

62.1
1-
Первый институт высшего среднего специального образования РСФСР

Московское
имени Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по курсу

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Издание МВТУ

Москва

1966

✓
Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

620.1
Л-125

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по курсу

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

23076/961
Под редакцией
заслуженного деятеля науки
и техники д-ра техн. наук
проф. Пономарева С. Д.



Кафедра сопротивления материалов

Москва

1960

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие «Лабораторные работы по курсу «Сопротивление материалов» содержит сведения, необходимые студентам для самостоятельной подготовки к лабораторным занятиям по курсу «Сопротивление материалов».

Перед выполнением очередной лабораторной работы каждый студент должен предварительно изучить ее содержание и ознакомиться с устройством используемых при проведении работы испытательных машин и приборов.

В пособие включен только тот материал, который непосредственно связан с лабораторным практикумом, выполняемым студентами МВТУ.

В составлении пособия принимал участие весь коллектив кафедры. Первая часть пособия написана доцентами кафедры: В. Л. Бидерманом, С. В. Бояршиновым, С. М. Зинириным, К. К. Лихаревым и проф. С. Д. Пономаревым.

Описание испытательных машин и приборов, приведенное во второй части пособия, составлено доцентом С. В. Бояршиновым.

Окончательная обработка первой части выполнена доц. К. К. Лихаревым. Общее редактирование пособия проведено проф. С. Д. Пономаревым.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, теоретические основы курса «Сопротивление материалов» базируются на предположении, что рассчитываемые детали выполнены из материалов, представляющих собой непрерывную, однородную и изотропную среду.

Для того, чтобы поведение этой условной среды при нагружении соответствовало бы поведению какого-либо реального материала, она должна быть наделена некоторыми осредненными свойствами этого материала, установленными в результате испытаний соответствующих образцов в лаборатории.

Под образцами здесь понимаются тела простейшей формы и определенных размеров, конструктивно приспособленные для нагружения в лабораторных условиях.

Изучение поведения образцов реальных материалов при простейших видах нагружения (при растяжении, сжатии, кручении) и определение значений, характеризующих наступление предельных состояний материалов, составляют основную задачу механических испытаний.

Полученные в результате этих испытаний параметры называются механическими характеристиками материалов.

Исследованию механических свойств различных материалов посвящена первая группа лабораторных работ, описанных в первой части пособия (см. работы 1—5).

Помимо изучения свойств материалов, задачей этой группы работ является изучение устройства основных машин для механических испытаний (см. вторую часть пособия), приобретение навыков работы с измерительными приборами и ознакомление с соответствующими образцами и с техническими условиями типовых испытаний, предусмотренных ГОСТом.

К упомянутым испытаниям примыкают и так называемые «технологические пробы» (см. работы 17—19).

Технологическими пробами называются некоторые установленные стандартами испытания, при которых, по условно принятым критериям, сравнительным способом оцениваются

например, твердость поверхностных слоев материала деталей, пластичность проволоки и листового материала, способность материалов сопротивляться ударным нагрузкам и т.п.

Каждый инженер-механик должен быть хорошо знаком с технологическими проблемами, поскольку они широко используются в машиностроительной практике.

Известно, что все расчетные формулы, изучаемые в курсе «Сопротивление материалов», опираются на ряд гипотез, схематизирующих действительную геометрическую картину деформированного состояния нагруженных тел и действительные законы распределения внутренних сил в различных сечениях этих тел.

Вторая группа работ, описанных в первой части пособия (см. работы 5—14) посвящена экспериментальной проверке гипотез, положенных в основу ряда типовых расчетов, и изучению напряженного состояния, возникающих при различных нагрузках бруса.

При проведении соответствующих экспериментальных исследований студенты имеют возможность наблюдать деформированное состояние простейших элементов конструкций (призматических брусьев при простом и косом изгибе, кривого бруса и тонкостенных стержней при изгибе, пружины при их растяжении-сжатии и т. д.), а также знакомятся со способами измерения перемещений и напряжений в ряде простейших случаев.

Третья группа работ, описанных в первой части пособия (15 и 16 работы) имеет целью познакомить студентов с экспериментальными методами исследования напряженного состояния деталей машин.

Как известно, расчет деталей сложной формы не может быть точно выполнен методами сопротивления материалов и теории упругости. Часто расчет затруднен отсутствием достоверных сведений о законе распределения, способе приложения и величине рабочей нагрузки. В этих случаях в инженерной практике широко используются экспериментальные методы исследования деформированного и напряженного состояния моделей рассматриваемых конструкций или непосредственно самих конструкций в рабочих условиях.

В лабораторной работе 15 студенты знакомятся с основным современным методом исследования деформированного и напряженного состояния деталей — методом тензометрии с применением проволочных датчиков сопротивления.

Работа 16 посвящена оптическому методу изучения напряженного состояния плоских моделей.

Упомянутые методы экспериментальных исследований являются мощным средством изучения напряженного состояния элементов машиностроительных конструкций и широко используются на практике.

При выполнении лабораторных работ студенты должны вести необходимые записи в специальном журнале, который им выдается в лаборатории. В этом журнале должны быть записаны результаты всех измерений, проведена их обработка, сделаны необходимые эскизы, построены соответствующие графики.

По заполненным журналам студенты отчитываются перед преподавателем.

Каждый студент должен помнить, что работа в лаборатории по курсу «Сопротивление материалов» является одной из основных активных форм изучения основ этого важного для каждого инженера предмета.

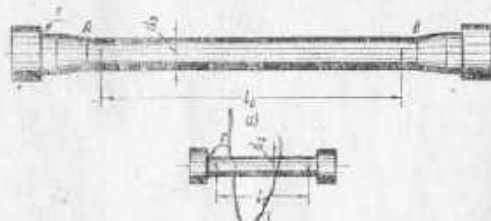
Часть I ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

РАБОТЫ 1, 2, 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ

Основными видами механических испытаний материалов являются статические испытания при односторонних растяжении и сжатии. В первую очередь, это объясняется относительной простотой осуществления этих видов нагружения. Во-вторых, при растяжении и сжатии имеет место однородность напряженного и деформированного состояния образца, что обеспечивает равноправное участие всех частей материала в процессе деформирования.

Наконец, при растяжении и сжатии очень просто по измеренным нагрузкам и удлинениям подсчитываются соответствующие напряжения и относительные деформации.

При механических испытаниях нагружению подвергают тела простейшего вида стандартной формы (фиг. 1), называемые образцами.



Фиг. 1. Цилиндрические образцы для испытаний на растяжение

Проведение самих испытаний и обработка результатов требуют единой методики. Только при этих условиях возможно получение в различных лабораториях сопоставимых механических характеристик для одного и того же материала.

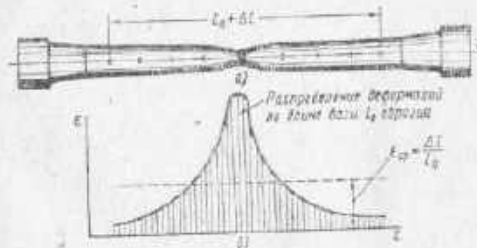
Основной задачей испытания на растяжение или сжатие является получение диаграммы, связывающей напряжение σ в поперечном сечении образца с его продольной деформацией ϵ на протяжении всего процесса деформирования от начала нагружения до разрушения образца. Эта диаграмма является наиболее полной характеристикой механических свойств материала.

Для проведения испытаний необходимы специальные испытательные машины, позволяющие производить нагружение образца и измерение величины приложенных к нему усилий.

Для точного измерения линейных деформаций образцов при их нагружении применяют специальные приборы, называемые тензометрами.

Описание конструкции машин и тензометров приведены во второй части пособия.

При больших пластических деформациях, превышающих некоторый определенный предел, их распределение по длине образца становится неравномерным. При растяжении, например, наибольшие удлинения возникают в частях образца, прилегающих к месту разрыва, где образуется местное утолщение образца, называемое шейкой. В этом можно убедиться, если нанести на образец разные деления (фиг. 2).



Фиг. 2. График распределения деформаций по длине образца пластичного материала при растяжении

Средняя наибольшая продольная деформация (фиг. 2) или так называемое удлинение образца при разрыве зависит от соотношения между длиной образца и его диаметром, поэтому для получения сравнимых результатов при испытаниях на растяжение используются узкоконические ГОСТом стандартные образцы (фиг. 1, а), у которых длина рабочего участка базы $l_0 = 10d_0$, где d_0 — диаметр образца. При возможности приготовления таких образцов (десятикратных) ис-

используются укороченные образцы, у которых $l_0 = 5d_0$ (пятикратные). На фиг. 1, б представлен широко используемый пятикратный образец простейшей конструкции, называемый «гагаринским»^{*)}.

В целях унификации размеров захватов испытательных машин и других приспособлений, используемых при испытаниях, обычно применяются нормализованные цилиндрические образцы на растяжение по ГОСТ 1497-42.

При исследовании свойств листового материала применяют плоские образцы (фиг. 3).



Фиг. 3. Плоский образец для испытаний на растяжение

При испытаниях металлов на сжатие используют короткие цилиндрические образцы (более подробно см. ниже).

Анализ результатов испытаний показывает, что некоторые материалы, при статическом нагружении, дают относительно большие пластические деформации, например, малоуглеродистая сталь, медь и т. п. Такие материалы принято называть пластичными. Они находят особенно широкое применение в практике машиностроения.

Образцы другой группы материалов разрушаются при очень малых пластических деформациях. К таким материалам относятся, например, серый литейный чугун, закаленные инструментальные стали и др. Материалы этой группы принято называть хрупкими.

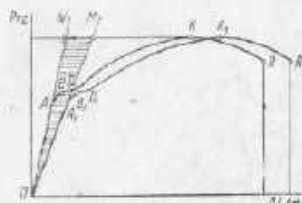
Следует, однако, иметь в виду, что разделение материалов на пластичные и хрупкие в значительной степени условно, поскольку, в зависимости от температуры, характера напряженного состояния и скорости нагружения, один и тот же материал может обладать в одних условиях свойствами пластичных, а в других — свойствами хрупких тел (например, при охлаждении сталь становится хрупкой, а при сильном нагреве — пластичной). Поэтому эти свойства материала следует связывать с тем его состоянием, в котором он находится в эксплуатации, и говорить о пластичном и хрупком состоянии материала в рабочих условиях.

^{*)} Гагарин А. Г. (1855—1921) — русский ученый, механик, конструктор испытательных машин.

а) Машинная диаграмма и диаграмма растяжения образца

Результаты испытания образца на растяжение позволяют построить зависимость между прилагаемым к образцу усилием P и удлинением образца Δl .

Если диаграмма, связывающая Δl и P , непосредственно вычерчивается диаграммным аппаратом испытательной машины, то она называется машинной диаграммой (линия $OA_1B_1D_1K_1R_1$ на фиг. 4).



Фиг. 4. Машинная диаграмма растяжения образца пластичного материала и ее исправление

Диаграммный аппарат обычно не только регистрирует удлинение цилиндрической части образца, но и отражает деформацию головок образца, а также элементов машины и приспособлений, применяемых для закрепления образца и нагружаемых в процессе испытаний. Поэтому машинная диаграмма содержит систематическую погрешность и нуждается в исправлении.

Исправленная машинная диаграмма называется диаграммой растяжения образца. Для построения последней на машинной диаграмме в соответствующем масштабе проводится (фиг. 4) прямая ON , определяемая уравнением $\Delta l = \frac{Pl}{EF}$

и характеризующая в пределах упругости нарастание удлинений Δl в зависимости от величины растягивающей силы P .

Необходимая для построения этой прямой величина модуля упругости E определяется предварительно экспериментально, с помощью тензометров (см. работу 4).

Горизонтальные отрезки, заключенные между прямой ON и OM , представляют погрешности машинной диаграмм.

мы, получающиеся за счет упругих деформаций головки образца, а также в связи с деформациями зажимов и деталей испытательной машины.

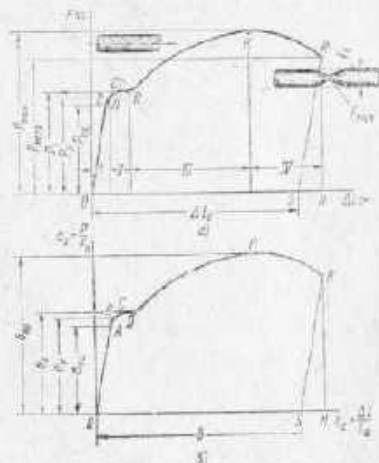
Чтобы внести исправления и построить диаграмму растяжения образца, достаточно сместить точки машинной диаграммы влево (фиг. 4) на величину соответствующих горизонтальных отрезков, заключенных между лучами OM и OM' .

Диаграмма растяжения образца представлена на фиг. 4 линией $OABDKR$.

б) Диаграмма растяжения материала

Для получения численно сравнимых между собой механических характеристик материалов диаграммы растяжения (фиг. 5, а) перестраиваются в других координатах, а именно по оси абсцисс откладываются относительные удлинения (продольные деформации) $\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0}$, а по оси ординат на-

пряжения в поперечном сечении образца $\sigma_x = \frac{P}{F_0}$, где F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца (фиг. 5 б).



Фиг. 5. а) Диаграмма растяжения образца малоуглеродистой стали б) Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Такая диаграмма, называемая диаграммой растяжения материала, обычно и принимается за характеристику механических свойств испытываемого материала. Заметим, что диаграмма растяжения материала и диаграмма растяжения образца (фиг. 5, а и б) по существу отличаются лишь масштабами по осям координат. Следует также иметь в виду, что диаграмма растяжения, особенно для пластичных материалов, является в некоторой степени условной. Так, при вычислениях напряжения σ_x растягивающее усилие P относится к начальной площади поперечного сечения F_0 , хотя в действительности в процессе растяжения размеры поперечного сечения, особенно в пластической стадии деформирования, уменьшаются. Кроме того, как уже отмечалось, удлинения распределяются по длине образца неравномерно. Это особенно заметно при испытании пластичных материалов в конечной стадии растяжения образца, когда в окрестности намечающегося места разрыва образуется утонение (шейка) (фиг. 2) и дальнейшее нарастание удлинений, в основном, идет за счет деформирования материала в области шейки. Несмотря на это, при вычислении линейной деформации ε_x абсолютное удлинение Δl принято относить к начальной длине базы l_0 (фиг. 1); получающаяся при этом средняя деформация $\varepsilon_p = \frac{\Delta l}{l_0}$ заметно отличается от действительной деформации в районе шейки (фиг. 2).

Условность диаграммы растяжения кружковых материалов значительно меньше, поскольку неравномерность уменьшения размеров поперечного сечения и продольных удлинений образца, в этом случае, почти отсутствует.

в) Испытание на растяжение образца малоуглеродистой стали

Рассмотрим диаграмму растяжения образца (фиг. 5, а) малоуглеродистой стали, которая является типичным представителем пластичных материалов.

Начальный участок OA характеристики соответствует упругим деформациям. На этой стадии напряжения зависят между удлинениями Δl и силой P является линейной.

В точке A , при нагрузке $P_{0.2}$, характеристика начинает заметно отклоняться от прямой, а когда сила достигает значения P_y (точка B), начинают образовываться пластические деформации. При силе P_0 (точка C) этот процесс становится особенно интенсивным, удлинение растет без заметного

увеличении нагрузки. Материал как бы тает. В связи с этим на характеристике появляется горизонтальный участок CD , называемый площадкой текучести.

Течение материала сопровождается рядом физических явлений, свидетельствующих, что для материала наступило некое критическое состояние. Если до начала текучести работа внешних сил переходит в потенциальную энергию упругодеформированного образца, то при образовании пластических деформаций работа внешних сил, в основном, переходит в тепло и поэтому температура образца заметно повышается. В зоне текучести у стальных образцов существенно изменяются электропроводность и магнитные свойства.

В связи с возникновением пластических деформаций полированная поверхность образца тускнеет.

Под микроскопом можно наблюдать, что на поверхности образца появляются линии, наклоненные к его оси (фиг. 5, а). Они представляют собой следы слоев скольжения части материала при образовании пластических деформаций. Эти линии называются линиями Чернова *).

Следует заметить, что пластические деформации образуются за счет сдвигов частиц металла, причем плоскости скольжения, по которым особенно интенсивно происходит сдвиг, приблизительно совпадают с плоскостями, в которых возникают наибольшие касательные напряжения.

Площадка текучести CD на диаграмме растяжения образца малоуглеродистой стали имеет ограниченную протяженность. Это указывает на то, что способность образца удлиняться при постоянной нагрузке быстро исчерпывается (точка D) и дальнейшее растяжение образца уже требует увеличения нагрузки. Наклонный участок (участок DK), следующий за площадкой текучести, называется участком упрочнения.

Заметим, что величина $\frac{dP}{d(\Delta l)}$ в конце участка упрочнения постепенно уменьшается. Это объясняется тем, что на образце зарождается местное утонение (шейка). При некоторой нагрузке (точка K) шейка уже сформировывается настолько отчетливо, что дальнейшее удлинение образца протекает, главным образом, за счет деформации в этой локальной области, при снижающихся по величине нагрузках (участок характеристики KR на фиг. 5, а).

Таким образом, нагрузка P_{max} является наибольшей нагрузкой, воспринимаемой образцом при его растяжении от начала нагружения до разрушения (точка R).

Рассмотрев диаграмму, заключаем, что процесс растяжения образца малоуглеродистой стали может быть разделен на ряд этапов (фиг. 5, а).

Вначале имеет место упругое деформирование (I этап), затем наступает пластическое деформирование, охватывающее всю рабочую часть образца (II этап). Третий этап связан с упрочнением материала и, наконец, последний (IV) этап характерен образованием местной пластической деформации в зоне шейки.

В пластической стадии деформирования образца (II, III и IV этапы) полное удлинение складывается из остаточного и упругого удлинений. Поэтому после разрыва длины частей образца несколько уменьшаются за счет исчезновения упругих удлинений. Если нагружать образец перед самым разрывом, то диаграмма замыкнется прямой RS , которая параллельна прямой OA на начальном участке диаграммы.

Отрезок HS (фиг. 5, а) представляет в масштабе сокращения длины образца за счет исчезновения упругого удлинения.

Относительное удлинение образца при разрыве δ , равное отношению абсолютного остаточного удлинения Δl_0 к начальной длине базы l_0 , выражаемое в процентах, служит показателем пластических свойств материала (фиг. 5, б).

$$\delta = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

Вследствие неравномерности распределения удлинений по длине образца этот показатель существенно зависит от длины рабочей части образца, принятой за базу.

Поэтому в индексе при δ всегда указывается длина базы. Так например, при десятикратном образце записывают $\delta_{10\%}$.

Практическое измерение остаточного удлинения Δl_0 производится следующим образом: на образце, предназначенном для испытания, по всей его длине, при помощи специальной делительной машины, наносят полусантиметровые деления; укрепляют образец в захватах испытательной машины и затем доводят его до разрушения. Выбрав расчетную длину $l_0 = 10d_0$ или $l_0 = 5d_0$, находят число делений, которое и шей содержитсся, затем складывают обе части разорванного образца по месту разрыва и измеряют длину участка, со-

* Чернов Д. К. (1899—1921) — русский ученый, металлург и металлвед.

держившего и делений, отсчитывая деления симметрично в обе стороны от места разрыва.

Относительное остаточное удлинение вычисляют в соответствии с указанной выше формулой

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

где l_1 — длина n делений после разрыва,

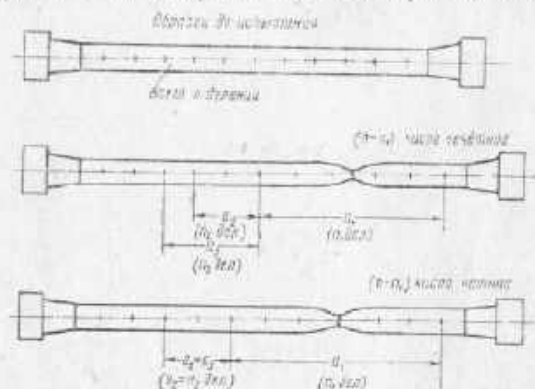
l_0 — длина тех же делений до разрыва.

Весьма существенно, чтобы расчетный участок был взят симметрично относительно места разрыва, т. е. чтобы в обе стороны было отсчитано одинаковое число делений (с точностью до одного деления).

Несоблюдение этого условия вызовет искажение результатов, так как вместо сильно деформированных участков, лежащих вблизи от шейки, в расчет войдут удаленные мало деформированные участки.

Если шейка образовалась не посередине образца, то длина l_1 базы после разрушения образца определится следующим образом.

Прежде всего измеряется длина a_1 (фиг. 6) возможно



Фиг. 6. Порядок измерений при приведении места разрыва образца пластичного материала к середине образца.

большого числа делений, которые можно взять приблизительно симметрично относительно места разрыва.

Положим, что отрезок a_1 содержит n_1 делений из общего числа n делений, соответствующих всей базе.

Оставшееся число делений $(n - n_1)$ следует разделить на две части n_2 и n_3 .

Если $(n - n_1)$ число четное, то $n_2 = n_3 = \frac{n - n_1}{2}$.

Если $(n - n_1)$ число нечетное, то

$$n_2 = n_3 + 1 = \frac{n - n_1 + 1}{2}.$$

Затем от конца отрезка a_1 в сторону длинной части разрушенного образца измеряются длины a_2 и a_3 , соответствующие n_2 и n_3 делениям. Общая длина n делений после разрыва вычисляется по формуле

$$l_1 = a_1 + a_2 + a_3.$$

Указанный прием основан на предположении, что если бы короткая часть разорванного образца имела длину большую, чем в действительности, то все ее элементы деформировались бы так же, как симметрично расположенные элементы длинной части образца.

Для оценки пластических свойств материала используются еще и другие характеристики, а именно, относительное сужение площади поперечного сечения в шейке ψ при разрыве, выраженное в процентах:

$$\psi = \frac{F_0 - F_{min}}{F_0} \cdot 100\%.$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца, F_{min} — площадь поперечного сечения в месте разрыва шейки (фиг. 5, а).

Площадь, ограниченная линией $OABCDERHO$, в масштабе выражает работу A кг.см, затраченную на деформирование образца. Эту работу обычно относят к начальному объему рабочей части образца $V = F_0 l_0$ см³.

Величина удельной работы $a = \frac{A}{V} \frac{\text{кг.см}}{\text{см}^3}$ является

важной механической характеристикой энергоемкости материала, играющей существенную роль для оценки прочности материала при динамической нагрузке, так как работоспо-

способность материала при ударном нагружении определяется способностью поглощать передаваемую ему энергию.

Рассмотрим теперь диаграмму растяжения малоуглеродистой стали в координатах ϵ , σ (диаграмму растяжения материала) (фиг. 5,б) и сопоставим ее с диаграммой образования (фиг. 5,а).

Напряжение, соответствующее точке А диаграммы, называется пределом пропорциональности и обозначается $\sigma_{пл}$.

$$\sigma_{пл} = \frac{P_{пл}}{F_0}$$

Пределом пропорциональности называется то наибольшее напряжение, при котором еще соблюдается закон Гука.

Напряжение, соответствующее точке В диаграммы, представляет собой предел упругости.

$$\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}$$

Пределом упругости называется то напряжение, при котором появляются первые пластические деформации.

В большинстве случаев практики, однако, различия между пределом упругости и пределом пропорциональности не делают, поскольку по величине они близки друг к другу.

При напряжениях, превышающих предел упругости, пластические деформации, возникающие ранее лишь в микрочастях отдельных слабых и неблагоприятно ориентированных частиц металла, охватывают уже весь объем рабочей части образца.

Напряжение, при котором пластические деформации начинают интенсивно нарастать без заметного увеличения нагрузки, называется пределом текучести материала.

Предел текучести обозначается через σ_t .

$$\sigma_t = \frac{P_t}{F_0}$$

На диаграмме растяжения малоуглеродистой стали этому напряжению соответствует горизонтальная «платошка текучести» (фиг. 5,б).

Принятые в инженерной практике и установленные ГОСТом приемы определения величин $\sigma_{пл}$, σ_y и σ_t по диаграмме растяжения (сжатия) материала изложены ниже.

Механические характеристики, определенные по нормам, установленным ГОСТом, носят название *технических* пределов пропорциональности, упругости и текучести.

Следующий за площадкой текучести участок упрочнения (участок DK) заканчивается точкой К, имеющей на диаграмме (фиг. 5,б) максимальную ординату. Напряжение, соответствующее этой точке, имеет важное значение для характеристики материала. Это напряжение называется пределом прочности, или временным сопротивлением $\sigma_{вп}$. Таким образом, *пределом прочности называется отношение наибольшей силы P_{max} , возникающей в образце при растяжении до его разрушения, к первоначальной площади F_0 испытанного сечения*

$$\sigma_{вп} = \frac{P_{max}}{F_0}$$

Последний участок KR диаграммы заканчивается точкой R, соответствующей разрыву образца при нагрузке $P_{разр}$.

Условное напряжение при разрыве (точка R), равное отношению $\frac{P_{разр}}{F_0}$ (фиг. 5,б), не может рассматриваться как

характеристика прочности пластического материала, так как оно зависит от степени деформации образца в зоне шейки.

Однако, если нагрузку $P_{разр}$ разделить на действительную площадь сечения шейки в месте разрыва $F_{мин}$, то полученная величина является важной характеристикой материала (фиг. 5,а).

Отношение разрушающей нагрузки $P_{разр}$ к площади поперечного сечения шейки при разрушении $F_{мин}$ называется *действительным пределом прочности*

$$\sigma_{разр} = \frac{P_{разр}}{F_{мин}}$$

У пластичных материалов действительный предел прочности значительно больше временного сопротивления.

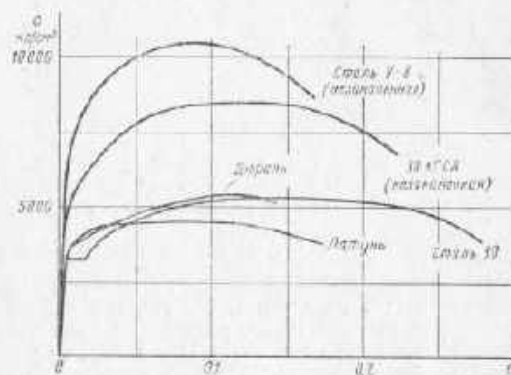
$$\sigma_{разр} > \sigma_{вп}$$

г) Особенности диаграмм растяжения пластичных материалов, отличных от малоуглеродистой стали

Все сказанное о диаграмме растяжения малоуглеродистой стали, вообще говоря, относится и к другим пластичным материалам. Однако диаграммы растяжения этих материалов



все же имеют некоторые отличительные особенности. В частности, у сталей с более высоким содержанием углерода, а также у цветных металлов (медь, алюминий) диаграмма растяжения не имеет площадки текучести, ее прямолинейная часть плавно переходит в криволинейную (фиг. 7). В этом случае предел текучести определяется как напряжение, при котором остаточная деформация достигает некоторой условно выбранной величины, называемой допуском (см. ниже).



Фиг. 7. Диаграммы растяжения различных пластичных материалов.

У сталей с большим содержанием углерода одновременно с повышением величины предела прочности снижается способность пластически деформироваться.

На фиг. 7 сопоставлены диаграммы растяжения различных пластичных материалов.

д) Диаграмма растяжения хрупких материалов

Целый ряд машиностроительных материалов (серый чугун, твердозакаленные стали и др.) разрушаются при статическом растяжении при очень малых относительных удлинениях, без образования шейки. Такие материалы принято называть хрупкими.

Определив наибольшую нагрузку P_{max} , которую выдерживает образец хрупкого материала при растяжении, можно на-

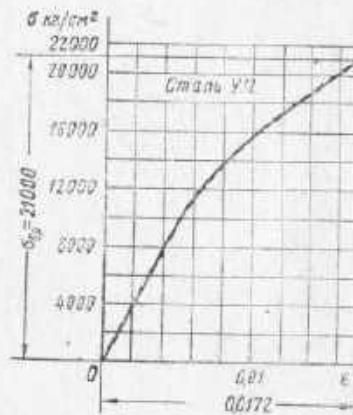
числить для него предел прочности (временное сопротивление):

$$\sigma_{up} = \frac{P_{max}}{F_0}$$

Поскольку в этом случае шейка на образце не образуется, то величина σ_{up} для хрупких материалов достаточно точно характеризует их прочность и таким образом $\sigma_{up} \approx \sigma_{разр}$.

Понимая предела прочности, являющегося основной механической характеристикой хрупкого материала, целесообразно также определить и технический предел текучести этих материалов по допуску, установленному ГОСТом.

Диаграмма растяжения образца хрупкого материала, а именно, твердозакаленной углеродистой стали У12, приведена на фиг. 8.



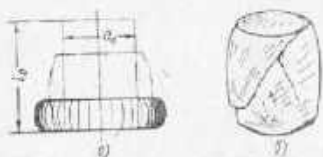
Фиг. 8. Диаграмма растяжения стали У12.

Следует обратить внимание, что площадь рассматриваемой диаграммы, представляющей в масштабе удельную энергию, затрачиваемую на разрушение материала, относительно мала. Эта незначительная энергоемкость хрупких материалов является их отличительной особенностью, которая препятствует их использованию при динамических нагрузках.

е) Испытание материалов на сжатие. Диаграмма сжатия

Вторым наиболее распространенным видом испытания является испытание на сжатие.

Во избежание искривления, образцы в этом случае приходится делать очень короткими. При диаметре d_0 их длина не должна превышать $l_0 = (1,0—1,5)d_0$ (фиг. 9, а).



Фиг. 9. а) Сжатый образец малоуглеродистой стали. б) Разрушившийся при сжатии образец чугуна.

Основная трудность получения механических характеристик металлов при сжатии заключается в том, что цилиндрическая форма образцов в процессе испытания искажается. Причиной этому являются силы трения, возникающие на торцах образца, которые препятствуют поперечному расширению. В результате образец становится бочкообразным. Силы трения сказываются и на характере разрушения образцов.

На фиг. 9 представлен вид сжатого образца малоуглеродистой стали (фиг. 9, а) и вид разрушившегося образца чугуна (фиг. 9, б).

В целях возможно более полного устранения сил трения целесообразно при испытании проложить по торцам образца пропитанную парафином фильтровальную бумагу. Смазка торцов маслом даст меньший эффект, поскольку масло практически почти полностью выдавливается.

Машинная диаграмма, записанная в координатах $\Delta l, P$ диаграммным аппаратом прессы, должна быть исправлена, так как на ней, помимо деформации образца, частично зафиксированы деформации опорных плит и силовых деталей прессы.

Неточности устраняются такими же приемами, как при обработке машинной диаграммы, полученной при растяжении.

Исправленный график в координатах $\Delta l, P$ называется диаграммой сжатия образца. Для малоуглеродистой стали эта диаграмма имеет вид, представленный на фиг. 10, а. В на-

чальной своей части диаграмма сжатия совпадает с диаграммой растяжения (фиг. 5, а).

При дальнейшем сжатии, в связи с расплюсыванием образца, сжимающая сила P быстро растет (см. участок DK диаграммы).



Фиг. 10. а) Диаграмма сжатия образца малоуглеродистой стали. б) Диаграмма сжатия малоуглеродистой стали.

Значительное искажение цилиндрической формы образца на этой стадии деформирования не позволяет использовать этот участок диаграммы для установления каких-либо механических характеристик малоуглеродистой стали. Поэтому, при дальнейшей обработке результатов испытаний, участок диаграммы DK обычно опускается.

При сжатии расплющивания на наружном контуре образца появляются радиальные надрывы.

На фиг. 10, б представлена диаграмма сжатия малоуглеродистой стали в координатах $\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l_0}$ и $\sigma_z = \frac{P}{F_0}$,

где F_0 и l_0 — площадь поперечного сечения и высота ненагруженного образца.

Точки А, В и С диаграммы соответствуют пределам пропорциональности, упругости и текучести при сжатии. Они определяются так же, как и при растяжении.

Начальный участок диаграммы сжатия OABCD, включающий площадку текучести, практически совпадает с аналогичным участком диаграммы растяжения.

Таким образом, модуль упругости первого рода, а также пределы пропорциональности, упругости и текучести у малоуглеродистой стали при растяжении и сжатии можно считать одинаковыми. В связи с тем, что при сжатии образец расплющивается, определить предел прочности малоуглеродистой стали при сжатии не представляется возможным.

Для других пластичных материалов, диаграмма сжатия которых не имеет явно выраженной площадки текучести (легированные стали, медь, алюминий и др.), все отмеченные выше особенности механических свойств в основном сохраняются.

Диаграмма сжатия образца хрупкого материала приведена на фиг. 11, а в координатах Δl , P.

Конечный участок KR графика соответствует процессу разрушения образца (трещинообразование, расслоение). Он не может быть использован для оценки каких-либо механических характеристик материала. Поэтому на диаграмме сжатия в координатах ε_z , σ_z представленной на фиг. 11, б, конечный участок KR опущен.

Основной характеристикой прочности хрупкого материала при сжатии, так же как и при растяжении, является предел прочности (пременное сопротивление).

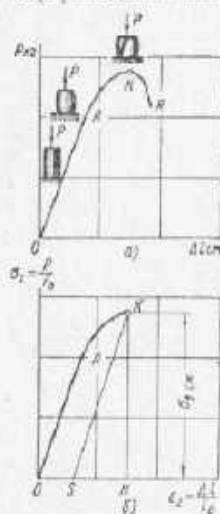
$$\sigma_{сж} = \frac{P_{max}}{F_0}$$

Заметим, что хрупкие материалы при сжатии значительно прочнее, чем при растяжении ($\sigma_{сж} > \sigma_{пр}$).

ж) Законы разгрузки и повторного нагружения

Закон разгрузки

Если при некотором напряжении σ_1 (точка М) (фиг. 12, а), превышающем предел пропорциональности ($\sigma_1 > \sigma_{пр}$), прекратить нагружение и начать постепенно разгружать образец, то зависимость между деформацией и напряжением изобразит-



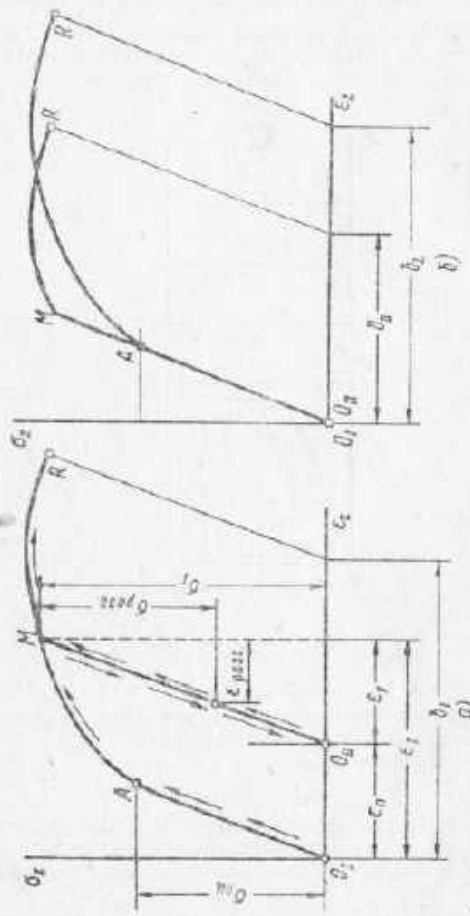
Фиг. 11. а) Диаграмма сжатия образца хрупкого материала.
б) Диаграмма сжатия хрупкого материала.

ся прямой линией MO_1 , параллельной прямой O_1A . Это указывает на то, что при разгрузке уменьшение напряжений $\sigma_{раз}$ и уменьшение продольной деформации $\varepsilon_{раз}$ связаны между собой законом Гука

$$\sigma_{раз} = E \varepsilon_{раз}$$

Это положение, впервые экспериментально установленное Герстнером ^{*)}, имеет первостепенное значение в современной теории пластичности и носит название «закона разгрузки».

^{*)} Gerstner F. J. (1736—1832) — австрийский ученый, математик и механик.



Фиг. 12. Диаграммы растяжения при нагрузке, разгрузке и вторичном нагружении

На основании сказанного можно заключить, что полная деформация ε_1 , соответствующая напряжению σ_1 (фиг. 12, а), складывается из двух частей: пластической ε_p (остаточной) и упругой ε_u , исчезающей при разгрузке. Последняя, даже далеко за пределами пропорциональности, связана с напряжением той же линейной зависимостью Гука, что и в пределах пропорциональности, т. е. $\varepsilon_u = \frac{\sigma_1}{E}$.

и поэтому полная деформация ε_1 равна

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_p + \varepsilon_u = \frac{\sigma_1}{E} + \varepsilon_{pu}$$

Следует заметить, что сформулированный выше закон разгрузки отражает реальный процесс лишь приблизительно.

Закон повторного нагружения

Если образец, предварительно нагруженный за предел пропорциональности, разгрузить, а затем нагрузить вторично, то в начальной стадии деформирования материал вновь будет следовать закону Гука, причем модуль упругости E сохранит свое прежнее значение. При этом, однако, предел пропорциональности материала, в связи с предварительным напряжением за предел пропорциональности, повышается до величины напряжения, достигнутого при первичном нагружении, т. е. $(\sigma_{pu})_2 = \sigma_1$. В этом и состоит так называемый «закон повторного нагружения».

Если начало координат диаграммы первичного нагружения совместить с точкой O_1 (концом первого цикла «нагружение—разгрузка») (фиг. 12, а), то линейный участок диаграммы первичного нагружения сойдется с линией разгрузки.

Если напряжения при вторичном нагружении превысят, новый, увеличенный предел пропорциональности, образец будет вновь пластически деформироваться, причем закон нарастания деформаций будет точно таким, как будто процесс первичного нагружения не прерывался разгрузкой.

