А.М. АФАНАСЬЕВ
В. А. МАРЬИН

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

А. М. АФАНАСЬЕВ, В. А. МАРЬИН

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

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

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1978

606
А94
УДК 620.10

Лабораторный практикум по сопротивлению материалов, учебное пособие. А. М. Афанасьев, В. А. Марьин, издание 2-е, переработанное. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975.

Лабораторные занятия по курсу сопротивления материалов открывают новые пути. Они способствуют усвоению основ предмета в наглядной и запоминающейся форме, знакомят студентов с важнейшими механическими свойствами материалов, учат постановке и проведению экспериментов, что очень важно для развития научно-исследовательской работы студентов в связи с новым курсом высшей школы на усиление этого рода работы студентов.

В настоящей книге наряду с обычными работами описаны эксперименты повышенной сложности, которые могли бы послужить началом самостоятельной исследовательской работы студентов. Во второе издание книги включены описания новой литературы и получившего в настоящее время развитие метода муаров.

Книга предназначена для студентов высших и средних технических учебных заведений, преподавателей и инженеров и техников, ведущих экспериментальную работу по исследованию прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций.

©Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975 с изменениями.

А $\frac{30106-027}{053(02)-75}$ 143-75

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 6

ЧАСТЬ I

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

Глава I. Определение постоянных упругости и основных механических характеристик материалов 7

Работа 1. Диаграмма растяжения мягкой стали 7
Работа 2. Определение модуля упругости E и пределов пропорциональности и текучести 16
Работа 3. Испытание материалов на сжатие 25
Работа 4. Испытание на срез 31
Работа 5. Определение коэффициента Пуассона 32
Работа 6. Испытания на прочность при переменных напряжениях (выносливость) 36
Работа 7. Определение твердости 45
Работа 8. Испытание на ползучесть 60

Глава II. Исследование деформаций и напряжений 63

Работа 9. Внецентренное растяжение 63
Работа 10. Растяжение полосы с отверстием 66
Работа 11. Кручение стержней круглого сечения 68
Работа 12. Кручение стержней прямоугольного сечения 75
Работа 13. Испытание винтовой пружины 78
Работа 14. Испытание балки на изгиб 80
Работа 15. Определение положения центра изгиба открытого профиля 87
Работа 16. Косой изгиб 92
Работа 17. Распределение нормальных напряжений в сечении кривого бруса при изгибе 96
Работа 18. Определение главных напряжений при изгибе и кручении трубы 98
Работа 19. Внецентренное сжатие 103
Работа 20. Действие ударной нагрузки на балку 108
Работа 21. Колебания груза на пружине 113
Работа 22. Исследование свободных колебаний балки 119

Глава III. Испытания на устойчивость 122

Работа 23. Устойчивость сторонней при сжатии 122
Работа 24. Изгибно-крутильная форма потери устойчивости 125
Работа 25. Устойчивость плоской формы изгиба балки 128

Глава IV. **Специальные методы исследования напряжений** 130

Работа 26. Исследование напряжений в поляризованном свете. Определение цены полосы 130
Работа 27. Определение главных напряжений в поляризованном свете 140
Работа 28. Определение нормальных напряжений методом муаров 143
Работа 29. Исследование изгиба пластины методом муаров 147
Работа 30. Электротензометрирование 154

Часть II

ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Глава V. **Измерительные приборы** 159

§ 1. Штангенциркули и микрометры 159
§ 2. Индикатор для измерения линейных смещений 162
§ 3. Измерители углов закручивания (торсиометры) 163
§ 4. Нивелиры 165
§ 5. Делительная машина 166
§ 6. Тензометры рычажные 169
§ 7. Планиметры 171
§ 8. Вибраторы 174
§ 9. Осциллография 176
§ 10. Электронный измеритель деформаций 192
§ 11. Аппаратура для измерения статических и динамических деформаций 194

Глава VI. **Испытательные винтовые машины с горизонтальным силоизмерительным рычагом** 198

§ 12. Разрывная машина с силой до 50 *Т* 198
§ 13. Универсальная машина с силой до 25 *Т* 200
§ 14. Машина для испытаний на растяжение и сжатие силой до 5 *Т* 204
§ 15. Разрывная машина с силой до 1,5 *Т* 207
§ 16. Машина на кручение до 100 *кГ м* 207

Глава VII. **Машины винтовые с тензометрическим силоизмерителем** . . . 207

§ 17. Универсальная машина WPM с силой до 6 *Т* 207
§ 18. Разрывная машина ИМ-12А 209
§ 19. Машина на кручение до 50 *кГ м* 215

Глава VIII. **Машины гидравлические** 215

§ 20. Универсальная машина с силой до 10 *Т* 215
§ 21. Универсальная машина с силой до 20 *Т* для длинных образцов . . . 217
§ 22. Универсальная 50-тонная машина для испытаний при сложном нагружении 219

Глава IX. **Приборы для испытаний на твердость** 227

§ 23. Пресс Бринеля (тип Альфа) 227
§ 24. Прибор для определения твердости по Роквеллу 229
§ 25. Прибор для определения твердости алмазной пирамидой 231
§ 26. Прибор Шора 233
§ 27. Прибор для определения твердости напильником 234
§ 28. Прибор для определения микротвердости 236

Глава X. **Машины динамического действия** 237

§ 29. Универсальная машина WPM с силой до 100 *Т* с пульсатором 237
§ 30. Универсальная машина с силой до 50 *Т* с пульсатором на 10 *Т* динамического действия 245

§ 31. Маятниковый копер для ударной пробы надрезанных образцов 250
§ 32. Универсальная машина с силой до 10 *Т* с электрическим силоизмерителем и напряжительным устройством 255

Глава XI. **Машины для испытаний при высоких и низких температурах** . . 262

§ 33. Испытательная 30-тонная машина с нагревателем до 1200° 262
§ 34. Машина с силой до 30 *Т* для испытаний при температурах от −60° до −150° 267

Глава XII. **Настольные лабораторные установки** 270

§ 35. Установки для испытаний на изгиб 270
§ 36. Установка для испытания на сложное сопротивление 271
§ 37. Установка для испытаний на продольный изгиб 274
§ 38. Установка для испытания пластинки на изгиб 276

Глава XIII. **Лабораторные установки для факультативных работ** 277

§ 39. Стенд для испытания консольных моделей 277
§ 40. Установка для исследования пространственного изгиба криволинейного бруса 278
§ 41. Иллюстрация теоремы о взаимности работ 279
§ 42. Установка для определения положения центра сдвига 281
§ 43. Вибрационная установка установки с электродинамическим вибратором 282

Литература 285
Предметный указатель 286

ПРЕДИСЛОВИЕ

Механические испытания являются неотъемлемой частью курса сопротивления материалов — науки о прочности и жесткости элементов конструкций. Эта наука нуждается в экспериментальном обосновании исходных гипотез, проверке теоретических выводов и изучении процесса деформации вплоть до разрушения. Удовлетворять этим задачам и призваны лабораторные занятия, сопутствующие курсу сопротивления материалов.

Настоящая книга предназначена быть руководством для проведения лабораторных занятий и подготовки к ним. Она построена как дополнение к учебнику по втузовскому курсу сопротивления материалов, однако может служить учебным пособием и для техникумов.

Книга содержит две части:

I. Описание лабораторных занятий.

II. Описание испытательных машин, установок и измерительных приборов.

Первая часть составлена в той последовательности, в какой работы обычно выполняются в лаборатории. В описаниях работ указываются: цель опыта, постановка задачи, соответствующие теоретические данные, форма лабораторного журнала, порядок проведения опыта, необходимые пояснения к пользованию аппаратурой и способы обработки результатов опыта. В отдельных случаях здесь же приводится описание применяемых приборов и машин. В основном же описанию машин, специальных установок и приспособлений посвящена вторая часть книги, где рассмотрены принципиальные схемы наиболее распространенных агрегатов, их назначение, области применения, правила эксплуатации, точность и масштабы показаний.

Наряду со стандартным содержанием большое внимание уделено новым задачам и методам. Дано описание настольных установок для специальных испытаний, электрических и оптических методов измерения деформаций и соответствующей аппаратуры. Показано применение этих методов при статическом и динамическом нагружении.

Работы 1—5, 8—16, 19, 21, 23—27, 30 и §§ 3, 4, 6, 12—20, 35—42 составлены В. А. Марениным; работы 6, 7, 17, 18, 20, 22, 29 и §§ 1, 2, 5, 7, 8, 9 (п. 1—4), 21—34 — А. М. Афанасьевым; работа 28 — Е. Н. Андреевой; §§ 9 (п. 5), 10, 11, 43 — В. А. Виноградовым.

ГЛАВА 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ УПРУГОСТИ И ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Работа 1. Диаграмма растяжения мягкой стали

1. Общие сведения. Цель работы — исследовать процесс растяжения металлического образца вплоть до разрыва его и определить при этом следующие механические характеристики материала:

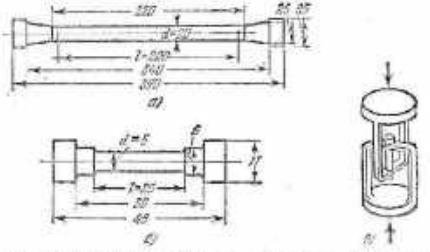


Рис. 1. Металлические образцы для испытаний: *а* — горизонтальный образец; *б* — малый образец, *в* — общий динамометр.

1) предел текучести $\sigma_т$; 2) предел прочности $\sigma_в$; 3) напряжение при разрыве $s_к$; 4) удлинение при разрыве δ; 5) сужение ψ в шейке; 6) удельную работу a, затрачиваемую на разрыв.

Стандартный металлический образец для испытания на растяжение имеет вид, показанный на рис. 1, *а*. Длина цилиндрической части образца равна $11d$, где d — диаметр образца. Длина $l = 10\,d$ называется р а с ч е т н о й д л и н о й образца. При диаметре $d = 2$ см образец называется н о р м а л ь н ы м.

Обозначив через F площадь сечения образца, для нормального образца получим такие соотношения:

$$d=\sqrt{\frac{4F}{\pi}}=1{,}13\sqrt{F} \quad \text{и} \quad l=11{,}3\sqrt{F}.$$

Применяются образцы и некруглого поперечного сечения. Ширина стандартного образца прямоугольного сечения втрое больше его толщины, а его расчетная длина l также принимается равной $11{,}3\sqrt{F}$.

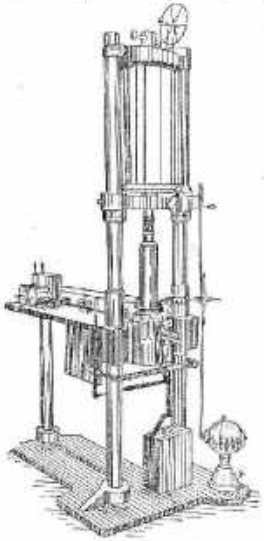


Рис. 2. Общий вид пресса Гагарина.

Для испытаний применяются и малые образцы (рис. 1, *б*), у которых отношение длины цилиндрической части к диаметру равно 5. Такие образцы применяются для испытаний на прессе Гагарина и на некоторых других машинах.

2. Пресс Гагарина. Растяжение образца осуществляется на той или иной испытательной машине. Широко известен в учебных и заводских лабораториях пресс А. Г. Гагарина (рис. 2), выпущенный многими сериями.

Пресс Гагарина применяется для испытаний как на сжатие, так и на растяжение. При испытании на растяжение используется приспособление, называемое реверсором. Образец (рис. 1, *б*) устанавливается в реверсор, как показано на рис. 1, *в*; при этом сжимающая сила пресса, действующая сверху и снизу на упорные поверхности реверсора, растягивает образец. Существуют также реверсоры для испытаний на срезывание и на кручение.

