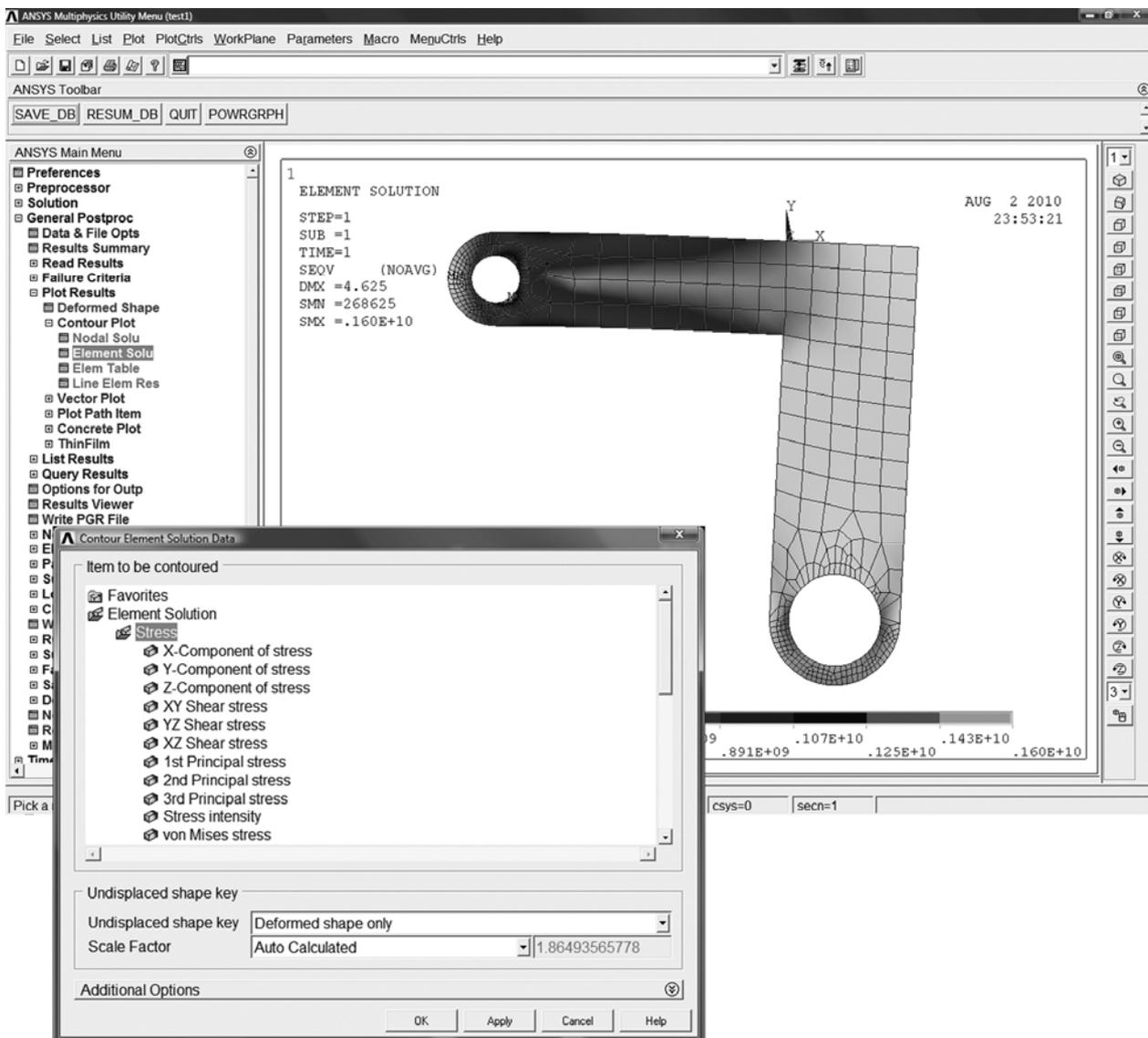


Рис. 13.7. Построение изолиний эквивалентных по Мизесу напряжений

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные структурные части программного комплекса Ansys?
2. Какие задачи ставятся перед препроцессором Ansys?
3. Какие функции выполняет постпроцессор Ansys?
4. В чем разница между h- и p-методами?

5. Какие элементы используются для плоской, пространственной задач?

6. Как влияет сгущение сетки в области концентраторов на точность получаемого решения задачи?

7. Как задаются граничные условия – перемещения, силы в Ansys?

8. Какие упрощения используются при описании модели материала?

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

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

В текстовой части приводятся исходные данные для проведения эксперимента, входные параметры испытания, изображения с исходной геометрией модели. Приводят изображения полученных конечно-элементных сеток, полученных в ходе расчета данных о напряженном и деформированном состоянии. Проводят анализ напряженно-деформированного состояния конструкции. В заключении анализируют полученные результаты, делают выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бернштейн, М. Л.** Механические свойства металлов. / Бернштейн М. Л., Займовский В.А. // М., «Металлургия», 1979., – 495 с.
2. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов. Изд. 3, в 2-х частях. / М., «Машиностроение», 1974., – 840 с.
3. **Греков, Ф. Ф.** Структурная кристаллография / Греков Ф. Ф., Рябенко Г. Б., Смирнов Ю. П. // Л.: изд-во ЛГПИ, 1988., – 774 с.
4. **Instron AVE Усовершенствованный видеоэкстензометр.** Справочное руководство – оборудование. RU-M26-14058 / 2004., – 209 с.
5. **Instron AVE Усовершенствованный видеоэкстензометр.** Справочное руководство – Указания по применению. RU-M26-14059 / 2004., – 48 с.
6. **Справочное руководство по вычислениям к программному обеспечению Bluehill Lite компании Instron.** M12-14366-RU. Редакция А (Help V 2.4) / 2006., – 144 с.
7. **Instron Bluehill Lite.** M12-14367-RU, Ред. А (Справочная система V 2.4) Руководство по программному обеспечению / 2003., – 234 с.
8. **Справочник по программе Instron Bluehill, версия 1.0** / 2006., – 177 с.
9. **Настольные двухколонные испытательные машины Instron модель 3380.** Справочное руководство M10-14135-RU. Издание А / 2002., – 105 с.
10. **Феодосьев, В. И.** Сопротивление материалов Учеб. для вузов. / М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.
11. **Афанасьев, А. М.** Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. Учебное пособие / Афанасьев А. М., Марьин В. А. // М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 288 с.
12. **Сопротивление усталости элементов конструкций** / Воробьев А. З., Олькин Б. И., Стебнев В. Н. и др. // М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
13. **Лабораторный практикум по механике материалов и конструкций** / Под ред. проф. А. К. Любимова. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2003. – 360 с.
14. **Мавлютов, Р. Р.** Концентрация напряжений в элементах конструкций / М.: Наука, 1996. – 240 с.
15. **Каплун, А. Б.** Ansys в руках инженера. Практическое руководство / Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. // М.: Едиторал УРСС, 2003. – 272 с.

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич
ЕРМОЛЕНКО Анатолий Николаевич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
«Сопротивление материалов»

Редактор Соколова О. А.

Подписано в печать 21.09.2010. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 8,0 . Уч. – изд. л. 7,9

Тираж 100 экз. Заказ № 92

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет

Центр оперативной полиграфии УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12