Если, однако, совместить точку O_1 с началом координат O_2 диаграммы первичного нагружения (см. график $O_2 AMR$ на фиг. 12, б), то легко установить, что одновременно с повышением предела пропорциональности материал становится менее пластичным. В частности, относительное

удлинения разрыва сокращается на величину первичного пластического удлинения δ_1 так, что

$$\delta_{\text{из}} = \delta_1 - \delta_0$$

52

Изменение механических свойств металла в связи с пластическим деформированием называется механическим упрочнением (наклепом).

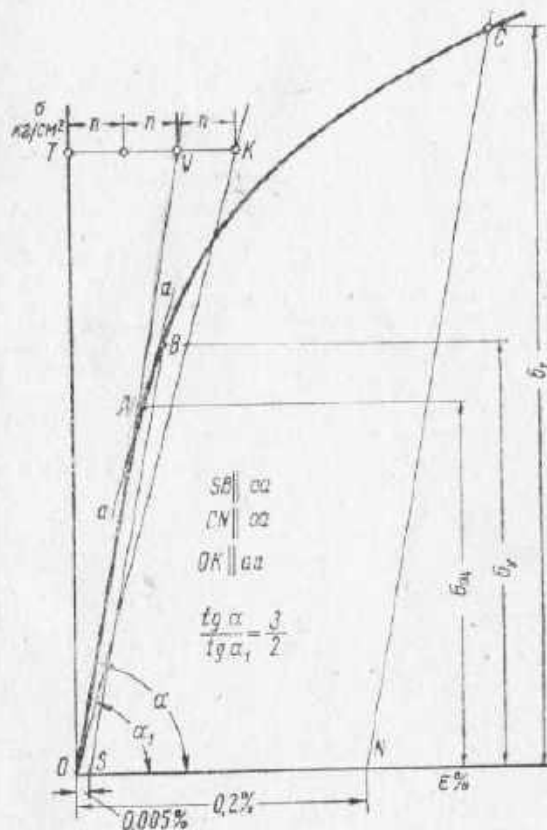
3) Условные (технические) механические характеристики и методика их определения по диаграмме

Часто бывает практически трудно точно отделить линейную часть диаграммы от криволинейной и строго установить, при каком напряжении материал перестает быть упругим. Необходимо также установить, какое напряжение следует считать соответствующим пределу текучести, если площадка текучести отсутствует. Сказанное заставляет уточнить приведенные выше определения пределов пропорциональности, упругости и текучести и установить единые инженерные приемы определения этих величин с тем, чтобы во всех лабораториях механических испытаний эти величины определялись одинаковым образом, по одним и тем же техническим условиям.

Получаемые таким образом механические характеристики материалов называются техническими; методика их определения оговаривается техническими условиями и общегосударственными стандартами. Являясь в значительной степени условными, технические характеристики должны соответствовать требованиям практики. Если запросы промышленности изменяются, то и методы определения технических пределов пропорциональности и текучести должны быть соответствующим образом пересмотрены.

Обычно за технический предел пропорциональности (точка А на фиг. 13) принимается такое напряжение, при котором тангенс угла наклона касательной aa_1 ($\text{tg } \alpha_1$) к кривой $\sigma = f(\epsilon)$ уменьшается в 1,5 раза по сравнению с тангенсом угла наклона ($\text{tg } \alpha$) начальной прямолинейной части диаграммы ($\frac{\text{tg } \alpha}{\text{tg } \alpha_1} = \frac{3}{2}$ см. фиг. 13).

На фиг. 13 указан графический способ построения луча OK , наклоненного к оси абсцисс под углом α_1 . Для его построения надо продолжать прямую Гука до пересечения с произвольной горизонталью в точке V. Затем следует разделить



Фиг. 13. Графические построения при определении технических пределов пропорциональности, упругости и текучести

Работа 1. Испытание на растяжение

В первой работе, на примерах испытаний на растяжение образцов малоуглеродистой стали ($0,01\text{ C} \pm 0,02\text{ C}$) и серого литейного чугуна, студенты знакомятся с физическими явлениями, происходящими в процессе растяжения при нагрузках, изменяющихся от нуля до значения, соответствующего разрушению образца.

По результатам испытания подсчитываются основные механические характеристики, определяющие пластические свойства и прочность испытываемых материалов.

Испытания проводятся на машине ИМ-12А или Р-5, описания которых приведены во второй части пособия. С описанием этих машин студенты должны подробно ознакомиться.

Работа 2. Получение диаграммы растяжения и ее обработка

Во второй работе производятся испытания на растяжение гитарных образцов малоуглеродистой ($0,01\text{ C} \pm 0,02\text{ C}$) и конструкционной стали с записью машинных диаграмм. Полученные диаграммы исправляются и на их основе строятся диаграммы растяжения испытанных материалов.

Затем по изложенной выше методике определяются основные механические характеристики материалов.

Испытания проводятся на машине ИМ-4А, описание которой приведено во второй части пособия.

Работа 3. Испытание на сжатие

В третьей работе студенты производят испытания образцов малоуглеродистой стали ($0,01 \pm 0,02\text{ C}$) и серого литейного чугуна на сжатие и определяют основные механические характеристики этих материалов при сжатии.

Испытания проводятся на машине УИМ-50 или ИМЧ-30, описания которых приведены во второй части пособия.

отрезок TU перпендикулярен и отложить от оси абсцисс отрезок TK , равный $1,5 \cdot TU$, как это указано на фиг. 13. Очевидно, что луч, соединяющий точку K с началом координат, наклонен к оси абсцисс под углом α , тангенс которого в 1,5 раза меньше, чем $\tan \alpha$. Затем следует провести касательную AK к кривой, параллельную лучу OK . Ордината полученной точки касания A и определяет значения предела пропорциональности.

За технический предел упругости (точка B на фиг. 13) принимается то напряжение, при котором остаточные деформации составляют определенную величину (допуск), установленную соответствующими нормами (например $0,005\%$).

Для определения предела упругости $\sigma_{0,005}$ на оси абсцисс диаграммы следует отложить принятый допуск и провести, в соответствии с законом разрушки, прямую SB , параллельную прямой Гукса OU , до пересечения с криволинейной частью графика в точке B (фиг. 13). При необходимости определения технического предела пропорциональности и упругости начальный участок диаграммы должен быть построен особенно тщательно. Продолжные деформации в этом случае желательно измерять с помощью точных тензометров. Заметим, что обычно значения $\sigma_{0,01}$ и σ_e отличаются друг от друга незначительно и их принимают совпадающими.

Технический предел текучести в настоящее время в соответствии с ГОСТ 1497—42 определяется по допуску $0,2\%$, т. е. он соответствует напряжению, при котором пластическая деформация равна $\epsilon_p = 0,002$. Соответственно технический предел текучести обозначается $\sigma_{0,2}$.

Для определения величины $\sigma_{0,2}$ (точка C на фиг. 13) следует на оси абсцисс диаграммы отложить отрезок, равный, в масштабе, $0,002$, и точно так же, как и при определении предела упругости, провести вспомогательную прямую, параллельную прямой Гукса, до пересечения с криволинейной частью графика в точке C (фиг. 13).

Технический предел текучести металлов, установленный по допуску $0,2\%$, приводится во всех машиностроительных справочниках. Однако следует отметить, что в настоящее время запросы практики не могут быть удовлетворены одним лишь заданием напряжения, характеризующим начало возникновения интенсивных пластических деформаций. Как для конструктора, так и технолога представляет интерес вся кривая, характеризующая закон нарастания пластических деформаций по мере нагружения.

РАБОТА 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПЕРВОГО РОДА И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА

Большинство формул в курсе «Сопротивление материалов» выведено в предположении, что зависимость между напряжениями и деформациями является линейной (т. е. соблюдается закон Гука).

В начальной стадии деформирования упругого тела (в пределах упругости) это положение хорошо подтверждается опытом.

Для одноосного напряженного состояния (растяжение — сжатие) закон Гука выражается формулой:

$$\sigma = E \varepsilon_{\text{прод}} \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{P}{F_0} = \frac{KF}{F_0}$ — нормальное напряжение в поперечном сечении бруса;

P и K — сила, растягивающая (сжимающая) брус;

F_0 , см^2 — начальная площадь поперечного сечения бруса;

$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta l}{l_0}$ — линейная деформация в продольном направлении;

Δl , см — удлинение образца;

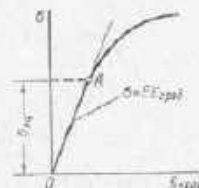
l_0 , см — начальная длина образца;

$E = \frac{KF}{\text{см}^2}$ — постоянный для каждого материала коэффициент пропорциональности, называемый модулем упругости первого рода.

Напряжение, до которого справедлива линейная зависимость между напряжениями и деформациями, носит название предела пропорциональности, который обозначается $\sigma_{\text{пл}}$ (см. работы 1—3).

На фиг. 14 закон Гука представлен графически прямой OA .

Наблюдения за брусом (образцом) в процессе испытания показывают, что при растяжении поперечные размеры бруса уменьшаются, а при сжатии увеличиваются.



Фиг. 14. Начальный участок диаграммы растяжения материала

В начальной стадии нагружения между продольными и поперечными деформациями существует линейная зависимость:

$$|\varepsilon_{\text{поп}}| = \mu |\varepsilon_{\text{прод}}|, \quad (2)$$

где μ — постоянная для каждого материала величина, называемая коэффициентом поперечной деформации или коэффициентом Пуассона.

Целью данной лабораторной работы является проверка справедливости линейной зависимости между нормальными напряжениями и продольными деформациями (закон Гука) и определение упругих постоянных исследуемого материала E и μ .

а) Порядок проведения работы по экспериментальной проверке закона Гука и определению модуля упругости

Для проверки справедливости закона Гука необходимо тщательно измерить продольные деформации образца при его растяжении в пределах упругости.

Для этого примерно посередине образца устанавливают диаметрально-противоположно два механических тензомера (например, типа МИЛ). Описание механических тензометров дано во второй части пособия.

Образец статически нагружается силой, которую увеличивают равными ступенями. При этом проводятся измерения

соответствующих удлинений. Использование двух тензотронов позволяет, посредством усреднения их показаний, исключить влияние изгиба образца. Изгиб может возникнуть в связи с нецентральной приложением осевых нагрузок.

Справедливость закона Гука подтверждается тем, что равным ступеням нагрузки соответствуют и равные приращения удлинений.

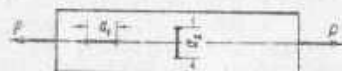
Для вычисления величины модуля упругости первого рода используется зависимость (1), на основании которой

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (3)$$

б) Порядок проведения работы по определению коэффициента Пуассона

Определение коэффициента Пуассона производится посредством испытания на растяжение образца, имеющего форму широкой полосы. Наличие у образца жестких головок обеспечивает равномерное распределение растягивающей силы по ширине образца.

Для определения продольной и поперечной деформаций на образце (фиг. 15) устанавливаются два тензотрометра, один в продольном, другой в поперечном направлениях.



Фиг. 15. Центральная часть плоского образца с установленным баз тензотронов, установленных для определения коэффициента поперечной деформации материала

Вначале образец нагружается некоторой начальной нагрузкой P_0 , затем конечной нагрузкой P . Величина последней выбирается так, чтобы напряжение не превышало предела пропорциональности.

Разности показаний тензотрометра, установленного в продольном направлении, $\Delta \epsilon_{\text{прод}}$ и тензотрометра, установленного в поперечном направлении, $\Delta \epsilon_{\text{перп}}$ позволяют определить приращения удлинений в продольном и поперечном направлениях (см. фиг. 15).

$$\Delta \epsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta a_1}{a_1} = \frac{\Delta a_2}{a_2}$$

$$\Delta \epsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta a_1}{a_1} = \frac{\Delta a_2}{a_2}$$

Коэффициент Пуассона $\mu = \frac{\epsilon_{\text{перп}}}{\epsilon_{\text{прод}}}$ при $a_1 = a_2$ равен

$$\mu = \frac{\Delta \epsilon_{\text{перп}}}{\Delta \epsilon_{\text{прод}}} = \frac{\Delta a_{\text{перп}}}{\Delta a_{\text{прод}}} \quad (4)$$

Опыты по определению коэффициента поперечной деформации μ повторяют по два—три раза, чтобы иметь возможность достоверно определить его значение.

РАБОТА 5 ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ

Испытание на кручение производится с целью определения механических характеристик материала при напряженном состоянии, называемом чистым сдвигом, возникающим при кручении.

Образцы для испытаний на кручение обычно имеют цилиндрическую форму с головками по концам (фиг. 16).



Фиг. 16. Образец для испытания на кручение

Переходы от головок к рабочему участку образца плавно скругляются для уменьшения влияния местных напряжений.

Длина l_0 рабочего участка образца, согласно ГОСТ 3165—47, должна быть равна $10d_0$, где d_0 — диаметр образца.

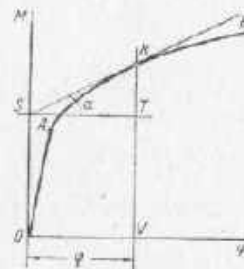
Форма головок определяется конструкцией зажимов машины.

Машины для испытаний на кручение (К-50 или «Эверис», описание которых см. во второй части пособия) снабжены устройствами для измерения моментов и для определения соответствующих углов закручивания.

Нагружение образца проводится статически. В начальной стадии испытания нагружение ведется ступенями. После очередного этапа нагружения производится запись момента и соответствующего ему углового перемещения.

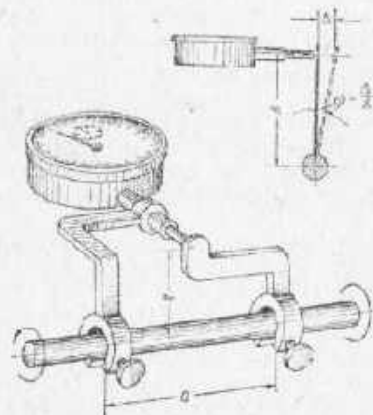
На основании полученных данных строится зависимость между моментами M и углами закручивания φ , называемая диаграммой кручения образца (линия OAB на фиг. 17).

Следует учесть, что имеющееся у машины приспособление для измерения углов закручивания, помимо деформаций образца, фиксирует также взаимный поворот зажимов, связанный с деформацией головок образца и деформацией неко-



Фиг. 17. Диаграмма кручения образца

торых деталей испытательной машины. Поэтому в начальной стадии нагружения, когда угол закручивания мал, для его измерения применяется специальный угломер (фиг. 18), позволяющий получить значение угла закручивания без искажений.



Фиг. 18. Угломер конструкции С. В. Бояршинова

На начальном участке диаграммы кручения (фиг. 17) в пределах упругости (участок ОА) зависимость между крутящим моментом и углом закручивания, как известно, имеет следующий вид:

$$\varphi = \frac{M_k l}{G J_p} \quad (1)$$

где l см — расстояние между теми сечениями бруса, относительно которых угол поворота φ которых определяется;

$G \frac{\pi l}{32}$ — модуль сдвига;

$J_p = \frac{\pi d_0^4}{32}$ — полярный момент инерции круглого поперечного сечения.

Если в формулу (1) подставить найденные из опыта значения приращений момента ΔM_k и угла закручивания $\Delta \varphi$, а также приравнять длину l базе угломера a (т. е. длине участка образца, на котором производится измерение угла закручивания), то из этой формулы нетрудно определить величину модуля сдвига G .

$$G = \frac{\Delta M_k a}{\Delta \varphi \cdot J_p} \quad (2)$$

а) Диаграмма кручения образца

Как уже отмечалось, на начальном участке диаграммы кручения образца (линией ОА на фиг. 17) угол закручивания пропорционален моменту [см. формулу (1)]. На этом этапе нагружения деформации образца являются упругими.

При дальнейшем нагружении пропорциональная зависимость между углом закручивания и крутящим моментом разрушается (линия АВ).

Перемещения, возникающие на этом этапе нагружения, являются в основном пластическими. Точка В диаграммы соответствует разрушению образца.

Практически диаграмма кручения образца строится следующим образом.

На начальном участке используются результаты измерений, полученные с помощью угломера. При этом, однако, углы закручивания, измеренные угломером на длине базы a , необходимо пропорционально увеличить в отношении $l_0 : a$, т. е. привести их к длине l_0 рабочего участка образца.

После начала текучести материала угломер снимается и выполняется механический привод машины. Образец постепенно нагружается и доводится до разрушения; при этом через каждые 20° поворота ведущего захвата делается отсчет момента. Поворот ведущего захвата представляет собой угол закручивания, соответствующий длине рабочего участка образца l_0 .

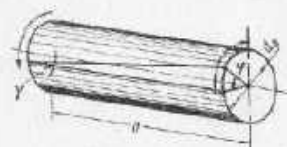
Ввиду того, что углы закручивания в пластической стадии деформирования образца весьма велики, систематическими погрешностями, внесенными испытательной машиной, на этом этапе нагружения можно пренебречь.

Указанные замеры производятся до достижения углом закручивания значения $150-200^\circ$. Далее замеряется число полных оборотов ведущей головки и значение момента, соответствующие разрушению образца.

б) Диаграмма сдвига

Диаграммой сдвига называется зависимость между касательными напряжениями τ возникающими в материале при чистом сдвиге, и соответствующими углами сдвига γ .

Для бруса круглого поперечного сечения, закручиваемого моментами, приложенными по его торцам, имеет место следующая геометрическая зависимость между углом закручивания φ и наибольшим углом сдвига $\gamma = \gamma_{\max}$ у поверхности бруса (фиг. 19):



Фиг. 19. Закручиваемый брус в деформированном состоянии

$$\gamma_{\max} = \varphi \frac{d_0}{2a} \quad (3)$$

где d_0 см — диаметр образца,

a см — длина образца, на которой измеряется угол закручивания φ .

Величина наибольшего касательного напряжения $\tau_{\max}$ возникающего в поперечных сечениях образца, за пределом упругости определяется в зависимости от M , по следующей формуле, установленной методами теории пластичности.

$$\tau_{\text{max}0} = \frac{4}{\pi d_0^3} \left[\mathfrak{I}_0 M_0 + \frac{dM_0}{d\varphi} \cdot \varphi \right]. \quad (4)$$

Поскольку при линейной зависимости между σ и M ,

$$\frac{dM_n}{d\varphi} = \frac{GJ_n}{l}, \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{M_n l}{GJ_n}, \quad \text{то} \quad \frac{dM_n}{d\varphi} \cdot \varphi = M_n.$$

Отсюда следует, что для области упругих деформаций формула (4) приводится, как и следовало ожидать, к виду:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_R}{W_D} \quad (5)$$

где W_0 , см³ — момент сопротивления кручению бруса круглого поперечного сечения.

Диаграмма сдвига строится по диаграмме кручения образца графическим способом следующим образом (см. фиг. 17).

В избранной точке K диаграммы кручения проводится касательная KS до пересечения с осью ординат в точке S . Затем из точки S проводится горизонтальная прямая ST . Очевидно, что отрезок

$$RT = SF \cdot \lg 2.$$

Этот срезок в масштабе, принятом для момента на диаграмме кручения, представляет величину $\frac{dM_{\tau}}{d\varphi}$.

Отрезок KV в том же масштабе представляет величину крутящего момента M_n .

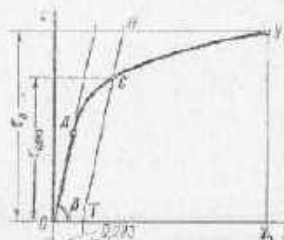
Таким образом, вычисление напряжений по формуле (4) не представляет труда:

Подсчитавшая ординаты диаграммы сдвига τ должна быть отложена на этой диаграмме совместно с абсциссой γ , определяемой формулой (3).

Указанное построение повторится для ряда точек диаграммы кручения и по полученным значениям координат строится диаграмма сдвига.

Последняя имеет вид, представленный на фиг. 20

Необходимо отметить, что формулы (3), (4) выведены в предположении, что $\lg \tau \approx \tau$, и поэтому они применимы только при небольших значениях удельных углов закручивания. При $d_0 = 10$ мм угол закручивания на единицу для



Фиг. 20. Диаграмма сдвига

на образца $\psi = \frac{\varphi}{I} < 10 \frac{\text{град.}}{\text{см}}$. Поэтому построение диаграммы сдвига производится только до достижения углом φ указанного выше значения ($\varphi = 150-200^\circ$).

ж) Основные характеристики материала при чистом сдвиге

В начальной своей части диаграмма сдвига линейна, т. е. при напряжениях, не превосходящих некоторого определенного предела, угол сдвига γ пропорционален величине соответствующего касательного напряжения τ .

Этот закон пропорциональности, называемый законом Гука, при сдвиге может быть записан в виде следующей формулы:

$$\tau = O_T. \quad (6)$$

Способ точного определения модуля сдвига (модуля упругости второго рода) был изложен выше (см. формулу 2).

На диаграмме сдвига модуль упругости второго ряда пропорционален $\lg \beta$, где β — угол наклона к оси абсцисс прямой OA , представленной на графике (фиг. 20) зависимость (6).

Наибольшее касательное напряжение $\tau_{\text{из}}$, до которого справедлива линейная зависимость между углами сдвига и напряжениями, называется пределом пропорциональности при сдвиге.

За технический предел пропорциональности при сдвиге обычно принимают такое касательное напряжение, при котором тангенс угла наклона касательной к кривой $\tau = f(\gamma)$ в 1,5 раза меньше по сравнению с $\operatorname{tg} \beta$. Графически предел пропорциональности при сдвиге определяется так же, как технический предел пропорциональности при растяжении (см. работы 1—3).

Пределом упругости при сдвиге τ_0 называется то наибольшее касательное напряжение, при котором деформации сдвига еще являются полностью упругими.

Как правило, при технических испытаниях величина предела упругости при сдвиге самостоятельно не определяется, так как предел упругости по величине близок к пределу пропорциональности.

Основной механической характеристикой материала при сдвиге является предел текучести материала τ_0 . При этом напряжении материал интенсивно пластически деформируется.

За технический предел текучести при сдвиге принимается то напряжение, при котором остаточный угол сдвига γ равен 0,003 рад.

Технический предел текучести обозначается $\tau_{0,003}$. Для его определения по оси абсцисс (по оси γ) диаграммы сдвига (фиг. 20) откладываем отрезок OT , равный в масштабе 0,003 рад. В соответствии с законом разгрузки, который при сдвиге соблюдается в такой же мере, как и при растяжении, из точки T проводим прямую TN , параллельную прямой OA . Ордината точки C пересечения прямой TN с кривой $\tau = f(\gamma)$ и представляет собой технический (условный) предел текучести $\tau_{0,003}$, полученный по допуску 0,003 рад.

У пластичных материалов $\tau_0 \approx (0,55—0,6) \sigma_0$.

Наибольшее касательное напряжение, соответствующее началу разрушения при чистом сдвиге, называется пределом прочности материала при сдвиге.

Предел прочности обозначается τ_b (точка B на фиг. 20). Это напряжение приблизительно может быть подсчитано по формуле (4), если в нее подставить значения $M_{\text{кр}}^{\text{разр}}$ и

$\left(\frac{dM_{\text{кр}}}{d\varphi} \right)_{\text{разр}}$, соответствующие наивысшей точке диаграммы кручения образца (точки B на фиг. 17),

$$\tau_b = \frac{4}{\pi d_0^3} \left[3 M_{\text{кр}}^{\text{разр}} + \left(\frac{dM_{\text{кр}}}{d\varphi} \right)_{\text{разр}} \right]. \quad (7)$$

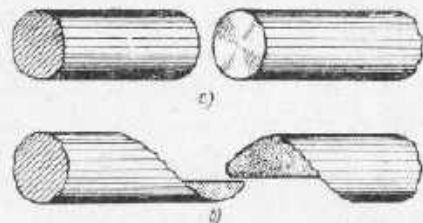
Для очень пластичного материала, деформирующегося при сдвиге без заметного упрочнения,

$$\frac{dM_{\text{кр}}}{d\varphi} \approx 0$$

$$\tau_b \approx \frac{12 M_{\text{кр}}^{\text{разр}}}{\pi d_0^3} \quad (8)$$

Необходимо обратить внимание на характер разрушения образцов при кручении.

Образцы пластичного материала разрушаются по поперечному сечению (фиг. 21, а), вследствие взаимного сдвига частиц материала.



Фиг. 21. Вид разрушенного образца в результате его закручивания: а) малоуглеродистая сталь, б) серый чугун

Хрупкие материалы разрушаются в результате взаимного отрыва частиц материала. Если подвергнуть испытанию на кручение образец хрупкого материала, например, чугуна, то разрушение произойдет по сложной винтовой поверхности (фиг. 21, б), в которой при кручении возникают максимальные растягивающие напряжения.

г) Порядок выполнения работ

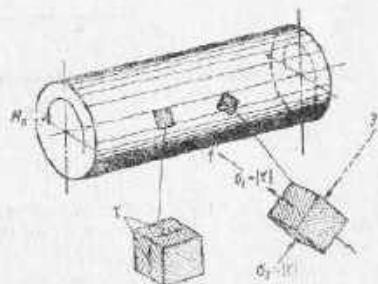
При выполнении работы испытанию подвергаются два образца — стали и чугуна.

По полученным результатам вычерчиваются диаграммы кручения образцов. Затем строятся диаграммы сдвига испытываемых материалов. По диаграмме сдвига определяются пределы текучести и пределы прочности материала при сдвиге. Для стали определяется модуль сдвига G . Диаграмма сдвига для стали строится в пределах от $\gamma = 0$ до значения γ , соответствующего углу $\varphi = 150—200^\circ$.

РАБОТА 6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ КРУЧЕНИИ

Как известно, при кручении бруса имеет место напряженное состояние, называемое чистым сдвигом. В поперечных и продольных сечениях возникают только касательные напряжения τ , а в площадках, наклоненных под углом в 45° к оси — только нормальные напряжения (главные напряжения) σ_1 и σ_2 , соответственно численно равные $\pm |\tau|$ и $-|\tau|$ (фиг. 22).



Фиг. 22. Элементы закручиваемого бруса

В пределах упругости крутящий момент связан с максимальным напряжением в поперечном сечении бруса зависимостью

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_k} \quad (1)$$

где $W_k, \text{ см}^3$ — момент сопротивления кручению, зависящий от формы и размеров поперечного сечения бруса.

Цель работы состоит в экспериментальном определении величины наибольших напряжений, возникающих при нагружении бруса, и сопоставления полученных значений с теоретическими.

Чтобы определить напряжения экспериментальным путем, необходимо измерить относительную линейную деформацию в направлении главных осей 1 или 3, наклоненных под углом $\pm 45^\circ$ к оси бруса (фиг. 22). Деформация в направлении главной оси 1 складывается из деформации за счет напряжения τ_1 , равной $\frac{\sigma_1}{E}$, и деформации за счет напряже-

ния τ_2 , равной $-\mu \frac{\sigma_1}{E}$, где E и μ — соответственно модуль упругости первого рода и коэффициент Пуассона материала.

Следовательно,

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \frac{\sigma_1}{E}$$

или, учитывая, что $\sigma_1 = +|\tau|$ и $\sigma_2 = -|\tau|$, получим

$$\varepsilon_1 = \frac{\tau(1+\mu)}{E} \quad (2)$$

Аналогично деформация в направлении главной оси 3

$$\varepsilon_3 = -\frac{\tau(1+\mu)}{E} \quad (3)$$

Таким образом, измерив величину деформаций ε_1 или ε_3 , легко определить значение искомого напряжения.

а) Описание экспериментальной установки

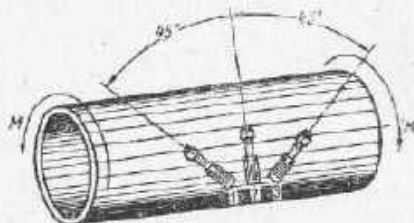
Работа выполняется на машине для испытаний на кручение завода «Олесп» с максимальным моментом $M = 2250 \text{ кг}\cdot\text{м}$.

Образец имеет форму тонкостенной трубы со средним диаметром $D_{ср} = 203 \text{ мм}$ и толщиной стенки $\delta = 2.7 \text{ мм}$.

Для измерения деформаций применяются электротензометры с проводящими тензодатчиками сопротивления. Датчики наклеены на образец, как показано на фиг. 23.

В процессе нагружения проволока, образующая датчик, получает такую же деформацию, как поверхность образца, к которой приклеен датчик. В результате возникает некоторое изменение омического сопротивления датчика, кото-

рое и регистрируется специальным измерительным прибором. Для удобства шкала прибора проградуирована непосредственно в единицах относительной деформации. Цена одного деления шкалы прибора равна $1 \cdot 10^{-5}$ единиц деформации.



Фиг. 23. Схема расстановки тензометров на изгибаемой тонкостенной трубе.

Активная длина проволоочной решетки датчика, называемая базой, в данном случае не имеет существенного значения и может быть равна 5, 10 или 20 мм. Омическое сопротивление датчика $R = 100-200 \text{ ом}$.

б) Порядок выполнения работы

При выполнении работы надо прежде всего ознакомиться с устройством испытательной машины, записать в журнал размеры образца и параметры тензометрической аппаратуры. Затем следует произвести нагружение трубы сначала моментом M_1 . Отсчеты по шкале тензометрического устройства заносятся в лабораторный журнал.

Датчики подключаются к прибору по очереди, и нагружение повторяется по два раза для каждого датчика.

Следует иметь в виду, что разности отсчетов для первого и третьего тензодатчиков должны быть противоположны по знаку и одинаковы по абсолютной величине. Разность отсчетов для второго тензометра должна быть равна нулю.

По найденным средним значениям разностей показаний тензометров 1 и 3 вычисляется общая средняя разность (среднее арифметическое абсолютных значений) и по формуле (2) определяется напряжение τ .

Теоретическое значение напряжения τ , соответствующее разности моментов $(M_1 - M_0)$, вычисляется по формуле (1),

при этом момент сопротивления кручению трубы принимается равным:

$$W_x = \frac{\pi D^3 t}{2} \quad (4)$$

В заключение работы следует сопоставить теоретические и опытные значения касательных напряжений.

РАБОТА 7

ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ

Целью настоящей работы является экспериментальное определение напряжений и прогибов стальной балки и сопоставление экспериментальных значений с теоретическими.

Нормальные напряжения в поперечном сечении бруса (балки) при изгибе теоретически определяются по формуле:

$$\sigma_x = \frac{M_x y}{J_x}, \quad (1)$$

где M_x кГ·см — изгибающий момент в рассматриваемом поперечном сечении балки;

J_x см⁴ — главный центральный момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной оси x ;

y см — ордината точки поперечного сечения, в которой определяется напряжение.

С другой стороны, по закону Гука нормальные напряжения σ_x в точках поперечного сечения балки связаны с соответствующими продольными деформациями ϵ_x формулой

$$\sigma_x = E \epsilon_x, \quad (2)$$

где E кГ/см² — модуль упругости первого рода для материала балки.

Определив экспериментальным путем относительную деформацию, по формуле (2) подсчитывают соответствующие напряжения.

Величина прогиба может быть определена или интегрированием дифференциального уравнения упругой линии или же с помощью интеграла Мора (по способу Верещагина).

а) Описание установки

Испытанию подвергается стальная балка прямоугольного поперечного сечения ($H = 12$ см, $B = 4$ см), лежащая на

двух опорах. Длина пролета $l = 100$ см. Балка нагружается сосредоточенной силой P в середине пролета (фиг. 24).

Для определения продольных деформаций балки установлены три механических тензомера 1, 2 и 3.

Тензомер 1 установлен на верхней грани балки в сечении, отстоящем от правой опоры на расстоянии $0,4l$.



Фиг. 24. Испытываемый брус (балка) с указанием положения точек 1, 2 и 3, в которых устанавливаются тензомеры

Тензомер 2 расположен на нейтральной линии в среднем сечении балки.

Тензомер 3 расположен в сечении, отстоящем от левой опоры на расстоянии, равном $0,4l$, а по высоте балки на расстоянии $\frac{H}{4}$ вверх от нейтральной линии.

Вследствие полной симметрии нагружения, в сечениях, где установлены тензомеры 1 и 3, изгибающие моменты одинаковы и равны

$$M_x = \frac{P}{2} \cdot 0,4l.$$

Определение линейного перемещения (прогиба) производится в сечении aa , отстоящем на расстоянии $\frac{l}{4}$ от одной из опор балки. Для этой цели здесь установлен стрелочный индикатор (описание см. во второй части пособия) с делениями $\beta = 0,01$ мм/дел.

б) Порядок выполнения работы

Перед проведением опыта следует занести в лабораторный журнал размеры балки, вычислить геометрические характеристики поперечного сечения, начертить эпюру изгибающих моментов с указанием величин, нужных для дальнейших расчетов, зарисовать схему расположения приборов

и записать координаты точек установки приборов и цену их делений.

Нагрузив балку начальной силой P_1 , следует записать показания всех тензосметров и индикатора.

Затем нагрузка увеличивается одинаковыми ступенями величиной ΔP .

При каждом значении нагрузки показания всех приборов заносятся в лабораторный журнал.

Показания тензосметра 2, установленного на нейтральной линии, теоретически должны оставаться неизменными.

Проведя измерения, вычисляют среднее значение показаний приборов. Если наблюдается непропорциональность изменения показаний какого-либо из приборов, то следует проверить установку соответствующего прибора и повторить опыт.

Значение напряжений и перемещений, подсчитанные теоретически и найденные по опытным данным, заносятся в журнал и сопоставляются друг с другом.

Для сечения, отстоящего от опоры на расстоянии 0,4l, следует построить теоретическую эпюру изменения нормальных напряжений σ_z по высоте сечения и нанести на нее результаты, полученные экспериментально.

РАБОТА 8

ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Изгиб называется косым, если плоскость изгибающего момента не совпадает ни с одной из главных плоскостей бруса.

Разложив изгибающий момент в исследуемом сечении по главным плоскостям бруса, косой изгиб сводит к двум простым изгибам.

Нормальные напряжения в поперечном сечении бруса при косом изгибе определяются по формуле:

$$\sigma_z = \frac{|M_x| y}{J_x} + \frac{|M_y| x}{J_y} \quad (1)$$

где M_x кГ·см и M_y кГ·см — изгибающие моменты в сечении относительно его главных центральных осей x и y ;

J_x см⁴; J_y см⁴ — главные центральные моменты инерции сечения;

x, y в см — координаты исследуемой точки в системе главных центральных осей.

Формула (1) написана в предположении, что в первой четверти поперечного сечения ($x > 0, y > 0$) в связи с изгибом как в главной плоскости xy , так и в главной плоскости zx возникают напряжения растяжения, поэтому обоим слагаемым в формуле (1) приписан знак плюс.

В брусках прямоугольного сечения наибольшие нормальные напряжения возникают в одной из угловых точек сечения и поэтому могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_x|}{W_x} + \frac{|M_y|}{W_y} \quad (2)$$

где W_x см³; W_y см³ — моменты сопротивления относительно главных центральных осей x и y соответственно

Для прямоугольного сечения

$$W_x = \frac{b h^3}{6},$$

$$W_y = \frac{b^3 h}{6}.$$

где b см — длина стороны прямоугольного сечения, параллельной оси x ;

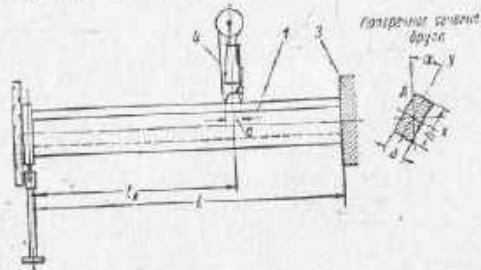
h см — длина стороны, параллельной оси y ;

При приложении нагрузки ΔP на свободном конце бруса, заделанного одним концом, составляющие изгибающего момента в сечении, отстоящем на расстоянии l_A от свободного конца, равны:

$$\Delta M_x = \Delta P \cdot l_A \cos \alpha;$$

$$\Delta M_y = \Delta P \cdot l_A \sin \alpha,$$

где α — угол, образуемый плоскостью изгибающего момента с осью y (фиг. 25).



Фиг. 25. Схема установки для испытания балки при кром изгибе

Полное перемещение δ свободного конца рассматриваемого бруса длиной l теоретически определяется по составляющим в направлении главных осей.

В направлении оси x

$$\delta_x = \frac{\Delta P l^3 \sin \alpha}{3 E I_y}.$$

В направлении оси y

$$\delta_y = \frac{\Delta P l^3 \cos \alpha}{3 E I_x}.$$

Эти формулы следует вывести самостоятельно при подготовке к занятиям.

Полное перемещение конца бруса δ по величине и по направлению определяется геометрическим сложением подсчитанных составляющих δ_x и δ_y .

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}.$$

Целью работы является определение опытным путем напряжений и перемещений у бруса, работающего в условиях кром изгиба и сравнение экспериментальных результатов с данными теоретического расчета.

а) Описание установки

Испытанию подвергается брус 1 прямоугольного поперечного сечения, заделанный одним концом и нагружаемый вертикальной силой (фиг. 25). Нагружение производится при помощи гири 2, устанавливаемых на подвеске, прикрепленной к свободному концу бруса (фиг. 26).

Устройство опоры 3 позволяет закреплять брус (фиг. 25) в любом положении. Угол α между главной плоскостью 25 бруса и вертикальной плоскостью отсчитывается по лимбу, прикрепленному к опоре 3.

Напряжения определяют в угловой точке поперечного сечения бруса на расстоянии l_A от его свободного конца, для чего в этом сечении на ребре бруса установлен рычажный тензометр 4 с базой $a = 20$ мм.

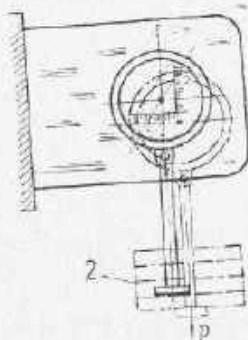
(Описание тензометра см. во второй части пособия).