Схема пресса Гагарина изображена на рис. 3. При помощи мотора или от руки диаграммный барабан *1* приводится во вращательное движение вокруг своей оси. При этом поступательно выдвигается винт *5*, который нажимает на образец *2* (на рис. 3 показан реверсор с образцом, испытываемым на растяжение). Сила нажатия винта передается через образец на короткое плечо рычага *3*. На другом плече рычага помещается уравновешивающий груз *4*, подвешенный к тележке, которая может передвигаться по рычагу. Передвижение тележки происходит автоматически при помощи пружинных часовых механизмов *6* и *7*, каждый из которых может подключаться к бесконечной цепи *8*, передвигающей тележку с грузом: механизм *6* двигает тележку влево, а механизм *7* — вправо. Если нагрузка возрастает, то длинное плечо рычага *3* поднимается и один из упоров регулятора *9* прижимается к маховику механизма *6*, как показано на рис. 3, и заторможивает его. В это время механизм *7* отодвигает груз *4* вправо до тех пор, пока рычаг не опустится; тогда происходит заторможивание механизма *7*, а механизм *6* начинает отодвигать груз

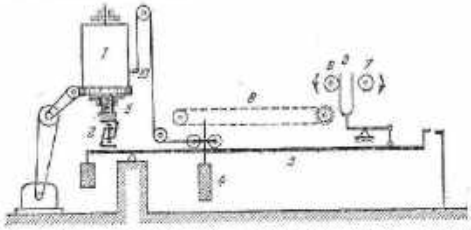


Рис. 3. Схема пресса Гагарина: *1* — диаграммный барабан, *2* — реверсор с образцом, *3* — рычаг, *4* — уравновешивающий груз, *5* — винт, *6* и *7* — часовые механизмы, *8* — бесконечная цепь, *9* — центростатический регулятор часовых механизмов, *10* — перо.

в обратную сторону [1]). Таким образом, всякое опускание или поднятие рычага тотчас приостанавливается соответствующим перемещением уравновешивающего груза *4*. Следовательно, нагрузка на образец всегда пропорциональна плечу уравновешивающего груза. На рычаге *3* имеется шкала нагрузок.

Пресс Гагарина относится к обширному классу испытательных машин, имеющих винтовой силовозбудитель и рычажный силоизмеритель. От других машин этого класса пресс Гагарина выгодно отличается тем, что имеет приспособление для автоматического уравновешивания нагрузки. Большим достоинством пресса Гагарина является крупный масштаб диаграммы, изображающей зависимость между нагрузкой и удлинением образца.

Диаграмма получается так: перо *10* (рис. 3), которое вычерчивает на барабане *1* диаграмму, перемещается по вертикали между направляющими. Положение пера определяется положением тележки с уравновешивающим грузом *4* на рычаге *3*, так как оно подвешено на

[1]) Иногда вместо описанного устройства применяется электромагнитный регулятор.

нитке, прикрепленной к тележке, и, следовательно, перемещению тележки вдоль рычага соответствует такое же вертикальное перемещение пера. Таким образом, вертикальный масштаб диаграммы или масштаб нагрузок совпадает с масштабом шкалы рычага, составляя либо 100 *кГ* в 1 *см*, либо 20 *кГ* в 1 *см*, в зависимости от величины груза 4. Максимальная нагрузка — 5 *Т*.

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

Образец закладывают в реверсор, который затем устанавливают под винт машины. Винт доводится от руки до соприкосновения с реверсором. Перед пуском мотора следует проверить готовность диаграммного аппарата и силоизмерителя: на диаграммном барабане должна быть прочерчена горизонтальная линия, что соответствует отсутствию нагрузки — ось абсцисс, а тормозной эксцентрик тележки должен быть освобожден. Следует также проверить, не соскочила ли с роликов нить, поддерживающая перо. Ползун-указатель на шкале рычага нужно вплотную придвинуть к тележке.

3. Диаграмма растяжения. Испытательная машина сообщает образцу принудительное удлинение и регистрирует сопротивление образца, т. е. нагрузку, соответствующую этому удлинению. Результат опыта представляется диаграммой растяжения. На рис. 4, *а* показана диаграмма растяжения малоуглеродистой стали, полученная на испытательной машине указанного типа. По оси абсцисс отложены удлинения λ образца, по оси ординат — нагрузки P.

Прямолинейный участок диаграммы указывает на пропорциональность между удлинением и нагрузкой (закон Гука). Нарушение этой пропорциональности при дальнейшем нагружении образца для мягких сталей сопровождается так называемой текучестью — быстрым возрастанием удлинений без увеличения нагрузки (а иногда даже с падением ее — рис. 4, *б*). Период текучести изображается на диаграмме участком AB, близким к горизонтальному, часто называемым площадкой текучести. П р е д е л о м т е к у ч е с т и $\sigma_т$ называется напряжение, соответствующее текучести.

Механически текучесть объясняется взаимными сдвигами частиц материала. На поверхности отполированного образца можно через лупу видеть косые штрихи — линии сдвигов. Эти линии называются линиями Чернова — Людерса. Большинство их наклонено к образующей образца под углом около 50°, т. е. приблизительно соответствует положению площадок наибольших касательных напряжений.

Высокоуглеродистые и другие стали большой прочности (как и другие материалы, кроме мягкой стали) не дают площадки текучести. Предел текучести для этих сталей принимается условно соответствующим напряжению, при котором остаточное удлинение образца составляет 0,2% или 0,5% его длины; обозначают его $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,5}$.

После стадии текучести материал вновь начинает сопротивляться возрастающей нагрузке, наступает так называемая стадия упрочнения.

Условное напряжение, получаемое как частное от деления максимальной наблюдаемой при опыте нагрузки (P_{max}) на первоначальную площадь поперечного сечения образца (F), называется в р е м е н н ы м с о п р о т и в л е н и е м, или п р е д е л о м п р о ч н о с т и материала и обозначается через $\sigma_в$.

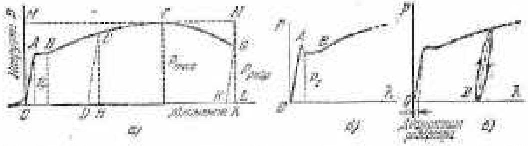


Рис. 4. График зависимости удлинения и нагрузки, полученный на испытательной машине: *а* — диаграмма растяжения малоуглеродистой стали; *б* — зуб текучести; *ОА* — прямолинейный участок, выражающий закон Гука, *АВ* — площадка текучести, *ВЕ* — область упрочнения образца, *ЕК* — область снижения сопротивляемости образца вследствие образования шейки, *СО* — разгрузка.

При максимальной нагрузке в образце начинает образовываться местное сужение поперечного сечения — шейка, вследствие чего сопротивление образца быстро уменьшается, и кривая здесь идет вниз. Но и с т и н н о е н а п р я ж е н и е, получающееся делением нагрузки на соответствующую площадь сечения образца в шейке, возрастает. К моменту разрыва истинное напряжение в шейке имеет наибольшее значение: оно может в два или даже в три раза превышать временное сопротивление.

4. Проведение испытания и обработка данных. Образец до установки его в машину тщательно обмеряют при помощи штангенциркуля (см. § 1 II части). Следует измерить диаметр и длину образца.

Нагружение образца можно начинать только после проверки готовности машины и приборов к испытанию. Первую часть испытания, соответствующую прямолинейному участку диаграммы, нужно проводить не быстро, чтобы избежать инерционных явлений, искажающих диаграмму.

Скорость нагружения на прессе Гагарина определяется установленным режимом работы мотора. Поэтому здесь нужно особенно

внимательно наблюдать начальную быстро протекающую стадию испытания.

Небольшой начальный участок диаграммы, получаемой на прессе Гагарина, бывает криволинейным (см. слева на рис. 4, *б*), переходящим далее в прямую линию. Начальная криволинейность диаграммы вызывается отсутствием полного контакта между головками образца и реверсором. Эту начальную криволинейность следует исключить, продолжив прямую линию диаграммы вниз, как показано на рис. 4, до пересечения ее с осью абсцисс. Полученную точку пересечения нужно считать началом диаграммы.

Деформация образца в начальной стадии растяжения, соответствующей прямолинейному участку диаграммы, у п р у г а я. С наступлением периода текучести образец начинает получать значительную остающуюся, так называемую п л а с т и ч е с к у ю или о с т а т о ч н у ю деформацию. Чтобы убедиться в этом, прекратим нагружение образца в некоторый произвольный момент испытания. Пусть точка *C* (рис. 4, *а*) соответствует моменту прекращения дальнейшего нагружения образца. Полное удлинение образца в данный момент выразится отрезком *OH* на оси абсцисс. Затем, постепенно разгружая образец, будем замечать уменьшение его длины. — при этом разгрузка изобразится прямой *CD*, параллельной первоначальному участку диаграммы. Отрезок *DH* представляет упругое удлинение образца, а отрезок *OD* — остаточное.

Упругое удлинение, как видим, подчиняется закону Гука в любой стадии деформации образца.

Загрузим теперь снова образец. На диаграмме повторится та же прямая *DC*, но в обратном направлении, и при дальнейшем нагружении получим кривую *CEG*, являющуюся как бы продолжением предыдущей диаграммы.

Следует отметить, что указанное явление описано здесь схематично. В действительности линии разгрузки и нагрузки не есть идеальные прямые и, несколько не совпадая друг с другом, образуют так называемую петлю гистерезиса (рис. 4, *в*).

Полное остаточное удлинение Δl образца определяется на диаграмме отрезком *OK* (рис. 4, *а*) на оси абсцисс, отсекаемых прямой *GK*, проведенной через точку *G* кривой параллельно первоначальному прямолинейному участку *OA* диаграммы.

О т н о с и т е л ь н ы м у д л и н е н и е м δ называется отношение абсолютного удлинения Δl образца к первоначальной его длине l (в процентах), т. е.

$$\delta = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%.$$

О т н о с и т е л ь н ы м с у ж е н и е м ψ поперечного сечения образца называется отношение $\frac{F - F_1}{F}$, где F — первоначальная площадь сечения образца, а F_1 — площадь сечения в месте разрыва, в шейке. Обычно величина ψ выражается в процентах:

$$\psi = \frac{F - F_1}{F} \cdot 100\%.$$

Полученная на диаграмме пресса Гагарина упругая деформация является преувеличенной, так как включает в себя деформацию реверсоров и других частей машины. Деформация реверсора по своей величине того же порядка, что и упругое удлинение образца. Следовательно, диаграмма, полученная на прессе Гагарина, не дает возможности судить о действительной упругой деформации образца. Этим недостатком обладают в разной степени и другие испытательные машины. Деформация реверсора λ_0 может быть предварительно измерена и учтена (рис. 4, *в*). Пунктирная прямая изображает действительную деформацию образца (при этом начало отсчета λ следует считать перенесенным в нижнюю точку пунктирной прямой).

Площадь диаграммы, заключенная между кривой *OAG* (рис. 4, *а*) и осью абсцисс, представляет собой работу, затраченную на растяжение образца. Для того чтобы вычислить ее, можно воспользоваться планиметром. Пусть, например, площадь диаграммы, замеренная планиметром, равна S *см*^{2}; масштабы диаграммы: в 1 *см* по вертикали (т. е. по оси нагрузок) — m *кГ*, в 1 *см* по горизонтали (т. е. по оси удлинений) — n *см*. Следовательно, 1 *см*^{2} диаграммы представляет mn *кГсм* работы и полная работа $T = Smn$.

Площадь S приближенно определяют, пользуясь так называемым к о э ф ф и ц и е н т о м п о л н о т ы д и а г р а м м ы, равным $\nu = S/S'$, где S' — площадь описанного прямоугольника *OMNL* (рис. 4, *а*). Площадь S' выражает работу, равную произведению $P_{max}\Delta l$, где Δl — удлинение образца (отрезок *OL* на рис. 4, *а*). Обозначим эту работу через T'; действительно затраченная работа T, выражаемая площадью S, несколько меньше; она равна $T'\nu$, т. е.

$$T = P_{max}\Delta l\nu. \qquad (1)$$

Для обычной малоуглеродистой стали коэффициент полноты диаграммы ν можно принять равным 0,85.

Полная работа, затраченная на разрыв образца, относимая к единице его объема, называется у д е л ь н о й р а б о т о й разрыва:

$$a = \frac{T}{V}. \qquad (2)$$

Здесь V — объем средней, цилиндрической, части образца.

Утолщенные части образца вблизи его головок обычно не получают пластической деформации, а их упругая деформация и, следовательно, соответствующая ей работа пренебрежимо малы по сравнению с полной работой T. Расчет работы ведется по

цилиндрическую часть образца длиной l (рис. 1, *а*), называемую расчетной. Часть работы, относящуюся к расчетной длине образца, обозначим через $T_{расч}$. Тогда удельная работа определится так:

$$a = \frac{T_{расч}}{V_{расч}}. \qquad (3)$$

Величину $T_{расч}$ можно приближенно определить по формуле (1), подставляя вместо Δl не полное удлинение образца, а только удлинение его расчетной части, определяемое непосредственным измерением.

В журнале лабораторных работ результаты описанного опыта записываются по форме, показанной в таблицах 1 и 2. Кроме того, в этом же журнале производят следующие записи:

Таблица 1

Размеры образца

До испытания			После разрыва		
l	d	$F=\frac{\pi d^2}{4}$	l_1	d_1	$F_1=\frac{\pi d_1^2}{4}$

Таблица 2

Сопротивление образца в *кГ*

При текучести $P_т$	Наибольшее P_{max}	В момент разрыва $P_{разр}$

Полное остаточное удлинение расчетной части образца $\Delta l = \ldots$ *см*.