Измерения перемещений свободного конца бруса в горизонтальном и вертикальном направлениях производятся при помощи шкал, прикрепленных к неподвижному кронштейну (фиг. 26).

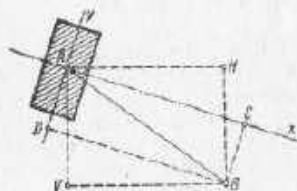
б) Порядок выполнения работы

Предварительная нагрузка на брус создается за счет веса подвески, на которую затем устанавливаются гири.

Записав отсчеты по шкалам измерительных приборов, а также показание тензометра в начальном состоянии, производят нагружение бруса равными ступенями по ΔP .



Фиг. 26. Общий вид установки для испытания балки при изгибе. Непоказанные шпатель для измерения вертикального и горизонтального перемещений.



Фиг. 27. К определению линейного перемещения свободного конца балки при изгибе.

При каждом значении нагрузки снимаются показания приборов.

Убедившись, что приращения показаний, соответствующие разным ступеням увеличения нагрузки, получаются приблизительно одинаковыми, записывают все показания в журнал и приступают к обработке результатов эксперимента.

Величина приращений напряжений определяется по формуле Гука:

$$\Delta\sigma = E \Delta\epsilon,$$

где E кГ/см² — модуль упругости первого рода материала балки,

$\Delta\epsilon$ — среднее приращение деформации.

Последнее определяется по формуле:

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta T \cdot \beta}{a},$$

где ΔT — средняя разность (приращение) отсчетов по тензометру, соответствующая приращению нагрузки ΔP ,

a — база тензометра,

β — цена одного деления тензометра.

Средние разности отсчетов по шкалам дают величины: перемещений свободного конца бруса по горизонтальному $\delta_{гор}$ и вертикальному $\delta_{вер}$ направлениям, соответствующие приращению нагрузки ΔP .

Полное перемещение конца бруса в этом случае равно:

$$\delta = \sqrt{\delta_{гор}^2 + \delta_{вер}^2}.$$

Работа выполняется при одном из трех значений угла α ($\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 45^\circ$; $\alpha = 60^\circ$).

Результаты теоретических расчетов и данные опытов записываются в таблицы (см. Лабораторный журнал) и сопоставляются между собой.

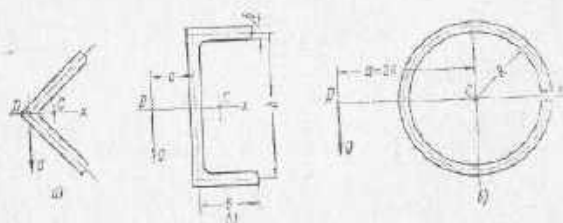
На фиг. 27 показаны перемещения конца бруса: AB — полное перемещение δ свободного конца бруса; AC и AD — составляющие δ_x и δ_y полного перемещения по осям x и y ; AH и AV — горизонтальная и вертикальная составляющие полного перемещения $\delta_{гор}$ и $\delta_{вер}$.

РАБОТА 9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ИЗГИБА

Центром изгиба называется такая точка в плоскости поперечного сечения бруса, через которую должна проходить поперечная сила, чтобы брус только изгибался и не подвергался бы одновременно кручению.

Целью настоящей лабораторной работы является опытное определение положения центра изгиба для тонкостенных стержней трех различных профилей (для равнобокого уголка, для корытного профиля или швеллера и для незамкнутого кольца) и сопоставление опытных данных с результатами расчета.

На фиг. 28 показано положение центра изгиба (точка D), исследуемых тонкостенных профилей^{*}.



Фиг. 28. Положение центра изгиба (точка D): а) равнобокого уголка; б) корытного профиля; в) незамкнутого кольца

Центр изгиба D равнобокого уголка (фиг. 28, а) находится в угловой точке средней линии контура.

У корытного профиля, размеры (h , b , δ), которого указаны на фиг. 28, б, центр изгиба D расположен на оси симметрии профиля и отстоит от средней линии вертикальной стенки на расстоянии a .

^{*} Теоретическое рассмотрение вопроса см. «Решения на прочность и малопрострелки» под ред. проф. Поповарева С. Д., том I. Машгиз, 1955 г., стр. 395—401.

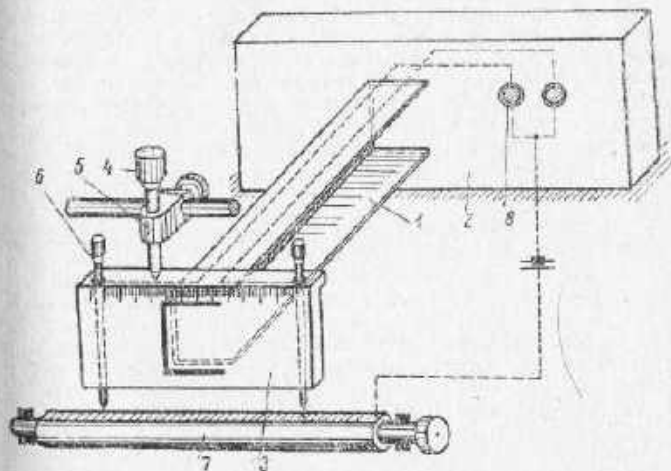
$$a = \frac{J_x b^2 \delta}{4 J_x}$$

где J_x — момент инерции сечения относительно оси x .

Центр изгиба D профиля в виде незамкнутого тонкостенного кольца (фиг. 28, в) расположен на оси симметрии x профиля и отстоит от центра C кольца на расстоянии $a = 2R$, где R — радиус средней линии профиля.

а) Описание установки

Работа выполняется на специальной установке (фиг. 29). Исследуемый брус 1 жестко закреплен одним концом в



Фиг. 29. Схема установки для экспериментального определения положения центра изгиба

массивной неподвижной опоре 2. На другом свободном конце брус может быть нагружен с помощью винта 4.

Винт 4 смонтирован на ползунке, благодаря чему его можно перемещать по горизонтали, перпендикулярно оси деформируемого бруса. Если нагрузочный винт установить точно против центра изгиба, то при надвигании им на колодку 3, прикрепленную к концу бруса, брус будет только изгибаться без закручивания. В этом случае горизонтальное

ребро колодки 3 получит лишь поступательное перемещение, соответствующее прогибу бруса. Если же винт 4 будет смещен в сторону от центра изгиба, то брус помимо изгиба будет также и закручиваться, вследствие чего колодка 3, кроме поступательного перемещения, еще и повернется. Чтобы иметь возможность судить о характере перемещения горизонтального ребра колодки, на ней установлены два контактных винта 6. До нагружения контактные винты 6 регулируются таким образом, чтобы зазоры между их остриями и контактной поверхностью валика 7 были одинаковыми.

Если при надавливании на колодку 3 нагрузочным винтом 4 оба контакта замыкаются одновременно, о чем сигнализируют контрольные лампы 8, то нагрузочный винт расположен точно против центра изгиба. Если загорается лишь одна контрольная лампа, то это означает, что нагрузочный винт смещен от центра изгиба в соответствующую сторону; в этом случае нагрузочный винт следует передвинуть в сторону незагоревшейся лампы и повторить эксперимент. Задача состоит в том, чтобы найти такое положение винта, при котором обе лампочки загорятся одновременно.

6) Порядок проведения работы

Прежде всего следует подготовить установку для проведения опыта. Отсверлив нагрузочный винт 4 и разгрузив, таким образом, испытуемый брус, устанавливают одинаковые зазоры у обоих контактов. Для этого поворачивают валик 7 цилиндрической стороной вверх и подводят контактные винты до соприкосновения с валиком (при этом обе сигнальные лампы загорятся). Затем валик 7 поворачивают так, чтобы имеющаяся на нем лыска находилась сверху. При этом между валиком и винтами образуются одинаковые зазоры и сигнальные лампы гаснут. После этого приступают к проведению опыта.

Установив ползушку 5 с нагрузочным винтом 4 вблизи предполагаемого положения центра изгиба, закрепляют ее в этом положении. Затем, завертывая нагрузочный винт, надавливают им на колодку, прикрепленную к торцу бруса. Если при этом обе контрольные лампы загорятся одновременно, то это значит, что винт 4 установлен правильно, т. е. точно против центра изгиба. В противном случае, ползушку с винтом надо сдвинуть в сторону незагоревшейся лампочки и повторить опыт.

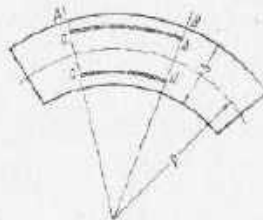
Положение центра изгиба, установленное экспериментально, следует сравнить с теоретическим.

РАБОТА 10

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОСКОМ БРУСЕ БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ

Плоским кривым брусом называется брус, ось которого представляет собой плоскую кривую (фиг. 30).

У кривого бруса, в отличие от прямого, длины продольных слоев (например, слоев *ab* и *cd*) между смежными поперечными сечениями *A* и *B* различны (фиг. 30).



Фиг. 30. Кривой брус с указанием его продольных слоев *ab* и *cd* между сечениями *A* и *B*.

Однако практически это следует принимать во внимание лишь в том случае, когда отношение радиуса кривизны ρ оси бруса к высоте его поперечного сечения h не превышает пяти, т. е. $\rho/h \leq 5$.

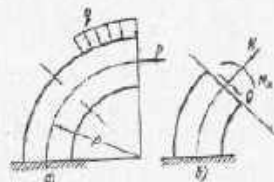
Такой кривой брус принято называть кривым брусом большой кривизны в отличие от кривого бруса малой кривизны, у которого $\rho/h > 10$.

При нагружении плоского кривого бруса в плоскости его кривизны (фиг. 31, а), в поперечных сечениях в общем случае возникают три силовых фактора (фиг. 31, б):

а) изгибающий момент M_x .

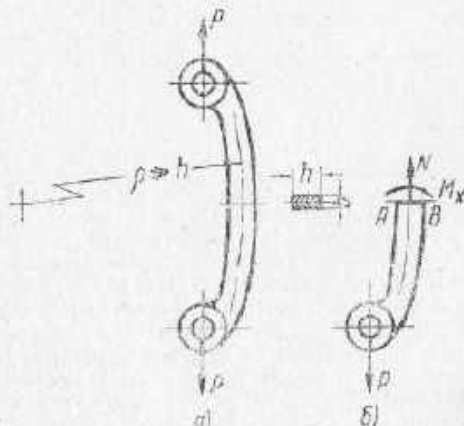
Момент считается положительным, если при изгибе кривизна оси бруса увеличивается;

- б) нормальная сила N .
 Нормальная сила считается положительной, если брус растягивается;
 в) поперечная сила Q .



Фиг. 31. а) Нагруженный кривой брус. б) Внутренние силовые факторы в поперечном сечении кривого бруса

Для кривого бруса малой кривизны (фиг. 32, а) нормальные и касательные напряжения в его поперечных сечениях



Фиг. 32. Кривой брус малой кривизны

практически могут быть вычислены по внутренним силовым факторам (фиг. 32, б) с помощью тех же формул, что и для прямого бруса.

В частности, нормальные напряжения равны:

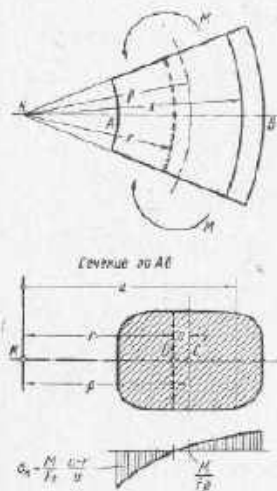
$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M_{xy}}{J_x} \quad (1)$$

Для расчета кривого бруса большой кривизны необходимо воспользоваться специальными формулами^{*}), учитывающими различие длин продольных слоев бруса.

В этом случае

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M(a-r)}{F e u} \quad (2)$$

где $F \text{ см}^2$ — площадь поперечного сечения бруса,
 $r \text{ см}$ — радиус кривизны нейтрального слоя при чистом изгибе бруса ($N=0$) (фиг. 33).



Фиг. 33. Элемент кривого бруса большой кривизны при чистом изгибе

$e = (r - r_0) \text{ см}$ — величина смещения нейтрального слоя от центра тяжести сечения по направлению к центру кривизны при чистом изгибе,

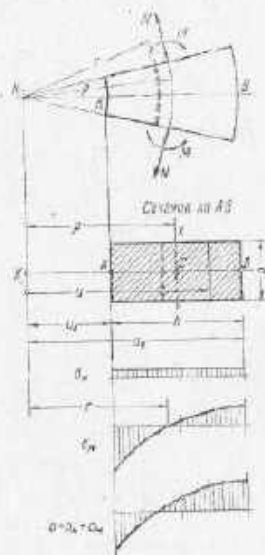
^{*}) Вывод формул (2) и (3) см., например, в курсе «Сопротивление материалов» М. М. Филиппова-Бородини и др., ч. I, ГИИЛ, 1955.

ρ — радиус кривизны оси бруса,
и σ_M — текущий радиус, определяющий положение исследуемой точки поперечного сечения бруса, в которой вычисляется напряжение (фиг. 33).

Для бруса прямоугольного поперечного сечения

$$\sigma = \frac{h}{\ln \frac{\sigma_M}{\sigma_A}} \quad (3)$$

где σ_B и σ_A — соответственно наружный и внутренний радиусы бруса (фиг. 34),



Фиг. 34. Элемент кривого бруса прямоугольного сечения при чистом изгибе и растяжении

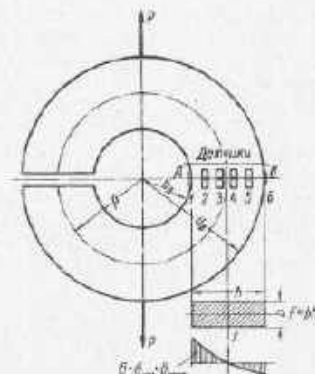
h — высота прямоугольного сечения (размер сечения в плоскости кривизны бруса).

Первое слагаемое в формуле (2) выражает напряжение σ_M , возникающее в связи с растяжением бруса, второе слагаемое представляет напряжение σ_K , при чистом изгибе бруса.

Эпюры изменения напряжений σ_K , σ_M и $\sigma = \sigma_K + \sigma_M$ по радиусу представлены на фиг. 34.

Определение напряжений в кривом брус большой кривизны прямоугольного поперечного сечения

Исследуемый брус прямоугольного поперечного сечения нагружается в плоскости кривизны по схеме, представленной на фиг. 35.



Фиг. 35. Схема растяжки пружинных датчиков на нагружаемом кривом брус

Напряжение определяется в сечении AB, в котором при нагружении бруса силой P возникнут следующие силовые факторы:

$$N = +P;$$

$$M = -P \rho;$$

$$Q = 0,$$

где ρ — радиус кривизны геометрической оси бруса.

Брус нагружается сначала силой P_0 , затем силой $P_1 = P_0 + \Delta P$.

Приращения деформаций $\Delta\epsilon$ в окружном направлении, соответствующие приращению нагрузки ΔP , для ряда точек сечения (фиг. 35) измеряются электротензометрической установкой с помощью проводочных датчиков. (Описание датчиков и электротензометрической установки дано в конце второй части пособия). Датчики подключаются к измерительной установке по очереди и для каждого датчика повторяется весь цикл нагружения. Опыты проводятся несколько раз.

Результаты измерений заносятся в журнал и по ним для каждой исследуемой точки сечения в отдельности вычисляется среднее значение приращения деформации $\Delta\epsilon_{cp}$, соответствующее приращению нагрузки ΔP .

Поскольку напряжения не превосходят предела пропорциональности, а напряженное состояние кривого бруса, в первом приближении, считается одноосным, то приращение напряжения, соответствующее приращению нагрузки ΔP , равно:

$$\Delta\sigma = E \Delta\epsilon_{cp}, \quad (4)$$

где E кг/см^2 — модуль упругости материала.

Подсчитав по формуле (4) приращения напряжений для всех рассматриваемых точек сечения АВ, следует построить эпюру распределения напряжений по сечению.

Напряжения, полученные опытным путем, должны быть сопоставлены с напряжениями, подсчитанными теоретически по формуле:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{F} + \frac{(-\Delta P \rho)(u - r)}{F e u}, \quad (5)$$

Поскольку в данном случае сила, нагружающая брус, проходит через его центр кривизны, нейтральная линия в сечении АВ при совместном растяжении и изгибе теоретически должна проходить через центр тяжести сечения.

Действительно, по формуле (5) при $u = \rho$ напряжение равно нулю (фиг. 35).

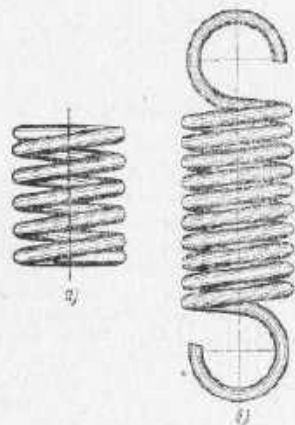
РАБОТА II

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВИНТОВОЙ ПРУЖИНЫ РАСТЯЖЕНИЯ—СЖАТИЯ

Цилиндрическая винтовая пружина представляет собой пространственный брус, осью которого является винтовая линия.

Обычно пружина навивается из проволоки или прутка круглого поперечного сечения.

У пружин сжатия между рабочими витками имеются значительные зазоры, а концевые витки поджаты и сошлифованы для образования опорной плоскости (фиг. 36, а). У пружин



Фиг. 31 а) Пружина сжатия.

б) Пружина растяжения

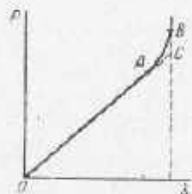
жин растяжения рабочие витки, как правило, плотно прилегают друг к другу, а концевые витки отогнуты и образуют зацепы, необходимые для приложения нагрузки (фиг. 36, б).

Винтовые цилиндрические пружины очень широко применяются в машинах и приборах. Это объясняется их компактной и удобной для изготовления и монтажа формой.

Основным рабочим параметром пружины является ее жесткость, т. е. величина нагрузки, при которой взаимное перемещение концов пружины равно одному сантиметру.

Зависимость между ходом λ и нагрузкой P , представленная графиком, называется характеристикой пружины.

Пружину сжатия изготавливают так, чтобы вплоть до посадки, т. е. до соприкосновения витков друг с другом, в пружине возникали только упругие деформации. Типичная характеристика пружины сжатия показана на фиг. 37. В основной



Фиг. 37. Характеристика пружины сжатия

своей части OA характеристика прямолинейна, лишь конечный ее участок AB , соответствующий процессу посадки витков, несколько искривлен. Если бы пружина была изготовлена идеально точно, то все витки пружины при посадке смыкались бы одновременно и характеристика пружины имела бы вид, показанный на фиг. 37 ломаной линией $OACB$.

В обычных условиях эксплуатации рабочий участок характеристики не должен выходить за пределы линейного участка, где характеристика пружины может быть выражена формулой:

$$\lambda = \frac{P}{Z} \quad (1)$$

Здесь $Z = \frac{kI}{cm}$ — жесткость пружины. Величина жесткости зависит от размеров и материала пружины.

Для пружин с малым углом подъема винтовой линии, навятых из проволоки или прутка круглого поперечного сечения, связь между взаимным перемещением концов пружины,

называемым ходом λ и силой P , устанавливается следующим выражением:

$$\lambda = \frac{8PD^3i}{Gd^4} \quad (2)$$

где D см — средний диаметр пружины,

d см — диаметр прутка,

i — число рабочих витков,

G кг/см² — модуль сдвига материала пружины.

Для пружинной стали $G \approx 8 \cdot 10^8$ кг/см².

Из выражений (1) и (2) следует, что в этом случае жесткость Z будет равна:

$$Z = \frac{Gd^4}{8D^3i} \quad (3)$$

Задачей настоящей работы является экспериментальное определение жесткости Z и сопоставление ее с теоретическим значением, вычисленным по формуле (3).

Порядок проведения работы

Для выполнения работы следует прежде всего ознакомиться с конструкцией пружины, начертить ее эскиз и указать на нем размеры, необходимые для определения жесткости Z пружины по формуле (3).

Следует также ознакомиться с устройством машины или установки, на которой будет сниматься характеристика пружины, и с приспособлением для измерения хода.

При экспериментальном определении жесткости пружины нагрузка прикладывается разными ступенями по ΔP . Величина ΔP берется в 5–8 раз меньше максимальной нагрузки $P_{\max}$. Значение нагрузки P и длины H пружины при этой нагрузке, а также приращение $\Delta \lambda$ хода следует занести в таблицу (см. Лабораторный журнал).

По полученным результатам вычисляется средне-арифметическое значение приращения хода пружины $\Delta \lambda_{cp}$, соответствующее увеличению нагрузки ΔP .

Затем вычисляется жесткость пружины

$$Z = \frac{\Delta P}{\Delta \lambda_{cp}}$$

Полученный результат надо сравнить с расчетным, найденным по формуле (3).

Необходимо также вычислить наибольшее касательное напряжение $\tau_{\max}$, возникающее в поперечных сечениях витков пружины, при наибольшей нагрузке $P_{\max}$.

$$\tau_{\max} = k \frac{8 P_{\max} D}{\pi d^3}. \quad (4)$$

Коэффициент k учитывает кривизну витка и наличие дополнительных касательных напряжений за счет поперечной силы $Q = P$.

$$k = \frac{4c + 2}{4c - 3},$$

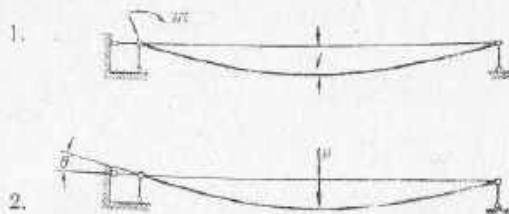
где $c = \frac{D}{d}$ — индекс пружины.

РАБОТА 12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ РАБОТ

Рассматриваются два состояния упругой системы (первое и второе) при различных нагрузках.

Согласно теореме о взаимности работ, работа нагрузок первого состояния на соответствующих им перемещениях второго состояния равна работе нагрузок второго состояния на соответствующих им перемещениях первого состояния.



Фиг. 38. Первое и второе состояние балки, иллюстрирующие принцип взаимности работ

Так например, рассматривая нагружение балки моментом M , а затем силой P , можем на основании теоремы о взаимности работ написать (фиг. 38):

$$M[\delta_{12} \cdot P] = P[\delta_{21} \cdot M],$$

где $\delta_{12} \cdot P = \theta$ — угловое перемещение от силы P в месте приложения момента M в направлении момента M ;

$\delta_{21} \cdot M = f$ — линейное перемещение от момента M в месте приложения силы P в направлении этой силы.

Теорема о взаимности работ является одной из основных теорем строительной механики и широко используется при рассмотрении статически неопределимых систем, а также при определении перемещений.

Свойство взаимности перемещений является следствием теоремы о взаимности работ. Так, если в рассмотренном примере положить $M=1$ кж.м и $P=1$ кг, то

$$\delta_{12} = \delta_{21},$$

Цель лабораторной работы заключается в том, чтобы убедиться в правильности свойства взаимности перемещений и использовать его для построения упругой линии балки, лежащей на двух опорах.

Схема установки для проведения работы приведена на фиг. 39; конструкция установки допускает приложение нагрузки и измерение прогиба в любой точке про-



Фиг. 39. Схема установки для экспериментальной проверки свойства взаимности перемещений.

лета балки, а также приложение горизонтальной нагрузки и измерение горизонтального перемещения на свободном конце стойки в точке K (фиг. 39). Прогибы измеряются с помощью микрометрических винтов с электрическим контактным устройством. Общий вид установки представлен на фиг. 40.

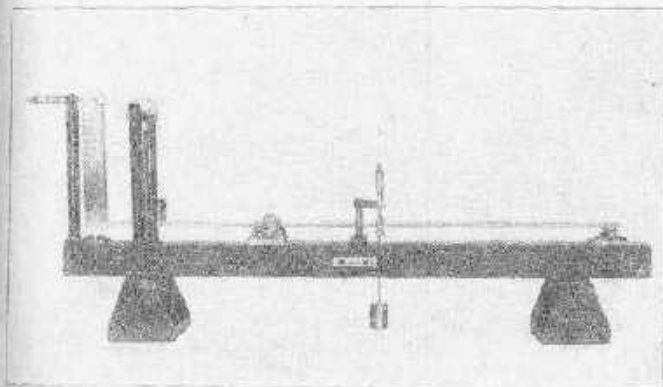
Порядок проведения работы

- а) Опытная проверка справедливости свойства взаимности перемещений

Нагрузочное устройство помещается в середине пролета (в точке B, фиг. 39), где к балке прикладывается вертикальная сила P. При этом измеряется соответствующее этой нагрузке горизонтальное перемещение на свободном конце стойки (в точке K). Затем в середине пролета устанавливается приспособление для измерения прогибов, а нагрузка P прикладывается в горизонтальном направлении в точ-

ке K. Эксперимент повторяют несколько раз и результаты записывают в соответствующую таблицу (см. Лабораторный журнал).

Полученные средние значения прогибов в точках B и K, в соответствии со свойством взаимности, должны быть равны.



Фиг. 40. Общий вид установки для экспериментальной проверки свойства взаимности перемещений.

- б) Построение на основе свойства взаимности перемещений упругой линии балки при ее нагружении в точке K горизонтальной силой P (см. фиг. 39)

Для измерения прогибов используются микрометр, установленный в точке K, а нагрузка прикладывается поочередно в трех точках по длине пролета (в точках A, B и C). Для точки B, лежащей в середине пролета, могут быть использованы результаты, полученные в предыдущем опыте.

Каждый замер повторяется дважды и результаты заносятся в таблицу (см. Лабораторный журнал).

Затем определяются средние значения прогибов в точке K в зависимости от места приложения нагрузки.

По полученным результатам, на основе свойства взаимности, строится в масштабе упругая линия балки.

Для проверки правильности полученных результатов производится теоретическое вычисление прогибов в точках A , B и C пролета балки при ее нагружении горизонтальной силой P , приложенной в точке K . Точки, соответствующие вычисленным значениям прогибов, наносятся на чертеже упругой линии.

РАБОТА 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СЕЧЕНИЙ СТАТИЧЕСКИ-НЕОПРЕДЕЛИМЫХ РАМ

Целью работы является экспериментальное исследование деформаций статически-неопределимой плоской рамы и сравнение экспериментальных данных с результатами теоретического расчета.

При теоретическом расчете рам раскрывается их статическая неопределимость, строятся эпюры моментов и определяются перемещения, которые впоследствии измеряются экспериментально. При выполнении расчета следует руководствоваться следующими указаниями.

1) Плоские рамы в виде замкнутого контура являются, вообще говоря, трижды статически-неопределимыми, однако при наличии двух осей симметрии и при симметричном их нагружении достаточно составить лишь одно каноническое уравнение для определения одной неизвестной.

Действительно, рассмотрим, например, раму, имеющую вид кольца, нагруженную вертикальными силами (фиг. 41, а).

Сечение A на вертикальной оси симметрии условно считаем как бы заделанным, поскольку оно не поворачивается. В сечении C по горизонтальной оси симметрии (фиг. 41, б) поперечная сила отсутствует, а продольная по условной симметрии равна $\frac{P}{2}$. Неизвестным является лишь изгибающий момент X в этом сечении. Этот момент определяется из уравнения

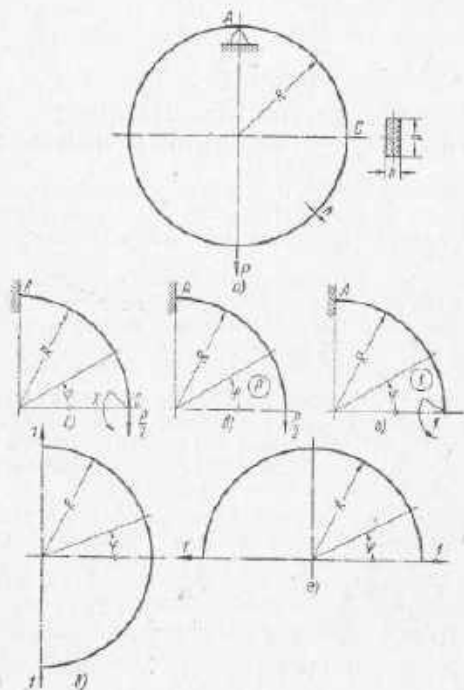
$$X\delta_{11} + \delta_{10} = 0,$$

выражающего условия отсутствия взаимного поворота сечений A и C .

В этом уравнении δ_{10} — поворот сечения C относительно A в системе «Р» от заданной нагрузки (фиг. 41, в);

δ_{11} — поворот того же сечения в системе «I» от действия единичного момента (фиг. 41, г).

Для кольцевой рамы коэффициенты δ_{11} и δ_{12} определяются при помощи интеграла Мора, непосредственным интегрированием.



Фиг. 41. Кольцевая симметрично нагруженная рама в различные точки нагружена ее частями, используемые при расчете статической неопределенности и определении перемещения

2) После того, как момент X определен, строится суммарная эпюра изгибающих моментов для рассматриваемой части рамы. Для остальных ее участков эпюра моментов строится на основании условий симметрии. Выражение изгибающе-

го момента в текущем сечении должно быть также записано в аналитическом виде.

3) Для определения изменения вертикального размера рамы достаточно рассмотреть только ее половину. В направлении искомого перемещения прикладываются единичные силы (фиг. 41, δ) и определяются изгибающие моменты M_1 , соответствующие этим силам.

Перемещение определяется при помощи интеграла Мора

$$\delta = \frac{1}{EI} \int_0^{\pi} M M_1 R d\varphi,$$

где M — искомый изгибающий момент в сечениях рамы от заданной нагрузки.

Интеграл вычисляется по длине оси половины рамы.

Для определения изменения горизонтального размера рамы единичную силу следует прикладывать так, как это показано на фиг. 41, ϵ .

Аналогичным образом рассматриваются и рамы прямоугольной формы (фиг. 42), но в этом случае интегралы вычисляются по способу Верещагина.

В симметричной раме при косесимметричной нагрузке (фиг. 43, a) в сечении, проведенном по оси симметрии, возникает только поперечная сила X (фиг. 43, b).

Эта сила определяется из канонического уравнения перемещений. Для вычисления коэффициентов канонического уравнения необходимо рассмотреть нагружение основной системы отдельно силами $P/2$ (фиг. 43, $в$) и отдельно единичными силами (фиг. 43, $з$).

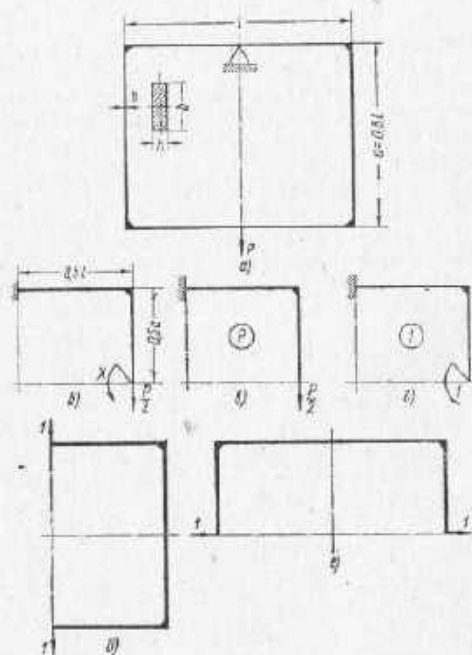
Для определения вертикального перемещения угловых точек рамы в направлении диагонали единичную силу следует приложить, как показано на фиг. 43, $д$.

а) Описание установки

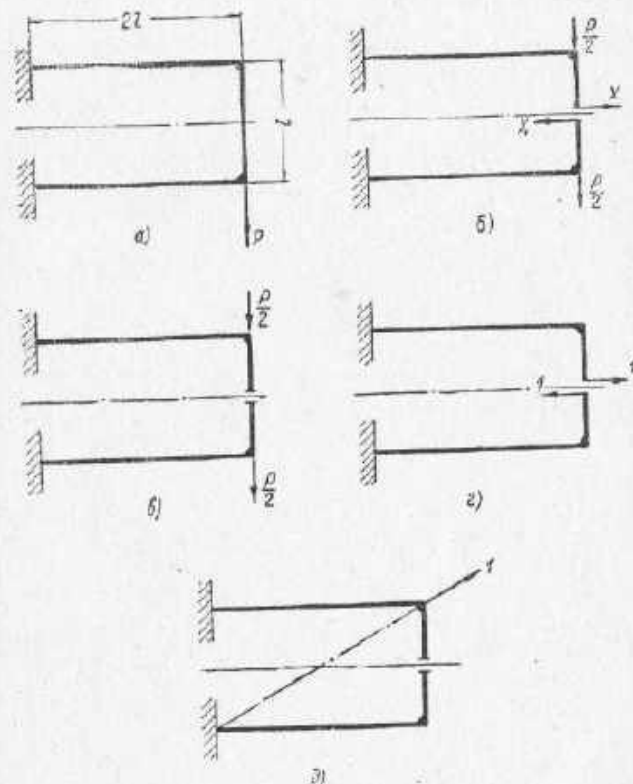
Исследуются замкнутые рамы: прямоугольная и кольцевая при симметричной нагрузке (фиг. 41 и 42) и прямоугольная рама при косесимметричной нагрузке (фиг. 43). С помощью микрометрических винтов с электрическими контактами измеряются изменения вертикального и горизонтального размеров симметричных рам и изменение длины диагонали косесимметричной рамы.

б) Порядок проведения работы

Рама предварительно нагружается небольшой начальной нагрузкой (например, 0,5 кГ), после чего микрометрические винты подводятся до контакта и их показания записываются в журнал. Затем рама нагружается рабочей нагрузкой (например, 4,5 кГ), винты снова доводятся до контакта и показания записываются вновь. (Необходимо следить за тем, чтобы винты были только доведены до контакта, но не нажманы на раму). Затем винты освобождаются и рама разгружается.



Фиг. 42. Прямоугольная симметрично нагруженная рама и различные схемы нагружения ее частей, используемые при раскрытии статической неопределенности и определении перемещений



Фиг. 43. Прямоугольная рама при кососимметричной нагрузке и основная система с приложенными единичными нагрузками.

Измерения повторяются 2-3 раза.

По данным измерений вычисляются средние значения перемещений, соответствующие нагрузке ΔP .

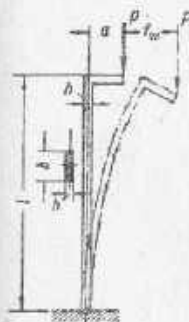
Экспериментальные значения перемещений для каждой рамы сопоставляются с расчетными и вычисляется их расхождение в процентах.

РАБОТА 14

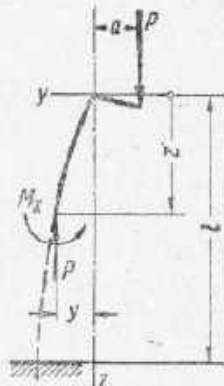
ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКИ МАЛОЙ ЖЕСТИКОСТИ ПРИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Как известно, при продольно-поперечном изгибе бруса малой жесткости величина изгибающего момента и сеченных бруса зависит от величины прогиба. Поэтому связь между напряжениями, прогибами и величиной продольной силы является нелинейной.

В частности, это наблюдается при изгибе стойки под действием нецентрально приложенной продольной сжимающей силы (фиг. 44).



Фиг. 44. Схема гибкой стойки, нагруженной нецентрально приложенной продольной силой



Фиг. 45. К составлению уравнения изгибающих моментов для гибкой стойки, нагруженной нецентрально приложенной продольной силой

Изгибающий момент в произвольном сечении стойки, взятом на расстоянии y от ее свободного конца, равен (фиг. 45)

$$M_x = -P(a + y), \quad (1)$$

где a — эксцентриситет приложения нагрузки;

y — ордината произвольной точки изогнутой оси, отсчитанная от вертикальной оси координат, проходящей через свободный конец изогнутой стойки.

Знак минус в этом выражении объясняется тем, что момент вызывает отрицательную кривизну стойки (фиг. 45).

Кривизна изогнутой оси балки, приближенно равная $\frac{d^2 y}{dz^2}$, связана с моментом равенством

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_z}{EI_z} \quad (2)$$

Подставляя в уравнение (2) значение момента, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 y}{dz^2} + \alpha^2 y = -\alpha^2 a, \quad (3)$$

где

$$\alpha^2 = \frac{P}{EI_z}$$

Общее решение уравнения (3) имеет вид:

$$y = -a + C_1 \cos \alpha z + C_2 \sin \alpha z,$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования. Эти постоянные определяются из граничных условий. Как видно из фиг. 45, на верхнем конце стойки (при $z=0$) прогиб $y=0$, на нижнем ее конце, в заделке ($z=l$), отсутствует поворот сечения и поэтому $\frac{dy}{dz} = 0$.

Из указанных условий следует, что

$$C_1 = a; \quad C_2 = a \operatorname{tg} \alpha l.$$

Окончательно получим:

$$y = a(-1 + \cos \alpha z + \operatorname{tg} \alpha l \sin \alpha z).$$

Максимальный прогиб $f_{\max}$ стойки получим, положив $z=l$

$$f_{\max} = y_{z=l} = a(-1 + \cos \alpha l + \operatorname{tg} \alpha l \sin \alpha l) = a \frac{1 - \cos \alpha l}{\cos \alpha l} \quad (4)$$

Формула (4), в параметрической форме, устанавливает зависимость прогиба стойки $f_{\max}$ от силы P , поскольку каждому значению силы соответствует определенная величина параметра αl , входящего в формулу (4).

Эта формула показывает, что зависимость прогиба от нагрузки нелинейна. При приближении силы P к величине P^* , где

$$P^* = \frac{\pi^2 EI_z}{(2l)^2}, \quad (5)$$

параметр αl стремится к $\frac{\pi}{2}$ и прогиб $f_{\max}$ неограниченно возрастает.

Наряду с приведенным методом интегрирования дифференциального уравнения упругой линии для определения прогибов при продольно-поперечном изгибе может быть использована приближенная формула С. П. Тимошенко^{*)}:

$$f_{\max} = \frac{f_0}{1 - \frac{P}{P^*}}, \quad (6)$$

где f_0 — прогиб, вычисленный с учетом одних только поперечных нагрузок. (Для внецентрично сжатой стойки f_0 представляет прогиб, вызываемый только моментом Pa , приложенным на свободном конце стойки).

P^* — сила, вычисляемая по формуле

$$P^* = \frac{\pi^2 EI_z}{(\mu l)^2}, \quad (7)$$

Коэффициент приведенной длины μ зависит от способа закрепления стойки. Для стойки, заделанной одним концом (фиг. 44), коэффициент $\mu = 2$ и формула (7) совпадает с формулой (5).

а) Постановка задач

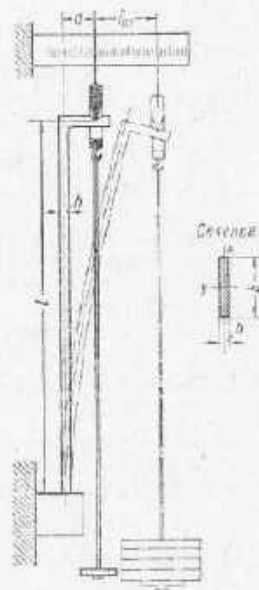
Задача лабораторной работы заключается в том, чтобы для стойки, схема которой показана на фиг. 46, опытным путем исследовать зависимость стрелы прогиба $f_{\max}$ от величины продольной силы P и сопоставить ее с теоретической

^{*)} См. книгу «Расчеты на прочность в машиностроении» под ред. Пономарева С. Д., т. I, Машгиз, 1956, стр. 530—552.

зависимостью, полученной методом интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси (см. формулу (4)), а также с зависимостью, полученной по приближенной формуле (6).

6) Порядок выполнения работы

Прежде всего следует ознакомиться с экспериментальной установкой (фиг. 46), измерить и записать в журнал все необходимые размеры l , b , h , a , вычислить момент инерции поперечного сечения I_x и силу P^* по формуле (5).



Фиг. 46. Схема лабораторной установки для определения стрелы прогиба стойки при внешнем сжатии

Затем следует произвести нагружение стойки и измерение стрелы прогиба f_m . Нагрузка прикладывается ступенями

по 5 кг; при каждом значении нагрузки производится отсчет по шкале. Результаты измерения заносятся в таблицу (см. Лабораторный журнал).

Следует иметь в виду, что полная величина нагрузки P складывается из веса гирь, устанавливаемых на подвеску, и веса самой подвески P_0 (для установки, осуществленной в лаборатории, $P_0 = 0,3$ кг).

Первый отсчет по шкале производится без гирь, при силе P_0 ; дальнейшие отсчеты соответствуют нагрузкам $(P_0 + 5)$ кг, $(P_0 + 10)$ кг и т. д.

Увеличение нагрузки можно продолжать до тех пор, пока стрелка не дойдет до конца шкалы.

Результаты экспериментального исследования следует сопоставить с данными теоретических расчетов по указанным выше формулам. (Значения нагрузок при теоретических расчетах следует принимать такими же, как и при экспериментальном определении стрелы прогиба).

В заключение по экспериментальным и по теоретическим данным в общих осях координат «нагрузка—прогиб» следует построить три графика. Первый график — по опытным данным, второй — по формуле (4), полученной методом интегрирования дифференциального уравнения, третий график — по приближенной формуле (6) и произвести их сопоставление.

РАБОТА 15

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИИ

а) Общие соображения

С помощью тензометрии можно определить деформации в точках около внешней поверхности исследуемой детали. Напряжения вычисляются по деформациям с помощью закона Гука.

Поверхность детали обычно свободна от внешних нагрузок. Иногда она находится под действием известного по величине давления. В том и другом случае нормаль к поверхности является одной из главных осей. Для изучения напряженного состояния в рассматриваемой точке детали необходимо, по замеренным деформациям, определить величины главных напряжений в двух главных площадках, перпендикулярных к поверхности.

б) Определение положения главных осей и величины главных деформаций

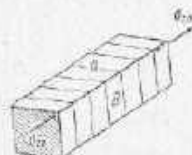
При определении напряжений методом тензометрии практически могут встретиться следующие характерные случаи:

1. Если известно, что напряженное состояние является одноосным, а также известно направление соответствующей главной оси (например, при растяжении или изгибе), то достаточно измерить деформацию ε только в одном заданном главном направлении. Величина напряжения вычисляется по формуле

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (1)$$

Заметим, что указанный случай всегда имеет место в точках, лежащих около ребра пересечения (фиг. 47) двух взаимно перпендикулярных наружных плоскостей A и B , при любом нагружении детали, если внешнее давление отсутствует.

2. Если напряженное состояние является двухосным и направление главных осей известно (например около внешней поверхности цилиндрической оболочки при осесимметрич-



Фиг. 47. Две наружные, взаимно перпендикулярные плоскости A и B , ограничивающие деформируемую деталь

ной нагрузке), то достаточно измерить две главные деформации ε_1 и ε_2 , после чего главные напряжения σ_1 и σ_2 могут быть вычислены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

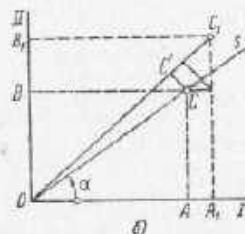
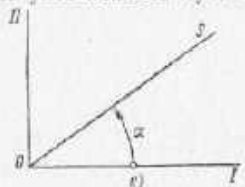
3. В общем случае, когда при двухосном напряженном состоянии направление главных осей неизвестно, в исследуемой точке необходимо измерить деформации по трем пересекающимся осям, направление которых может быть выбрано произвольно.

Предположим, например, что необходимо определить величины главных деформаций и главные напряжения в некоторой точке O (фиг. 48, а) около поверхности деформируемого тела.

Предварительно выведем зависимость между величинами главных деформаций ε_1 и ε_2 и линейной деформацией в направлении некоторой оси I , составляющей с направлением осей I угол α . Для этого рассмотрим взаимные перемещения близких к точке O точек A , B и C (фиг. 48, б), занимающих соответственно положения A_1 , B_1 , C_1 .

Поскольку оси I и II являются главными, то угол между ними при деформации не изменяется и точки A_1 и B_1 остаются на тех же главных осях I и II .

Точка C_1 в связи с возможным сдвигом в общем случае не будет расположена на луче OC . (Угол наклона луча OC_1 мало отличается от угла наклона луча OC).



Фиг. 48. К поведению зависимости между главными деформациями ε_I и ε_{II} в точке O и деформацией в направлении оси z , проходящей через ту же точку

По определению

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_I &= \frac{AA_1}{OA} \\ \varepsilon_{II} &= \frac{BB_1}{OB} \\ \varepsilon_z &= \frac{CC_1}{OC} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Но из фиг. 48, б видно, что:

$$CC_1 = AA_1 \cos \alpha + BB_1 \sin \alpha;$$

$$\overline{OC} = \frac{OA}{\cos \alpha} = \frac{OB}{\sin \alpha}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{CC_1}{OC} = \frac{AA_1 \cos \alpha + BB_1 \sin \alpha}{OC} = \\ &= \frac{AA_1}{OA} \cos^2 \alpha + \frac{BB_1}{OB} \sin^2 \alpha, \end{aligned}$$

или с учетом формул (3):

$$\varepsilon_z = \varepsilon_I \cos^2 \alpha + \varepsilon_{II} \sin^2 \alpha.$$

Используя известные соотношения

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}; \quad \sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2},$$

окончательно получим

$$\varepsilon_z = \frac{\varepsilon_I + \varepsilon_{II}}{2} + \frac{\varepsilon_I - \varepsilon_{II}}{2} \cos 2\alpha. \quad (4)$$

Измеряя линейные деформации по трем пересекающимся осям u , z , v , составляющим друг с другом некоторые известные углы, и подставив результаты измерений в формулу (4), получим систему трех уравнений, содержащих три неизвестные величины ε_I , ε_{II} и α .

Наибольшее распространение получала система осей, показанная на фиг. 49 (оси u , z , v). При таком расположении



Фиг. 49. Равнозначная система осей u , v и z , выбираемая при тензометрировании

осей определение неизвестных ε_I , ε_{II} и α является наиболее простым.

Подставляя в формулу (4) последовательно значения углов, соответствующих осям u , t , v , на фиг. 49, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_u &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_{11}}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{11}}{2} \cos 2\alpha; \\ \varepsilon_t &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_{11}}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{11}}{2} \cos 2(\alpha + 45^\circ); \\ \varepsilon_v &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_{11}}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{11}}{2} \cos 2(\alpha + 90^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решая систему (5) относительно неизвестных ε_1 , ε_{11} и α , имеем:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1,11} &= \frac{\varepsilon_u + \varepsilon_v}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\varepsilon_u - \varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_v - \varepsilon_t)^2 \right]}; \\ \operatorname{tg} 2\alpha &= \frac{2\varepsilon_t - (\varepsilon_u + \varepsilon_v)}{\varepsilon_v - \varepsilon_u}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

После того, как деформации ε_1 , ε_v , ε_t измерены и главные деформации ε_1 и ε_{11} вычислены, определение главных напряжений по формулам (2) не представляет затруднений.

Окончательные индексы главных напряжений следует проставлять после сопоставления их значений, так чтобы удовлетворялось неравенство

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

в) Описание схемы установки

На фиг. 50 приведена схема нагружаемого бруса и эпюры изменения изгибающих и крутящих моментов по его длине.

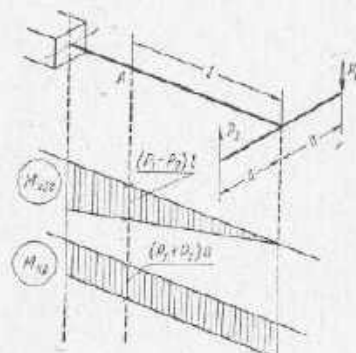
Для определения исходных деформаций ε_u , ε_t и ε_v используются датчики сопротивления в комплекте со специальным электронизмерительным прибором. (Описание прибора дано в конце второй части).

На фиг. 51 и 52 приведены схемы размещения датчиков в окрестности исследуемой точки O сечения A для бруса прямоугольного сечения и для тонкостенной трубчатого бруса.

г) Теоретическое определение главных напряжений в точке O (фиг. 51 и 52)

Компоненты напряжений определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{M_x}{W_x} = \frac{(P_1 - P_2)l}{W_x}; \\ \tau &= \frac{M_k}{W_k} = \frac{(P_1 + P_2)a}{W_k}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$



Фиг. 50. Схема экспериментальной установки для исследования напряженного состояния в одной из точек бруса при его изгибе и кручении

где W_x см^3 и W_k см^3 — моменты сопротивления сечения изгибу и кручению соответственно.

Для прямоугольного бруса (фиг. 51)

$$W_x = \frac{bh^2}{6} \text{ см}^3;$$

$$W_k = \alpha bh^2 \text{ см}^3.$$

Для тонкостенной трубки (фиг. 52)

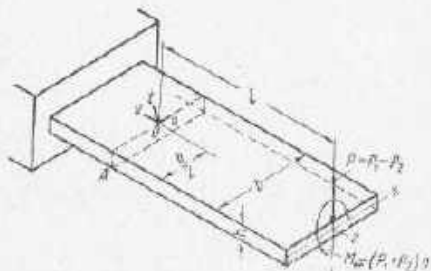
$$W_x = \frac{\pi D^2 \delta}{4} \text{ см}^3;$$

$$W_k = 2W_x = \frac{\pi D^2 \delta}{2} \text{ см}^3.$$

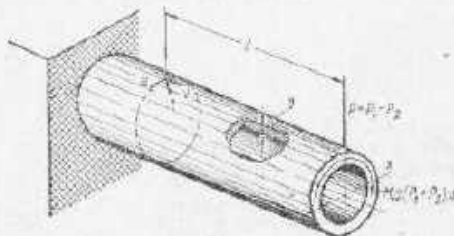
Главные напряжения и угол α (угол между главной осью и вспомогательной осью x) вычисляются по формулам

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau}{\sigma} \quad (9)$$



Фиг. 51. Брус прямоугольного сечения, на поверхности которого, в точке О, размещены три датчика для изучения напряженного состояния при изгибе и кручении бруса.



Фиг. 52. Тонкостенная трубка, на поверхности которой размещены три датчика для изучения напряженного состояния при изгибе и кручении трубки.

д) Тарировка измерительной аппаратуры

Указанная на шкале измерительного прибора цена деления $1 \cdot 10^{-6}$ единиц деформации действительна только при условии, что специальная ручка регулятора установлена на

том делении указателя, которое соответствует чувствительности применяемой партии датчиков. Если чувствительность датчиков неизвестна, то ручку регулятора надо поставить в некоторое произвольное положение и определить цену деления шкалы посредством тарировки датчика совместно с измерительным прибором.

В работе применены датчики, чувствительность которых заранее не задана, поэтому цену деления для них надо установить экспериментально.

Обычно для тарировки пользуются специальными тарировочными блоками, нагружаемыми так, чтобы измеряемую датчиком деформацию можно было легко определить теоретически.

В настоящей работе определение цены деления измерительного прибора производится при простом изгибе исследуемого бруса (фиг. 53) по показаниям датчика, наклеенного на поверхности растянутой части балочки в направлении ее продольной оси x .

Напряженное состояние в исследуемой точке в этом случае является одноосным, следовательно, деформации в направлении оси x равны:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{P l}{E W_x},$$

где E — модуль упругости материала балки.

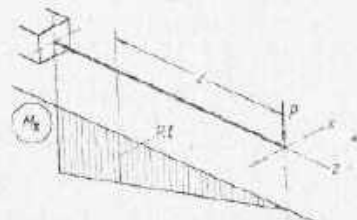
Если нагрузке P , приложенной к балке при тарировке, соответствует n делений, отсчитанных по шкале прибора, то цена одного деления составит:

$$k = \frac{\varepsilon_x}{n}.$$

Цену деления k надо определять как среднее из результатов 5—6 замеров в целях исключения случайных ошибок. Малыми нагрузками пользоваться не следует, так как относительная ошибка при этом становится большей. (Нагрузку целесообразно выбирать так, чтобы ей соответствовало $n \approx 10$ делений реохорда, тогда при возможной ошибке при отсчете в 0,5 деления общая погрешность при тарировке составит не более 5%.)

е) Экспериментальное определение величин главных напряжений

Нагружая брус по схеме, приведенной на фиг. 50, следует измерить деформации в направлениях u , t и v (фиг. 51 или фиг. 52).



Фиг. 53. Схема нагружения балки, используемой при тарировке измерительной аппаратуры.

В связи с невозможностью обеспечения постоянства переходного сопротивления в местах присоединения проводов (для обеспечения постоянства переходного сопротивления применяются специальные переключатели), датчики подключаются к прибору поочередно и для каждого из датчиков повторяется полный цикл нагружения.

Если показания, отсчитанные по шкале прибора, составляют n_u , n_t и n_v (соответственно осям u , t и v), то деформации будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_u &= k n_u; \\ \varepsilon_t &= k n_t; \\ \varepsilon_v &= k n_v. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Главные деформации ε_I и ε_{II} и угол α , определяющий главные направления, вычисляются по формулам (6). Главные напряжения вычисляются по формулам (2).

Значения главных напряжений и угла, полученные экспериментально, следует сопоставить с их теоретическими значениями, вычисленными по формулам (8) и (9).

ж) Опытное определение величины момента, вызывающего кручение бруса

Определение действующих на деталь нагрузок — одна из часто встречающихся задач, решаемых на практике методом тензоэметрии. В частности, этот метод широко приме-

няется для определения величины момента, передаваемого валом.

Напряженное состояние, возникающее при кручении бруса (при $P_t = P_v$, см. фиг. 50), является чистым сдвигом.

В этом случае деформация в направлении оси t под углом в 45° к оси бруса (см. работу 6) равна:

$$|\varepsilon_t| = \frac{|\tau| (1 + \mu)}{E}.$$

Учитывая, что $\tau = \frac{M_t}{W_t}$, получим

$$M_t = \frac{E W_t}{1 + \mu} \cdot \varepsilon_t \text{ кгсм.} \quad (11)$$

Определив экспериментально ε_t , нетрудно по формуле (11) вычислить момент.

Примечание. При выполнении работы следует принять модуль упругости материала равным $E = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$.

РАБОТА 16

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

а) Физические основы метода

Исследование напряженного состояния поляризационно-оптическим методом производится на прозрачных моделях реальных деталей. Модели выполняются из специальных оптически активных материалов и должны быть геометрически подобны исследуемым деталям. Нагруженные модели должны быть также подобны нагруженной детали.

Наиболее полно оптический метод разработан для исследования двухосного напряженного состояния на моделях постоянной толщины. Сущность оптического метода в этом случае состоит в том, что нагруженная модель детали просвечивается поляризованным светом. Изображение модели, проектируемое на экран, получается покрытым системой полос, по расположению которых можно определить напряжения в модели. Пользуясь законами подобия, по результатам исследования модели можно установить напряжения в детали.

Поляризационно-оптический метод применяется также для изучения объемного напряженного состояния, однако в этом случае эксперимент и обработка его результатов значительно сложнее.

Появление полос на изображении плоской модели при ее нагружении вызвано тем, что оптически активные материалы при нагружении становятся оптически анизотропными и приобретают способность двойного лучепреломления.

К числу таких оптически активных материалов относятся, например, стекло, целлюлоза, желатин и большое число специальных материалов, изготавливаемых для исследования напряжений поляризационно-оптическим методом (вискомит, ИМ-44 и др.).

Составной луч представляет собой поперечные электромагнитные колебания. При распространении света в оптически изотропной среде положение плоскости коле-

баний является неопределенным и непрерывно меняется. Явление двойного лучепреломления заключается в том, что в оптически анизотропной среде колебания падающего луча разлагаются на две взаимно перпендикулярные составляющие, плоскости которых совпадают с осями оптической анизотропии. Лучи, определяемые каждой из этих составляющих, распространяются в преломляющей среде с различными скоростями. Следовательно, выходя из среды, они отстают друг от друга. Это отставание может быть охарактеризовано или разностью фаз обоих лучей в одной точке пространства, или расстоянием δ между точками, в которых оба луча имеют одинаковую фазу. Величина δ называется разностью хода лучей.

Опытами большого числа исследователей установлена зависимость между двойным лучепреломлением, связанным с деформацией материала, и возникающими в материале напряжениями.

Основные законы фотоупругости для случая двухосного напряженного состояния можно сформулировать следующим образом:

1. Главные оптические оси в каждой точке модели совпадают с направлением главных напряжений.
2. Разность хода δ лучей по выходе из модели пропорциональна разности главных напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)$ и толщине b модели:

$$\delta = Cb(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Измерив разность хода δ лучей, прошедших сквозь модель, и зная величину постоянной C , можно определить разность главных напряжений в соответствующих точках модели.

Практически при проведении опытов разность хода δ измерять не требуется, так как из анализа возникшей вследствие разности хода интерференционной картины полос на экране можно сразу определить разность главных напряжений.

Поляризационно-оптическое исследование напряжений может выполняться при освещении модели белым или монохроматическим светом.

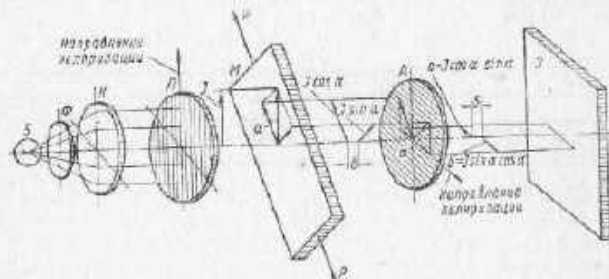
Ознакомимся сначала со вторым способом.

б) Полярископ с монохроматическим светом

Рассмотрим устройство установки, применяемой для исследования двухосного напряженного состояния методом фото-

уругости. Такая установка называется полярископом. Схема полярископа приведена на фиг. 54.

Луч света от источника S проходит через фильтр F , пропускающий только составляющую луча с определенной длиной волны λ . Полученный монохроматический луч проходит



Фиг. 54. Схема полярископа для исследования изогнутого напряжения методом фотоупругости.

через конденсорную линзу K , дающую параллельный пучок света, и попадает в поляризатор $П$. Луч, прошедший поляризатор $П$, становится плоско-поляризованным, т. е. колебания светового вектора совершаются только в плоскости, параллельной оптической оси поляризатора. В современных установках в качестве поляризатора используется полярионд, т. е. прозрачная пленка с определенным образом нанесенными на нее кристаллами германита. С целью защиты от повреждения полярионд помещают между двумя стеклами.

Входя в исследуемую модель M , плоско-поляризованный луч распадается на два составляющих луча соответственно параллельно главным напряжениям в точке встречи луча с моделью. Каждый из составляющих лучей распространяется в толще модели со своей скоростью. Один из них называется обыкновенным лучом, а другой — необыкновенным.

Таким образом, из модели выходят два луча, колебания которых совершаются по взаимно перпендикулярным направлениям, причем один из лучей отстает от другого на некоторую величину δ .

Эти лучи подходят к второму полярионду A , называемому анализатором. Последний пропускает только те составляющие колебаний лучей, которые параллельны его оптической оси. Таким образом, лучи вновь сводятся в одну плоскость и получают возможность интерферировать между собой. В

зависимости от разности хода δ лучей, поступающих в анализатор, суммарное колебание луча, прошедшего сквозь анализатор, будет иметь большую или меньшую интенсивность, а следовательно, и изображение соответствующей точки модели на экране $Э$ будет иметь большую или меньшую освещенность.

Для удобства обработки результатов эксперимента оптическая ось анализатора обычно устанавливается перпендикулярно оптической оси поляризатора (установка «на темноту»).

Характер распространения лучей света на участке поляризатор — экран, при установке «на темноту», схематически представлен на фиг. 54. На этом участке направления электромагнитных колебаний и их амплитуды изображены в виде векторов. Поляризованный свет, падающий на модель, изображается вектором I .

Легко видеть, что каков бы ни был угол α между плоскостью поляризации и направлением главных напряжений в модели, длины векторов a и b , изображающие интенсивности обыкновенного и необыкновенного лучей, после прохода через анализатор одинаковы (фиг. 54). Поэтому, если разность хода δ лучей равна нулю или кратна длине волны света λ , эти лучи погасят друг друга.

Таким образом, на изображении модели на экране будут наблюдаться темные области или полосы для тех зон модели, для которых

$$\delta = 0; \lambda; 2\lambda; \dots; n\lambda.$$

Учитывая, что согласно зависимости (1) разность хода лучей пропорциональна разности главных напряжений, можно заключить, что темные полосы представляют собой геометрическое место точек, где разность главных напряжений имеет одинаковое значение, т. е.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_n, \quad (2)$$

где $n = 0; 1; 2 \dots$ — порядок полосы.

$K = \frac{\lambda}{C} \frac{\pi \Gamma}{\delta m}$ — оптическая постоянная материала при данной длине волны света,
 b — толщина модели.

Указанные темные полосы на изображении модели, соответствующие постоянным значениям разности главных напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)$, называются изокромами.

Наряду с изохромами на изображении модели имеется еще одна система темных полос — изоклины, соответствующая тем точкам модели, в которых направление главных напряжений совпадает с плоскостью поляризации. В этих точках разложение падающего на модель луча не происходит, и экран остается темным.

Множитель n в формуле (2), определяющий значение разности ($\sigma_1 - \sigma_2$) для данной полосы, называется порядком полосы. Порядок n полосы легко определяется при опыте простым счетом полос, прошедших через данную точку модели при постепенном ее нагружении, при этом счет необходимо начинать с $n = 1$. Точки, в которых $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$, называют изотропными. Эти точки в течение всего процесса нагружения остаются темными.

Положение изоклин, в отличие от изохром, зависит от направления оптических осей поляризатора и анализатора. При одновременном (без нарушения взаимной ориентировки) вращении поляризатора и анализатора система изоклин будет перемещаться; изохромы же останутся неподвижными. Это обстоятельство и может быть использовано для разделения полос на изоклины и изохромы.

В тех случаях, когда необходимо получить четкую картину изохром, можно полностью устранить изоклины. Для этого применяются так называемые пластинки в четверть волны, превращающие плоско-поляризованный луч в луч, поляризованный по кругу.

Пластинки в четверть волны представляют собой тонкие, обычно слюдяные пластинки, обладающие естественной оптической анизотропией, обеспечивающей разность фаз, равную $\frac{\pi}{2}$ (четверть полного периода). Эти пластинки устанавливаются в полярископ перед моделью и за нею.

Оптически ось первой пластинки составляет угол 45° с осью поляризатора, а ось второй — такой же угол с осью анализатора.

Пластинка осуществляет вращение плоскости поляризации луча, входящего в модель (создает круговую поляризацию).

Вторая пластинка устраняет это вращение по выходе из модели, обеспечивая возможность выполнения анализатором своих функций. Устранение изоклин происходит вследствие отсутствия постоянной ориентации плоскости поляризации падающего луча.

Руководствуясь картиной изохром, можно определить значение разности главных напряжений для различных случаев нагружения модели. Для этого необходимо лишь знать величину оптической постоянной K используемого материала модели. Эту постоянную следует предварительно определить путем испытания образца при простом растяжении или сжатом изгибе, когда разности ($\sigma_1 - \sigma_2$) известны.

Картина изоклин позволяет установить направление главных напряжений и построить сетку их траекторий. Траектории главных напряжений называются изостатами.

Оптический метод позволяет определять разность главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$), но не дает возможности найти величину каждого из главных напряжений в отдельности. Численную величину одного из главных напряжений можно сразу установить для тех точек, где второе главное напряжение равно нулю. В частности, это можно сделать для точек, расположенных около свободного контура модели, где одно из двух главных напряжений равно нулю в силу граничных условий.

В большинстве случаев данные, получаемые оптическим методом, позволяют достаточно точно судить о напряженном состоянии детали.

При необходимости определения каждого из главных напряжений в отдельности во внутренних точках плоской модели следует опираться на имеющиеся способы определить дополнительно и суммы искоемых главных напряжений ($\sigma_1 + \sigma_2$) в этих точках.

Наиболее полно сущность оптического метода изучения напряжений изложена, например, в книге «Расчеты на прочность в машиностроении» под ред. Покомарова С. Л., т. I, Машгиз, 1956, стр. 159—175.

Итак, ограничиваясь данными только оптического метода, можно в любой точке модели определить направление главных осей и значение разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$).

в) Полярископ с белым светом

Выше изложена методика исследования напряженного состояния с использованием монохроматического света, т. е. света, имеющего строго определенную длину волны λ .

При применении белого света, представляющего совокупность лучей с различными длинами волн (при отсутствии фильтра), методика исследования несколько меняется.

Наряду с изохромами на изображении модели имеется еще одна система темных полос — изоклины, соответствующая тем точкам модели, в которых направление главных напряжений совпадает с плоскостью поляризации. В этих точках разложение падающего на модель луча не происходит, и экран остается темным.

Множитель n в формуле (2), определяющий значение разности ($\sigma_1 - \sigma_2$) для данной полосы, называется порядком полосы. Порядки n полос легко определяется при опыте простым светом полос, прошедших через данную точку модели при постепенном ее нагружении, при этом счет необходимо начинать с $n = 1$. Точки, в которых $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$, называют изотропными. Эти точки в течение всего процесса нагружения остаются темными.

Положение изоклин, в отличие от изохром, зависит от направления оптических осей поляризатора и анализатора. При однопериодном (без нарушения взаимной ориентировки) вращении поляризатора и анализатора система изоклин будет перемещаться; изохромы же останутся неподвижными. Это обстоятельство и может быть использовано для разделения полос на изоклины и изохромы.

В тех случаях, когда необходимо получить четкую картину изохром, можно полностью устранить изоклины. Для этого применяются так называемые пластинки в четверть волны, превращающие плоско-поляризованный луч в луч, поляризованный по кругу.

Пластинки в четверть волны представляют собой тонкие, обычно следящие пластинки, обладающие естественной оптической анизотропией, обеспечивающей разность фаз, равную $\frac{\pi}{2}$ (четверть полного периода). Эти пластинки устанавливаются в полярископ перед моделью и за ней.

Оптическая ось первой пластинки составляет угол 45° с осью поляризатора, а ось второй — такой же угол с осью анализатора.

Пластинка осуществляет вращение плоскости поляризации луча, входящего в модель (создает круговую поляризацию).

Вторая пластинка устраняет это вращение по выходе из модели, обеспечивая возможность выполнения анализатором своих функций. Устранение изоклин происходит вследствие отсутствия постоянной ориентации плоскости поляризации падающего луча.

Руководствуясь картиной изохром, можно определить значение разности главных напряжений для различных случаев нагружения модели. Для этого необходимо лишь знать величину оптической постоянной K используемого материала модели. Эту постоянную следует предварительно определить путем испытания образца при простом растяжении или изгибе, когда разность ($\sigma_1 - \sigma_2$) известна.

Картина изоклин позволяет установить направление главных напряжений и построить сетку их траекторий. Траектории главных напряжений называются изостатами.

Оптический метод позволяет определить разность главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$), но не дает возможности найти величину каждого из главных напряжений в отдельности. Численную величину одного из главных напряжений можно сразу установить для тех точек, где второе главное напряжение равно нулю. В частности, это можно сделать для точек, расположенных около свободного контура модели, где одно из двух главных напряжений равно нулю в силу граничных условий.

В большинстве случаев данные, получаемые оптическим методом, позволяют достаточно полно судить о напряженном состоянии детали.

При необходимости определения каждого из главных напряжений во внутренних точках плоской модели следует одним из имеющихся способов определить дополнительно и суммы искоемых главных напряжений ($\sigma_1 + \sigma_2$) в этих точках.

Наиболее полно сущность оптического метода изучения напряжений изложена, например, в книге «Расчеты на прочность в машиностроении» под ред. Пономарева С. Д., т. I, Машгиз, 1956, стр. 159—175.

Итак, ограничиваясь данными только оптического метода, можно в любой точке модели определить направление главных осей и значение разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$).

в) Полярископ с белым светом

Выше изложена методика исследования напряженного состояния с использованием монохроматического света, т. е. света, имеющего строго определенную длину волны λ .

При применении белого света, представляющего совокупность лучей с различными длинами волн (при отсутствии фильтра), методика исследования несколько меняется.

Изотропными (и изотропные точки), в случае применения белого света, остаются такими же, как и при монохроматическом свете, так как при совпадении направлений главных напряжений с плоскостью поляризации разложение луча не происходит.

Для изохром условие затухания будет выполняться в каждой данной точке модели только для какой-либо одной определенной длины волны света.

Таким образом, из первоначального белого света будет исключена соответствующая составляющая и точка на изображении окажется окрашенной в доминантный цвет поглощенному лучу свет. Поле изображения будет покрыто системой изохром, окрашенных в разные цвета (отсюда становится понятным и название этих полос: слово «изохром» означает «одноцветные»).

Окраска изохром данного порядка характеризует величину разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$).

При постепенном изменении разности ($\sigma_1 - \sigma_2$) в определенной последовательности меняются окраска точек изображения.

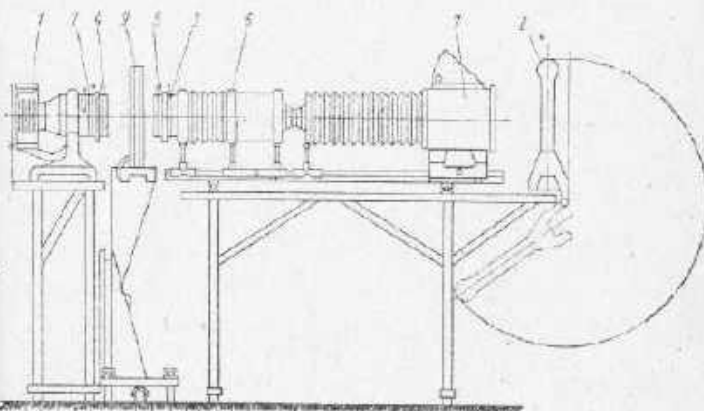
г) Описание оптической поляризационной установки ИМАШ-КБ2

Схема установки представлена на фиг. 55. Источником света 1 является кинопроекторная лампа накаливания мощностью 300—500 Вт. При работе с монохроматическим светом лампа накаливания заменяется ртутной лампой с зеленым светофильтром. В качестве поляризатора и анализатора применены поляроиды (2 и 3) с диаметром поля 120 мм. Поляроиды смонтированы в оправках, дающих возможность поворачивать плоскость поляризации в пределах от нуля до 90°. Для получения луча, поляризованного по кругу, установка снабжена двумя пластинками (4 и 5) в четверть волны, смонтированными в откидных оправках, позволяющих в случае надобности ввести пластинку в луч.

Для целей фотографирования и визуального наблюдения установка имеет длиннофокусный объектив 6, расположенный непосредственно за анализатором, и зеркальную фотокамеру 7, дающую изображение либо на матовом стекле, либо на фотопластинке. Для демонстрационных целей предусмотрен откидной экран 8.

Закрепление и нагружение исследуемой модели производится в специальном нагрузочном приспособлении 9, которое выдвигается между поляризатором и анализатором. Нагрузочное приспособление позволяет испытывать модели при дей-

ствии растягивающих и сжимающих сил, при действии сил, направленных произвольно, а также имеет специальное устройство для осуществления изгиба. Рама нагрузочного приспособления имеет размеры в свету приблизительно 500×500 мм, что определяет возможные размеры исследуе-



Фиг. 55. Схема оптической поляризационной установки ИМАШ-КБ2.

мых моделей. Перемещение рамы в вертикальном и горизонтальном направлениях осуществляется с помощью соответствующих передач с ручным приводом, дающих возможность внести в луч пучный участок модели.

д) Определение напряжений в детали по результатам испытания модели

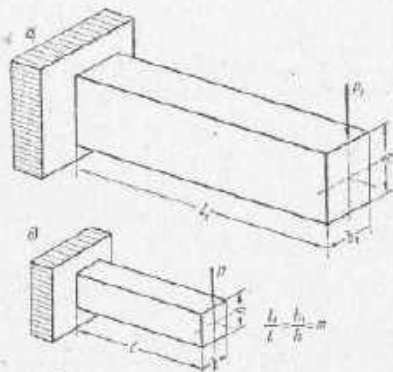
Изучив оптическим методом напряженное состояние модели, легко оценить напряжения и в геометрически подобной реальной детали, выполненной из металла. Это осуществляется простым пропорциональным пересчетом, поскольку напряжения пропорциональны нагрузкам и не зависят (при двухбазном напряженном состоянии) от величины изгибных постоянных *).

*). Строго говоря, это утверждение справедливо только для тех ограниченных однородных контуров при нагрузке по контуру. Однако с небольшой долей приближения сказанное относится и к другим случаям. Подробнее об этом см., например, М. Фрокт, «Фотоупругость», ГИИТ, 1950, ч. II, стр. 172.

Поясним сказанное примером.

Для двух балок а) и б) (фиг. 56), размеры которых в плоскости нагружения геометрически подобны, т. е.

$\frac{l_1}{l} = \frac{h_1}{h} = m$, а толщины b и b_1 произвольны, максимальные напряжения соответственно равны:



Фиг. 56. Схемы двух геометрически подобных и подобно-нагруженных балок.

для балки а)

$$\sigma_{1 \max} = \frac{6 P l_1}{b_1 \cdot h_1^2};$$

для балки б)

$$\sigma_{\max} = \frac{6 P l}{b \cdot h^2}.$$

Выражая $\sigma_{\max}$ через $\sigma_{1 \max}$, получим:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{1 \max} \cdot \frac{P}{P_1} \cdot \frac{h_1^2}{h^2} \cdot \frac{b_1}{b} \cdot \frac{l}{l_1}.$$

Но

$$\frac{h_1^2}{h^2} \cdot \frac{l}{l_1} = m^2 \cdot \frac{1}{m} = m = \frac{h_1}{h};$$

следовательно,

$$\sigma_{\max} = \sigma_{1 \max} \cdot \frac{P}{P_1} \cdot \frac{b_1}{b} \cdot m.$$

В общем случае при переходе от модели к детали следует руководствоваться соотношением:

$$\sigma_{\text{дет}} = \sigma_{\text{мод}} \cdot \frac{P_{\text{дет}}}{P_{\text{мод}}} \cdot \frac{b_{\text{мод}}}{b_{\text{дет}}} \cdot m, \quad (4)$$

где индексы «дет», «мод» указывают принадлежность соответствующих величин к детали или к модели;

P — действующая нагрузка;

b — толщина;

m — отношение линейных размеров модели к соответствующим размерам детали (масштаб детали).

Формула (4) выражает собою закон подобия напряженных состояний в модели и детали.

с) Экспериментальное исследование напряжений поляризационно-оптическим методом при помощи полярископа с белым светом. Определение оптической постоянной материала

Для определения значений разности главных напряжений требуется знать величину оптической постоянной K материала.

Последняя определяется путем испытания простейшей модели, в которой создается одноосное напряженное состояние. Используем для этой цели плоский призматический образец, который подвергается одноосному растяжению.