Работа, затраченная на растяжение расчетной части образца, $T_{расч} = P_{max} \Delta l_{расч} \nu = \ldots$ *кГсм*.

Получаемые характеристики.

Предел текучести $\sigma_т = \frac{P_т}{F} = \ldots$ *кГ/см²*

Предел прочности $\sigma_в = \frac{P_{max}}{F} = \ldots$ *кГ/см²*

Напряжение при разрыве (истинное) $s_к = \frac{P_{разр}}{F_1} = \ldots$ *кГ/см²*

Относительное сужение при разрыве $\psi = \frac{F - F_1}{F} \cdot 100\% = \ldots \%$

Относительное удлинение $\delta = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% = \ldots \%$

Удельная работа $a = \frac{T_{расч}}{V} = \ldots$ *кГсм/см³*

Построение эпюры удлинений. До испытания образец размечают при помощи делительной машины (§ 5 части II) на равные доли по 1 *см*. После испытания удлинения долей измеряют; они оказываются неодинаковыми. Наибольшие удлинения имеют участки, расположенные вблизи шейки. Величины удлинений долей устанавливают непосредственным измерением линейкой. Эти величины, выраженные в сантиметрах, численно представляют собой относительные удлинения долей. Запись удлинений ведется по форме, приведенной в таблице 3 для образца длиной $l = 10d = 10$ *см*.

Таблица 3

№ долей по порядку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удлинение доли после разрыва образца в *см*										

Откладывая замеренные удлинения долей в некотором масштабе, можно получить эпюру распределения удлинений вдоль образца (рис. 5).

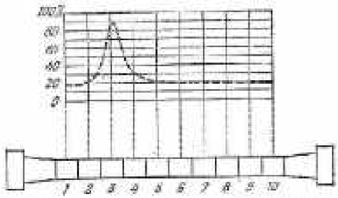


Рис. 5. Эпюра распределения остаточных деформаций по длине образца (цифры соответствуют месту замера и рисунку).

Сумма удлинений долей составляет полное абсолютное удлинение расчетной части образца. Относительное удлинение δ равно абсолютному удлинению, деленному на длину расчетной части образца. При δ пишется индекс 10 или 5, указывающий отношение длины расчетной части образца к его диаметру.

3. Приведение места разрыва к середине образца. Иногда разрыв образца происходит близко к его концу. В этом случае удлинение образца меньше обычного. Для того чтобы получить верный результат без повторения опыта, обмер образца после испытания производят следующим образом. От крайней риски (обозначена на рис. 6 нулем) отмеряют четное количество n долей так, чтобы место разрыва находилось приблизительно посредине отмеренного участка. Если место разрыва ближе к другому концу образца, то отмеривание производится от последней риски. В рассматриваемом примере $n = 2$. Соответствующую длину обозначим через a. Пусть образец содержит всего m долей (обычно m равно 20 или 10). За расчетную длину образца после испытания принимают $l_1 = a + 2b$, где b — длина участка, примыкающего к участку a, содержащего $\frac{m-n}{2}$ долей. В случае $m = 10$, показанном на рис. 6, имеем:

Рис. 6. Образец из мягкой стали после испытания на разрыв.

$$\frac{m-n}{2} = \frac{10-2}{2} = 4.$$

Относительное удлинение образца в процентах

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100.$$

Работа 2. Определение модуля упругости E и пределов пропорциональности и текучести

1. Общие сведения. В начальной стадии деформации образца для большинства металлов справедлив закон Гука

$$\lambda = \frac{Pl}{EF},$$

выражающий пропорциональность между удлинением λ образца и нагрузкой P.

Отсюда

$$E = \frac{Pl}{F\lambda}. \qquad (4)$$

Таким образом, модуль E может быть определен, если будут измерены удлинение λ образца и соответствующая нагрузка P.

Пределом пропорциональности $\sigma_{пц}$ называется наибольшее напряжение, при котором еще справедлив закон Гука. Для того чтобы найти $\sigma_{пц}$, ведут нагружение образца до тех пор, пока прира-

щения удлинения $\Delta\lambda$, соответствующие одному и тому же приращению нагрузки ΔP, не станут заметно увеличиваться. Для стали полагают предел пропорциональности достигнутым, если наблюдаемое значение $\Delta\lambda$ превышает среднее его значение, полученное в первой, линейной, стадии нагружения, на 50%; это равносильно увеличению «тангенса» угла [1] между касательной к линии $P(\lambda)$ и осью P на 50% (рис. 7).

Вслед за нахождением предела пропорциональности устанавливается и предел текучести. При отсутствии площадки текучести предел текучести принимается условно как напряжение, соответствующее остаточному удлинению, равному 0,2% длины образца.

Испытания проводятся на нормальном образце (см. рис. 1, а), или ему пропорциональном, т. е. таком, у которого отношение расчетной длины к диаметру равно 10.

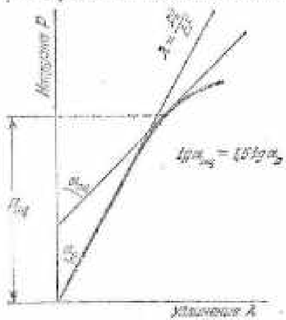


Рис. 7. К нахождению предела пропорциональности. Значение растягивающей силы $P_{пц}$ соответствует пределу пропорциональности.

2. Машина ГЗИП Р-5 силой до 5 Т. Испытание нормального образца (нормальный образец имеет диаметр 2 см) из малоуглеродистой стали возможно на машине мощностью не менее 30 Т (такие машины описаны в §§ 10 и 11 части II). Но часто применяются пропорциональные образцы меньших размеров. В этих случаях можно использовать маломощные машины.

Машина ГЗИП Р-5 силой 5 Т, показанная на рис. 8 и 9, имеет, как и описанный в работе 1 пресс Гагарина, в качестве силовозбудителя винт, однако силоизмерение здесь несколько другого типа, а именно, маятниковое. Гайка *1*, приводимая в движение электромотором или от руки, перемещает в вертикальном направлении винт *2*, вызывая растяжение или сжатие образца. При испытании на растяжение образец *5* закладывают концами в захваты *3* и *4* машины.

Если нужно выполнить испытание на сжатие, к захватам прикрепляются упорные плиты, между которыми помещается образец. Усилие, возбуждаемое вращением гайки, передаваемое на образец, уравновешивается через систему рычагов противовесом Q, помещен-

[1] Имеется в виду тангенс «искаженный» (в см/Т).

ным на маятнике[1]. Величина усилия откладывается в масштабе 50 кГ в 1 мм (либо 25, 10 или 5 кГ в 1 мм, в зависимости от величины противовеса Q) на диаграммном барабане 7, а также может быть прочтена по шкале 6. Деформации образца фиксируются на барабане в масштабе 2 : 1 или 1 : 1 при повороте барабана под действием натянутой нити 8.

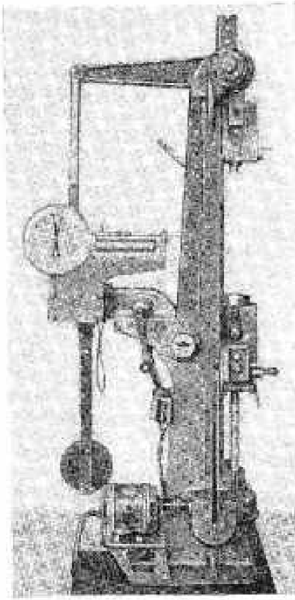


Рис. 8. Общий вид машины ГЗИП Р-5 для испытаний на растяжение и сжатие.

После разрушения образца противовес Q возвращается в исходное положение. Этому противодействует тормоз в виде веревки, переброшенной через шейку 9, снабженной грузом на конце. Тормоз удерживает маятник при его падении, не допуская значительного перехода маятника через его исходное вертикальное положение. При отсутствии тормоза маятник свободно раскачивается, причем основная стрелка силоизмерителя может сбить контрольную стрелку, указывающую максимальное значение нагрузки при опыте. Тормоз прикрепляется к маятнику до испытания и не влияет на показания машины в течение опыта, так как оказывает на маятник постоянное воздействие. Обе стрелки силоизмерителя устанавливаются на нуль после того, как подвешен груз тормоза.

[1] Наименование «маятник» здесь условно и основано лишь на внешнем сходстве рассматриваемого противовеса с подвесным маятником; колебательных движений маятник противовес не совершает, а всегда статически уравновешивает усилие, приложенное к образцу.

3. Зеркальный тензометр. Удлинение образца измеряется при помощи прибора, называемого тензометром. Существует много типов тензометров. Ниже описано устройство зеркального тензометра (прибора Мартенса).

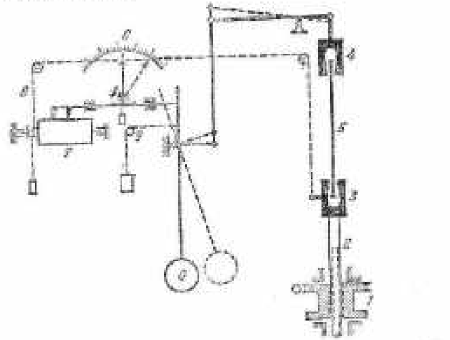


Рис. 9. Схема машины ГЗИП Р-5: 1 — гайки, 2 — винт, 3 и 4 — захваты, 5 — образец, 6 — шкала силоизмерителя, 7 — диаграммный барабан, 8 — нить, поворачивающая барабан, 9 — шейка маятника.

Планка 1 (рис. 10, а), установленная на образце 2, удерживается при помощи пружинной струбцинки 3. Одной опорой планки служит острие B, другой конец планки опирается на призму A ромбического сечения. Длина AB, которую обозначим через l, называется базой прибора. К призме A прикреплено зеркальце (на рис. 10, а плоскость зеркальца перпендикулярна к плоскости чертежа). На некотором расстоянии D от зеркальца на особой подставке установлена линейка 7 с миллиметровыми делениями. Посредством оптической трубы 4 наблюдают отсчеты по линейке, отражаемой зеркальцем. Пусть в начале испытания по волоску трубы прочитывается некоторый отсчет n_1, определяемый точкой F на линейке; световой луч 5 от этой точки падает под некоторым углом φ_1 на зеркальце и, отражаясь под таким же углом, попадает в трубу.

После нагружения образца растягивающими силами длина l получает приращение λ. Соответствующий угол поворота призмы A обозначим через α (рис. 10, б). На такой же угол повернется зеркальце. На рис. 10, а показано пунктиром новое положение зеркальца. Углы падения и отражения светового луча 6 обозначены через φ_2. Отсчет n_2 по шкале определяется теперь точкой E. Разность отсчетов $n_2 - n_1 = \Delta n$, разделенная на расстояние D,

дает значение угла $2\alpha = 2\varphi_1 + 2\varphi_2$ между лучами 5 и 6, если этот угол достаточно мал. Таким образом, $2\alpha = \Delta n/D$, следовательно, $\alpha = \Delta n/2D$. При малом α (рис. 10, б) можно принять, что $\lambda = \alpha a$, где a — диагональ поперечного сечения призмы, т. е. $\lambda = \Delta n a/2D$. Обозначив $2D/a = K$, получим $\lambda = \Delta n/K$.

Значение K — увеличение тензометра — зависит от длины диагонали a сечения призмы и расстояния D между зеркалом и линейкой. Обычно a равно 0,5 или 0,45 *см*; расстояние D выбирают

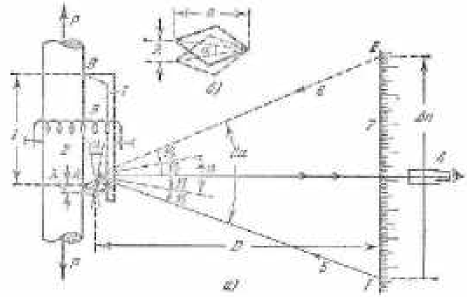


Рис. 10. Зеркальный тензометр: а — схема устройства; б — схема поворота призмы; 1 — планка, 2 — образец, 3 — пружина, прижимающая планку к образцу, 4 — призма, несущая зеркало, 8 — зрительная труба, 5 и 6 — лучи света, идущие от линейки 7 в трубу при различных положениях зеркала.

так, чтобы увеличение K равнялось 500, т. е. линейку устанавливают на расстоянии от зеркала $D = Ka/2 = 500a/2 = 250 \cdot 0{,}5 = 115$ *см*, либо $D = 250 \cdot 0{,}45 = 112{,}5$ *см*. Иногда это расстояние D удваивают, тогда $K = 1000$.