Растягивая образец из исследуемого материала (фиг. 57) и выбирая наиболее характерный для наблюдения цвет изохромы (обычно темно-зеленый или ярко-красный), устанавливают величину приращения разности главных напряжений $\Delta(\sigma_1 - \sigma_2)$, необходимую для увеличения порядка изохромы выбранного цвета на единицу (для растяжения

$$\sigma_1 = \frac{P}{F} \text{ и } \sigma_2 = 0).$$

Тогда, учитывая, что

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_2) = \Delta\sigma_1 = \frac{\Delta P}{F} = \frac{\Delta P}{bh}$$

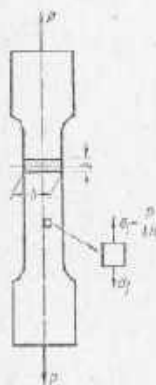
и $n = 1$,

из формулы (2) получаем

$$K = \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{\Delta P}{h}$$

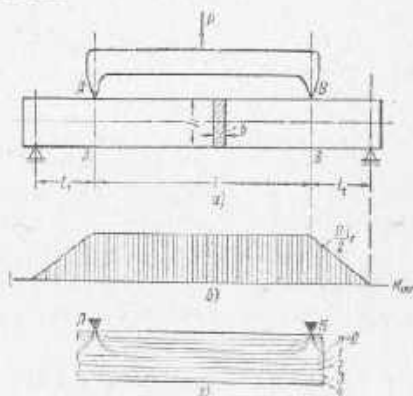
где ΔP — нагрузка при одноосном растяжении, соответствующая увеличению порядка изохромы данного цвета на одну единицу;

h — ширина образца.



Фиг. 57

Фиг. 57. Образец из оптически активного материала, испытываемый на растяжение, для определения величины оптической постоянной материала.



Фиг. 58

Фиг. 58. Схема экспериментальной установки для определения полихроматическим методом напряжений у балки при чистом изгибе:

а) схема установки; б) вид изгибающих моментов; в) картина полос

В целях уменьшения случайных ошибок определение величины K следует производить по результатам нескольких измерений, доводя порядок изохромы, примерно, до третьего.

При нагружении образца необходимо следить за тем, чтобы окраска изображения была равномерной по всему полю. Неравномерная окраска свидетельствует о том, что нагрузка приложена к образцу с эксцентриситетом. Измерения следует производить, когда оси подпрямков установлены, примерно, под углом 45° к оси образца, поскольку в этом случае изохромы получаются наиболее яркими.

ж) Экспериментальное определение напряжений при чистом изгибе и сопоставление полученных значений с расчетными данными.

На участке AB изгибаемого образца (фиг. 58, а, б) имеется место чистый изгиб. При нагружении образца соответствующая область изображения оказывается закрытой системой горизонтальных изохром (фиг. 58, в). Порядок изохром определяется отсчетом от темной (изотропной точки) нейтральной линии. Учитывая, что напряженное состояние является одноосным ($\varepsilon_{11} = 0$), из выражения (2) получим

$$|\varepsilon_1| = \frac{K}{b} \cdot n, \quad (5)$$

где n , как и прежде, — порядок изохромы.

Величина оптической постоянной материала K берется по результатам предыдущего опыта.

Формула (5) позволяет экспериментально определить величину напряжений в любой произвольной точке сечения.

Теоретическое значение напряжений определяется по известной формуле:

$$\sigma = \frac{M_1 y}{J_x} = \frac{12 P l_1}{b h^3} \cdot y,$$

где y — координата точки, отсчитываемая от нейтральной линии.

• При обработке результатов опыта необходимо помнить, что линейные размеры изображения пропорциональны размерам модели.

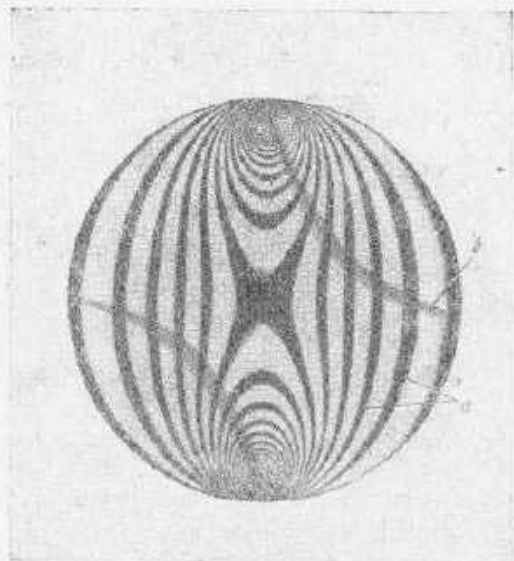
з) Исследование напряженного состояния диска, сжатого в диаметральной направлении

Целью испытания является определение направлений главных напряжений и построение системы двустат (траекторий главных напряжений), т. е. линий, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с главными напряжениями.

При просвечивании исследуемой модели на экране наблюдается семейство линий — изохром, а также отдельные темные линии — изоклины (фиг. 59, а — изохромы, б — изоклины).

Как уже было сказано, изоклина представляет собой геометрическое место точек, в которых направление одного из главных напряжений совпадает с направлением плоскости

поляризации. Следовательно, зная направление плоскости поляризации, можно сразу указать направление главных напряжений в точках модели, через которые проходит изоклина. Изоклину легко отличить от других линий на изображении модели, так как при поворачивании плоскости поляризации изоклины перемещаются по изображению, тогда как другие линии остаются на месте.



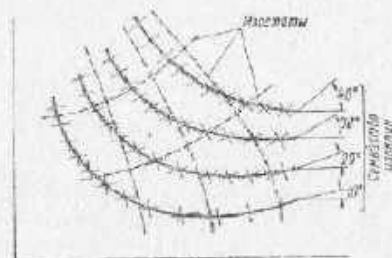
Фиг. 58. Картина изохром (линии а) и одна из изоклин (линия б) для диска, испытывающего асимметричную поляризацию.

Для определения направления главных напряжений и построения траекторий по всему полю изображения, надо постепенно поворачивать плоскость поляризации луча и фиксировать форму изоклин, соответствующих различным его положениям.

На фиг. 60 представлено семейство изоклин, полученных при различных положениях плоскости поляризации.

102

Зная, какому углу соответствует каждая изоклина, нетрудно получить траектории главных напряжений (изоэписты). Для этого надо в ряде точек каждой изоклины провести штрихи в направлении, совпадающем с плоскостью поляризации, а также в направлении, ему перпендикулярном. Эти штрихи являются касательными к искомым изоэпистам. Соединив штрихи плавными кривыми (см. пунктирные линии на фиг. 60), получим траектории главных напряжений (изоэписты).



Фиг. 60. Построение траекторий главных напряжений (изоэписты) по семейству изоклин.

РАБОТА 17 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА И ПРОВОЛОКИ

Технологическими пробами называются испытания материалов, цель которых — получение вспомогательных характеристик, определяющих пригодность данного материала для тех или иных условий работы. В большинстве случаев технологические пробы выполняются условными методами, дающими сравнимые результаты только при одинаковой форме и одинаковых размерах образцов; поэтому результаты испытаний обязательно должны сопровождаться указаниями, на каких образцах эти результаты были получены.

Ниже будут рассмотрены некоторые, наиболее распространенные, технологические пробы.

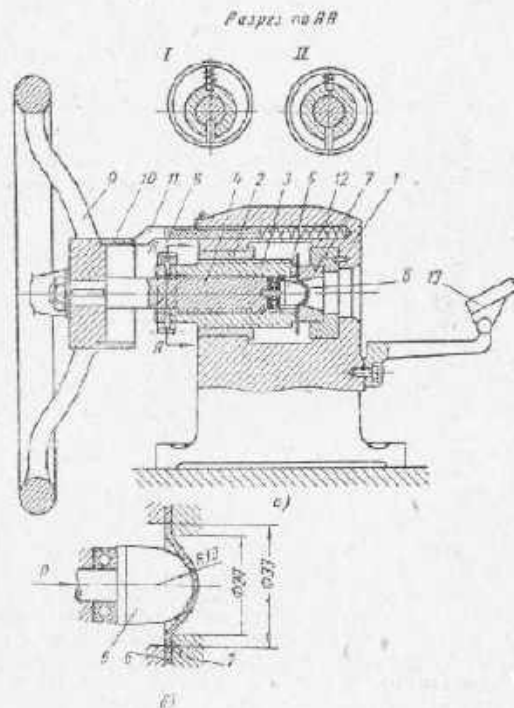
а) Испытание тонкого листового материала (толщиной до 1,5 мм) на выдавливание

Целью испытания является определение пластических свойств листового материала и установление пригодности его для штамповки. Испытание состоит в выдавливании лунки при помощи сферического пуансона (фиг. 61, б) с радиусом, равным 10 мм, и измерении ее глубины при появлении первых трещин.

Испытание производится на специальном приборе.

Схема прибора изображена на фиг. 61, а. В литой корпус 1 запрессована втулка 2, в которую ввертывается на резьбе стальная направляющая 3. Внутри последней также на резьбе ввернут винт 4 с пуансоном 5. Пуансон имеет форму, изображенную на фиг. 61, б, и закреплен на валу при помощи шариковой опоры, обеспечивающей ему свободное вращение. Испытуемый образец 6 закладывается между пуансоном и кольцевой каменной матрицей, опирающейся на корпус 1, и прижимается направляющей втулкой 3. Для того, чтобы зажать образец, стопор 8 сдвигается в положение I (см. разрез по АА), при этом направляющая втулка 3 и вал 4 жестко соединяются между собой. Вращая махо-

вик 9, заворачивают втулку 3 до тех пор, пока образец не будет плотно зажат. После этого стопор 8 переводится в положение II и вал расцепляется со втулкой. Переключение стопора осуществляется путем смещения наружного кольца в радиальном направлении.



Фиг. 61. Прибор для испытания тонкого листового материала на выдавливание.

При дальнейшем вращении маховика вал 4 ввертывается во втулку и заставляет пуансон 5 вдавливать в испытуемый материал. Продольное перемещение пуансона измеряется по шкале 10 с помощью указателя 11. Цена деления шкалы составляет 0,1 мм. Целые миллиметры отсчитываются по

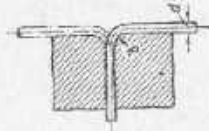
продольному перемещению указателя 11, который прижимается к краю шкалы пружиной 12.

При вдавливании пуансона в испытуемый материал необходимо следить за состоянием поверхности материала. Наблюдение проводится при помощи зеркала 13. Вдавливание прекращается при появлении на поверхности листового материала первых трещин. Глубина вдавливания, считанная после этого по шкале, и является критерием пластичности листового материала.

б) Проба на перегиб (по ГОСТ 1579—42)

Проба предназначена для определения способности материала выдерживать повторные изгибы в противоположных направлениях. Пробы применяются для круглой и фасонной проволоки с площадью поперечного сечения до 120 мм² и листового материала толщиной до 5 мм.

Испытание заключается в повторном изгибе образца, зажатого в специальные тиски со скругленными цилиндрическими губками (фиг. 62). Характеристикой, которая количе-



Фиг. 62. Закрепление проволоки для испытания на гиб с перегибом.

ственно отражает пластичность материала, является число полных (на 180°) перегибов образца до его разлома. Для получения сравнимых между собой результатов испытаний образцов разных размеров между размерами поперечного сечения образцов, например, диаметром d и радиусом R закругления губок, установлены определенные соотношения, оговоренные стандартом.

а) Испытание проволоки на скручивание (по ГОСТ 1545—42)

Испытание проволоки на скручивание производится для оценки ее пластичности.

Характеристикой пластичности является число полных оборотов ведущего захвата испытательной машины (фиг. 63), соответствующих разрушению образца.

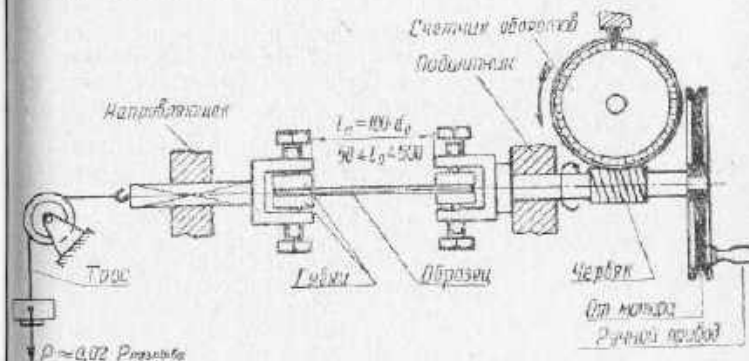
Кроме того, при этом испытании выявляется неоднород-

ность металла и наличие поверхностных дефектов, о которых судят по виду излома и состоянию поверхности разрушенного образца.

Такого рода испытанию подвергается проволока диаметром до 10 мм.

Для проведения испытания на скручивание в СССР в настоящее время выпускаются одностанинные машины, отличающиеся в основном только размерами: К-1, К-2 с ручным и механическим приводами.

Устройство и принцип действия этих машин видны из схемы, представленной на фиг. 63.



Фиг. 63. Схема прибора для испытания проволоки на скручивание.

Согласно ГОСТ 1545—42, величина предварительного натяжения P должна составлять $\approx 2\%$ от разрушающей нагрузки при растяжении проволоки ($P = 0,02 R_{разгн}$). Это натяжение необходимо для предотвращения искривления образца в процессе скручивания.

Расчетная длина образца l_0 (расстояние между губками) выбирается равной $100d_0$, где d_0 — диаметр проволоки ($l_0 = 100d_0$).

Если по приведенной зависимости числовое значение l_0 получается менее 30 мм или более 500 мм, то длину l_0 принимают соответственно равной $l_0 = 30$ мм или $l_0 = 500$ мм. Скорость скручивания должна быть:

а) при $d_0 \leq 3$ мм примерно 60 об/мин,

б) при $d_0 > 3$ мм примерно 30 об/мин.

ГОСТ 1545—42 предусматривает и иные методы проведения опыта на скручивание, которые здесь не приводятся.

РАБОТА 18 ИСПЫТАНИЕ НА УДАР

Определение ударной вязкости (по ГОСТ 2415—44)

Известно, что при динамических нагрузках сопротивляемость материалов разрушению иная, чем при статическом нагружении. Поэтому материал деталей, работающих в условиях динамических ударных нагрузок, должен быть подвергнут испытанию на удар.

В настоящее время широко распространен только один вид испытания на удар — так называемая ударная проба. Это испытание заключается в том, что образец материала подвергается разрушению изгибающим ударом. При этом определяется количество энергии, израсходованной на разрушение. Критерием, определяющим способность материала противостоять удару, является так называемая «удельная ударная вязкость» a , равная отношению работы A кДж, затраченной на разрушение образца, к площади поперечного сечения F см², по которому произошло разрушение

$$a = \frac{A}{F} \frac{\text{кДж}}{\text{см}^2}$$

Ввиду того, что удельная ударная вязкость зависит не только от свойств испытуемого материала, но и от размеров и формы образцов, испытания необходимо производить на стандартных образцах (см. ГОСТ 1524—42), обеспечивающих получение сравнимых друг с другом результатов.

В настоящее время наибольшее распространение получил образец, изображенный на фиг. 64.

При испытании образец укладывается на две жесткие опоры и подвергается удару по середине. Благодаря наличию надреза со стороны, обратной направлению удара, пластические деформации сосредотачиваются в области ослабленной надрезом; это обеспечивает получение высоких скоростей деформации и ставит испытуемый материал в условия, наиболее характерные для ударных нагрузок.

Описанное испытание обычно производится на маятниковых копрах.

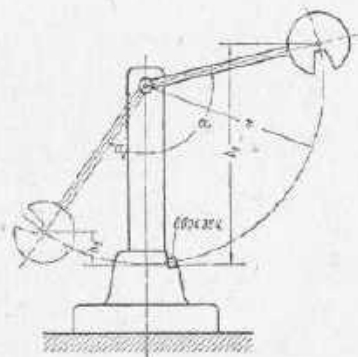
Принципиальная схема маятникового копра изображена на фиг. 65.



Фиг. 64. Эталон образца по ГОСТ 1524—42 для определения ударной вязкости.

Тяжелый маятник падает с некоторой высоты h_1 и ударяет по образцу, лежащему на двух опорах. Некоторая часть энергии маятника расходуется на разрушение образца, а оставшаяся энергия заставляет маятник подняться с противоположной стороны на высоту h_2 . Зная вес маятника и измерив высоты h_1 и h_2 , можно вычислить энергию, израсходованную на разрушение образца. Разделив ее на площадь поперечного сечения, получим значение удельной ударной вязкости.

Ниже приведено описание маятникового копра на 15 кДж завода ГЗИП.

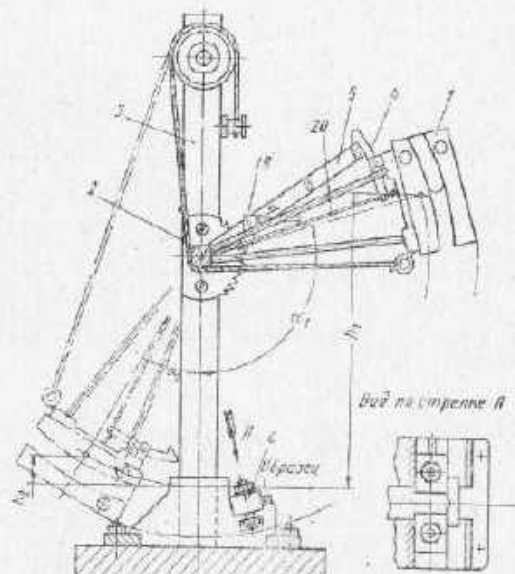


Фиг. 65. Принципиальная схема маятникового копра.

Основные данные копра:

1. Наибольшая энергия маятника 15 кДж.
2. Величина произведения веса маятника Q на расстояние r от оси вращения маятника до его центра тяжести $Qr \approx 10$ кДж.
3. Расстояние от оси вращения до центра удара ~ 700 мм.

Конструктивная схема копра изображена на фиг. 66 и 67. (нумерация деталей на обеих фигурах единая). Плоский

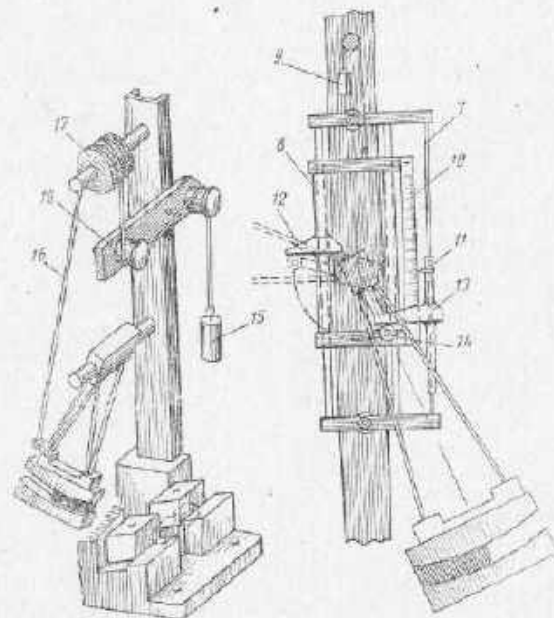


Фиг. 66. Схема маятинного копра.

стальной маятник 1 подвешен на оси 2, укрепленной при помощи шариковых подшипников в станине 3. В средней части маятника сделан вырез, в который вставлен закаленный нож.

Перед началом испытания маятник поднимается в верхнее положение, зацепляется защелка 4 за перекладину рамы 5 и запирается предохранителем во избежание случай-

ного падения (на фиг. 66 предохранитель не показан). Испытуемый образец укладывается на опоры 6, расстояние между которыми при использовании стандартного образца по ГОСТ 1524-42 устанавливается равным 4 см. После этого предохранитель выключается, защелка 4 освобождается; маятник падает и разрушает образец. Освобождение защелки



Фиг. 67. Схема устройства для замера разности высот ($h_1 - h_2$) начального и конечного положения центра тяжести маятника.

производится при помощи шпура 20. В момент удара большая часть энергии маятника расходуется на разрушение образца; оставшаяся часть энергии затрачивается на подъем маятника на некоторую высоту, по другую сторону от оси.

Обозначив через h_1 высоту, на которой находится центр тяжести маятника до удара, и через h_2 — высоту, на которую

он поддается после удара, получим следующее выражение для энергии, затраченной на разрушение образца (фиг. 65)

$$A = Q(h_1 - h_2),$$

где Q — вес маятника.

Эту энергию можно также выразить через начальный α_1 и конечный α_2 углы отклонения маятника от вертикали

$$A = Qr(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1),$$

где r — расстояние от оси вращения маятника до его центра тяжести.

Приведенные формулы показывают, что энергия, затраченная на разрушение образца, может быть определена путем замера высот h_1 и h_2 или углов отклонения от вертикали α_1 и α_2 .

Описываемый копёр снабжен специальным устройством (фиг. 67), позволяющим находить непосредственно разность $(h_1 - h_2)$, причем шкала 10, по которой производится отсчет, градуирована в кГм энергии, затраченной на разрушение образца.

По направляющим 7, укрепленным неподвижно на станине копра, скользит рамка 8 со шкалой 10 и указатель шкалы 11. На рамке 8 и указателе 11 прикреплены поперечные планки 12 и 13. При подъеме маятника в верхнее положение ролик 14, соединенный жестко с маятником, упирается в планку 12 и поднимает рамку со шкалой на величину, пропорциональную высоте h_1 . В этом положении шкала удерживается грузом 9. После падения и удара об образец маятник поднимается по другую сторону от оси на высоту h_2 , при этом ролик 14, упиравшись в планку 13, поднимает указатель шкалы 11 на величину, пропорциональную высоте h_2 . Указатель удерживается в этом положении силами трения. В результате, деление шкалы, находящееся против указателя, непосредственно укажет величину энергии A .

На той же фиг. 67 изображено устройство тормоза, удерживающего полторные качания маятника. Тормоз состоит из груза 15, подвешенного на шнуре 16, конец которого прикреплен к маятнику. Шнур 16 перекинут через неподвижный барабан 17 и ролики 18 таким образом, что при подъеме маятника после разрушения образца груз свободно опускается и не препятствует движению маятника; при обратном же движении маятника силы трения шнура о барабан и ролики тормозят маятник и устраняют качение.

Для того, чтобы испытывать образцы разной формы и размеров, высоту h_1 необходимо изменять. Это достигается соответствующей установкой рамы 5 (фиг. 65), которая может быть закреплена в любом положении при помощи собачки 19. Выбор высоты h_1 производится исходя из того, чтобы потенциальная энергия маятника была достаточна для разрушения образца, но не была чрезмерно большой, так как в последнем случае точность измерения энергии, затраченной на разрушение образца, сильно понижается.

При испытании нормальных образцов рама 5 устанавливается в самое верхнее положение, при котором потенциальная энергия маятника равна 15 кГм.

Соотношение
между числами твердости по Бриггелю и по Роквеллу

Диаметр дунки <i>d</i> мм	По Бриггелю*)		По Роквеллу		По Бриггелю*)		По Роквеллу	
	H_B	R_C	H_B	R_C	Диаметр дунки <i>d</i> мм	H_B	R_C	H_B
2,20	750	61	—	—	3,40	312	33	—
2,25	745	63	—	—	3,45	311	32	—
2,30	712	61	—	—	3,50	302	31	—
2,35	682	59	—	—	3,55	293	30	—
2,40	653	59	—	—	3,60	285	29	—
2,45	627	57	—	—	3,65	277	28	—
2,50	601	55	—	—	3,70	269	27	—
2,55	575	55	—	—	3,75	262	26	—
2,60	555	53	—	—	3,80	255	24	—
2,65	531	52	—	—	3,85	248	23	—
2,70	514	51	—	—	3,90	241	22	102
2,75	495	50	—	—	3,95	235	21	101
2,80	477	49	—	—	4,00	229	19	100
2,85	461	48	—	—	4,05	223	—	99
2,90	444	47	—	—	4,10	217	—	98
2,95	429	45	—	—	4,15	212	—	97
3,00	415	43	—	—	4,20	207	—	95
3,05	401	42	—	—	4,25	201	—	94
3,10	388	41	—	—	4,30	197	—	93
3,15	375	40	—	—	4,35	192	—	92
3,20	363	39	—	—	4,40	187	—	91
3,25	352	38	—	—	4,45	183	—	90
3,30	341	36	—	—	4,50	179	—	90
3,35	331	35	—	—	4,55	174	—	89

*) $P = 3000 \text{ кг}$; $D = 10 \text{ мм}$

РАБОТА 19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ

Твердостью называется способность материала сопротивляться выдвиганию в него другого, не получающего остаточных деформаций тела.

Определение твердости деталей, работающих в качестве режущего инструмента или находящихся в условиях контактных напряжений, имеет особо важное практическое значение.

Определение твердости может производиться различными способами, основанными на одном из следующих принципов:

1) измерение величины отпечатка, полученного при вдавливании в поверхностный слой испытуемого материала твердого тела;

2) измерение ширины царапины, полученной при царапании поверхности испытуемого материала твердым острым;

3) измерение высоты отскоки шара твердого упругого тела, падающего на поверхность испытуемого материала.

Рассмотрим способы определения твердости по первому принципу и соответствующие испытательные приборы, применяемые при этом.

а) Определение твердости по Бриггелю

Этот способ измерения твердости заключается в том, что в поверхностный слой испытуемого материала вдавливаются стальной закаленный шарик (фиг. 68). После выдерживания шарика под нагрузкой в течение некоторого времени, достаточного для стабилизации процесса деформирования испытуемого образца, и последующей разгрузки, на поверхности образца остается дунка. Характеристикой твердости является так называемое «число твердости по Бриггелю» H_B , равное частному от деления наибольшей нагрузки на площадь сферической поверхности дунки:

$$H_B = \frac{P}{F} \frac{\pi l}{\text{мм}^2}$$

Таблица 1 (продолжение)

По Бринеллю ^{a)}		По Роквеллу		По Бринеллю ^{a)}		По Роквеллу	
Диаметр шарики d мм	H_B	R_C	R_B	Диаметр шарики d мм	H_B	R_C	R_B
4,60	170	—	88	5,80	102	—	63
4,65	167	—	87	5,85	101	—	62
4,70	163	—	86	5,90	99,2	—	61
4,75	159	—	85	5,95	97,3	—	60
4,80	156	—	84	6,00	95,5	—	59
4,85	152	—	83	6,05	93,7	—	58
4,90	149	—	82	6,10	92,0	—	57
4,95	146	—	81	6,15	90,3	—	56
5,00	143	—	80	6,20	88,7	—	54
5,05	140	—	80	6,25	87,1	—	52
5,10	137	—	78	6,30	85,5	—	50
5,15	134	—	77	6,35	84,0	—	49
5,20	131	—	76	6,40	82,5	—	47
5,25	128	—	75	6,45	81,0	—	45
5,30	126	—	74	6,50	79,6	—	43
5,35	123	—	73	6,55	78,2	—	42
5,40	121	—	72	6,60	76,8	—	41
5,45	118	—	71	6,65	75,4	—	40
5,50	116	—	70	6,70	74,1	—	39
5,55	114	—	68	6,75	72,8	—	37
5,60	111	—	67	6,80	71,6	—	36
5,65	109	—	66	6,85	70,4	—	33
5,70	107	—	65	6,90	69,2	—	31
5,75	105	—	64	7,00	68,0	—	29

^{a)} $P = 3000$ кг; $D = 10$ мм

Выражая площадь сферического сегмента через диаметр отпечатка d и диаметр давливаемого шарика D , получим

$$H_B = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$$

При стандартных испытаниях сила $P = 3000$ кг, а диаметр шарика $D = 10$ мм. Поэтому число твердости является только функцией диаметра отпечатка и практически опре-



Фиг. 68. Система
опыта при опре-
делении твердости
по способу Бри-
нелля.

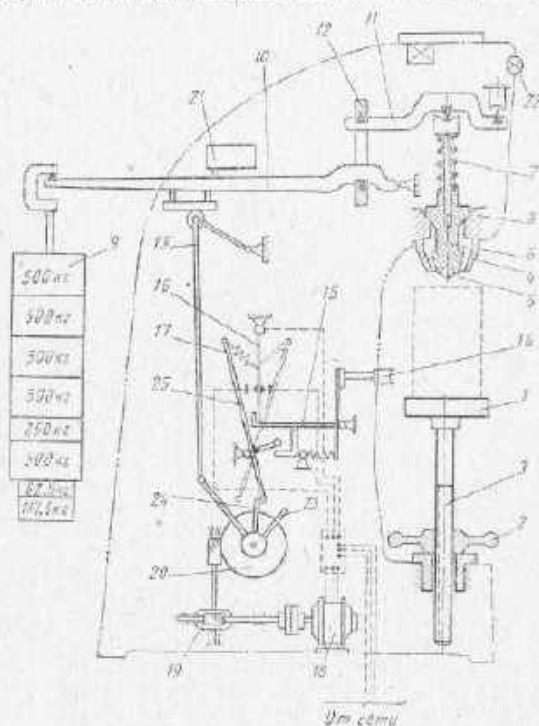
делается в зависимости от последнего по специальным таб-
лицам (см. табл. 1). Время выдерживания образца под на-
грузкой для черных металлов составляет 10–30 сек., для
большинства цветных металлов 30 сек.

Механический пресс ТШ-2 для испытания на твердость по
Бринеллю схематично показан на фиг. 69.

Испытуемый образец устанавливается на столе 1 и под-
водится под шарик посредством маховика 2, который при
вращении наворачивается на винт 3. Образец должен быть
поднят до упора в ограничительную втулку 4, тогда сталь-
ной шарик 5 вместе с обоймой 6 несколько приподнимется,
сжимая пружину 7, а обойма 6 отделяется от конической
направляющей втулки 8. Благодаря этому устраняются силы
трения о направляющую втулку, могущие повлиять на ве-
личину рабочей нагрузки.

Нагружение образца производится при помощи грузов 9,
подвешенных к концу рычага 10 посредством рычажной си-
стемы, состоящей из рычагов 10 и 11, соединенных сери-
гой 12. Вес грузов передается шарку, будучи увеличе-
ным в 50 раз. На каждом грузе указана величина рабо-

чей нагрузки, создаваемой этим грузом. Весь комплект гирь дает возможность создавать рабочую нагрузку в 3000 кг, 750 кг и 187,5 кг, что соответствует трем предусмотренным стандартам диаметра шарика 10 мм, 5 мм и 2,5 мм.



Фиг. 60. Схема механического пресса Вьяноли.

В нерабочем положении рычаг 10 поддерживается кривошипным механизмом 13, который воспринимает вес грузов 9. Для того, чтобы произвести нагружение образца, достаточно нажать на кнопку 14. При этом приходит в действие автоматическое устройство, которое обеспечивает нагружение образца, поддержание образца под нагрузкой в

течение определенного, установленное стандартом времени, разгрузку образца и автоматическое выключение прибора.

Действительно, при нажатии на кнопку 14 собачка 15 освобождает контактный рычаг 16; последний под действием пружины 17 отклоняется влево и замыкает цепь электродвигателя 18. Электродвигатель начинает работать и через двухступенчатый червячный редуктор 19 приводит в медленное вращение по направлению против часовой стрелки колесо 20. При этом кривошип 13 движется вниз и отходит от рычага 10. В результате вес грузов начинает передаваться на образец.

В момент освобождения рычага микровыключатель 21 замыкает цепь контрольной лампы 22, которая продолжает гореть в течение времени, пока образец находится под нагрузкой.

На одной оси с колесом 20 насажены два переставных упора 23 и 24. При вращении колеса упор 23 находит упор на коромысло 25 и переносит его в положение, показанное пунктиром. При этом контактный рычаг 16 под действием пружины 17 перескакивает слева направо и переключает фазы электродвигателя. В результате колесо 20 начинает вращаться в обратном направлении: кривошип 13 начинает двигаться вверх, поднимает снизу рычаг 10 и снимает с образца нагрузку. После того, как нагрузка снята, второй упор 24 переводит коромысло 25 снова в прежнее положение (показанное сплошными линиями), что вызывает поворот контактного рычага 16 влево. В этом случае, однако, рычаг 16 поворачивается только до нейтрального положения, так как при обратном движении он удерживается собачкой 15, и электродвигатель выключается.

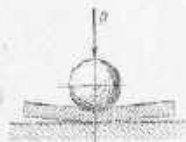
Одновременно с выключением электродвигателя прибор приводится в состояние готовности для следующего испытания.

Регулирование времени выдерживания образца под нагрузкой производится перестановкой упоров 23 и 24, которые в нужном положении закрепляются зажимной гайкой.

После разгрузки образца по диаметру оставшейся на его поверхности лунки определяют число твердости так, как это было описано выше.

Определение твердости по Бринеллю весьма распространено благодаря простоте измерений и стабильности результатов. Следует отметить, что для получения достаточно точных результатов необходимо, чтобы расстояние от центра лунки до края образца или до соседней лунки было не менее 10 мм. Толщина образца также не должна быть слишком малой.

так как в противном случае образец будет искривляться (фиг. 70), при диаметре шарика, равном 10 мм, наименьшая допустимая толщина образца составляет 6 мм. При меньшей толщине материала можно производить измерения, при-



Фиг. 70. Тонкий образец искривляется, при определении его твердости способом Роквелла.

меня шарика меньшего диаметра и соответственно уменьшив нагрузку так, чтобы соблюдалось численное соотношение $P=30D^2$. В приведенной формуле P кг, D мм. При толщине образца 3–5 мм шарик $D=5$ мм, нагрузка $P=750$ кг; при толщине 1,5–3 мм шарик $D=2,5$ мм, нагрузки $P=187,5$ кг.

Однако в последнем случае удобнее пользоваться другими способами определения твердости.

б) Определение твердости по Роквеллу

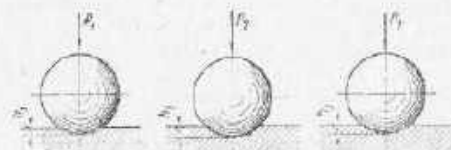
Прибор для определения твердости по Роквеллу, именуемый иногда дюрометром, основан на принципе вдавливания в поверхностный слой испытуемого материала, под действием определенной статической нагрузки, стального закаленного шарика диаметром $\frac{1}{16}$ " (1,59 мм) или алмазного конуса с углом заострения в 120° , с последующим измерением глубины полученного отпечатка. Глубина отпечатка, являющаяся критерием твердости, обратно, тем меньше, чем выше твердость испытуемого материала.

Числа на шкале индикатора, измеряющего глубину отпечатка, расположены в обратном порядке с тем, чтобы числа твердости по Роквеллу с увеличением твердости возрастали.

Для того, чтобы устранить неточности, связанные с наличием неровностей поверхности испытуемой детали и зазором между частями прибора, возможных при отсутствии нагрузки, прикладываются две следующие друг за другом нагрузки: начальная P_1 и основная P_2 .

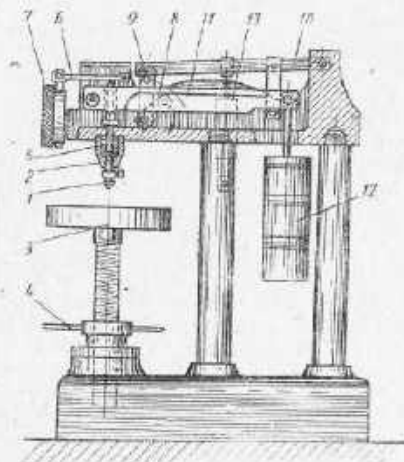
О твердости материала судят по разности между глубиной лунки h_1 , при действии начальной нагрузки P_1 , и глуби-

ной лунки h_2 (фиг. 71), образованной после приложения основной нагрузки P_2 и последующей разгрузки до величины начальной силы P_1 . Величины этих нагрузок в случае применения стального шарика составляют $P_1=10$ кг и $P_2=100$ кг, а в случае алмазного конуса $P_1=10$ кг и $P_2=150$ кг.



Фиг. 71. Схема опыта, при определении твердости способом Роквелла по шкале „В“.

Нижне приводится описание пресса Роквелла (дюрометра) завода ГЗИП. Схема этого прибора изображена на фиг. 72.



Фиг. 72. Схема пресса Роквелла

Стальной закаленный шарик (или алмазный конус) закреплен в обойме 1, насаженной на стержень 2.

Испытуемый образец устанавливается на стол 3 и вращением маховика 4 подводится под шарик. После соприкосновения образца с шариком стол поднимают выше, заставляя пружину 5 сжиматься; при этом верхний конец стержня 2 через рычаг 6 перемещает измерительную пошку индикатора 7 и вызывает вращение стрелок. Когда малая стрелка индикатора найдет положение, совпадающее с красной точкой на циферблате, подъем стола с образцом прекращают: в этот момент сила, развиваемая пружиной 5, составляет 10 кг. Циферблат большой стрелки индикатора имеет две шкалы: красную и черную. При сравнительно невысокой твердости испытание ведут с помощью шарика; в этом случае надлежит пользоваться красной шкалой (имеющей индекс «В», от английского слова «Ball» — шарик). При высоких значениях твердости используют алмазный конус и отчет производят по черной шкале (имеющей индекс «С», от английского слова «Cone» — конус). После того, как начальное усилие в 10 кг создано (конец малой стрелки индикатора совпадает с отметкой), необходимо наружную обойму индикатора со шкалами повернуть так, чтобы треугольная черная метка на циферблате (расположенная против нуля черной шкалы и деления 30 красной шкалы) совпала с большой стрелкой. Теперь можно приложить основную нагрузку. Для этого поворачивают ручку 8 по направлению, указанному на фиг. 72 стрелкой; планка 9, поддерживающая рычаг 10, также поворачивается и освобождает нагружающую систему, состоящую из рычагов 10 и 11. При этом грузы 12, висевшие на конце рычага 11, заставляют его надавить на стержень 2. При действии основной нагрузки рычаги 10 и 11 расходятся, что устраняет действие побочных усилий из рычаг 11. Величина грузов и плечи рычага подобраны так, что действующее усилие увеличивается при двух грузах до 100 кг, а при трех грузах — до 150 кг. Под действием усилия P_0 шарик или конус внедряются в испытуемую поверхность. Для того, чтобы устранить возможность появления динамических нагрузок и создать чисто статическое нагружение, к рычагу 10 присоединен масляный амортизатор 13 (указан на чертеже пунктиром), представляющий собой гидравлический цилиндр, заполненный маслом и имеющий в паре малое отверстие. При перемещении рычагов масло перетекает через отверстие из одной полости в другую и создает сопротивление движению тем больше, чем выше скорость. Показание индикатора в момент действия основного усилия не представляет интереса, так как в него входят упругие деформации частей прибора и испытуе-

емого образца; поэтому для того, чтобы прочесть показание, необходимо снять основную нагрузку, оставив лишь первоначальное 10 кг. Снятие нагрузки производится обратным поворотом ручки 8. После этого число твердости может быть прочитано по показанию большой стрелки на красной шкале (при испытании шариком) или на черной шкале (при испытании алмазным конусом).