Ввиду возможного эксцентриситета в приложении растягивающих сил на образец ставят два тензометра для того, чтобы измерить удлинения двух противоположных волокон испытываемого образца, как показано на рис. 11. Среднее удлинение, полученное из показаний двух тензометров, принимают равным удлинению λ оси образца. База зеркального тензометра может изменяться от 5 до 20 *см*. Обычно она равна 10 *см*. Описание некоторых других типов тензометров см. в работах 5 и 28, а также в § 6 части II.

4. Проведение испытания и обработка его результатов. Установленный в машине образец нагружают предварительной нагрузкой. При этой нагрузке напряжение в стальном образце должно быть несколько меньше 1000 *кГ/см*². Затем устанавливают тензометры, после чего нагрузку слегка увеличивают с тем, чтобы напряжение

в образце составило приблизительно 1000 *кГ/см*² (в случае цветных сплавов начальное напряжение должно быть около 300 *кГ/см*²), и по тензометрам берут начальные отсчеты $n_{лев}$ и $n_{пр}$, которые записывают во второй и третьей колонках журнала (см. пример в табл. 4).

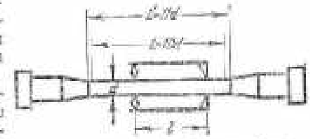


Рис. 11. Установка прибора на образце.

Далее нагрузку увеличивают крупными ступенями до напряжения в образце, равного 65—80% ожидаемого значения предела пропорциональности. В этой стадии нагружения следует сделать четыре-пять отсчетов по тензометрам.

Вблизи предела пропорциональности нагрузку увеличивают малыми равными ступенями так, чтобы приращение напряжения в образце равнялось каждый раз 200 *кГ/см*².

Таблица 4

Нагрузка P, *кГ*	Отсчеты по тензометрам: левому $n_{лев}$	правому $n_{пр}$	Приращения отсчетов: $\Delta n_{лев}$	$\Delta n_{пр}$	Сумма приращений, $\Delta n = \Delta n_{лев} + \Delta n_{пр}$		Сумма отсчетов $n_{лев} + n_{пр}$
700	21	25					46
1300	40	45	19	20	39	Среднее значение Δn для малой ступени нагрузки $\Delta P = 150$ *кГ* равно $\Delta n_{ср} = 9{,}5$	85
1900	59	63	18	18	37		122
2500	78	82	19	19	38		160
2650	83	87	5	5	10		170
2800	88	92	5	5	10		180
2950	92	97	4	5	9		189
3100	98	103	6	6	12		201
3250	104	109	6	6	12		213
3400	112	116	8	7	15		228
3550	121	125	9	9	18		246

В 4-й и 5-й колонках таблицы 4 записывают приращения отсчетов $\Delta n_{лев}$ и $\Delta n_{пр}$, в 6-й колонке — суммы приращений Δn по обоим тензометрам. Эти колонки заполняют одновременно с заполнением колонок 2 и 3, немедленно после взятия отсчета.

Нагружение продолжают до заметного отклонения от закона пропорциональности.

Обработка результатов испытания производится в следующем порядке. Определяют среднюю сумму приращений отсчета $\Delta n_{ср}$ для малой ступени нагрузки в пределах пропорциональности. За пределами пропорциональности находят величину Δn, равную $1{,}5\ \Delta n_{ср}$. Соответствующее напряжение в образце и есть искомый условный предел пропорциональности.

Пример нахождения предела пропорциональности, приведенный в таблице 4, соответствует образцу диаметром 1 *см*. Площадь сечения $F = 0{,}785\ см^2$. Тензометр имеет увеличение $K = 500$. База тензометра 10 *см*. Ожидаемый предел пропорциональности материала около $4000\ кГ/см^2$.

Начальная нагрузка $1000 \cdot 0{,}785 = 785\ кГ$; округленно принимаем 700 или 800 *кГ*; 80% от нагрузки, соответствующей ожидаемому значению предела пропорциональности, составляют $0{,}80 \times 4000 \cdot 0{,}785 = 2500\ кГ$. В таблице 4 это значение нагрузки достигнуто тремя ступенями по 800 *кГ*. Далее ступень нагрузки должна составлять $200 \cdot 0{,}785 = 157\ кГ$. Округленно принято 150 *кГ*.

Пропорциональность между нагрузкой и деформацией образца наблюдается до нагрузки, равной 2950 *кГ*, здесь приращения отсчетов равномерны как на больших ступенях нагрузки, так и на малых. Общие приращения отсчета: по левому тензометру $92 - 21 = 71$, по правому $97 - 25 = 72$; сумма их $71 - 72 = 143$. Средняя сумма приращений отсчета при малой ступени нагрузки составляет:

$$\Delta n_{ср} = \frac{143}{2950 - 700} \cdot 150 = 9{,}5.$$

Увеличивая эту величину на 50%, получаем 14,3. Рассматривая последнюю колонку таблицы 4, видим, что полученное значение Δn соответствует интервалу нагрузки между 3250 и 3400 *кГ*. Интерполируя линейно, получим значение нагрузки, соответствующее пределу пропорциональности

$$P_{пц} = 3250 + \frac{150 \cdot 3{,}3}{3} = 3360\ кГ,$$

отсюда предел пропорциональности

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F} = \frac{3360}{0{,}785} = 4300\ кГ/см^2.$$

Теперь определим модуль упругости. Выше было найдено $\Delta n_{ср} = 9{,}5$; эта величина равна соответствующему приращению удлинения $\Delta\lambda$ образца, умноженному на $2K$ (где K — увеличение тензометра), так как $\Delta n_{ср}$ представляет собой сумму приращений отсчетов по обоим тензометрам. Следовательно,

$$\Delta\lambda_{ср} = \frac{\Delta n_{ср}}{2K} = \frac{9{,}5}{2 \cdot 500} = 0{,}0095\ мм = 0{,}00095\ см.$$

Это приращение абсолютного удлинения соответствует малой ступени нагрузки $\Delta P = 150\ кГ$. Получаем

$$E = \frac{\Delta P l}{\Delta\lambda_{ср} F} = \frac{150 \cdot 10}{0{,}00095 \cdot 0{,}785} = 2{,}02 \cdot 10^6\ кГ/см^2.$$

Покажем также графический способ обработки результатов наблюдений, обладающий наглядностью и получающий в настоящее время широкое распространение. По оси ординат (рис. 12) отложены значения нагрузки P (первая колонка табл. 4), а по оси абсцисс — значения суммы $n_{ст} - n_{пр}$ отсчетов по тензометрам (последняя колонка). Прямолинейный участок графика[1]) продолжаем до оси абсцисс и из точки пересечения проводим прямую AB под углом α_m, так, чтобы было (см. стр. 17)

$$\operatorname{tg}\alpha_m = \frac{2}{\beta}\operatorname{tg}\alpha_0.$$

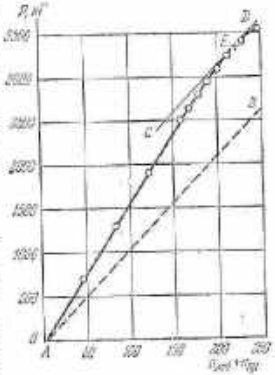


Рис. 12. Графическое определение $n_{пц}$.

Параллельно прямой AB проводим касательную CD к линии графика. Точка касания E определяет величину предела пропорциональности.

5. Нахождение условного предела текучести. Начальное напряжение σ_0 стали должно составлять $500\ кГ/см^2$ (для других материалов и сплавов начальное напряжение принимается равным не более 10% ожидаемого значения предела текучести). При нагрузке, соответствующей начальному напряжению, устанавливают тензометры. Затем образцу дается нагрузка вдвое больше и выдерживается в течение 5 *сек*, после чего образец разгружают до начальной нагрузки, при которой делают первые отсчеты по тензометрам.

Далее образец загружают, причем величина нагрузки соответствует 70—80% ожидаемого значения предела текучести, и после разгружения образца до начальной нагрузки снова берут отсчеты

[1]) Если точки ложатся с разбросом, прямую следует проводить между точками, чтобы разброс был наименьшим. Эта прямая может не пройти через начало координат вследствие погрешностей эксперимента в начале испытаний (см. работу 1, стр. 12).

по тензометрам. Они покажут некоторую остаточную деформацию. Затем нагрузка несколько увеличивается, ступень приращения напряжения принимается равной ~ 200 *кГ/см²*; соответственно увеличивается остаточная деформация. Остаточная деформация измеряется вновь как разностью между данным отсчетом и начальным. Остаточная деформация, соответствующая условному пределу текучести, принимается равной 0,2% длины образца (см. стр. 11).

Таблица 5

Нагрузка P, в *кГ*	Отсчеты по тензометрам		Приращения отсчетов		Сумма приращений, $\Delta n = \Delta n_{лев} + \Delta n_{пр}$
	левому $n_{лев}$	правому $n_{пр}$	$\Delta n_{лев}$	$\Delta n_{пр}$	
400	10	20			
3800	32	32	12	12	24
4200	40	48	20	28	48
4400	62	70	22	22	44
4700	90	95	28	25	53
5000	130	145	40	50	90
			80	75	155
			120	125	245

Пример нахождения условного предела текучести по опыту приведен в таблице 5. Диаметр образца $d = 1$ *см*. Следовательно, площадь сечения $F = 0{,}785$ *см²*. Материал — углеродистая сталь с ожидаемым значением предела текучести около 6000 *кГ/см²*. Тензометр с базой $l = 10$ *см* и увеличением $K = 500$. Начальная нагрузка равна $500 \cdot 0{,}785 = 393$ *кГ*. Округленно принимаем 400 *кГ*. Отсчеты по левому и правому тензометрам при этой нагрузке соответственно равны 10 и 20. Первая пробная нагрузка принята равной 3800 *кГ*, что соответствует 80% ожидаемого значения предела текучести. После разгружения до начальной нагрузки получены отсчеты 22 и 32 (2-я строка таблицы 5). Приращения отсчетов по сравнению с начальными равны 12 и 12. Сумма приращений Δn составляет 24.

Эта величина определяет остаточное удлинение образца, равное $\Delta n/2K = 24/2 \cdot 500 = 0{,}024$ *мм*.

Пределу текучести соответствует остаточное удлинение $0{,}2 \times \times 0{,}01 = 0{,}2 \cdot 0{,}01 \cdot 100 = 0{,}2$ *мм*; умножив его на удвоенное увеличение тензометра, получаем $\Delta n_т = 200$ — значение суммы приращений отсчетов, соответствующей пределу текучести. Это значение (см. последнюю колонку таблицы 5) соответствует интервалу нагрузки между 4700 и 5000 *кГ*. Интерполируя, находим нагрузку, соответствующую пределу текучести,

$$P_т = 4700 + \frac{300}{245 - 155}(200 - 155) = 4850 \text{ кГ},$$

Отсюда предел текучести

$$\sigma_т = \frac{P_т}{F} = \frac{4850}{0{,}785} = 6150 \text{ кГ/см}^2.$$

Определение $\sigma_т$ можно выполнить непосредственно после нахождения предела пропорциональности на том же образце. В этом случае при нахождении предела пропорциональности следует несколько уменьшить начальную нагрузку (до напряжения около 500—700 *кГ/см²*) и до испытания выдержать образец в течение нескольких секунд при напряжении около 1000 *кГ/см²*.

Работа 3. **Испытание материалов на сжатие**

1. Общие сведения. Целью испытаний на сжатие является изучение процесса сжатия материалов и определение их сопротивления сжимающим нагрузкам.

На рис. 13, *а* показаны диаграммы сжатия, полученные при испытании различных материалов. Диаграммы сняты от начала координат вдоль оси абсцисс для того, чтобы они взаимно не накладывались.

Малоуглеродистая или мягкая сталь является пластичным материалом. Поперечные размеры образца, выполненного из малоуглеродистой стали, при сжатии увеличиваются, а длина образца значительно уменьшается; нарушения целостности образца не происходит. Из диаграммы сжатия мягкой стали (рис. 13, *а*) видно, что в начальной стадии загружения имеется пропорциональность между нагрузкой и деформацией, затем деформации быстро возрастают при небольшом увеличении нагрузки, далее рост деформаций постепенно замедляется вследствие увеличения сечения образца.

Образцы из хрупких материалов при сжатии разрушаются, распадаясь на части. Например, при испытании чугуна части образца по достижении разрушающей нагрузки сдвигаются одна по другой по косым площадкам.