Описанная схема нагружения образца несколько упрощена. В действительности при приложении основной нагрузки пружина 5 выключается, что дает большую уверенность в правильности значения приложенной нагрузки.

Если твердость испытуемого материала велика и отчет по шкале R_0 (красная шкала) превосходит 100, то необходимо перейти на испытание алмазным конусом. В этом случае испытание производится точно так же, как было описано выше, с той лишь разницей, что величина основного груза должна быть равна 150 кг (на рычаге должны быть установлены все три груза). Число твердости при испытании алмазным конусом отсчитывается по шкале R_c (черная шкала). Наименьшее значение твердости R_c , при котором можно пользоваться алмазным конусом, равно 20 по черной шкале.

Перевод полученных чисел твердости по Роквеллу на твердость по Бринеллю и обратно производится при помощи приведенной ранее табл. 1.

Прибор Роквелла является одним из лучших приборов для измерения твердости. Его достоинства — широкий диапазон измеряемых твердостей, малая величина оставаемого на детали следа (глубина — не более 0,25 мм при материале малой твердости), простота и удобство в обращении, а также возможность измерения твердости тонких образцов.

Часть II

ОПИСАНИЕ МАШИН И ПРИБОРОВ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем разделе рассмотрено устройство машин и приборов, применяемых при статических испытаниях материалов.

В зависимости от вида нагружения испытательные машины разделяются на следующие группы:

- а) машины для испытаний на растяжение (разрывные машины);
- б) машины для испытаний на сжатие (прессы);
- в) универсальные машины для испытаний на растяжение, сжатие и изгиб;
- г) машины для испытаний на кручение.

Все машины для статических испытаний материалов имеют следующие основные механизмы:

- 1) механизм для деформирования испытуемого образца (силовоозбудитель);
- 2) силоизмерительный механизм, служащий для измерения усилий, возникающих в процессе деформации образца.

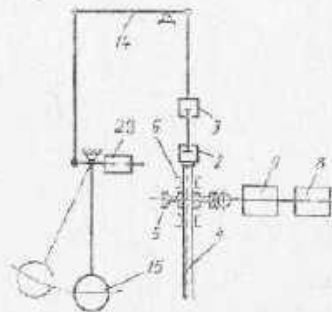
Некоторые машины дополнительно оснащаются механизмом для автоматической записи диаграммы испытаний в координатах «перемещение—нагрузка».

Необходимо обратить внимание на то, что при стандартных механических испытаниях материалов независимой переменной является деформация образца (перемещение); нагрузка же определяется как функция от деформации (перемещения).

Нагружающие устройства (точнее, механизмы, служащие для деформирования образца) бывают двух видов: механические и гидравлические.

В устройствах механического типа (см., например, фиг. 73) основными деталями являются грузовой винт и гай-

ка. Гайка винта опирается на плиту и поэтому не может перемещаться в осевом направлении; благодаря этому при ее вращении винт получает поступательное движение, вызывающее деформирование образца.



Фиг. 73. Принципиальная схема машины ИМ-12А

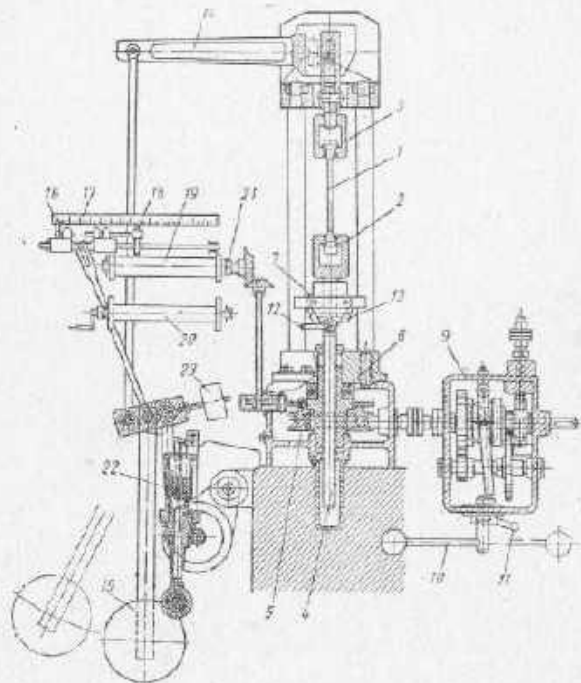
В механизмах гидравлического типа основной частью является гидравлический цилиндр с плунжером. В этом случае деформирование образца достигается за счет вытеснения масла в рабочий цилиндр.

Силовизмерители испытательных машин, предназначенные для определения рабочего усилия в испытуемом образце, бывают трех видов: механические — маятниковые, механические — рычажные и гидроманометрические.

Маятниковые силоизмерители имеют силоизмерители первого типа (см., например, фиг. 73). В этих силоизмерителях рабочее усилие передается на тяжелый маятник и вызывает отклонение последнего от вертикального положения. Чем больше величина нагрузки, тем больше отклонение маятника. С маятником соединена стрелка, указывающая по шкале величину рабочей нагрузки.

Маятниковые силоизмерители обладают следующими преимуществами: они работают автоматически, не требуя вмешательства экспериментатора; могут с успехом применяться в машинах как с механическим, так и с гидравлическим нагружающим устройством. В последнем случае усилие, воздействующее на маятник, обычно создается при помощи вспомогательного гидроцилиндра, соединенного параллельно с рабочим цилиндром (давление, одинаковое в обоих гидро-

планах, пропорционально измеряемому усилию) (см. например, фиг. 88). К маятниковому силомерителю удобно может быть присоединен диаграммный механизм наиболее простой и надежной конструкции (фиг. 74).



Фиг. 74. Схема машины НМ-12А

В силомерителях рычажного типа (фиг. 92) рабочее усилие передается на рычаг, несущий на себе уравновешивающий груз. Чем больше измеряемое усилие, тем дальше от точки опоры надо отодвинуть груз. Отсчет величины усилия производится по делениям, нанесенным на рычаге.

Недостатком этого силомерителя является то, что в процессе опыта экспериментатор все время должен следить за равновесием рычага и по мере надобности перемещать груз.

В некоторых машинах этот недостаток устраняется применением специальной системы, которая реализует на наружные рычаги и автоматически передвигает груз.

В силомерителях гидравлического типа (фиг. 84) величина измеряемого усилия определяется по высоте столба ртути в манометрической трубке. Силовмерители этого типа можно встретить только на старых машинах; на современных машинах гидравлические силомерители не применяются вследствие значительных неудобств, связанных с использованием ртути, а также в связи с вредностью ее паров для организма человека.

Диаграммные приборы испытательных машин, служащие для автоматического вычерчивания графика зависимости нагрузки от деформации образца, состоят обычно из цилиндрического барабана, к которому прикрепляется бумага для записи диаграммы, и караванша, соединенного с силомерителем. Поворот барабана в процессе испытания пропорционален степени деформации образца, а перемещение караванша пропорционально нагрузке. В результате на бумаге вычерчивается кривая в координатах «перемещение—нагрузка».

В зависимости от размеров и механических свойств испытываемых образцов применяются машины с различной величиной максимальной нагрузки. Если для всех испытаний применять одну и ту же испытательную машину, то при испытании малых образцов относительная погрешность измерений будет недопустимо большой. Это приводит к необходимости иметь ряд машин, одинаковых по назначению, но с различной величиной максимальной нагрузки.

Кроме того, каждая машина обычно имеет несколько шкал с различной ценой деления. Настройка машины на требуемый диапазон измерения (на требуемую шкалу) производится изменением количества грузов, укрепляемых на маятнике (или на рычаге, если силомеритель является рычажным).

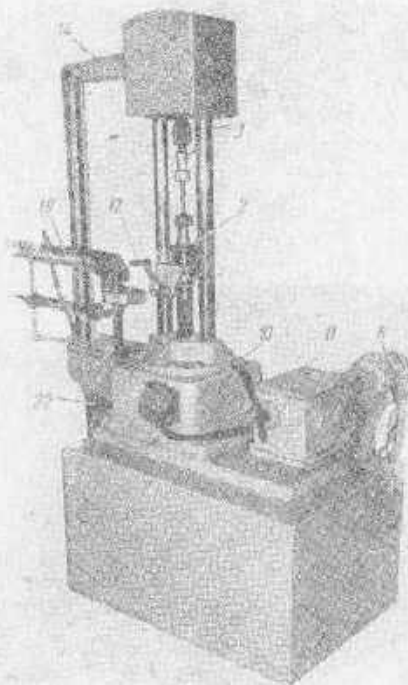
Далее рассматриваются конструкции ряда машин, используемых в лабораториях испытаний материалов при прохождении студентами лабораторного практикума.

МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ НМ-12А конструкции ЦНИИТМАШ (Максимальное растягивающее усилие 12 т)

Принципиальная и конструктивная схема машины, а также ее общий вид представлены соответственно на фиг. 73, 74 и 75. (На всех трех фигурах нумерация деталей единая).

Машина имеет следующие основные механизмы:

- 1) нагружающее устройство — винтового типа, служащее для растягивания испытуемого образца;
- 2) силовой измеритель — рычажно-маятниковый типа, служащий для измерения усилия, действующего на образец;



Фиг. 75. Общий вид машины ИМ-12А.

- 3) диаграммный прибор, автоматически записывающий диаграмму растяжения в координатах «удлинение — нагрузка».

Испытуемый образец 1 закрепляется в захватах 2 и 3 (фиг. 74). В процессе испытания нижний захват получает поступательное движение вниз, благодаря чему образец растягивается.

Нагружающий механизм расположен в литой чугунной коробке, являющейся основанием машины. Он состоит из грузового винта 4 и червячного колеса 5, служащего одновременно тайкой грузового винта. Червячное колесо 5 опирается на подшипник 6, не позволяющий ему перемещаться в осевом направлении. Во время рабочего хода червячное колесо приводится во вращение от электродвигателя 8 (фиг. 73) через редуктор 9 и сообщает винту 4 поступательное движение вниз. Чтобы винт не мог при этом вращаться, он закрепляется стопорным штифтом 7 (фиг. 74).

Рукоятка 10 редуктора 9 может иметь три положения: при вертикальном положении — привод выключен; при положении «влево» — быстрый ход; при положении «вправо» — медленный ход.

В каждом из положений рукоятки закрепляется стопором 11. При переключении редуктора стопор необходимо освободить. Фрикционная муфта редуктора позволяет производить переключение также и на ходу. Выключение электродвигателя производится посредством рубильника, расположенного на передней стороне основания машины. Рукоятка рубильника также имеет три положения:

- при горизонтальном положении электродвигатель выключен;
- положение «вниз» соответствует рабочему ходу (ход вниз);
- положение «вверх» — обратному ходу (ход вверх).

Однако пользоваться электродвигателем для обратного хода не следует. Возвращение нижнего захвата в исходное положение после разрыва образца, а также перемещение захвата вверх или вниз при установившемся образце может быть осуществлено при помощи ручки 12, соединенной с грузовым винтом 4 посредством конической зубчатой передачи 13. Для того, чтобы опустить или поднять нижний захват, следует вынуть стопорный штифт 7 и с помощью ручки 12 привести грузовой винт 4 во вращение.

Силовой измеритель машины ИМ-12А устроен следующим образом: рабочее усилие передается от верхнего захвата 3 через рычаг 14 на маятник 15. Чем больше сила, растягивающая образец, тем сильнее отклоняется маятник от вертикального положения. С маятником соединен указатель силоиз-

мерителя 16, перемещающийся вдоль шкалы 17. Шкала проградуирована в тоннах; 1 мм шкалы соответствует 33,33 кг.

Одновременно с указателем перемещается и каретка 18, скользящая вдоль образующей барабана диаграммного механизма 19. В процессе испытания барабан 19 поворачивается пропорционально перемещению нижнего (ведущего) захвата, и на прикрепленной к барабану бумаге высчерчивается диаграмма испытания в координатах «удлинение—нагрузка».

По оси удлинений 100 мм на диаграмме соответствуют 1 мм удлинения образца (100:1). По оси сил 1 мм соответствует 33,33 кг.

При использовании дополнительного редуктора в кинематической цепи привода барабана (этот редуктор на схеме не указан) масштаб по оси удлинений может быть уменьшен до 10:1.

Ввиду того, что за время испытания одного образца барабан 19 успевает сделать несколько оборотов, бумага для записи диаграммы не просто прикрепляется к барабану 19, а наливается на вспомогательный валок 20 и прижимается к барабану 19 резиновыми роликами.

Отключение барабана диаграммного механизма от центрального привода производится с помощью муфты 21, для размыкания которой пранный диск муфты надо сдвинуть вдоль оси.

Необходимо отметить, что диаграммный прибор рассматриваемой машины дает систематическую погрешность. Это объясняется тем, что верхний захват машины не является абсолютно неподвижным, и перемещается пропорционально отклонению маятника. Поэтому действительное удлинение образца несколько отличается от перемещения нижнего захвата, которому пропорциональны абсциссы записанной на машине диаграммы.

Методика исключения этой систематической погрешности рассмотрена в описании работ 1—3.

Чтобы предотвратить резкое перемещение маятника после разрыва образца, на машине установлен масляный демпфер 22. Последний состоит из цилиндра, заполненного маслом, и поршня, соединенного с маятником.

При движении маятника вверх масло свободно перетекает через специальный клапан из одной полости цилиндра в другую; при этом демпфер не оказывает воздействия на маятник. При обратном движении маятника клапан закрывается.

вается, и вместо, проходя из одной полости цилиндра в другую через малое отверстие, вызывает торможение маятника.

Чтобы уменьшать при подъеме маятника трение плунжера демпфера о направляющую втулку, последняя с помощью специального электродвигателя приводится во вращение. Благодаря этому силы трения получают направление, перпендикулярное к оси плунжера, и не влияют на его перемещение в осевом направлении.

Установка указателя силоразмерителя на нуль производится при помощи контргруза 23, закрепляемого в нужном положении стоперным винтом.

Рассмотрим подробнее устройство захватов для закрепления образцов. Стандартные образцы для испытаний имеют цилиндрические головки. Закрепление этих образцов в захватах производится при помощи разрезных втулок. Чтобы закрепить образец, надо пропустить головку образца через отверстие захвата, заложить под головку обе половины втулки и затем опустить головку образца на место (фиг. 74). При испытании плоских образцов, а также гладких цилиндрических образцов, применяются клиновые захваты. В этом случае корпус захватов заменяется другими, имеющими гнезда трапецевидной формы.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА Р5

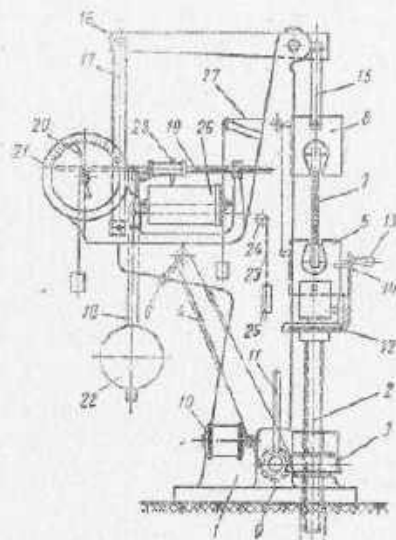
(Максимальная рабочая нагрузка 5 т)

Машина предназначена для испытаний на растяжение и сжатие; при использовании специальных приспособлений на машине можно производить также испытания на изгиб.

Схема машины и ее общий вид представлены соответственно на фиг. 75 и 77. Нагружающий механизм, служащий для деформирования испытуемого образца, смонтирован в нижней части литой чугунной станины 1. Основными деталями этого механизма являются грузовой винт 2 и червячное колесо 3, втулка которого служит гайкой грузового винта. Червячное колесо 3 приводится во вращение от электродвигателя 10 или вручную, при помощи рукоятки 6 и цепной передачи 4. Вращение червячного колеса вызывает вертикальное перемещение винта 2 вместе с нижним захватом 5. При этом испытуемый образец 7, укреплённый в захватах 5 и 8, или растягивается, или сжимается, в зависимости от направления вращения червячного колеса.

На схеме показана установка образца для испытания на растяжение. Образец закрепляется при помощи клиновых

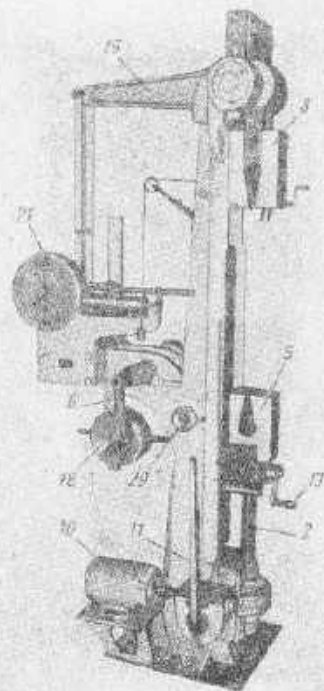
губок. При испытании плоских образцов используются губки с плоской рабочей поверхностью. При испытании цилиндрических образцов применяются губки с призматическими клинниками. Рабочая поверхность губок имеет насечку, обеспечивающую лучшее сцепление с образцом. При испытании на сжатие взамен зажимных губок в захваты устанавливаются опорные плиты, между которыми и помещается испытуемый образец.



Фиг. 76. Схема машины Р-3

При использовании механического привода червячное колесо 3 приводится во вращение через редуктор 9. В этом случае ручка 6 снимается с оси и рычаг 11 переводится в одно из двух рабочих положений. Чтобы включить медленный ход (10 мм/мин), рычаг 11 надо наклонить по направлению к станине. Включение быстрого хода (45 мм/мин) достигается поворотом рычага в направлении от станины. При вертикальном положении рычага редуктор выключен. Пуск в ход производится при помощи выключателя 29 (фиг. 77).

При установке образца может потребоваться быстро поднять или опустить нижний захват машины. Быстрое перемещение нижнего захвата достигается вращением грузового винта 2 при неподвижном червячном колесе 3. Для приведения винта во вращение служат: коническая передача 12



Фиг. 77. Общий вид машины Р-3

и рукоятка 13. При этом необходимо предварительно отсоединить от ручки 13 замковый штифт 14, удерживающий грузовой винт 2 от проворачивания во время рабочего хода.

Силомерительный механизм машины, предназначенный для измерения возникающего в образце усилия, расположен в верхней части машины. Рабочее усилие, действующее в образце 18, передается через тягу 15, рычаг 16 и тягу 17 на маятник 7 и заставляет последний отклониться от вертикального положения. При испытании на растяжение маятник отклоняется влево; при испытании на сжатие — вправо. Отклонение маятника вызывает перемещение в горизонтальном направлении рейки 19 и поворот стрелки 20, указывающей на шкале 21 величину силы.

Силомеритель данной машины имеет четыре диапазона измерения усилий: от 0 до 5000 кг, от 0 до 2500 кг, от 0 до 1000 кг и от 0 до 500 кг.

Переключение диапазонов производится перемещением центра тяжести маятника относительно его оси вращения; кроме того, на последних двух диапазонах часть груза 22 снимается. Каждому диапазону соответствует свой дифференциал силомерителя.

При испытаниях следует пользоваться наименьшим возможным диапазоном измерения, в пределах которого укладывается ожидаемое значение максимальной нагрузки. Этим обеспечивается большая точность измерения.

Для предотвращения удара, а также качания маятника после разрушения образца служит фрикционный тормоз. Тормоз состоит из прикрепленного к маятнику шнура 23, движущегося по окружности неподвижного штиря 24 и натянутого груза 25. При отклонении маятника от станины (при растяжении образца) шнур свободно скользит по штирю и груз опускается. При обратном движении маятника силы трения шнура о штирь мешают его направлению и сильно возрастают; в результате маятник испытывает торможение. Для приведения маятника в исходное положение груз надо поднять рукой. При испытаниях на сжатие конец тормозного шнура прикрепляется к маятнику ниже его оси вращения или же тормозной шнур совсем снимается.

Машина Р5 оборудована прибором для автоматической записи диаграммы испытания. Барабан 26 с прикрепленной к нему бумагой приводится во вращение при помощи вала 27, соединенной с нижним захватом машины. Вдоль ободу барабана скользит карандаш 28, укрепленный на рейке силомерителя 19.

В процессе испытания барабан поворачивается пропорционально удлинению образца, а карандаш перемещается пропорционально изменению рабочего усилия. Таким обра-

зом на бумаге вычерчивается диаграмма испытания в координатах «удлинение—нагрузка».

Масштаб диаграммы по оси удлинения может быть установлен 1:1, 2:1 или 10:1 в зависимости от того, по какому желобку барабана 26 проходит нить 27 (1 или 2 или 10 мм на диаграмме соответствуют 1 мм удлинения образца). Масштаб диаграммы по оси сил

1 мм соответствует 50 кг при шкале на 5000 кг

1 мм соответствует 25 кг при шкале на 2500 кг,

1 мм соответствует 10 кг при шкале на 1000 кг,

1 мм соответствует 5 кг при шкале на 500 кг.

Ввиду того, что записанная на машине диаграмма получается в малом масштабе, использовать ее для количественных измерений затруднительно.

МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ фирмы «Лозенгаузен»

(Максимальное растягивающее усилие 5 т)

Машина имеет механическое нагружающее устройство и маятниковый силомеритель.

Схема машины и ее общий вид представлены на фиг. 78 и 79. (Нумерация деталей на обеих фигурах одинаковая).

Испытуемый образец 1 закрепляется в захватах 2 и 3 (фиг. 78). Нижний захват 2 соединен с нагружающим механизмом, смонтированным в нижней части станины 6 (фиг. 79). Основными деталями этого механизма являются грузовой винт 4 и гайка 5 (фиг. 78). При вращении винта 4 гайка 5 и захвату 2 сообщается медленное поступательное движение вниз. Чтобы винт не мог перемещаться в осевом направлении, он опирается на подпятник 11. Грузовой винт приводится во вращение или вручную, или от электродвигателя 8.

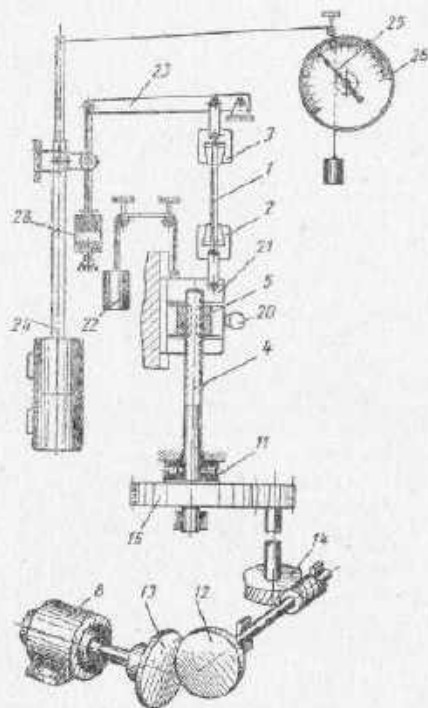
Соединение двигателя с винтом 4 осуществляется через фрикционный вариатор 12—13, червячную передачу 14 и зубчатую передачу 15.

Фрикционный вариатор служит для плавного изменения скорости деформации. Освободив створ 16 (фиг. 79) и поворачивая ручку 17 на себя, можно перемещать диск 12 в осевом направлении и таким образом изменять передаточное отношение вариатора.

Значение скорости деформации при любом положении ручки вариатора можно прочесть на шкале 18. Для полного

выключении вариатора служит рычаг 19, при помощи которого можно отодвинуть один диск вариатора от другого.

Пуск в ход электродвигателя производится при помощи рубильника 10.

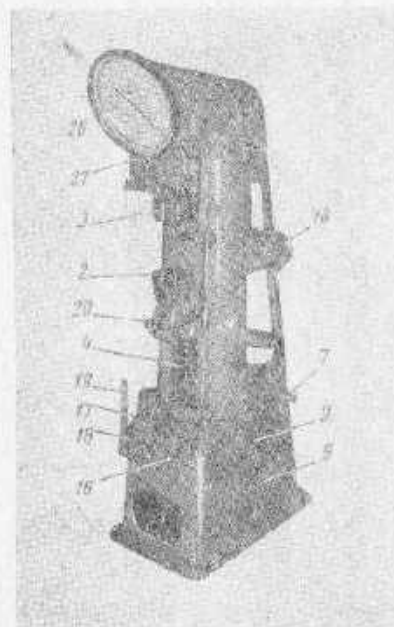


Фиг. 78. Схема машины для испытаний на растяжение фирмы Лёбенгаузен»

Если в процессе испытания требуется производить медленное нагружение образца, то целесообразно использовать ручной привод. В этом случае рычаг 9 надо перевести из положения «Механический привод» в положение «Ручной привод».

После этого грузовой винт можно привести во вращение посредством ручки 7 (фиг. 79).

При установке образцов необходимо иметь возможность быстро передвигать нижний захват 2. С этой целью гайка 5 (фиг. 78) сделана из двух половин. Поворотом ручки 20 мож-



Фиг. 79. Общий вид машины для испытаний на растяжение фирмы «Лёбенгаузен»

но раздвинуть половинки гайки и вывести их из зацепления с винтом 4; после этого нижний захват 2 вместе с ползуном 21 можно свободно поднимать и опускать.

Для уравнивания ползуна 21 и захвата 2 служит контргруз. Размыкать гайку 5 можно только при полном отсутствии нагрузки.

Силомерительный механизм данной машины имеет следующее устройство. Рабочее усилие передается от верхнего лапката 3 через рычаг 23 и маятник 24 и заставляет последний отклониться от вертикального положения. Чем больше сила, тем сильнее отклоняется маятник. Верхний конец стержня маятника соединен при помощи нити со стрелкой 25, указывающей по циферблату 26 величину нагрузки.

Циферблат силомерителя имеет две шкалы от 0 до 5000 кг и от 0 до 2000 кг. Перевод машины с 5-тонной шкалы на 2-тонную производится путем снятия со стержня маятника части грузов, при этом точность измерения усилия соответственно увеличивается.

Торможение маятника при его падении после разрыва образца осуществляется с помощью масляного демпфера 28.

Для автоматической записи диаграммы растяжения машина оборудована диаграммным механизмом 27 (фиг. 79). Бумага для записи диаграммы укрепляется на барабане, который в процессе испытания поворачивается пропорционально удлинению образца. Вальс образующей барабана движется карандаш, соединенный с силомерителем, который и вычерчивает диаграмму испытания. Масштаб диаграммы по оси удлинений 1:1 или 2:1 (2 мм на диаграмме соответствует 1 мм удлинения образца).

Масштаб диаграммы по оси сил: 1 мм соответствует 50 кг или 1 мм соответствует 20 кг (в зависимости от того, на какой диапазон измерения установлена машина).

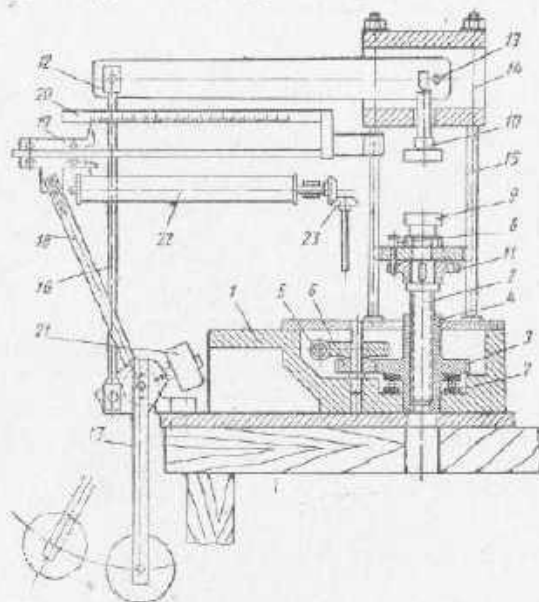
ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА ИМ-4А конструкции ЦНИИТМАШ

(Максимальное рабочее усилие 4 т)

Машина предназначена для испытания образцов на сжатие, а также при использовании дополнительного приспособления «реверсора» для испытания «агаринских» образцов на растяжение. Машина оборудована диаграммным механизмом, позволяющим записывать диаграмму испытания в крупном масштабе.

Схема машины и ее общий вид представлены на фиг. 80 и 81. Нагружающий механизм винтового типа расположен в литой чугунной коробке, служащей основанием машины. Основными деталями этого механизма являются: грузовой винт 2 и зубчатое колесо 3. Втулка последнего 4 имеет внутреннюю резьбу и служит гайкой грузового винта 2.

Нагружающий механизм приводится в действие или от электродвигателя или от руки при помощи ручки, надеваемой на вал червяка 5. От червяка вращение передается червячному колесу 6 и далее через шестерню 6 центральному

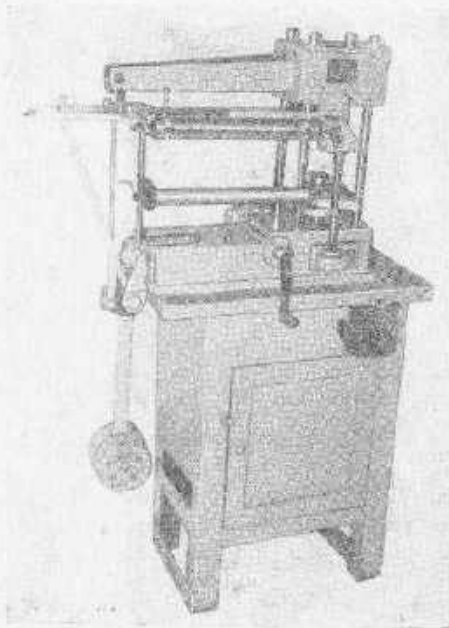


Фиг. 80. Схема машины ИМ-4А

зубчатому колесу 3 и гайке 4. Последняя опирается на шариковую ленту 7, не позволяющую ей перемещаться в осевом направлении. При вращении гайки 4 грузовой винт 2 получает поступательное движение в вертикальном направлении, и испытуемый образец, устанавливаемый между опорными плитами 9 и 10, нагружается.

Переключение машины с механического привода на ручной и обратно производится при помощи кнопки, расположенной с обратной стороны машины на продолжении вала червяка 5. Чтобы включить механический привод, надо снять ручку ручного привода и нажать на кнопку переключения

так, чтобы утопить ее до отказа. После этого можно включить двигатель. Рубильник расположен на передней стороне стола. Скорость деформации образца при использовании механического привода составляет приблизительно 1 мм/мин. При переходе на ручной привод кнопку переключения надо вынуть наружу.



Фиг. 81. Общий вид машины ИМ-4А.

Для быстрого перемещения нижней опорной плиты, при установке нового образца, следует вынуть стопорный штифт 8 и, вращая от руки маховичок 11, установить требуемое расстояние между плитами.

Силовой измерительный механизм машины рычажно-маятникового типа имеет следующее устройство: рабочее усилие

передается от верхней опорной плиты 10 на рычаг 12. Ось последнего 13 укреплена на шарикоподшипниках в коробке 14, установленной на стойках 15 на литем основании машины. От рычага 12 усилие передается через тягу 16 на маятник 17 и заставляет его отклониться от вертикального положения. С маятником 17 жестко связан поводок 18, который передвигает каретку силовизмерителя 19 вдоль шкалы 20.

Предварительная балансировка силовизмерительной системы и установки указателя шкалы на нуль производится перемещением груза 21, который закрепляется в нужном положении стопорным болтом.

Рассмотрим устройство диаграммного прибора. Бумага для записи диаграммы крепится на барабане 22. Барабан приводится во вращение через коническую передачу 23 от центральной шестерни 3. Угол поворота барабана пропорционален перемещению нижней опорной плиты.

Вдоль образующей барабана 22 скользит карандаш, укрепленный на каретке силовизмерителя 19; перемещение карандаша пропорционально рабочему усилию. В процессе испытания карандаш вычерчивает на бумаге кривую, абсцисса которой пропорциональна деформации, а ордината пропорциональна нагрузке. Масштабы диаграммы: по оси удлинения 100 : 1 (т. е. 100 мм на диаграмме соответствуют 1 мм удлинения образца); по оси сил 1 мм соответствует нагрузке 10 кг. Диаграмма вычерчивается в левой системе координат.

Необходимо отметить, что записанная на машине диаграмма содержит систематическую погрешность; это объясняется тем, что при записи диаграммы не учитывается перемещение верхней опорной плиты. При обработке диаграммы указанную систематическую погрешность необходимо исключить (см. описание работ 1—3).

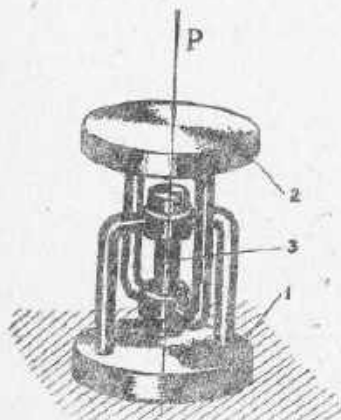
Данную машину можно также использовать для испытаний на растяжение. В этом случае применяется специальное приспособление — «реверсор», с помощью которого сжимающая сила преобразуется в растягивающую. Устройство реверсора показано на фиг. 82.

Реверсор состоит из двух накрест расположенных скоб 1 и 2, между которыми помещается испытуемый образец 3.

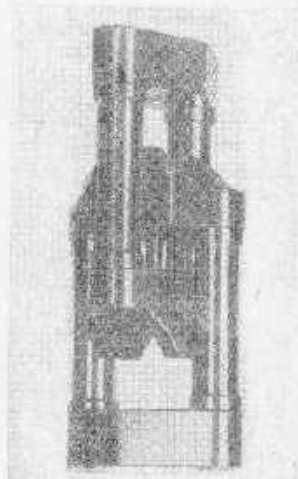
Верхняя головка образца опирается на нижнюю скобу, а нижняя головка на верхнюю. В таком виде реверсор устанавливается в пресс. Нетрудно видеть, что при действии рабочего усилия P испытуемый образец растягивается. Закрепление образца в скобах производится при помощи разрез-

ных втулок. Чтобы закрепить образец, надо пропустить его головку через отверстие в скобе, заложить под головку две половины разрезной втулки и опустить головку в гнездо скобы. Аналогично закрепляется и другой конец образца во второй скобе.

Общий вид реверсора показан на фиг. 83.



Фиг. 82. Схема реверсора



Фиг. 83. Общий вид реверсора

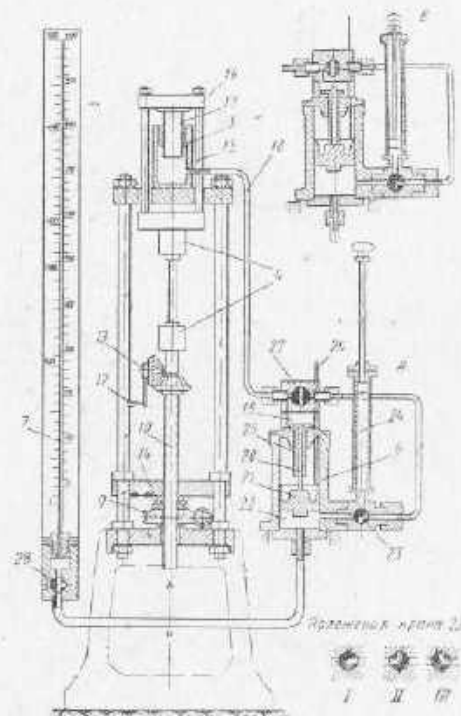
МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ фирмы «Анслер» (Максимальное усилие 5 т)

Схема машины и ее общий вид представлены на фиг. 84 и 85 (нумерация деталей на обеих фигурах одинака).

Машина имеет механическое нагружающее устройство с ручным приводом. Это устройство состоит из маховика 2, зубчатой передачи 8 (фиг. 85), червячной передачи 9 (фиг. 84), грузового винта 10 и конической передачи 13 с ручкой 12.

При нагружении образца ручка 12 застопоривается штифтом 11 (фиг. 85) так, чтобы грузовой винт 10 не мог прова-

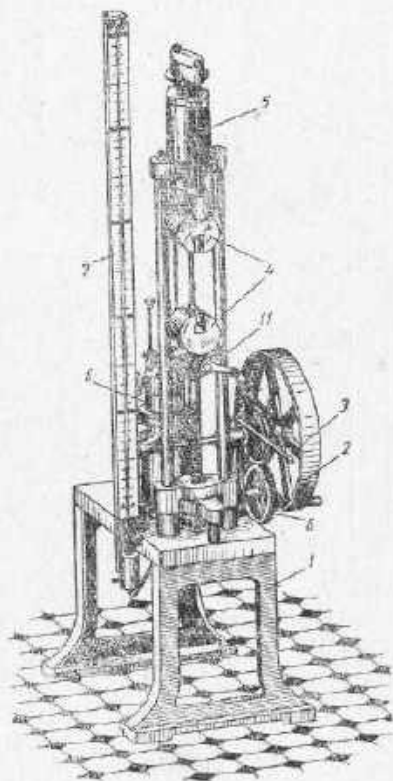
риваться. После этого с помощью маховика 2 приводится во вращение центральное червячное колесо, служащее одновременно гайкой грузового винта. Червячное колесо враща-



Фиг. 84. Схема машины для испытания на растяжение фирмы «Анслер»

тывается на винт и сообщает последнему поступательное движение вниз. Вместе с грузовым винтом перемещается нижний захват 4, в результате чего испытуемый образец растягивается. С целью уменьшения момента трения между червячным колесом 9 и корпусом машины установлен шариковый подшипник 14 (фиг. 84).

Для быстрого перемещения нижнего захвата при установке нового образца стопорный штифт 11 отсоединяется и грузовой винт приводится во вращение при помощи ручки 12



Фиг. 85. Общий вид для испытания на растяжение фирмы «Амслер»

через коническую передачу 13. Ввертываясь в червячное колесо 9, винт 10 вместе с нижним захватом перемещается вверх или вниз.

Если в процессе испытания требуется приостановить нагружение (например, для измерения удлинения), то муфта 3 (фиг. 85) разъединяется, и механизм 2 отключается от привода, что устраняет возможность случайных толчков, могущих повлиять на величину рабочего усилия.

Силовизмеритель рассматриваемой машины гидравлического типа имеет следующее устройство (фиг. 84). От верхнего захвата 4 рабочее усилие передается через тяги 15 на траверсу 16 и далее на плунжер гидравлического цилиндра 17. Внутри гидравлического цилиндра находится масло. Давление в гидравлическом цилиндре 6, пропорциональное величине рабочей нагрузки, измеряется ртутным манометром 7. Ртутный манометр имеет две шкалы: от 0 до 1 т и от 0 до 5 т.

При работе на первом диапазоне измерения величина рабочего усилия ограничивается одной тонной, но точность измерения соответственно в пять раз выше. Переключение машины с одного диапазона измерения на другой производится при помощи специального гидравлического устройства 6 (фиг. 85).

Положение всех деталей этого устройства, показанное на фиг. 84 А, соответствует диапазону измерения от 0 до 5 т. Давление в рабочем цилиндре, действуя на торец штока 20, создает усилие, равное произведению величины давления на площадь поперечного сечения штока. Это усилие передается через поршень 21 на масло, находящееся в камере 22, и далее через ventиль 28 на ртуть в манометрической трубке 7.

Чтобы переключить машину на другой диапазон измерения, следует повернуть кран 23 из положения I в положение II и при помощи ручного насоса 24 добавить масла в камеру 22 так, чтобы поршень 21 приподнялся в положение, показанное на фиг. 84 В. После этого кран 23 должен быть повернут обратно в исходное положение I. При новом положении поршня 21 штулка 25 перестает опираться запяточником на корпус, в результате чего сила, действующая на поршень 21, возрастает и становится равной произведению величины давления в рабочем цилиндре на сумму площадей сечения штока 20 и штулки 25. Величина этих площадей подобрана так, что сила, приходящаяся на поршень 21, будет во втором случае в пять раз больше, чем в первом случае при одном и том же значении растягивающего усилия в образце. Соответственно этому ртуть в манометрической трубке 7 будет подниматься на высоту, также в 5 раз большую, чем в первом случае, и полная высота подъема ртути будет теперь соответствовать рабочему усилию всего в одну тонну.

Перевод машины с одного диапазона измерения на другой можно производить лишь при полном отсутствии нагрузки.

Для того, чтобы определить, на какой диапазон измерения установлена машина, служит указатель 26. Этот указатель перемещается вверх и вниз вместе с поршнем 21 и имеет две риски. Совпадение верхней риски с плоскостью крышки указывает, что машина установлена на 5 м; совпадение нижней риски с плоскостью крышки соответствует установке на 1 м.

Перед началом испытания необходимо убедиться, что указатель 26 стоит точно на риске, соответствующей выбранному диапазону работы, и уровень ртути в манометрической трубке совпадает с нулевым делением шкалы данного диапазона измерения. Если при отсутствии нагрузки уровень ртути не совпадает с нулевым делением шкалы, последнюю следует поднять или опустить при помощи винта, имеющегося на нижнем конце шкалы.

С целью увеличения точности измерения поршень 21 соединен с приводным маховиком 2 шатунно-кривошипной передачи, при помощи которой поршню сообщается возвратно-вращательное движение (на схеме передача не указана). Благодаря этому силы трения между поршнем 21 и стенками корпуса получают горизонтальное направление и не оказывают влияния на показания машины.

Утечки масла из гидравлической системы могут быть подолжены при помощи насоса 24. Для этого предварительно надо залить масло в цилиндр насоса 24, затем открыть край 27, повернуть край 23 в положение III и, нажимая на ручку насоса, добавить нужное количество масла в систему. После этого краны 27 и 23 следует поставить в первоначальное положение. При заливке масла под поршень насоса 24 необходимо следить, чтобы в трубопроводы не попал воздух, так как попадание воздуха может вызвать нарушение нормальной работы машины.

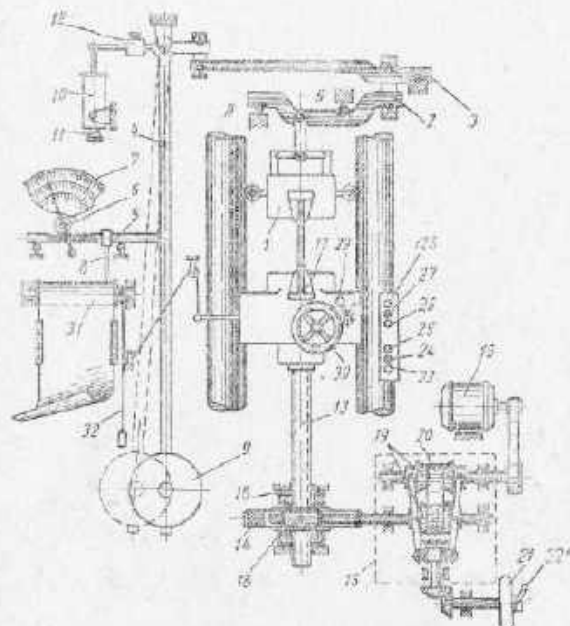
УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА завода «Шопер»

(Максимальное значение нагрузки 5 м)

Схема машины и ее общий вид представлены на фиг. 86 и 87.

Машина имеет механическое нагружающее устройство с моторным приводом и рычажно-маятниковый силоизмеритель реверсивного типа; последний позволяет измерять рабочее усилие как при растяжении, так и при сжатии.

При испытаниях на растяжение сила, передающаяся от верхней головки 1 на рычаг 2, направлена вниз. Под действием этой силы рычаг 2 отходит от опоры Б и поворачивается вокруг опоры А, работая по схеме рычага второго рода.

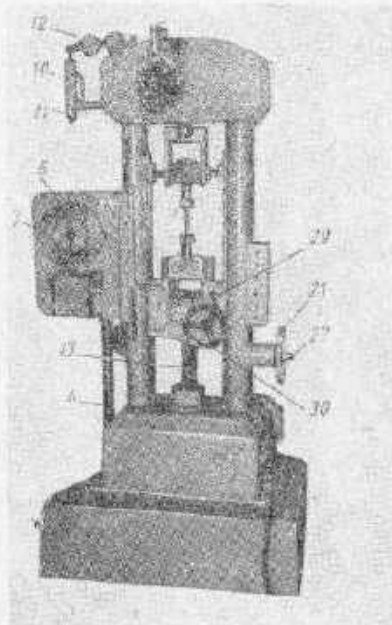


Фиг. 86. Схема универсальной испытательной машины завода «Шопер»

При испытаниях на сжатие рабочее усилие направлено вверх, рычаг 2 в этом случае поворачивается вокруг точки Б и отходит от опоры А, работая как рычаг первого рода.

В обоих случаях правый конец рычага 2 опускается вниз и передает усилие на верхний рычаг 3. С рычага 3 усилие передается на маятник 4 и заставляет последний отклоняться от вертикального положения, как показано на фиг. 86 пунктиром. Чем больше усилие, тем сильнее отклоняется маятник. Отклонение маятника вызывает перемещение п го-

горизонтальном направлении рейки 5, с которой соединены стрелка силосизмерителя 6, а также карандаш диаграммного прибора 8. Циферблат силосизмерителя 7 имеет три шкалы: от 0 до 5 *т*, от 0 до 2,5 *т*, от 0 до 1 *т*. Третья шкала имеет в пять раз более крупные деления, чем первая, и соответственно даст в 5 раз большую точность измерения, но значения максимальной силы ограничиваются одной тонной. Пе-



Фиг. 87. Общий вид универсальной испытательной машины завода «Шопер»

ревод машины с одного диапазона измерения на другой производится изменением количества грузов 9 на маятнике 4.

Чтобы предотвратить резкое перемещение маятника после разрушения образца, машина снабжена масляным демпфером 10. Демпфер состоит из цилиндра, заполненного маслом,

и поршня, соединенного с маятником. При движении маятника вверх масло свободно перетекает из одной полости цилиндра в другую. При обратном движении маятника отверстие для пропуска масла закрывается клапаном и маятник тормозится. Величина пропускаемого отверстия регулируется головкой 11 в соответствии с количеством грузов на маятнике. При переводе машины с одной шкалы на другую головка тормоза 11 должна быть установлена на риску, соответствующую выбранному диапазону измерения усилий. Первоначальная регулировка маятника с целью придания ему строго вертикального положения производится при помощи болта 12, который в нужном положении фиксируется болтом.

Рассмотрим устройство механизма, служащего для нагружения образца. Основными деталями этого механизма являются грузовой винт 13 и червячное колесо 14, служащее одновременно гайкой грузоповинта. Червячное колесо установлено на двух опорных шариковых подшипниках 18. Оно приводится во вращение от электродвигателя 15 через вариатор 16. Навертываясь на винт 13, червячное колесо сообщает нижней рабочей головке 17 поступательное движение вниз или вверх, в зависимости от вида выполняемого испытания. При испытаниях на сжатие к рабочей головкам прикладываются опорные плиты, между которыми устанавливается образец. При испытаниях на растяжение образцы закрепляются при помощи клиновых губок в специальных захватах.

Вариатор 16 служит для плавного изменения скорости деформации образцов в пределах от 10 *мм/мин* до 50 *мм/мин*. Вариатор имеет два вала с двумя парами конических зубчатых колес 19, соединенных зубчатой цепью 20. Посредством вращения штурвала 21 можно сдвигать или раздвигать зубчатые колеса на верхнем валу и одновременно раздвигать или сдвигать колеса на нижнем валу и таким образом изменять передаточное отношение вариатора. Следует заметить, что изменение скорости деформации посредством вариатора можно производить только на ходу, при работающем двигателе главного привода. После установки требуемой скорости маховых 21 фиксируется стопором 22.

Включение и выключение двигателя главного привода производится при помощи трех кнопок 23, 24, 25 (кнопка 23 — «ход вниз»; кнопка 24 — «стоп»; кнопка 25 — «ход вверх»).

Для быстрого перемещения нижней рабочей головки 17 на машине имеется второй — малый электродвигатель, распо-

доженный позадн рабочего стола 17 (на схеме не показан). От этого двигателя приводится во вращение грузовой винт 13. Ввертываясь в червячное колесо 14, грузовой винт вместе с рабочим столом 17 получает быстрое движение в вертикальном направлении. Включение и выключение двигателя быстрого хода производится при помощи кнопок 26, 27, 28 (кнопки 26 — «ход вниз»; кнопка 27 — «стоп»; кнопка 28 — «ход вверх»). Приводом быстрого хода можно пользоваться только при отсутствии рабочей нагрузки. Кроме того, необходимо иметь в виду, что выключение двигателя быстрого хода возможно только в том случае, когда отсоединен ручной привод, т. е. когда рычаг 29 повернут влево, как показано на фиг. 86 сплошными линиями. При повороте рычага 29 направо, как это показано пунктиром, привод быстрого хода выключается.

В последнем случае при помощи маховичка 30 можно привести грузовой винт во вращение и таким образом произвести нагружение вручную.

Рассматриваемая машина имеет автоматическое устройство для записи диаграммы испытания в координатах «удлинение—нагрузка». Бумага для записи диаграммы прикрепляется к барабану 31, который приводится во вращение шестом 32, соединенным с нижней рабочей головкой 17. В процессе испытания барабан 31 поворачивается пропорционально удлинению, а карандаш 8 перемещается пропорционально нагрузке. Вычерчиваемая на бумаге график зависимости нагрузки от удлинения имеет следующие масштабы по оси удлинения 5:1 или 10:1 (т. е. 10 мм по оси диаграммы соответствуют 1 мм удлинению образца). Масштаб зависит от диаметра шпинделя на оси барабана 31. По оси нагрузки 1 мм на диаграмме соответствует 33,3 кГ при установке машины на диапазон измерения усилия от 0 до 5 т; при диапазоне усилий от 0 до 2,5 т 1 мм соответствует 16,6 кГ и при диапазоне от 0 до 1 т 1 мм соответствует 6,6 кГ.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА УИМ-50 (Максимальное рабочее усилие 50 т)

Машина предназначена для испытания образцов и деталей на растяжение, сжатие и изгиб.

Схема машины представлена на фиг. 88. Машина имеет гидравлическое нагружающее устройство с питанием от масляного насоса, приводимого в действие электродвигателем, и маятниковый силовоммеритель с четырьмя диапазонами изме-

рения рабочего усилия: от 0 до 50 т; от 0 до 25 т; от 0 до 10 т и от 0 до 5 т.

Конструктивно машина состоит из трех отдельных частей, соединенных между собой трубопроводами; первая часть — собственно испытательная машина (на фиг. 88 — справа), вторая часть — силовоммеритель и пульт управления (на фиг. 88 — посередине) и третья часть — питательный насос и резервуар для масла (на фиг. 88 — слева).

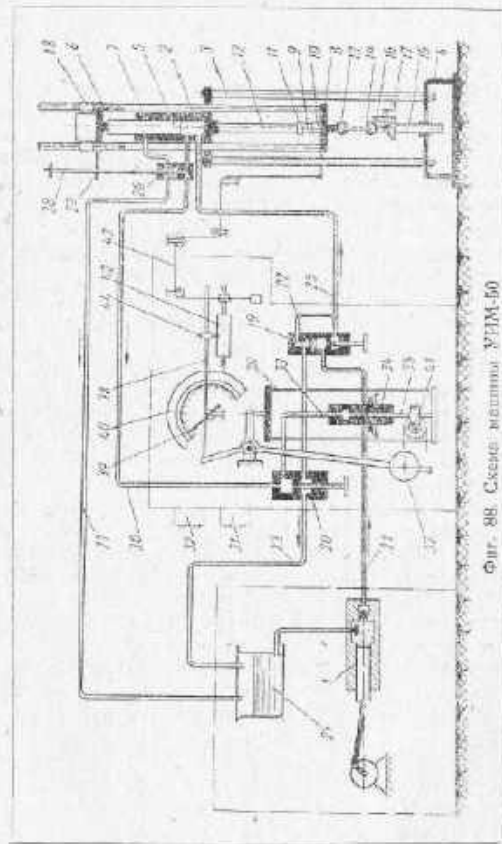
Рабочая жидкость (масло) нагнетается насосом 1 через регулировочный вентиль 19 в гидравлический цилиндр 2. Последний укреплен на 4-х колоннах 3, установленных на массивном чугунном основании машины 4. Под действием рабочей жидкости поршень 5 поднимается вверх. Вместе с ним поднимается верхний traversa 6 и соединенный с ней тягачи 7 рабочий стол 8.

При испытании на сжатие испытуемый образец 9 устанавливается между опорными плитами 10 и 11, первая из которых прикреплена к рабочему столу 8, а вторая — к неподвижной колонке 12. В случае испытания на растяжение испытуемый образец закрепляется в захватах 13 и 14. Верхний захват 13 подвешен к рабочему столу 8; нижний захват 14 соединен посредством винта 15 с основанием машины 4. Винт 15 служит для того, чтобы перемещать нижний захват при установке образцов на растяжение. Для приведения винта 15 во вращение предназначена ручка 17 с конической зубчатой передачей 16.

Кроме того, предусмотрена возможность быстрого перемещения стола 8 при установке образцов. Для этого на машине имеется дополнительный независимый привод от отдельного электродвигателя, установленного на верхней traversa 6. Двигатель приводит во вращение две гайки 18, которые навертываются на тяги 7 и сообщают столу 8 быстрое вертикальное движение. (Пусковые кнопки двигателя быстрого хода на схеме обозначены номером 32). Необходимо иметь в виду, что приводом быстрого хода можно пользоваться только при полном отсутствии рабочей нагрузки.

При выполнении испытаний на изгиб опорные плиты 10 и 11 снимаются, а вместо них на рабочий стол устанавливаются две опоры, а на колонку 12 — скругленный погн. Максимальное расстояние между опорами при испытании на изгиб составляет 1000 мм.

Для управления машиной служат два вентили 19 и 20, смонтированные на пульте управления. Правый вентиль 19 служит для осуществления рабочего хода; левый вентиль



Фиг. 88. Схема машины УИМ-50

20—для спуска масла из рабочего цилиндра. Если оба вентиля закрыты, то рабочий стол машины остается неподвижным. В этом случае масло, поступающее по трубке 21 от насоса 1, приподнимает золотник 22 и по трубке 23 возвращается в резервуар 24. Чтобы осуществить рабочий ход машины, следует открыть правый вентиль 19. Тогда масло от насоса 1 по трубкам 21 и 25 поступает в гидравлический цилиндр 2 и заставляет плунжер 5 вместе с рабочим столом 8 подниматься вверх; при этом испытуемый образец деформируется. Если давление в гидравлическом цилиндре превысит допустимый предел, то открывается предохранительный клапан 26 и масло из гидравлического цилиндра сливается по трубке 27 в резервуар 24. Клапан 26 срабатывает также в том случае, когда плунжер 5 с traversой 6 поднимается слишком высоко. В последнем случае клапан открывается в результате приподнимания стержня 28, на который надавливает планка 29, прикрепленная к верхней traversе 6. Трубка 27 используется также для отвода масла, просачивающегося через зазор между плунжером и направляющей втулкой гидроцилиндра.

Для осуществления обратного хода служит левый вентиль 20. При открывании этого вентиля масло из гидравлического цилиндра 2 сливается по трубкам 30 и 23 в резервуар 24, и плунжер 5 с рабочим столом 8 опускается. Включение и выключение двигателя приподнимательного насоса производится при помощи кнопки 31 (черная кнопка — пуск в ход, красная кнопка — стоп).

Двигатель быстрого хода включается при помощи кнопки 32 (верхняя кнопка — ход вверх, нижняя кнопка — ход вниз, выключение двигателя быстрого хода производится автоматически при отпускании нажатой кнопки).

Силовой измеритель рассматриваемой машины имеет следующее устройство: рабочее давление из гидроцилиндра 2 по трубкам 30 и 33 передается в силовой измерительный цилиндр 34 и действует на плунжер 35 с силой, пропорциональной измеряемому усилию. От плунжера 35 сила передается через рамку 36 на маятник 37 и заставляет последний отклоняться от вертикального положения. Чем больше давление в гидроцилиндре, тем сильнее нагружен образец, и, следовательно, тем сильнее отклоняется маятник. Отклонение маятника 37 вызывает перемещение в горизонтальном направлении рейки 38 и поворот стрелки силоизмерителя 39, которая и указывает по шкале 40 величину нагрузки.

Для повышения точности силоизмерения плунжер силоизмерительного цилиндра 35 приводится во вращение. Благо-

даря этому силы трения между плунжером и цилиндром получают горизонтальное направление и не препятствуют перемещению плунжера по вертикали. Червячная передача, служащая для приведения плунжера во вращение, обозначена на фиг. 88 номером 41.

Переход силоизмерителя с одного диапазона измерения на другой производится путем изменения величины и положения груза на маятнике 37.

При выборе диапазона измерения следует иметь в виду, что чем меньше диапазон измерения, тем выше точность. Например, при работе на пятидесяти шкале точность измерения усилия в десять раз выше, чем при работе на пятидесяти-тонной шкале, но величина максимально возможной нагрузки соответственно в десять раз меньше.

После настройки машины на выбранный диапазон измерения усилия необходимо на силоизмерителе установить соответствующий масштаб шкалы 40. Изменение масштаба шкалы достигается поворотом ручки, расположенной под циферблатом силоизмерителя. На фиг. 88 эта ручка не показана.

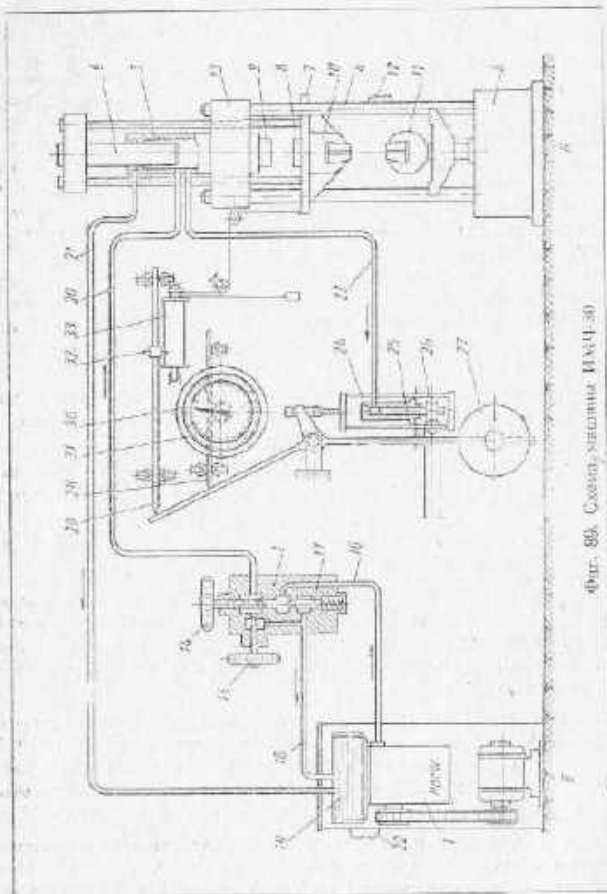
Описываемая машина оборудована прибором для автоматической записи диаграммы испытания в координатах удлинение—нагрузка. Бумага для записи диаграммы прикрепляется к барабану 42, который приводится во вращение при помощи нити 43, соединенной с рабочим столом 8. Вдоль образующей барабана движется карандаш 44, укрепленный на рейке силоизмерителя 38. В процессе испытания барабан порочивается пропорционально удлинению образца, а карандаш перемещается пропорционально нагрузке. Вычерчиваемая на бумаге диаграмма испытания получается в масштабе по оси удлинений 1:1 или 2:1 (т. е. 2 мм на диаграмме соответствуют 1 мм удлинения образца). По оси сил 1 мм соответствует 300 кг (при работе на пятидесяти-тонной шкале силоизмерителя). При работе на других шкалах возможны также масштабы:

- 1 мм соответствует 150 кг (при 25-тонной шкале),
- 1 мм соответствует 60 кг (при 10-тонной шкале),
- 1 мм соответствует 30 кг (при 5-тонной шкале).

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА ИМЧ-30 (Максимальное рабочее усилие 30 т)

Машина предназначена для испытания материалов и деталей на растяжение, сжатие, изгиб.

Схема машины представлена на фиг. 89.



Фиг. 89. Схема машины ИМЧ-30

Машина ИМЧ-30 состоит из трех отдельных узлов, соединенных между собой трубопроводами:

- а) собственно испытательная машина;
- б) силовизмеритель с пультом управления и диаграммным прибором;
- в) масляный насос с резервуаром для масла.

Масло нагнетается насосом 1 через распределительную коробку 2 в гидравлический цилиндр 3. Гидроцилиндр установлен на колоннах 4, укрепленных на массивном чугунном основании 5. Поступающее в цилиндр масло заставляет подниматься плунжер 6 вместе с рабочим столом 7. При испытании на сжатие испытуемый образец устанавливается между плитами 8 и 9. При испытании на растяжение образец закрепляется в захватах 10 и 11. Регулировка расстояния между захватами при установке образца на растяжение производится посредством механического привода (на схеме не показан), сообщающего нижнему захвату 11 быстрое движение вверх или вниз. Механический привод включается кнопками 12.

При испытаниях на изгиб плиты 8 и 9 снимаются и вместе с ними на рабочий стол устанавливаются два опора, а на traversу 13 — скругленный нож.

Управление машиной производится при помощи двух вентиля 14 и 15, расположенных на распределительной коробке 2.

Верхний вентиль 14 используется при рабочем ходе; боковой вентиль 15 — при обратном ходе.

Если оба вентиля закрыты, то рабочий стол остается неподвижным. В этом случае масло, поступающее от насоса по трубопроводу 16, отжимает вниз цилиндрический золотник 17 и через образовавшийся зазор стекает по трубке 18 обратно в бак 19.

Чтобы включить рабочий ход машины, следует открыть вентиль 14. Тогда масло от насоса 1 по трубкам 16 и 20 поступает в гидравлический цилиндр 3 и заставляет рабочий стол подниматься вверх. Скорость рабочего хода можно регулировать, изменяя степень открытия вентиля 14.

Обратный ход рабочего стола осуществляется посредством вентиля 15. Если открыть этот вентиль, то масло из гидравлического цилиндра под действием веса плунжера и рабочего стола по трубкам 20 и 18 стекает обратно в масляный бак. Для отвода утечек масла, просачивающегося че-

рез зазор между плунжером и направляющей ступкой гидроцилиндра, служит трубка 21.

Включение и выключение электроприбора насоса 1 производится при помощи кнопок 22.

Силовизмеритель рассматриваемой машины, предназначенный для измерения рабочего усилия, имеет следующее устройство. Давление масла, пропорциональное рабочей нагрузке, передается из гидравлического цилиндра 3 по трубке 23 в цилиндр силовизмерителя 24. Усилие, возникающее при действии давления на торцевую поверхность плунжера 25, передается через рамку 26 на маятник 27 и заставляет последний отклониться от вертикального положения. Отклонение маятника вызывает перемещение в горизонтальном направлении двух реек 28 и 29. Первая из них приводит в движение стрелку 30, указывающую на шкале 31 величину рабочей нагрузки, а вторая перемещает карандаш диаграммного прибора 32, который скользит вдоль образующей барабана 33.

Циферблат силовизмерителя имеет три шкалы: 30-тонную, 15-тонную и 6-тонную. Настройка машины на тот или другой диапазон измерения производится путем изменения величины и положения центра тяжести груза на маятнике 27.

При выборе диапазона измерения следует руководствоваться ожидаемой величиной наибольшей нагрузки, имея в виду, что меньший диапазон измерения обеспечивает соответственно большую точность.

Диаграммный барабан 33 приводится во вращение при помощи анти, соединенной с рабочим столом испытательной машины. В процессе испытания барабан поворачивается пропорционально деформации образца, а карандаш перемещается пропорционально нагрузке; в результате на прикрепленной к барабану бумаге пишется диаграмма испытания. Масштаб диаграммной записи:

по оси деформаций 2 : 1 или 5 : 1 (т. е. 5 мм на диаграмме соответствует 1 мм удлинения образца), а зависимости от того, по какому желобу на барабане 33 проходит нить;

по оси сил 1 мм соответствует 100 кг (при настройке маятника на 30-тонный диапазон измерения усилия).

При настройке на другие шкалы возможны также масштабы:

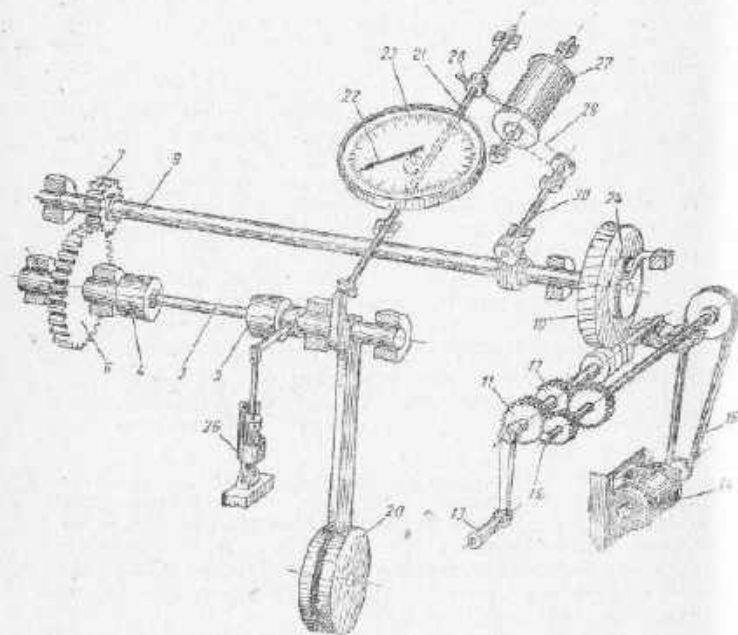
1 мм соответствует 50 кг (при настройке на 15 т) и

1 мм соответствует 20 кг (при настройке на 6 т).

МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА КРУЧЕНИЕ К-50

(Максимальный момент 5000 кг/см)

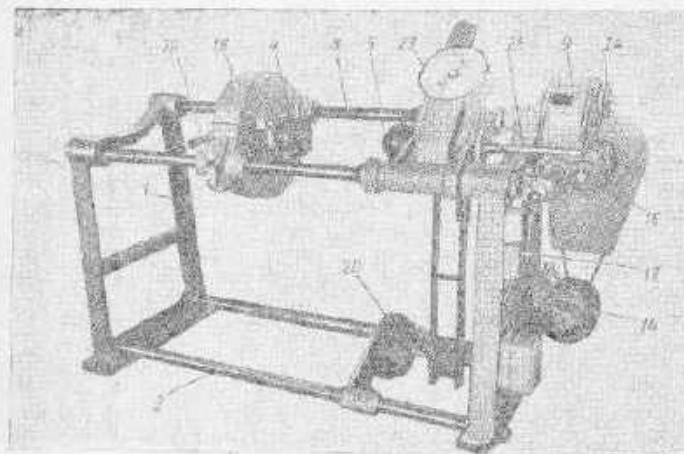
Схема машины и ее общий вид представлены на фиг. 90 и 91. (Нумерация деталей на обеих фигурах единая).



Фиг. 90. Схема машины К-50

Машина имеет следующие основные механизмы:
 а) механизм нагружения образца с ручным и механическим приводами;
 б) маятниковый силовизмеритель для измерения действующего на образец момента;
 в) диаграммный прибор для автоматической записи диаграммы кручения.

Все механизмы смонтированы на общей станине, состоящей из двух чугунных стоек 1, соединенных между собой горизонтальными стальными стержнями 2 (фиг. 91).



Фиг. 91. Общий вид машины К-50

Испытуемый образец 3 (фиг. 90) закрепляется в двух захватах 4 и 5. Левый ведущий захват приводится во вращение через пару зубчатых колес 6 и 7 и приводной вал 8 от редуктора 9 (фиг. 91). Последний состоит из червячной пары 10 и двух пар цилиндрических шестерен 11 и 12.

Редуктор позволяет производить нагружение образца или вручную, при помощи съемной ручки 13, или от электродвигателя 14, соединенного с редуктором ремненной передачей 15.

Для переключения редуктора с ручного привода на механический служит штырь 16, посредством которого перемещается передаточная шпилька. Если штырь 16 полностью вытянут на себя, то пара шестерен 11 будет включена, а пара шестерен 12 — выключена. Это соответствует медленному механическому приводу (0,3 оборота в минуту). При полностью вставленном штыре будет включена пара шестерен 12.

а пара шестерен II выключена, что соответствует быстрому механическому приводу (1 оборот в минуту).

При среднем положении штыря 16 механический привод полностью отключен (оба пары шестерен выключены). В этом случае нагружение можно производить вручную. При использовании механического привода ручку 13 необходимо предварительно снять.

Пуск в ход и остановка электродвигателя производится посредством кнопки 17 (фиг. 91).

Левый захват 4 вместе с зубчатыми колесами 6 и 7 смонтирован на подвижной каретке 18, которую можно перемещать вдоль оси и таким образом устанавливать нужное расстояние между захватами в соответствии с длиной испытуемого образца (длина рабочей части образца может достигать 700 мм). Перемещение каретки 18 производится при помощи съемной ручки 19, которая по мере надобности надевается или на вал каретки 18, или на первичный вал механизма привода. На фиг. 91 ручка показана надетой на вал каретки 18, а на схеме (фиг. 90) — на вал привода.

Силовизмеритель машины, с которым соединен правый захват 5, также смонтирован на подвижной каретке и в небольших пределах может перемещаться вдоль оси образца. Благодаря наличию контргруза, присоединенного к каретке силовизмерителя (на схеме контргруз не показан), в образце можно создавать небольшое растягивающее усилие, что является существенным при испытании тонкой проволоки, которая в ненапрянутом состоянии при закручивании может искривиться. После разрушения образца каретка силовизмерителя под действием веса контргруза отходит в крайнее правое положение.

Основной деталью силовизмерителя является тяжелый маятник 20. При действии момента маятник отклоняется от вертикального положения до тех пор, пока создаваемый маятником момент не уравновесит момента, скручивающего образец. Отклонение маятника вызывает поступательное перемещение рейки 21 (фиг. 90) и поворот связанной с ней стрелки 22. Последняя указывает на шкале 23 величину момента. Машина снабжена тремя съемными шкалами, соответствующими трем различным диапазонам измерения момента: от 0 до 10 кгм, от 0 до 20 кгм и от 0 до 50 кгм. Настройка машины на тот или иной диапазон измерения производится путем изменения количества грузов на маятнике.

Для отсчета величины углов закручивания образца служит шкала 24.

Указатель этой шкалы связан приводом 25 (фиг. 91) с валом маятника и перемещается пропорционально углу отклонения последнего. Благодаря этому отсчет по шкале получается равным разности углов поворота захватов 4 и 5, т. е. соответствует действительному углу закручивания образца. Цена деления шкалы 24 равна одному градусу. Число полных оборотов шкалы отсчитывается по счетчику оборотов (счетчик установлен рядом со шкалой).

Для предотвращения резкого падения маятника после разрушения образца машина оборудована масляным демпфером 26 (фиг. 90). Последний состоит из цилиндра, заполненного маслом, и поршня.

При медленном движении маятника масло свободно перетекает через отверстие в поршне из одной полости цилиндра в другую, не оказывая воздействия на силовизмеритель. При быстром падении маятника отверстие в поршне прикрывается пластинчатым клапаном и маятник тормозится. Степень торможения можно регулировать вентилем, установленным на трубке, соединяющей верхнюю и нижнюю полости цилиндра демпфера.

Диаграммный прибор, служащий для автоматической записи диаграммы испытания, состоит из барабана 27, к которому прикрепляется бумага для записи диаграммы, и карандаша 28. Барабан 27 приводится во вращение при помощи ременной передачи 29 от промежуточного валика 30, который соединен червячной передачей с приводным валом 8. Угол поворота барабана в каждый момент времени пропорционален повороту ведущего захвата 4. Карандаш 28, прикрепленный к рейке силовизмерителя 21, перемещается вдоль образующей барабана 27 пропорционально изменению крутящего момента. Вычерчиваемая на бумаге диаграмма испытания получается в следующих масштабах:

по оси моментов: 1 мм соответствует 0,1 кгм, 0,2 кгм или 0,5 кгм (в зависимости от того, на какой диапазон измерения настроена машина);

по оси углов закручивания: 1 мм соответствует 0,5° или 1,0° (в зависимости от того, по какой канавке диаграммного барабана проходит ремень 29).

Закрепление испытуемого образца в захватах производится при помощи съемных клиновых губок, которые затягиваются специальной гайкой с ленточной резьбой. Для затягивания зажимных губок к машине прилагается специальный ключ.

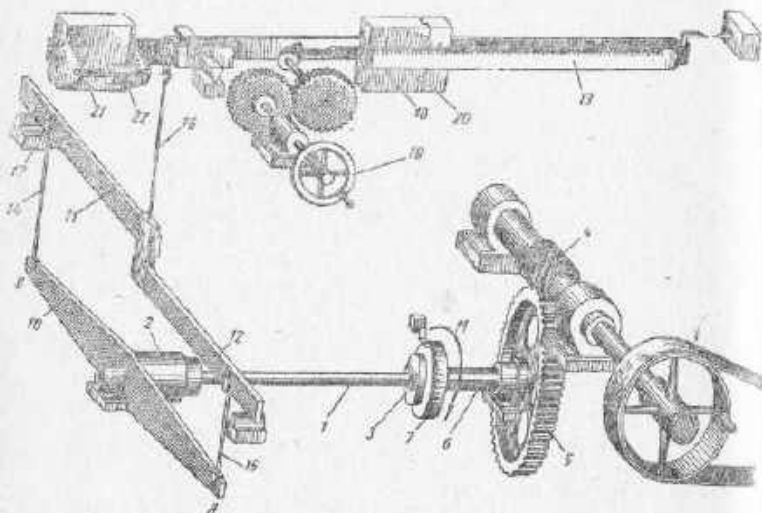
Следует отметить, что записанная на машине диаграмма испытания содержит систематическую погрешность. Углы за-

закручивания на диаграмме записываются с учетом поворота только одного ведущего захвата, в то время как в действительности угол закручивания образца равен разности углов поворота обоих захватов. Эта погрешность должна быть учтена при обработке диаграммы.

МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА КРУЧЕНИЕ фирмы «Эверс»

(Максимальный момент 15 000 кг/см)

Схема машины и ее общий вид представлены на фиг. 92 и 93 (нумерация деталей на обеих фигурах одинаковая).



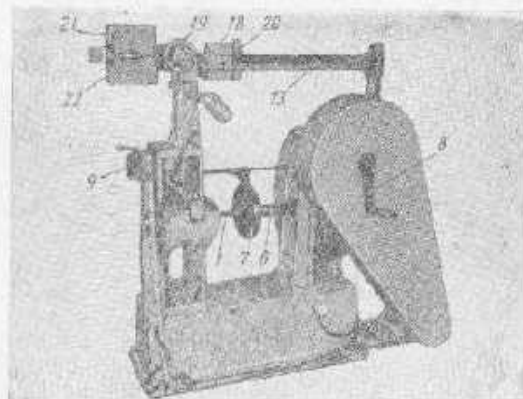
Фиг. 92. Схема машины для испытаний на кручение фирмы «Эверс»

Машина состоит из двух основных узлов, смонтированных на общем чугунном основании:

- а) нагружающего механизма и
- б) силовизмерителя.