На рис. 13, *б* показан общий вид образцов различных материалов до и после испытания их на сжатие. Бочкообразная форма образцов после испытания объясняется трением между торцовыми поверхностями образца и плитами пресса. Дерево разрушается при сжатии, подобно чугуну, претерпевая сдвиг по косой площадке (рис. 13, *б*, *3*), но этому предшествует значительная пластическая деформация; площадка образует с осью образца угол около 45—50°, т. е. приблизительно совпадает с площадкой наибольших касатель-

ных напряжений. Алюминий деформируется, как и малоуглеродистая сталь. Но для него характерно резкое проявление текучести после некоторого небольшого периода пропорциональности между нагрузкой и деформациями. При сжатии древесины вдоль волокон (рис. 13, *б*, *5*) пропорциональность между нагрузками и деформациями наблюдается почти до момента разрушения (см. кривую *5*

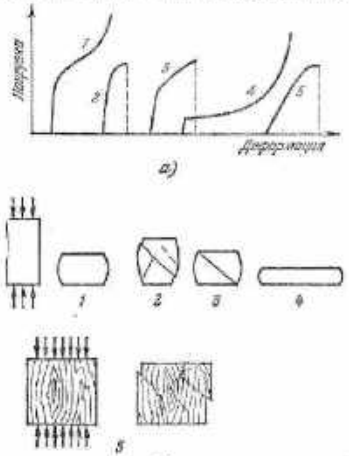


Рис. 13. *а* — Диаграммы сжатия: *1* — малоуглеродистой стали, *2* — чугуна, *3* — дюраля, *4* — алюминия, *5* — дерева. *б* — Общий вид образцов различных материалов до и после испытания на сжатие: *1* — мягкой стали, *2* — чугуна, *3* — дюраля, *4* — алюминия и *5* — дерева (вдоль волокон).

на рис. 13, *а*). Разрушение твердых пород дерева сопровождается сдвигами по косым плоскостям, следовательно, в этом случае древесина также разрушается от действия касательных напряжений.

Испытание материалов на сжатие производится на машинах, называемых прессами. Ниже дается описание пресса системы Амслера.

2. **Пресс Амслера силой до 200 *Т*.** Пресс Амслера (рис. 14) представляет собой гидравлическую испытательную машину для испытаний на сжатие. Пресс имеет приспособление и для испытания на изгиб.

Схема силовозбуждения машины показана на рис. 15. Нагнетательный насос подает масло по трубам *1* и *2* в рабочий цилиндр машины. Поступление масла регулируется от руки краном *3* (избыток поступающего от насоса масла по трубам *4* и *5* стекает в бак). Повышение давления в цилиндре вызывает поднятие поршня *6* и, следовательно, сжатие образца *12*, помещенного сверху на поршне.

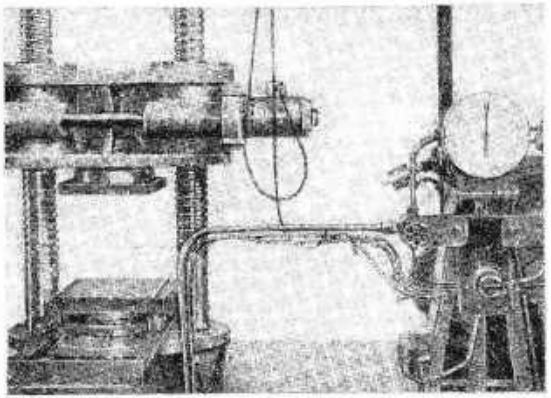


Рис. 14. Общий вид пресса Амслера силой до 200 *Т*.

Верхний конец образца упирается в неподвижно установленный траверс *7*. Траверс может передвигаться вверх и вниз по стойкам машины, до испытания его устанавливают при помощи особого мотора на требуемой высоте, а затем доводят ручную до соприкосновения с образцом.

Для измерения усилия, передаваемого поршнем на образец, служит малый цилиндр *7* (рис. 15); трубки *8* и *9* (рис. 15) соединяют рабочий цилиндр машины с цилиндром *7*, поршень которого давит на стрелка *2* и поворачивает этим штангу маятникового противовеса *Q*. Горизонтальная проекция перемещения противовеса пропорциональна давлению в цилиндре. Как видно из схемы (рис. 15), эта проекция пропорциональна также перемещению карандаша *3*

на диаграммном барабане 4 вдоль оси барабана. Следовательно, перемещение карандаша вдоль оси барабана пропорционально силе, сжимающей образец. Рейка, несущая карандаш, одновременно поворачивает также шестерню 7 со стрелкой, указывающей величину сжимающей силы на круговой шкале. Шкала должна соответствовать величине груза Q; при изменении груза или изменении его положения на маятнике (см., например, положение 5 показанное пунктиром) соответственно должна быть изменена шкала.

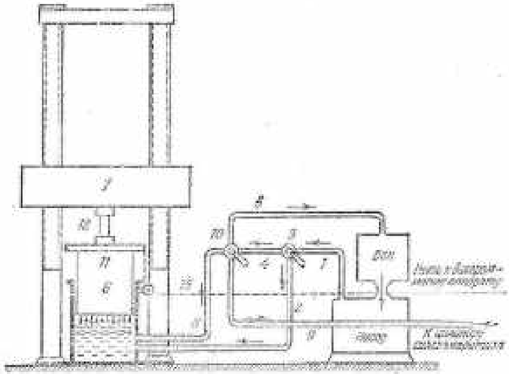


Рис. 15. Схема гидравлического пресса Амслера силой 200 Т: 1 и 2 — [illegible] цилиндр, 3 — кран, регулирующий подачу масла, 4 и 5 — [illegible] под масла, 6 — рабочий поршень, 7 — упорный траверс, 8 и 9 — трубопроводы к силоизмерителю, 10 — кран для выпуска масла из цилиндра, 11 — плита, 12 — испытываемый образец.

Деформация образца фиксируется на диаграмме при помощи следующего устройства. К поршню 6 (рис. 15) прикреплена нить, которая посредством блоков доводится до шейки диаграммного барабана, обертывает ее и натягивается затем грузом 6 (рис. 16). Перемещение поршня 6 (рис. 15), равное укорочению образца, вызывает перемещение нити и, следовательно, поворот барабана вокруг его оси, причем проекция перемещения острия карандаша относительно барабана на ось абсцисс диаграммы вдвое больше укорочения образца, так как диаметр шейки барабана вдвое меньше диаметра барабана.

Во время работы машины кран 10 (рис. 15) закрыт. По окончании опыта этот кран открывают, и масло из трубки 8—9 может

поступить в трубку 5 и оттуда в бак. Давление масла падает, и поршни 6 и 1 возвращаются в свои исходные положения.

Максимальная сила сжатия описанного пресса равна 200 Т. Уменьшая противовес, можно работать при шкалах 100, 50 и 20 Т; это увеличивает точность измерения нагрузки при малопрочных образцах. Соответственно масштаб нагрузок на диаграмме составляет 20, 10, 5 и 2 Т в сантиметре.

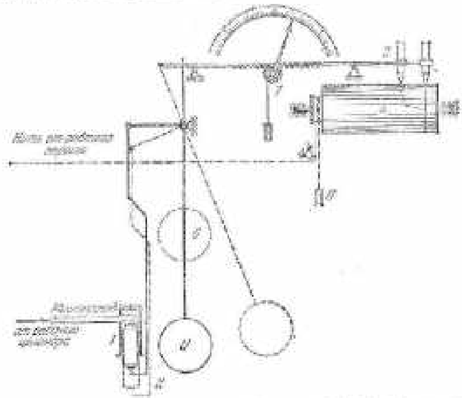


Рис. 16. Схема силоизмерителя пресса Амслера силой 200 Т: 1 — цилиндр силоизмерителя, 2 — стрелка силоизмерителя, 3 — рейка с карандашом, 4 — диаграммный барабан, 5 — [illegible] груз для испытания слабых образцов, 6 — груз, натягивающий нить, 7 — шестерня стрелки, указывающей нагрузку, Q — груз на маятнике.

Включая машину, нужно иметь в виду, что в нерабочем состоянии поршень 6 опущен и плита 11 (рис. 15) опирается на станину машины своими роликами. До испытания следует при помощи насоса предварительно поднять поршень настолько, чтобы плита была снята со своих роликовых опор и поддерживалась только поршнем. Тогда при опускании траверса 7 сила, передаваемая им на образец, оказывает давление на масло в цилиндре, что тотчас фиксируется силоизмерителем. Опусканием траверса 7 создается лишь некоторая малая начальная нагрузка. После этого траверс оставляют неподвижным, и дальнейшее нагружение образца производится при помощи насоса.

Об испытании на изгиб на описанном прессе см. работу 14.

3. Испытание металлов. При испытании металлических образцов на сжатие запись в лабораторном журнале производится по форме, приведенной в таблице 6.

Таблица 6

Материал				
Размеры образца	Высота h, см			
	Диаметр d, см			
	Площадь сечения F, $см^2$			
Максимальное значение сжимающей силы P_{max}, $кГ$				
Временное сопротивление (для хрупких материалов) $\sigma_в$, $кГ/см^2$				
Максимальное напряжение (для пластичных материалов) σ_{max}, $кГ/см^2$				
Вид образца после испытания (рисунок)				

Временное сопротивление $\sigma_в = P_{max}/F$ может быть определено только для материалов, разрушающихся при сжатии (чугун, дюраль); для весьма пластичных материалов (мягкая сталь, алюминий), не разрушающихся при сжатии, в таблице 6 указывают максимальное напряжение $\sigma_{max} = P_{max}/F$, до которого материал был доведен при испытании.

При сжатии пластичных материалов в последней стадии испытания необходимо внимательно следить за увеличением нагрузки, не допуская перегрузки машины.

4. Испытание древесины. Запись при испытании древесины на сжатие производится, например, по форме, показанной в таблице 7.

При сжатии древесины поперек волокон сопротивление ее зависит от расположения годичных слоев древесины по отношению к направлению действия силы. Если направление годичных слоев параллельно направлению действия сжимающей силы, то сопротивление древесины сжатию несколько выше, чем в случае перпендикулярности силы к слоям. В последнем случае сжатие мягких слоев древесины приводит к значительным деформациям образца (вдвое или более) даже при незначительных нагрузках. Затем сопротивление образца значительно увеличивается, но при этом работает уже как

Таблица 7

	Вдоль волокон		Поперек волокон	
	дуб	сосна	дуб	сосна
Площадь поперечного сечения образца F, $см^2$				
Разрушающая нагрузка P, $кГ$				
Временное сопротивление $\sigma_в$, $кГ/см^2$				
Вид образца после испытания (рисунок)				

бы новый материал — прессованная древесина однородной плотности, разрушение которого характеризуется образованием косых трещин сдвига.

Работа 4. **Испытание на срез**

Цель опыта — установить временное сопротивление материала при срезывании. Испытанию подвергаются металл (сталь или дюраль) и древесина, причем древесина испытывается на скалывание вдоль волокон.

Таблица 8

Материал	Площадь среза F, $см^2$	Разрушающая нагрузка P_{max}, $кГ$	Предел прочности при срезе $\tau_в$, $кГ/см^2$

Временное сопротивление равно отношению максимальной нагрузки, выдержанной образцом при испытании, к площади срезывания, т. е.

$$\tau_в = \frac{P_{max}}{F}.$$

Металлический образец имеет цилиндрическую форму. При испытании его вставляют в отверстие приспособления, изображенного на рис. 17, *а*. Машина вытягивает диск *2* из вилки *1*. 3, вследствие

чего происходит сдвиг средней части образца относительно крайних его частей. Рабочая площадь F (площадь среза) равна удвоенной площади поперечного сечения образца, так как срез происходит одновременно по двум плоскостям.

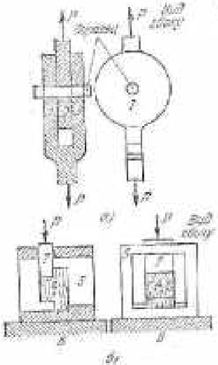


Рис. 17. Испытание на скалывание: а — металлического образца, б — деревянного образца.

Испытание производится на машине ГЗИП Р-5 (см. работу 2) или на другой разрывной машине.

Для испытания на скалывание древесины применяется образец 4, показанный на рис. 17, б. Применяются также образцы другой формы. Образец 4 располагают внутри коробки 5, которую ставят на нижнюю опорную плиту 6 пресса. Верхняя плита давит сверху на бобышку 7, проходящую через вырез в коробке, своим нижним концом бобышка опирается на выступ в образце, который при разрушающей нагрузке скалывается, т. е. сдвигается вдоль волокон относительно остальной части образца.