Особенностью машины является ее реверсивность, т. е. то, что нагружение испытуемого образца можно производить как

в одну, так и в другую сторону. Благодаря этому на машине можно испытывать не только нормальные круглые образцы, но и звитые тросы и гибкие проволочные валы с правым или левым направлением скрутки.



Фиг. 93. Общий вид машины для испытаний на кручение фирмы «Эверс»

Машина имеет следующее устройство. Испытуемый образец с квадратными головками закрепляется в двух захватах 2 и 3. Левый захват 2 соединен с силовизмерителем и в процессе испытания остается практически неподвижным. Правый захват 3 приводится во вращение посредством нагружающего механизма.

Нагружающий механизм состоит из червяка 4, червячного колеса 5 и шпинделя 6, на конце которого укреплен диск 7 с делениями для отсчета угла закручивания, а также ведущий захват 3. Шпиндель 6 вставлен в отверстие червячного колеса 5 на скользящей посадке и имеет длинную шпоночную канавку, благодаря этому его можно передвигать вдоль оси и таким образом устанавливать требуемое расстояние между захватами в соответствии с длиной испытуемого образца. Для передвигания шпинделя на его правом свободном конце имеется ручка (на схеме она не показана).

Нагружающий механизм приводится в действие или вручную, при помощи рукоятки 8 (фиг. 93), или от электродвигателя; в последнем случае рукоятка 8 должна быть снята. Включение двигателя производится посредством рубильника 9.

Силовой измерительный механизм ланной машины, служащий для измерения действующего на образец момента, состоит из traversы 10 (фиг. 92), промежуточных рычагов 11 и 12, силоизмерительного рычага 13 и соединительных тиг 14, 15, 16. При действии момента, направленного в сторону, указанную стрелкой (фиг. 92), traversa 10 поворачивается так, что точка А опускается вниз. При этом в тиге 15 возникает растягивающее усилие, которое передается через рычаг 12 и тигу 16 на измерительный рычаг 13. Тига 14 и рычаг 11 в этом случае выключаются из работы, так как опорная поверхность рычага приподнимается над опорной призмой 17.

При действии момента в обратном направлении усилие передается через тигу 14 и рычаг 11, в то время как рычаг 12 выключается из работы.

Очевидно, что при любом направлении момента усилие, действующее на измерительный рычаг 13, направлено вниз. Это усилие уравнивается грузом 18. В процессе испытания груз 18 необходимо постепенно перемещать вдоль рычага 13 так, чтобы последний все время находился в состоянии равновесия; чем больше момент, тем дальше от точки опоры вправо надо сместить уравнивающий груз 18. Величина момента отсчитывается по шкале, нанесенной на рычаге 13.

Для перемещения груза 18 вдоль измерительного рычага служит маховичок 19. Следует заметить, что груз 18 состоит из двух частей, скрепленных между собой винтами 20. Если винты вывернуть (но оставить их обратно в гнезда), то вдоль рычага будет двигаться только малая часть груза. При этом диапазон измерения момента в пять раз уменьшится, а точность измерения соответственно в пять раз увеличится.

Собственный вес элементов силоизмерительной системы уравнивается неподвижным грузом 21. Для точной балансировки силоизмерителя и установки машины на нуль служит малый груз 22.

Установка образцов для испытания производится следующим образом. Отодвинув ведущий захват вправо, надо вставить квадратную головку образца в гнездо одного из захватов и, вращая ручку 8, повернуть шпиндели 6 так, чтобы вторая головка образца точно совпала с гнездом второго захвата. Затем, перемещая ручку шпинделя, надо соединить образец со вторым захватом.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Измерение деформаций приходится производить при испытаниях материалов с целью определения их упругих постоянных (модуля упругости, коэффициента Пуассона), а также при экспериментальном определении напряжений в деталях конструкций.

Приборы, служащие для измерения линейных деформаций (удлинения или укорочения), называются тензомерами. Принцип действия и конструкция тензометров весьма разнообразны, однако общим является то, что любой тензомер измеряет изменение расстояния между двумя фиксированными точками на поверхности образца или детали. Это расстояние называется базой.

Если величину абсолютного удлинения (или укорочения), измеренного тензомером, разделить на длину базы, то получится среднее относительное удлинение (относительная линейная деформация) на длине базы. В зависимости от величины базы тензомеры разделяются на тензомеры с большой базой ($a=50 \div 200$ мм), со средней базой ($a=10 \div 50$ мм) и на малобазные тензомеры ($a=1 \div 5$ мм).

Тензомеры с большой базой можно применять только в том случае, когда по длине образца деформируется равномерно. В частности, тензомеры с большой базой целесообразно применять для измерения удлинений при растяжении (при определении модуля упругости первого рода).

Тензомеры со средней базой применяются в том случае, когда деформация по длине изменяется не очень резко, например, при исследовании деформаций при изгибе.

Малобазные тензомеры применяются при исследовании местных напряжений, возникающих вблизи отверстий, около резких ступенчатых переходов и т. п., когда имеет место большой градиент относительной деформации.

Тензомеры со средней и малой базой применяются также для измерения деформаций на криволинейных (не плоских) поверхностях.

Поскольку величина удлинений в пределах упругих деформаций очень мала, то тензомеры должны обладать большой чувствительностью. Степень чувствительности тензомера определяется его «увеличением», т. е. отношением длины образца, пройденного стрелкой по шкале, к величине измеряемого удлинения. Тензомеры с большой базой должны обладать увеличением, приблизительно равным 500. Тензомеры со средней и малой базой должны давать увеличение соответственно большее (примерно $5 \cdot 10^3 \div 20 \cdot 10^3$).

Для получения необходимого увеличения в тензомерах с большой базой обычно используется принцип механического, гидравлического или оптического рычага.

Принципы действия тензомеров с малой базой основаны обычно на более чувствительных электрических методах измерения. Ниже будут рассмотрены некоторые типы оптических и механических тензомеров с большой базой, а также наиболее распространенный тип электрического тензомера с проволоочными тензодатчиками.

Кроме тензомеров будут также рассмотрены стрелочные индикаторы — приборы, предназначенные для измерения перемещений (например, прогибов при изгибе). Индикаторы в некоторых случаях могут использоваться и в качестве тензомеров.

Зеркальный тензомер типа Мартенса

Конструктивная и принципиальная схемы зеркального тензомера показаны на фиг. 94.

Жесткая планка 1 опирается на испытуемый образец в двух точках — в нижней точке посредством неподвижного ножа 2 и в верхней точке посредством призмы 3. Расстояние между точками опоры прибора является базой, т. е. тем отрезком, удлинение которого измеряется.

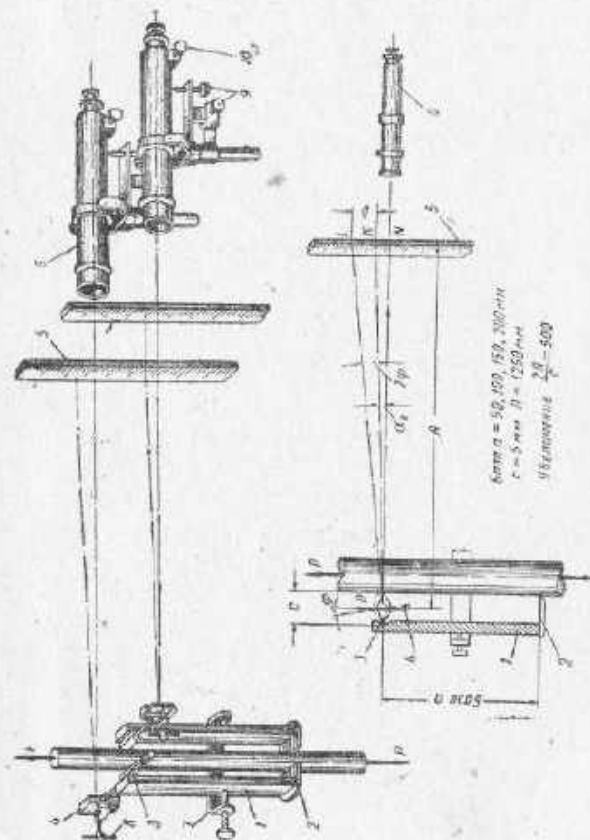
Стандартный комплект зеркального тензомера включает набор планок различной длины, позволяющих производить измерения при базе 50, 100, 150, 200 мм.

При растяжении образца его длина увеличивается, а длина планки 1 остается неизменной. Вследствие этого призма 3 поворачивается на некоторый угол; вместе с призмой поворачивается зеркало 4, которое отражает изображение шкалы 5, наблюдаемое в оптическую трубу. Поворот зеркала вызывает гермещение делений шкалы, видимых в трубу. Если в начале опыта наблюдатель видит некоторое деление K (фиг. 94), то после деформации он будет видеть уже деление L .

Обозначим через c — длину диагонали призмы 3; через A — расстояние между зеркалом и шкалой и, наконец, через b — расстояние между точками K и L на шкале.

При удлинении образца на величину Δa зеркало повернется на угол φ

$$\sin \varphi = \frac{\Delta a}{c}.$$



Фиг. 94. Конструктивная и принципиальная схемы зеркального тензомера

Вследствие малости угла можно считать, что

$$\varphi = \frac{\Delta a}{c}$$

При повороте зеркала на угол φ луч OK повернется на угол, равный 2φ , и займет положение OL . Тангенс угла 2φ (из треугольника KOL) равен

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{b}{A}$$

Ввиду малости угла φ можно принять, что

$$2\varphi \approx \frac{b}{A}$$

Исключая из двух написанных уравнений угол φ , получим:

$$\frac{2\Delta a}{c} = \frac{b}{A}$$

или

$$b = \frac{2A}{c} \cdot \Delta a$$

Таким образом, разность отчетов по шкале b пропорциональна удлинению базы образца Δa . Коэффициент пропорциональности $\frac{2A}{c}$ представляет собой степень увеличения.

Он зависит от длины c диагонали призмы и расстояния A от зеркала до шкалы. Обычно расстояние A выбирают так, чтобы увеличение равнялось 500 (например, $c = 5$ мм, $A = 1250$ мм, $\frac{2A}{c} = 500$).

Для большей точности измерений прибор делают двояным, чтобы иметь возможность одновременно измерять деформации с обеих сторон образца. Среднее арифметическое показаний обоих приборов дает величину действительной деформации растяжения. Таким образом, исключается ошибка, которая может возникнуть из-за неточного приложения растягивающей силы по оси образца, что приводит к его искривлению.

Крепление прибора к образцу осуществляется при помощи трубки 7. В зависимости от профиля образца (круглый или прямоугольный) нижний нож 2 должен быть повернут

к образцу своей вогнутой или выпуклой стороной; это обеспечивает надежное сцепление ножа с образцом. Для поворота ножа надо освободить крепящий винт и, повернув нож соответствующей стороной, вновь его закрепить.

Оптические трубы 6 и зеркала 4 должны быть установлены так, чтобы деления шкалы были хорошо видны. Установка зеркал производится путем поворачивания их относительно точки закрепления при помощи винтов 8. Установка оптических труб в вертикальной и горизонтальной плоскостях осуществляется посредством винтов 9. Наведение труб на фокус производится с помощью винтов 10. Перед тем, как производить установку зеркал и труб, необходимо убедиться, что расстояние A между шкалой и зеркалом составляет 2500, где c — длина большой диагонали призмы, в этом случае увеличение будет равно 500. При установке прибора необходимо также обратить внимание на правильность установки призмы. Призмы должны быть установлены с некоторым наклоном в сторону, обратную направлению их рабочего хода так, чтобы им была обеспечена достаточная подвижность.

Тензометр «МИЛ»

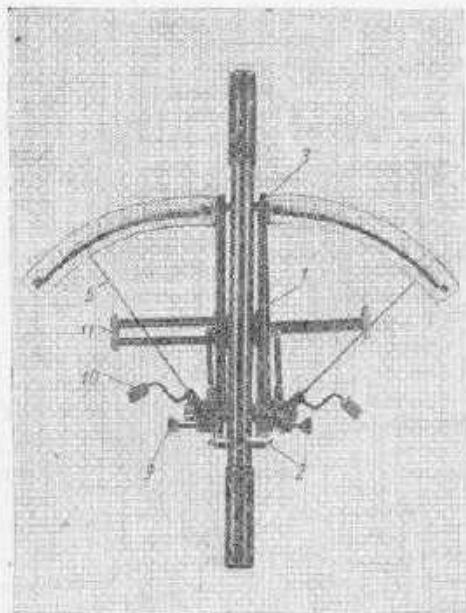
Тензометр «МИЛ» так же, как и зеркальный тензометр Мартенса, предназначен исключительно для измерения линейных деформаций образцов при растяжении.

Общий вид и схема прибора представлены на фиг. 95 и 96 (нумерация деталей на обеих фигурах единая).

Тензометр состоит из двух одинаковых систем рычагов, расположенных на противоположных сторонах испытуемого образца и соединенных между собой пружинной струбиной 11 (фиг. 95). Каждая система рычагов имеет в качестве основания плоскую планку 1, выполненную в виде рамки (фиг. 96). К нижнему концу планки прикреплен неподвижный нож 2, а к верхнему — подвижный клинообразный нож 3. Расстояние между обоими ножками, равное 100 мм, является базой прибора. Верхний подвижный нож 3, составляющий одно целое с рычагом 4, укреплен в точке А шарнирно. При удлинении образца верхний нож 3 поворачивается. Это вызывает перемещение в горизонтальном направлении нижнего конца рычага и поворот соединенной с ним стрелки 5. Соединение стрелки 5 с рычагом 4 осуществляется при помощи якоря 6, выполненного из тонкой листовой стали в удерживаемого пружины 7. Ось стрелки (точка В) укреплена на подвижной детали 8; благодаря этому ее можно перемещать в горизонтальном направлении при помощи

винта 9. Это обеспечивает возможность устанавливать стрелку на нуль после того, как прибор поставлен на образец.

Увеличение, даваемое прибором, определяется отношением плеч рычага 4 и стрелки 5. Эти плечи выбраны таким

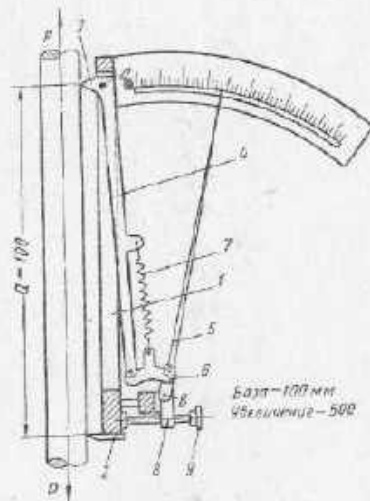


Фиг. 93. Общий вид двойного тензомера «МИЛ», установленного на образце

образом, что увеличение составляет 500. Для увеличения диапазона измерения прибора имеется возможность в процессе испытания возвращать стрелку на нуль. Это осуществляется перемещением точки закрепления стрелки при помощи винта 9.

Описанный прибор очень удобен в эксплуатации. Установка его на образец весьма проста. Для того, чтобы установить прибор, следует сжать пружину струбины и отодви-

нуть таким образом лавки друг от друга; затем надо установить прибор по центру образца и отпустить пружину. В процессе установки прибора стрелки удерживаются в положении, близком к нулевому делению, при помощи грузиков 10; точная установка на нуль производится винтом 9.



Фиг. 96. Схема тензомера «МИЛ»

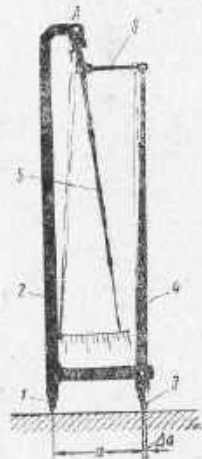
Рычажный тензомер типа Хугенбергера

Тензомер Хугенбергера применяется для измерения деформаций при исследовании напряженного состояния деталей и конструкций. В соответствии с назначением прибор имеет небольшую базу (базой называется расстояние между острями, которыми прибор устанавливается на испытуемую деталь) и довольно большое увеличение. Большинство моделей имеют базу $a=20$ мм и увеличение примерно равное 1000. (Некоторые модели имеют базу $a=10$ мм).

При испытаниях стандартных образцов с целью определения модуля упругости и предела пропорциональности тензомер Хугенбергера обычно не применяется, так как в этом

случае целесообразно использовать тензометры с большой базой, обеспечивающие большую точность измерения. Для исследования напряжений в деталях и конструкциях тензометры с большой базой не пригодны, так как они дают усредненное значение деформации на большом участке (на длине базы); в действительности же деформация по длине исследуемой детали может измениться. При изучении напряженного состояния в зонах концентрации напряжений, где имеет место большой градиент деформации, база тензометра Хугенбергера, равная 20 мм, также будет недопустимо большой. В этом случае необходимо пользоваться малобазными тензометрами с базой 5 мм, 2 мм и меньше.

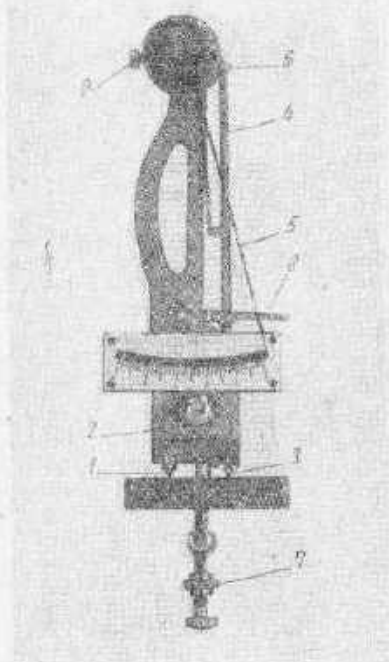
Принципиальная схема прибора и его общий вид показаны на фиг. 97 и фиг. 98. По своему устройству рассматриваемый тензометр аналогичен тензометру «МИЛ».



Фиг. 97. Принципиальная схема рычажного тензометра типа Хугенбергера

Прибор опирается на исследуемую поверхность в двух точках. Неподвижный нож 1 составляет одно целое с корпусом прибора 2. Подвижной нож 3, жестко соединенный с рычагом 4, прикреплен к корпусу шарнирно. Для уменьшения

трения шарнирное соединение ножа 3 с корпусом 4 конструктивно выполнено в виде призматической пары, состоящей из стальной закаленной призмы и седла, смонтированного в корпусе.



Фиг. 98. Общий вид рычажного тензометра типа Хугенбергера

В процессе деформации исследуемой детали расстояние между острыми ножами 1 и 3 изменяется и рычаг 4 поворачивается вокруг точки закрепления; при этом его верхний конец перемещается в горизонтальном направлении, что вызывает поворот стрелки 5. Стрелка шарнирно закреплена в

точке А и соединена с рычагом 4 при помощи соединительного звена 6. Размеры рычага 4 и стрелки 5 выбраны с таким расчетом, чтобы перемещение конца стрелки по шкале было примерно в 1000 раз больше измеряемого удлинения α . Прибор прикрепляется к испытуемой детали посредством струбины 7, как это показано на фиг. 98. Для предохранения прибора от повреждения при установке, рычаг 4 запирается арретиром 8, который освобождается только после того, как прибор уже установлен.

Установка стрелки на нуль шкалы, а также перестановка стрелки в процессе опыта в случае, если шкала будет полностью исчерпана, производится посредством винта 9, вращение которого вызывает перемещение точки закрепления стрелки (точки А).

Циферблатный индикатор

Циферблатный, или стрелочный индикатор, общий вид которого показан на фиг. 99, служит для измерения линейных перемещений. При применении специального крепления прибор можно также использовать в качестве тензомера (для измерения удлинений).

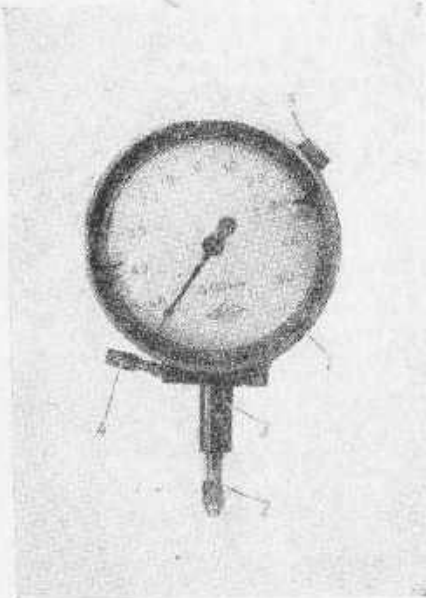
При измерении перемещений корпус прибора 1 прикрепляется к неподвижной детали, а его стержень 2, под действием пружины, расположенной внутри корпуса, прижимается к поверхности перемещающейся детали.

Осевое перемещение измерительного стержня относительно корпуса прибора вызывает поворот стрелки, указывающей на циферблате в увеличенном виде величину измеряемого перемещения. Увеличение достигается за счет зубчатой передачи, соединяющей измерительный стержень со стрелкой.

Индикаторы изготавливаются с ценой деления 0,001 мм, 0,002 мм и 0,01 мм. Для расширения диапазона измерения индикаторы обычно устроят так, чтобы стрелка могла делать несколько оборотов. Число полных оборотов стрелки в этом случае отсчитывается по вспомогательной малой шкале, расположенной на том же циферблате. Диапазон измерения индикаторов с ценой деления 0,001 мм может достигать 1 мм, а индикаторов с ценой деления 0,01 мм — до 10 мм.

При измерении линейных перемещений индикатор обычно устанавливается на специальном штативе с массивным литым основанием и шарнирным кронштейном, позволяющим закреплять прибор в любом положении. При использовании индикатора в качестве тензомера необходимо к поверхности

исследуемой детали прикрепить две стойки, на одной из которых закрепляется сам прибор, а на второй устанавливается упор для измерительного стержня. Расстояние между стойками является базой тензометра.



Фиг. 99. Общий вид циферблатного индикатора

Во всех случаях прибор закрепляется за втулку 3, составляющую одно целое с корпусом 1.

Рычаг 4 служит для приподнимания стержня 2 над поверхностью испытуемой детали.

Для установки стрелки на нуль шкала индикатора может быть повернута относительно корпуса в любое положение. Она зажимается в нужном положении винтом 5.

Электротензометрия

Применение механических тензометров при исследовании напряженного состояния деталей по целому ряду причин ограничено. К этим причинам относятся недостаточная чувствительность, значительные габаритные размеры, невозможность установки и наблюдения в малодоступных местах конструкций, трудность крепления к крупным деталям, невозможность снятия показаний на расстоянии и др.

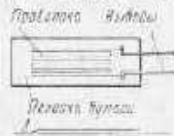
Указанные причины привели к необходимости разработки различных электротензометров. В настоящее время электротензометрия получила широкое распространение в лабораторной практике. Благодаря малым размерам тензометры этого типа могут быть в большом количестве размещены в различных, в том числе труднодоступных местах конструкции. При этом их показания регистрируются на одном пульте.

Всякий электротензометр состоит из двух основных элементов: тензодатчика, прикрепляемого к исследуемой детали, и измерительной аппаратуры.

Принцип действия электротензометров состоит в том, что деформация исследуемой детали вызывает изменение некоторого электрического параметра датчика, например, его омического сопротивления, емкости, индуктивного сопротивления и т. п., которое и регистрируется соответствующими приборами. Наибольшее распространение имеют тензодатчики, действие которых основано на изменении в процессе деформации их омического сопротивления (датчики сопротивления).

Рассмотрим более подробно устройство проволочных датчиков сопротивления, которые благодаря их простоте, линейности характеристики и стабильности применяются в настоящее время наиболее широко.

Проволочный датчик представляет собой несколько петель тонкой проволоки, зигзагообразно уложенной и приклеенной к полоске тонкой бумаги (фиг. 100). Концы проволо-



Фиг. 100. Схема проволочного датчика сопротивления

ки, образующей датчик, припаяны к более толстым выводам, также приклеенным к бумаге.

В собранном виде датчик прикрепляется к исследуемой поверхности при помощи специального клея. При нагружении детали проволока датчика деформируется так же, как и исследуемая поверхность, вследствие чего электрическое сопротивление проволоки изменяется.

Изменение сопротивления датчика при деформации обуславливается, с одной стороны, изменением геометрических размеров проволоки (ее длины и площади поперечного сечения) и, с другой стороны, изменением ее удельного сопротивления.

Благодаря зигзагообразной укладке проволоки датчик реагирует на деформацию только в одном направлении, совпадающем с направлением витков проволоки. Деформации же в перпендикулярном направлении практически датчиком не регистрируются.

Характеристика проволочных датчиков (т. е. зависимость изменения сопротивления датчика от деформации) почти полностью линейна в пределах величин относительной деформации до 1% как при растяжении, так и при сжатии.

Некоторым недостатком проволочных датчиков является невозможность их многократного использования, так как при отклеивании датчик разрушается. В связи с этим отсутствует возможность предварительной тарировки датчиков. Тарировка проволочных датчиков, т. е. определение их тензочувствительности, производится отборочным порядком. По результатам тарировки некоторой части датчиков, отобранных от данной партии, устанавливают характеристику всей партии.

Проволочные датчики, изготавливаемые отечественными лабораториями, обычно имеют следующие данные: база датчика от 5 до 20 мм, омическое сопротивление 100—20 Ом, материал проволоки — константан, никром и др., диаметр проволоки приблизительно 0,03—0,05 мм.

Основной характеристикой датчика является его тензочувствительность, т. е. отношение относительного изменения сопротивления $\frac{\Delta R}{R}$ к относительной деформации ε :

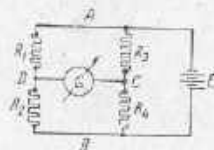
$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

Чувствительность датчиков из константана равна приблизительно двум. Колебание чувствительности для датчиков одной партии допускается в пределах 1%.

Надежные результаты измерения деформаций с помощью проволоочных датчиков можно получить только при условии тщательной их приклейки. Для приклеивания датчиков применяются различные клеи. Наиболее часто применяется клей БФ-2. Вследствие медленного затвердевания этого клея измерения можно производить не ранее, чем через сутки после приклейки. Из более быстросохнущих клеев можно указать 5-процентный раствор целлулозы в ацетоне, который также широко употребляется, хотя и менее надежен, чем клей БФ-2.

Рассмотрим устройство аппаратуры, применяемой для регистрации показаний проволоочных датчиков. Эта аппаратура должна давать возможность регистрировать весьма малое изменение сопротивления датчика, измеряющееся десятками долями процента его величины. Обычно для такого рода измерений используется схема мостика Уитстона.

При простейшей постановке эксперимента эта схема выглядит так, как показано на фиг. 101. Сопротивления R_1 , R_2 ,



Фиг. 101. Принципиальная схема простейшего измерительного мостика

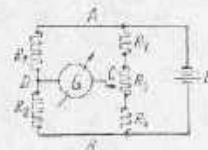
R_1 и R_2 представляют собой плечи мостика. К диагоналям мостика AB и CD подключаются источник постоянного тока E и гальванометр G . Сила тока, протекающего через гальванометр, определяется соотношением величин сопротивлений, образующих мостик. В случае соблюдения условия $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$

ток гальванометра равен нулю. При изменении одного из сопротивлений, например сопротивления R_1 , через гальванометр потечет ток, пропорциональный этому изменению. Если в качестве сопротивления R_1 подключить датчик, наклеенный на исследуемую деталь, а остальные сопротивления (R_2 , R_3 и R_4) взять постоянными, то отклонение стрелки гальванометра будет пропорционально деформации исследуемой де-

тали. Знак деформации в этом случае определяется направлением отклонения стрелки гальванометра.

Для устранения влияния температуры сопротивление R_2 обычно выполняют в виде такого же датчика, наклеенного на пластинку, изготовленную из того же материала, что и исследуемая деталь, и находящуюся в тех же температурных условиях. В этом случае изменение температуры вызывает одинаковое изменение сопротивления датчиков R_1 и R_2 (первый из которых называется активным, а второй — компенсирующим), и ток в гальванометре остается неизменным.

При выполнении измерений по описанной схеме необходимо во избежание ошибок поддерживать строго постоянное напряжение источника питания, кроме того, необходимо иметь прецизионный гальванометр, который позволил бы не только зарегистрировать наличие тока в диагонали CD , но и измерить его величину. Выполнение указанных условий связано с некоторыми трудностями, поэтому чаще применяют другую схему — схему так называемого уравновешенного моста (фиг. 102).



Фиг. 102. Схема «уравновешенного моста», применяемого для измерения показаний проволоочных датчиков

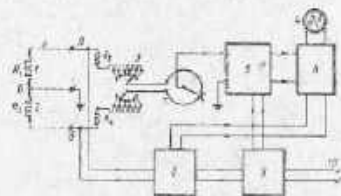
Отличие этой схемы от первой состоит в том, что между сопротивлениями R_2 и R_1 включается дополнительное малое сопротивление R_5 со скользящим контактом C , к которому подключается гальванометр. В процессе деформации мост разбалансируется так же, как и в первом случае, и стрелка гальванометра отклонится. Для того, чтобы прочесть показания, контакт C передвигают и добиваются восстановления равновесия, т. е. возвращают стрелку гальванометра на нуль. О величине и знаке деформации в этом случае судят по величине и направлению смещения контакта C , шкала которого соответствующим образом градуирована.

Эта схема нечувствительна к колебаниям напряжения источника питания, так как при равновесии моста (при отсутствии тока в гальванометре) положение скользящего контакта определяется только соотношением величин сопротивлений и не зависит от напряжения источника питания.

Мостовые схемы такого типа применяются также при измерении деформаций в нескольких точках детали.

В качестве примера более совершенного прибора для измерения статических деформаций с помощью проволоочных датчиков, опишем электронный измеритель статических деформаций.

Принципиальная схема этого прибора показана на фиг. 103. В основе прибора лежит та же схема уравновешенного моста Уитстона. Мост составлен из сопротивления



Фиг. 103. Схема электронного измерителя статических деформаций

активного датчика R_1 , сопротивления компенсирующего датчика R_2 и двух постоянных сопротивлений R_3 и R_4 , смонтированных внутри прибора. Питание моста осуществляется от специального генератора 8, дающего переменный ток частотой приблизительно 1000 μ . Генератор расположен также внутри прибора. Использование переменного тока для питания моста дает возможность производить усиление напряжения, снимаемого с диагонали мостика CD , и применить в качестве указателя разбалансировки обычный миллиамперметр постоянного тока. Для целей усиления применен электронный усилитель 5 переменного тока с тремя каскадами усиления.

При разбалансировке моста, вызванной деформацией датчика, стрелка гальванометра отклоняется. Восстановление баланса и возвращение стрелки на нуль производится при помощи струнного реохорда 7, на диске которого имеется лимб для отсчета величин деформации. Цена одного деления лимба составляет $1 \cdot 10^{-5}$ единиц. При одном полном обороте диска реохорда указатель лимба проходит 100 делений, что соответствует диапазону измерения деформации от нуля

до $1 \cdot 10^{-3}$ единиц. С целью расширения диапазона измерения реохорд подключен к мосту через переключатель диапазонов 3. Переключатель имеет шесть положений, причем каждая его ступень соответствует 100 делениям реохорда. Для того, чтобы проматывать показание, следует отсчитывать сотни делений по шкале переключателя диапазонов, а десятки и единицы делений — по шкале реохорда. Весь диапазон измерения равен $6 \cdot 10^{-3}$ единиц деформации.

Следует заметить, что миллиамперметр 4, указывающий разбалансировку, подключен не непосредственно к выходу усилителя, а к так называемому физическому дискриминатору 6. Дискриминатор производит выпрямление переменного тока и, кроме того, дает возможность отличать деформации растяжения от деформаций сжатия. Его действие основано на том, что при уменьшении сопротивления датчика R_1 напряжение разбалансировки, снимаемое с диагонали моста CD , совпадает по фазе с напряжением питающего генератора 8, а при увеличении сопротивления R_1 противоположно по фазе напряжению генератора.

Пройдя усилитель 5, напряжение разбалансировки попадает в дискриминатор 6, куда также подведено напряжение непосредственно от генератора 8. Дискриминатор производит сравнение фаз этих напряжений и дает выпрямленный ток того или другого направления в зависимости от разности фаз. При деформации растяжения разность фаз равна нулю, и стрелка амперметра отклоняется влево; при деформации сжатия получается сдвиг фаз на 180° и стрелка получает отклонение вправо.

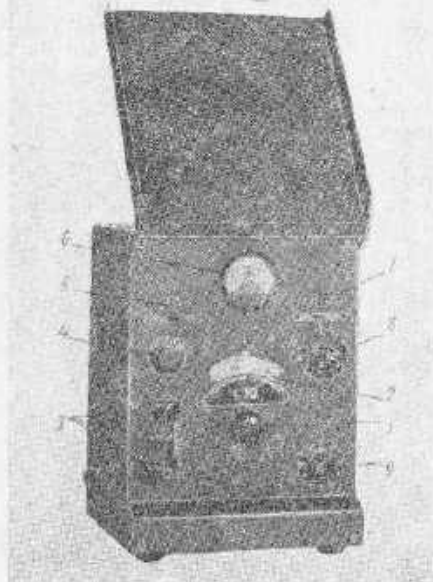
Описанная схема несколько упрощена по сравнению с действительной схемой. В действительной схеме, кроме перечисленного выше, имеются регулятор чувствительности, переключатель с рабочего положения на контроль и корректор нуля. Назначение регулятора чувствительности состоит в том, чтобы обеспечить одну и ту же цену деления реохорда при использовании датчиков различной тензочувствительности. Чувствительность датчиков, указанная в паспорте каждой партии, может колебаться в пределах от 1,8 до 2,3.

Для получения цены деления, равной $1 \cdot 10^{-5}$ единиц деформации, ручку регулятора необходимо поставить в положение, соответствующее чувствительности данной партии датчиков.

Переключатель с «рабочего положения» на «контроль» и «корректор нуля» служит для проверки и настройки прибора перед началом работы. Поставив переключатель в положение

«контроль» (при этом измерительный мост отключен от усилителя) и вращая ручку корректора, следует установить стрелку амперметра на нуль. Этим будет обеспечено отсутствие искажений при выполнении измерений.

Общий вид прибора с указанием планшета ручек управления дан на фиг. 104.



Фиг. 104. Общий вид электронного измерителя статических деформаций.

1 — ручка рекорда; 2 — шкала рекорда; 3 — клеммы для подключения датчиков. Рабочий датчик подсоединяется к верхней и средней клеммам, а компенсационный — к средней и нижней (средняя клемма — общая); 4 — ручка корректора нуля; 5 — переключатель «измерение — контроль»; 6 — милливольтметр; 7 — выключатель датчика; 8 — регулятор чувствительности; 9 — переключатель аналогов.

Необходимо отметить, что для более надежного определения цены деления шкалы прибора часто производят тарировку датчиков в комплекте с тем измерительным прибором, который применяется при последующих исследованиях. Для этого берут датчик из той же партии, что и применяемые при исследовании, наклеивают его на специальную тарировочную линейку, затем ставят ручку чувствительности в некоторое определенное положение (например, на деление 2,0) и, задавая линейке известные по величине деформации, отсчитывают показания по шкале прибора. Разделив величину относительной деформации линейки на число делений, получают цену одного деления, при этом погрешность может несколько отличаться от $1 \cdot 10^{-6}$. В дальнейшем при проведении самого эксперимента нужно следить, чтобы ручка «чувствительности» все время находилась в одном и том же выбранном положении, тогда при обработке результатов можно считать, что цена деления шкалы прибора равна цене деления, полученной при тарировке.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Часть I Описание экспериментальных работ	6
Работы 1, 2, 3. Определение механических характеристик материала при растяжении и сжатии	6
Работа 4. Определение модуля упругости первого рода и коэффициента поперечной деформации материала	36
Работа 5. Испытание на кручение	34
Работа 6. Экспериментальное исследование напряженного состояния, возникающего при кручении	42
Работа 7. Испытание стальной балки на изгиб	46
Работа 8. Испытание стальной балки при косом изгибе	49
Работа 9. Определение радиуса кривизны центра изгиба	54
Работа 10. Исследование напряжений в плоском брусе большой кривизны	57
Работа 11. Определение жесткости цилиндрической винтовой пружины растяжения — сжатия	63
Работа 12. Экспериментальная проверка теоремы о взаимности работ	67
Работа 13. Определение перемещений сечений статически неопределяемых рам	71
Работа 14. Исследование стойки малой жесткости при продольно-поперечном изгибе	77
Работа 15. Исследование напряженного состояния методом тензиометрии	82
Работа 16. Поларизационно-оптический метод исследования напряжений	92
Работа 17. Технологические испытания листового материала и проволочки	106
Работа 18. Испытание на удар	110
Работа 19. Определение твердости	115
Часть II. Описание машин и приборов для механических испытаний материалов	126
Введение	126
Машина для испытаний на растяжение ИМ-12А конструкции ЦНИИТМАШ	129
Универсальная испытательная машина Р5	133
Машина для испытаний на растяжение фирмы «Лозентаузен»	137

Испытательная машина ИМ-1А конструкции ЦНИИТМАШ	140
Машина для испытаний на растяжение фирмы «Амслер»	144
Универсальная испытательная машина завода «Шопера»	148
Универсальная испытательная машина ИИМ-50	152
Универсальная испытательная машина ИИМ-30	156
Машина для испытаний на кручение К-80	160
Машина для испытаний на кручение фирмы «Эвент»	164
Приборы для измерения деформаций	167
Зеркальный тензиометр типа Мартенса	168
Тензиометр «МИУ»	171
Рычажный тензиометр типа Хугенберга	173
Циферблатный индикатор	176
Электротензиометрия	178