Испытание дерева на скалывание производится на машине силой 5—10 Т.

Запись в лабораторном журнале при испытании материалов на срез и скалывание ведется по форме, приведенной в таблице 8.

Древесина оказывает различное сопротивление сдвигающей силе в зависимости от направления действия силы по отношению к волокнам и слоям древесины.

Работа 5. Определение коэффициента Пуассона

1. Общие сведения. Образец, подвергнутый растяжению или сжатию вдоль своей оси, деформируется также и в направлении, перпендикулярном к оси. Абсолютное значение отношения относительной поперечной деформации ε_1 к относительной продольной деформации ε образца называется коэффициентом поперечной деформации или коэффициентом Пуассона. Он обозначается обычно буквой μ.

Значение коэффициента Пуассона для большинства металлов близко к 0,3. Для стали среднее его значение, полученное из многочисленных опытов, составляет 0,28 и изменяется в пределах от 0,26 до 0,30. Для дюраля среднее значение составляет 0,34; крайние значения 0,31 и 0,36.

Величина коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии одна и та же, знак усилия на значение μ не влияет. При испытании на растяжение применяются плоские образцы, растягиваемые на 1,5-тонной машине (см. § 13 во II части) или других разрывных машинах. Образец для испытания на сжатие представляет собой прямоугольный параллелепипед. Опыт проводится на мощном прессе (описание 200-тонного пресса см. в работе 3).

Измерение деформаций производится с помощью тензометров, описанных ниже (см. также работу 30).

На образце устанавливают два тензометра для измерения продольных деформаций (тензометры I и I' на рис. 18, а) и два — для

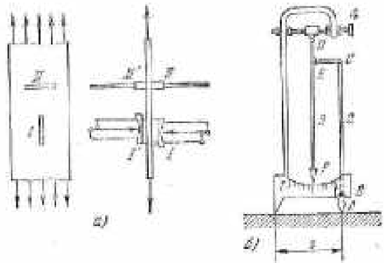


Рис. 18. а — Расположение тензометров на образце при определении коэффициента Пуассона; б — схема рычажного тензометра: 1 — планка, 2, 3 — рычажная система, 4 — установочный винт.

измерения поперечных деформаций (тензометры II и II'). Искомые деформации определяются как средние из показаний двух тензометров ввиду возможной эксцентричности силы, растягивающей (или сжимающей) образец, и, следовательно, неравномерного распределения напряжений в образце.

При проведении опыта нужно избегать мертвых ходов приборов, для этого изменение нагрузки следует производить лишь в одном направлении (обычно соответствующем возрастанию нагрузки). После проведения опыта следует проверить начальные отсчеты.

2. Тензометр Гуггенбергера. Тензометр Гуггенбергера — наиболее распространенный из рычажных тензометров. Устройство тензометра показано на рис. 18, б. Планку I притягивают струбцинкой (изображенной отдельно на рис. 19, а) к поверхности образца, деформации которого подлежат измерению (на чертеже эта поверх-

ность отсчета штриховкой). Опорами планки 1 являются неподвижный нож (слева) и призма ромбовидного сечения (справа), к которой жестко прикреплен стержень 2. При изменении расстояния s между точками опоры вследствие деформации образца призма наклоняется и с ней наклоняется стержень 2. Поворот призмы и стержня 2 при этом происходит вокруг ребра B призмы, в котором

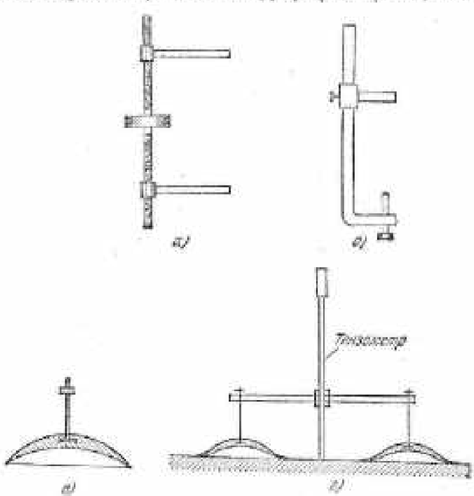


Рис. 19. Приспособления для крепления тензометров: а — упорная струбцинка для двух тензометров; б — струбцинка для одного тензометра; в — резиновая присоска в свободном состоянии; г — две присоски в рабочем состоянии, удерживающие тензометр.

планка 1 опирается на призму. Верхний конец C стержня 2 шарнирно соединен при помощи серьги CE со стрелкой 3, имеющей шарнирную опору в точке D. Перемещение точки C при повороте стержня 2 вызывает такое же перемещение точки E стрелки 3. При этом стрелка поворачивается вокруг своей опоры D и нижний ее конец F перемещается вдоль миллиметровой шкалы, нанесенной на планке 1. Перемещение Δn стрелки, очевидно, пропорционально изменению Δs длины s. Отношение диагонали AB призмы к длине стержня 2 обычно равно 1:50; отношение длин участков DE и EF стрелки — около 1:20, т. е. увеличение K тензометра около 1000. Увеличение каждого тензометра устанавливается его тарировкой на специальном калибраторе.

Опорная точка D стрелки находится на ползуне и может перемещаться при помощи винта 4; это позволяет установить стрелку до испытания на желаемом отсчете, а также продолжить опыт без перестановки тензометра при исчерпании шкалы.

Расстояние s между точками опоры называется базой тензометра и равно обычно 20 мм. База тензометра может быть увеличена с помощью приставной планки, называемой удлинителем базы.

Прикрепление тензометров к образцу осуществляется с помощью струбцинок (рис. 19, а и б). В случае образцов больших размеров пользование упорными струбцинками затруднительно. В этих случаях могут быть применены присоски. Присоска представляет собой резиновую сферическую чашечку (рис. 19, в) с тонкими краями диаметром опорной окружности 25—40 мм. Если такую чашечку прижать к плоской или слабо искривленной поверхности, то она присасывается к поверхности, так как под присоской образуется вакуум, и она оказывается прижатой внешним давлением. Такая присоска может служить опорой для укрепления тензометра. На рис. 19, г показаны две присоски, между которыми установлен тензометр Гуггенбергера. С внешней стороны к каждой присоске прикреплены оттяжки, имеющие резьбу для гаек, которыми притягивается поперечная струбцинка, прижимающая тензометр. Установка тензометра с помощью присосок является односторонней по отношению к испытуемому образцу и поэтому пригодна для любых размеров образца или исследуемой модели. Поверхность модели, на которую устанавливают присоски, должна быть смазана вазелином, тавотом, или другим жиром.

3. Проведение опыта и обработка результатов. Нагрузив образец начальной нагрузкой P_1, берут отсчеты n_1 по тензометрам и записывают их в лабораторный журнал по форме, указанной в таблице 9. Затем увеличивают нагрузку (в пределах упругости) настолько, чтобы получить заметные изменения Δn отсчетов на тензометрах, и снова берут отсчеты (n_2). Тензометры I и I', измеряющие продольные удлинения, покажут увеличение отсчетов, а тензометры II и II', измеряющие поперечные укорочения, — уменьшение отсчетов.

Иногда увеличение нагрузки ведут несколькими ступенями, при этом проверяется пропорциональность между нагрузкой образца и его деформацией. При условии выполнения учащимися работы 2 в данной и большинстве последующих работ можно для сокращения вычислений ограничиться одной ступенью нагрузки.

По данным, полученным по тензометрам I и I', вычисляют среднее значение продольного удлинения Δs_1 образца (на длине s,

Таблица 9

Тензометры		Отсчеты по тензометрам		Приращение отсчета по тензометру $\Delta A = A_2 - A_1$	Абсолютная деформация	База тензометра s	Увеличение тензометра K	Удлинение $\Delta s = \frac{\Delta A}{K}$	Среднее значение удлинения
измеряемые деформации	№	A_1 При нагрузке P_1	A_2 При нагрузке P_2						
продольные	I								$\Delta s_I =$
	I'								
поперечные	II								$\Delta s_{II} =$
	II'								

равной базе тензометра). Из данных по тензометрам II и II' определяется среднее поперечное укорочение Δs_{II}.

Базы тензометров s обычно одинаковы. Тогда

$$\mu = \frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_I} = \frac{\frac{\Delta s_{II}}{s}}{\frac{\Delta s_I}{s}} = \frac{\Delta s_{II}}{\Delta s_I},$$

т. е. коэффициент Пуассона получается как отношение абсолютных деформаций.

При испытании на сжатие поперечные тензометры II и II' показывают увеличение отсчетов, а тензометры I и I', наоборот, — уменьшение отсчетов.

Работа 6. Испытания на прочность при переменных напряжениях (выносливость)

Повторно-переменные нагрузки и возникающие от них напряжения изменяются во времени по некоторому определенному закону. Однократная смена напряжений, принимающих все значения, периодически повторяющиеся во всех других сменах, называется циклом (рис. 20, *а*).

Цикл характеризуется следующими величинами: наибольшим p_{max} и наименьшим p_{min} напряжениями (нормальными σ или касательными τ), средним напряжением

$$p_m = \frac{p_{max} + p_{min}}{2},$$

амплитудой цикла

$$p_a = \frac{p_{max} - p_{min}}{2}$$

и коэффициентом асимметрии цикла

$$r = \frac{p_{min}}{p_{max}}.$$

При одинаковых, но противоположных по знаку экстремальных напряжениях $|p_{max}| = |p_{min}| = p_a$ имеет место симметричный цикл: его коэффициент асимметрии $r = -1$, а среднее напряжение $p_m = 0$ (рис. 20, *б*).

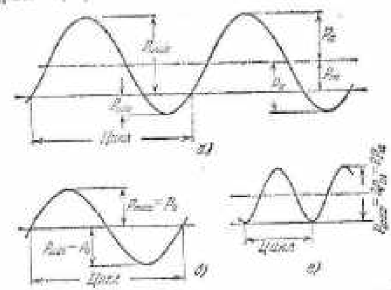


Рис. 20. Характеристики циклов переменных напряжений: *а* — асимметричный цикл; *б* — симметричный цикл; *в* — пульсирующий цикл.

Несимметричный цикл, у которого $p_{min} = 0$, при этом $p_m = p_a = \frac{p_{max}}{2}$ и $r = 0$, называют пульсирующим или отнулевым (рис. 20, *в*).

Статическую нагрузку можно рассматривать как предельный случай несимметричного цикла, при котором $p_{max} = p_{min} = p_m$, $p_a = 0$ и $r = 1$.

Разрушение материалов при периодических многократно изменяющихся напряжениях (порядка миллионов циклов) довольно сильно отличается от разрушения при действии статических или повторяемых малое число раз нагрузках. При переменных напряжениях разрушение даже пластичных материалов происходит внезапно, без заметной пластической деформации. Разрушающее напряжение значительно ниже временного сопротивления, а иногда даже ниже предела упругости материала. Задолго до разрушения

начинается процесс постепенного развития микроскопических трещин, возникающих в отдельных кристаллитах и зарождающихся затем в одну большую трещину, распространяющуюся на значительную часть сечения. Поверхность, по которой происходит разрушение, имеет две ярко выраженные зоны: одну — гладкую притертую — зону распространения трещины и вторую — зернистую — зону непосредственного излома части сечения, ослабленного трещиной.

Усталостью называют состояние материала, при котором переменные напряжения вызывают прогрессирующее развитие трещин, приводящее к разрушению.

Длительность процесса, предшествующего разрушению материала при переменных напряжениях, обусловила его название усталостью материала, хотя оно и не отражает физической сущности явления.

Способность материала сопротивляться разрушению при переменных напряжениях (усталостному разрушению) называется выносливостью. Она характеризуется пределом выносливости (или пределом усталости) — наибольшим периодически повторяющимся максимальным напряжением, при котором материал не разрушается после любого, весьма большого числа циклов.

Для сталей считается достаточно большим число $N = 10$ миллионов циклов; при большем числе циклов разрушение практически никогда не наступает. Цветные металлы характеризуются условным пределом выносливости, соответствующим числу $N = 500$ миллионов циклов, потому что с увеличением N их разрушение происходит при несколько пониженном напряжении.

Предел выносливости определяет прочность материала при действии переменных нагрузок.

Наиболее неблагоприятным фактором, значительно уменьшающим выносливость, является концентрация больших местных напряжений, способствующих возникновению и быстрому развитию трещин усталости. Концентрацию больших местных напряжений обусловливают резкие изменения сечений (галтели, отверстия, выточки, уступы и т. д.), неровности и повреждения поверхности (грубая обработка, царапины, надрезы и т. п.), внутренние пороки (шлаковые включения, пустоты и др.).

Выносливость зависит также от асимметрии цикла переменных напряжений и от вида напряженного состояния.

Наименьший предел выносливости получается при симметричном цикле; он обозначается σ_{-1}. Для всех других циклов значение предела выносливости σ_r лежит в интервале между σ_{-1} и временным сопротивлением $\sigma_в$.

Испытания на выносливость производят при простых напряженных состояниях, вызванных повторно-переменным растяжением (сжатием), изгибом или кручением, а иногда и при сложном напряжением состоянии, создаваемом одновременным изгибом и кручением или растяжением по двум направлениям.

Наиболее просто осуществляются переменные напряжения симметричного цикла при изгибе вращающегося образца. Такие условия достигаются, когда круглый образец жестко закрепляют в шпинделе (рис. 21, а) и приводят во вращательное движение с заданной скоростью. При этом на свободный конец образца посредством шарикового подшипника подвешивают постоянный груз, вызывающий растяжение верхних и сжатие нижних волокон. Вращение образца обусловливает смену этих напряжений. В подобных условиях работают колесные оси. Для того чтобы исключить влияние касательных напряжений, создают чистый изгиб, который возникает при симметричном нагружении двумя силами балки, вращающейся в двух опорных подшипниках (рис. 21, б). Балка состоит из образца, расположенного в средней ее части, и двух опорных захватов по концам.

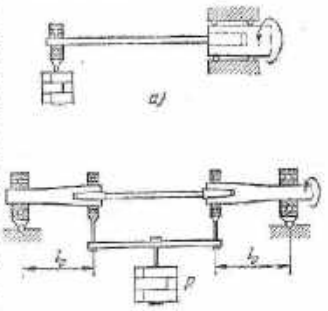


Рис. 21. Испытание материалов образца: *а* — нагружение консоли на изгиб; *б* — чистый изгиб

Переменные напряжения при растяжении (сжатии) или кручении создаются при помощи инерционных сил или кривошипно-шатунных механизмов в зависимости от конструкции испытательной машины. Для переменных нагрузок большой величины пользуются пульсаторами гидравлического, механического или пневматического действия, снабженными с обычными испытательными машинами.

Основная цель испытаний на выносливость состоит в определении предела выносливости. Когда предел выносливости известен, можно выявить сопротивление материала в том его состоянии, которое он имеет в готовом изделии, и применительно к тем воздействиям, которым он подвергается в работающих машинах.

Большое значение приобретает испытание на выносливость в вопросах изыскания прочности материала под влиянием таких факторов, как концентрация напряжений, способ обработки, размер детали и т. д. Влияние этих факторов не отражается на результатах статических испытаний по определению механических характеристик материала и выявляется только испытаниями на выносливость.

Надежность результатов испытаний достигается надлежащей их постановкой, по возможности наиболее близко воспроизводящей работу материала в эксплуатационных условиях. Необходимо исключать влияние случайных факторов на результат испытаний, а также учитывать большую чувствительность материалов, особенно металлов, ко всякого рода изъянам и повреждениям, уменьшающим их сопротивление действию переменных нагрузок.

Отсюда следует то исключительно важное значение, которое приобретают в этих условиях выбор и подготовка образцов; для испытаний на выносливость чаще всего применяют гладкие цилиндрические образцы диаметром 7,5 *мм*, изготовленные из одного материала, например из стали одной плавки.

Для каждого испытания требуется серия образцов, одинаковых по форме и по однородности материала, обычно в количестве 6—12 штук. Нельзя получить надежное значение предела выносливости в результате испытания только одного или двух образцов.

Особенностью испытания на выносливость является также их длительность. Например, для испытания только одного образца даже в очень быстроходной машине, дающей до 30 000 циклов в минуту, требуется 5—7 часов. Для партии образцов приходится затрачивать несколько суток. Испытание каждого образца должно проводиться непрерывно, так как перерывы могут существенно влиять на окончательные результаты.

Различают два вида испытаний: длительные и ускоренные. Первые дают возможность непосредственно определить предел выносливости по результатам испытания серии образцов. Вторые позволяют косвенным образом приближенно установить величину предела выносливости по результатам испытания одного образца.

Длительными испытаниями устанавливается зависимость числа циклов N от переменной величины максимального цикла ρ_{max}, необходимого для разрушения образца. Обычно эту зависимость представляют графически в виде так называемой диаграммы усталости (кривой Велера).

До испытания образцы закрепляют в создающую переменную нагрузку специальную машину, обязательной принадлежностью которой является счетчик циклов. Он должен автоматически выключаться, как только образец будет разрушен.

Первый образец испытывают при наибольшем напряжении цикла, составляющем долю временного сопротивления. Для сталей принимают $\rho_{max} \approx 0{,}6\,\rho_в$, для цветных металлов и легких сплавов — $\rho_{max} \approx 0{,}4\rho_в$. Должно быть зафиксировано число циклов N, при котором образец был разрушен.

Для каждого последующего образца наибольшее напряжение цикла уменьшают на 400 — 200 *кГ/см²* в зависимости от быстроты разрушения предыдущего образца и желаемой точности определения предела выносливости. При этом число циклов, необходимое

для разрушения, последовательно увеличивается. В итоге находят напряжение (принимаемое за предел выносливости), которое последний образец выдерживает без разрушения в течение заданного числа циклов, называемого базой испытаний. Согласно ГОСТ 2860-65 базой испытаний для сталей в обычных условиях принимается 10 миллионов циклов, для цветных металлов — 100 миллионов. В случае сравнительных испытаний допускаются базы, соответственно равные $5 \cdot 10^6$ $20 \cdot 10^6$ циклов.

Таблица 10

№	Образец: диаметр, *мм*	Образец: площадь поперечного сечения, *см²*	Нагрузка: наибольшее напряжение цикла, *кГ/см²*	Нагрузка: амплитуда цикла, *кГ/см²*	Нагрузка: среднее напряжение цикла, *кГ/см²*	Время испытания: начало	Время испытания: конец	Показания счетчика	Число циклов до разрушения, N
Пределы выносливости . . . . . *кГ/см²*									

Все результаты испытаний на копре вращающегося образца записывают в лабораторный журнал, форма которого приведена в таблице 10.

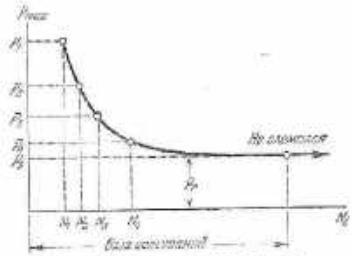


Рис. 22. Диаграмма усталости (Велера).

Диаграмму усталости (рис. 22) строят по точкам с ординатами ρ_i, равными заданному максимальному напряжению цикла ρ_{max},

и абсциссами, соответственно равными полученным из опыта числам циклов N_i, при которых произошло разрушение очередного образца.

Полученная кривая Велера вначале круто идет вниз, а затем становится все более пологой, асимптотически приближаясь к постоянной величине напряжения, которое и является пределом выносливости материала.

Существуют и другие способы построения кривой усталости. Иногда вместо числа циклов N_i по оси абсцисс откладывают обратную им величину $1/N_i$ (рис. 23, а). При таком построении ординаты кривой уменьшаются к началу осей координат; экстраполируя кривую до пересечения с осью ординат, получают предел выносливости, отвечающий величине $1/N = 0$. Этим способом можно пользоваться для приближенного определения предела выносливости по результатам испытания трех-четырех образцов.

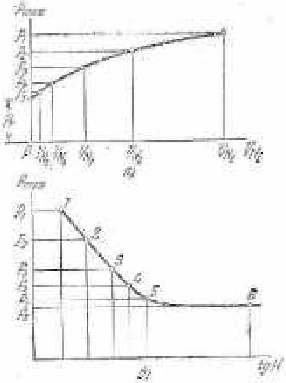


Рис. 23. Диаграммы усталости: а — по величине $1/N$ (N — число циклов); б — в полулогарифмических координатах.

В последнее время часто изображают кривые усталости в полулогарифмических координатах, откладывая по оси абсцисс $\lg N$, а на оси ординат по-прежнему величину p_{max} в линейном масштабе (рис. 23, б). Кривая получается из двух почти прямых участков с переломом. Пересечение прямых и определяет предел выносливости. Для черных металлов после перелома кривая идет горизонтально, и это позволяет определить предел выносливости с большой точностью. Кривая для легких цветных металлов имеет и после перелома небольшой наклон к оси абсцисс, что приводит к условному пределу выносливости.

У с к о р е н н ы е и с п ы т а н и я обычно проводят в условиях чистого изгиба вращающегося образца (рис. 21, б). Такие испытания основаны на свойстве материалов, которое иногда называется циклической текучестью. Это свойство выражается в резком возрастании прогибов, крутящего момента, температуры, энергии деформации и других параметров, характеризующих состояние образца, при достижении наибольшим напряжением цикла

определенного значения, весьма близкого к пределу выносливости материала.

Образец и испытательная машина снабжаются термопарой, прогибомерами, миллиамперметром для определения расходуемой энергии и приспособлением, фиксирующим величину крутящего момента.

Термопара, обычно железоконстантановая, вплавляется в латунное кольцо 1, состоящее из двух половинок, соединяемых винтами и плотно охватывающих испытуемый образец 2 в средней его части (рис. 24). Проволочки термопары другими своими концами соединяются с двумя коллекторами 3 в виде латунных колец с постоянной температурой, также вращающимися вместе с образцом. Ток, возникающий в проволочках при изменении температуры образца, отводится проводами со щеток коллекторов к милливольтметру 4, на шкале которого предварительно наносят деления в милливольтах и градусах.

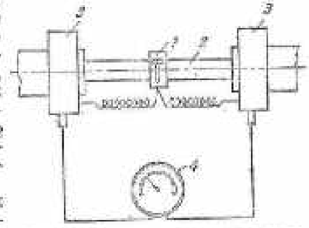


Рис. 24. Измерение температуры при ускоренных испытаниях на выносливость: 1 — латунные кольца с термопарой, 2 — образец, 3 — коллекторы, 4 — милливольтметр.

Прогибомеры в виде двух часовых индикаторов прикрепляются к станине машины над сечением, отвечающим точкам приложения изгибающей нагрузки.

Расход энергии (мощность), затрачиваемый на повторно изменяющуюся деформацию образца, приводимого во вращение электромотором, равен произведению силы тока, питающего мотор, на его напряжение, т. е.

$$W = IV.$$

Для того чтобы исключить влияние колебаний напряжения в сети, мотор машины питается током строго постоянного напряжения от специального генератора. Тогда мощность изменяется пропорционально силе тока и регистрируется миллиамперметром, включенным в сеть питания.

Крутящий момент, изменяющийся вследствие увеличения сопротивления вращению образца при увеличении его нагрузки, определяется по углу отклонения статора мотора. Поэтому статор монтируется в подшипниках, позволяющих ему поворачиваться около оси вращения ротора; кроме того, он имеет внизу массивный сплошной придаток. Таким образом, статор одновременно является маятниковым динамометром, измеряющим величину крутящего

момента. Шкала моментов нанесена на корпусе статора, а указательная стрелка неподвижно соединена со станиной машины.

Для испытания производится регулировка установленного в захватах образца так, чтобы не было биения. Для этого пускают машину при ненагруженном образце и по индикаторам замечают эксцентриситет оси вращения, который не должен превышать —0,02 *мм*; в противном случае машину останавливают и помогают положение образца, добиваясь устранения эксцентриситета. Затем машине дают нормальное число оборотов, и она должна работать без нагрузки в течение 15—20 минут. При установившемся ходе машины записывают показания всех приборов в журнал испытаний по форме, указанной в таблице 11.

Таблица 11

Машина . . . . . Материал . . . . .
Диаметр образца d = ... *см* Момент сопротивления W_x = . . . *см*³

№	Нагрузка P, *кГ*	Напряжение σ, *кГ/см*²	Прогиб, *мм*			Критический момент $M_{кр}$, *кГ см*	Температура $t°$	Мощность N, *кГ см*
			1 опыт	2 опыт	Средний прогиб f			

Нагружение образца производят ступенями, соответствующими напряжению $\sigma = 400$ *кГ/см*², которое вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{Pl_0}{2W_x},$$

где P — нагрузка, l_0 — расстояние от опор до точек приложения изгибающих сил (рис. 21, *б*).

На каждой ступени нагружения машина должна работать 2—5 минут, после чего записывают показания приборов. Приближаясь к предполагаемому пределу выносливости, ступень нагружения уменьшают до $\sigma = 100$ *кГ/см*². Испытания продолжают до циклической текучести материала, которая характеризуется тем, что все измеряемые параметры резко возрастают почти без увеличения нагрузки.

По результатам испытаний строят кривые зависимости величин f, $M_{кр}$, $t°$ и N от максимального напряжения цикла σ_{max} (рис. 25). Полученные четыре кривые вначале имеют прямолинейный участок и при некотором напряжении претерпевают отчетливый перелом

в виде их резкого подъема. Предел выносливости определяется по абсциссам точек пересечения начальных прямолинейных участков с касательными к последним участкам соответствующих кривых, кроме кривой прогиба f. Для этой кривой берется напряжение, соответствующее концу прямолинейного участка. Среднее из найденных четырех частных значений принимается за предел выносливости материала.

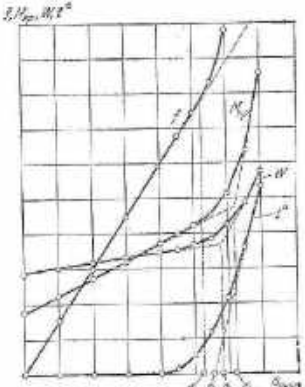


Рис. 25. Кривые ускоренных испытаний на выносливость.

Ускоренные испытания выявляют выносливость всего объема материала, подвергшегося деформации, и дают некоторое среднее значение предела выносливости. Совпадение результатов ускоренных и длительных испытаний возможно только при отсутствии внешних и внутренних повреждений и других очагов концентрации напряжений, а также для материалов с большой циклической вязкостью. Поэтому ускоренные испытания служат лишь для ориентировочного определения предела выносливости и не могут заменить длительных испытаний, которые остаются пока единственным надежным средством для суждения о выносливости материала в различных условиях его работы.

Работа 7. Определение твердости

1. Общие сведения. Определение твердости — одно из важнейших механико-технологических испытаний. Применение механических испытаний металлов на твердость чрезвычайно распространено. Это объясняется быстротой и простотой таких испытаний, малой величиной образцов, дешевизной и портативностью необходимого оборудования, а также возможностью производить испытания на готовых изделиях без их разрушения.

Под твердостью понимают разнообразные характеристики сопротивляемости металла местной, сосредоточенной в небольшом объеме, деформации на его внешней поверхности или на поверхности его

разреза. Испытание на твердость всегда производится на поверхности образца и носит характер внедрения через нее в металл другого тела, более твердого, нежели исследуемый металл. Твердость определяется в результате сообщения металлу некоторой пластической деформации в пределах малого объема. Способы и условия получения деформации при определении твердости весьма разнообразны. Поэтому существует много методов определения твердости, отличающихся формой проникающего тела и способами проникновения.

Общим условием любого метода определения твердости является осуществление сосредоточенного на поверхности образца механического давления, которое создается для данного метода одним и тем же телом определенных размеров и формы, не изменяемых под нагрузкой.

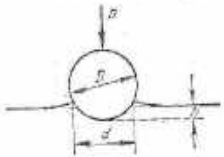


Рис. 25. Определение твердости вдавливанием стального шарика

Таким образом, под твердостью понимается сопротивление деформации на поверхности тела при заранее установленном механическом воздействии другого, более твердого тела заданной формы и размера, неизменяемых во время испытания.

Величины, характеризующие твердость, называются **числами твердости**. Определение разными методами, они различны по величине и по размерности и всегда сопровождается указанием способа их определения.

Наибольшее применение получили следующие способы: статическое вдавливание стального шарика (Бриналь), алмазных конусов (Роквелл) или пирамиды и упругий отскок падающего бойка (Шор). Из других способов отметим царапание металла алмазным конусом, динамическое вдавливание стального шарика или наконечника другого вида. Определение твердости производят специальными приборами (см. главу IX).

В последнее время получил развитие метод определения так называемой **микротвердости**, которая определяется вдавливанием малых алмазных наконечников при небольших нагрузках и микроскопических отпечатках.

2. Определение твердости по Бринелю. Сущность испытания заключается в том, что в образец вдавливают стальной закаленный шарик определенного диаметра D (рис. 26). Шарик выдерживается некоторое время под нагрузкой P, в результате чего на поверхности остается отпечаток (лунка) диаметром d. Отношение нагрузки в килограммах к площади поверхности отпечатка в квадратных миллиметрах называется числом твердости по Бринелю

$$H_B = \frac{P}{F}\ [кГ/мм^2].$$

Площадь поверхности отпечатка можно вычислить по формуле

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

Таким образом, число твердости по Бринелю является функцией диаметра отпечатка d, который зависит от величины нагрузки P и от диаметра D шарика. Получение сравнимых результатов испытания требует соблюдения закона подобия, что для данного случая соответствует постоянству отношения нагрузки к квадрату диаметра шарика, т. е.

$$\frac{P}{D^2} = \text{const}.$$

Это отношение принимают равным 30, 10 и 2,5 в зависимости от твердости исследуемого металла.

При испытании тонких изделий необходимо применять шарик с малым диаметром D для того, чтобы исключить влияние поверхности стола, на которую кладут образец. Для правильного назначения времени выдержки образца под нагрузкой, величины нагрузки и диаметра шарика для данного материала следует пользоваться рекомендацией ГОСТ 9012—59 (таблица 12).

Таблица 12

Материал	Твердость материала H_B, кГ/мм²	Толщина образца, мм	$\frac{P}{D^2}$, кГ/мм²	Диаметр шарика D, мм	Нагрузка P, кГ	Выдержка под нагрузкой, сек
Черные металлы	140—450	От 6 до 4 От 4 до 2 Менее 2	30	10 5 2,5	3000 750 187,5	10
	до 140	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	10	10 5 2,5	1000 250 62,5	30
Цветные металлы	35—130	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	10	10 5 2,5	1000 250 62,5	60
	8—35	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	2,5	10 5 2,5	250 62,5 15,6	90

Обозначение числа твердости часто сопровождается индексами, указывающими условия, при которых определялась твердость. Например, число твердости по Бринелю, полученное вдавливанием шарика диаметром $D = 10$ *мм* при нагрузке $P = 3000$ *кГ* и выдержке в 30 *сек* обозначается $H_{10/3000/30}$.

Центр отпечатка должен находиться на расстоянии не менее диаметра шарика от края образца, а расстояние от центра соседнего отпечатка должно быть не менее $2D$. Получив первый отпечаток, образец переглаживают и при тех же условиях получают еще один или два отпечатка.

Диаметр отпечатка d всегда измеряют по двум взаимно перпендикулярным направлениям, и из этих измерений берется среднее.

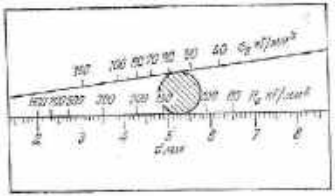


Рис. 27. Пластинка для измерения диаметра отпечатка.

Измерение производят с помощью специального приспособления или микроскопа. Одно из таких приспособлений представляет собой прозрачную пластинку с нанесенными на ней непрерывными линиями, на которых имеются деления, обозначающие диаметр отпечатка d, а иногда для определенных условий испытания числа твердости H_B и даже временное сопротивление $\sigma_в$ (рис. 27). Накладывая пластинку на отпечаток так, чтобы линии касались его очертания, получаем в точке касания диаметр отпечатка в миллиметрах, а для некоторых случаев — непосредственно число твердости и временное сопротивление. Такое приспособление дает возможность быстро измерить диаметр отпечатка с точностью до 0,1 *мм*. Более точное измерение производится при помощи лупы или микроскопа с нанесенными на окуляре шкалами. Обычно они дают увеличение от 10 до 50. При измерении микроскопом точность достигает 0,01 *мм*.

Для быстрого определения по измеренному отпечатку чисел твердости используются специальные таблицы, составленные для различных условий испытаний. В таблице 13 приведены числа твердости H_B при испытании шариком с диаметром $D = 10$ *мм* под нагрузкой $P = 30D^2$ в зависимости от среднего значения диаметра отпечатка d_{10}. Таблицей 13 можно пользоваться при испытаниях шариками других диаметров D_1, под другой нагрузкой P_1, приводя их к табличным значениям. Для этого измеренный в миллиметрах диаметр отпечатка d_1 умножают на отношение $10/D_1$ и соответственно величине $d_{10} = 10d_1/D_1$ по таблице 13 находят H_B при нагрузке

Таблица 13

Диаметр отпечатка d_{10}, *мм*	Площадь поверхности отпечатка F, *мм²*	Число твердости по Бринелю H_B, *кГ/мм²*	Диаметр отпечатка d_{10}, *мм*	Площадь поверхности отпечатка F, *мм²*	Число твердости по Бринелю H_B, *кГ/мм²*
1,35	1,4070	1583	4,00	3,1362	229
1,40	1,5037	1482	4,05	3,2172	223
1,45	1,6065	1378	4,10	12,8262	217
1,50	1,7154	1310	4,15	14,1749	212
1,55	1,8304	1206	4,20	14,5238	207
1,60	1,9516	1161	4,25	14,8804	201
1,65	2,0791	1108	4,30	15,2650	197
1,70	2,2129	1058	4,35	15,6497	192
1,75	2,3530	1015	4,40	16,0253	187
2,00	3,1702	945	4,45	16,4145	183
2,05	3,2427	868	4,50	16,8044	179
2,10	3,5200	857	4,55	17,2055	174
2,15	3,6727	817	4,60	17,6067	170
2,20	3,8305	780	4,65	18,0188	167
2,25	4,0225	745	4,70	18,4360	163
2,30	4,2007	712	4,75	18,8527	159
2,35	4,3982	683	4,80	19,2708	156
2,40	4,5930	656	4,85	19,7197	153
2,45	4,7885	627	4,90	20,1503	149
2,50	4,9899	601	4,95	20,5978	146
2,55	5,1931	578	5,00	21,0455	143
2,60	5,4093	555	5,05	21,5041	140
2,65	5,6188	534	5,10	21,9629	137
2,70	5,8340	514	5,15	22,4327	134
2,75	6,0553	495	5,20	22,9035	131
2,80	6,2832	477	5,25	23,3779	128
2,85	6,5172	461	5,30	23,8503	125
2,90	6,7545	444	5,35	24,3294	124
2,95	6,9986	429	5,40	24,8120	121
3,00	7,1880	415	5,45	25,2778	118
3,05	7,4709	401	5,50	25,8024	116
3,10	7,7378	388	5,55	26,4114	114
3,15	8,0031	375	5,60	26,9260	111
3,20	8,2872	363	5,65	27,4750	109
3,25	8,5510	352	5,70	28,0468	107
3,30	8,7998	341	5,75	28,5634	105
3,35	9,0782	331	5,80	29,1165	103
3,40	9,3585	321	5,85	29,6818	101
3,45	9,6478	311	5,90	30,2536	99,3
3,50	9,9369	302	5,95	30,8310	97,6
3,55	10,2358	293	6,00	31,4169	95,9
3,60	10,5288	285	6,05	32,0095	93,7
3,65	10,8416	277	6,10	32,6038	92,0
3,70	11,1495	269	6,15	33,2130	90,3
3,75	11,4595	262	6,20	33,8270	88,7
3,80	11,7896	255	6,25	34,4491	87,1
3,85	12,0954	248	6,30	35,0834	85,5
3,90	12,4107	241	6,35	35,7297	84,0
3,95	12,7385	235	6,40	36,3828	82,5

Продолжение табл. 13

Диаметр отпечатка d_{10}, мм	Площадь сферического отпечатка F, мм²	Число твердости по Бринелю H_B, кГ/мм²	Диаметр отпечатка d_{10}, мм	Площадь сферического отпечатка F, мм²	Число твердости по Бринелю H_B, кГ/мм²
6,45	33,0426	81,0	7,05	45,8850	61,4
6,50	33,7086	79,6	7,10	46,7251	60,4
6,55	34,3872	78,2	7,15	47,5703	59,4
6,60	35,0729	76,9	7,20	48,4278	58,4
6,65	35,7840	75,4	7,25	49,2982	57,4
6,70	36,4709	74,1	7,30	50,1810	56,4
6,75	37,1832	72,8	7,35	51,0765	55,5
6,80	37,8958	71,6	7,40	51,9845	54,6
6,85	38,6400	70,4	7,45	52,9173	53,7
6,90	39,3855	69,2	7,50	53,8567	52,8
6,95	40,1394	68,0	7,55	54,7932	51,9
7,00	40,9028	66,9	7,60	55,7824	51,0
7,05	41,6877	65,7	7,65	56,8102	50,2
7,10	42,4842	64,6	7,70	57,7742	49,4
7,15	43,2922	63,6	7,75	58,7931	48,6
7,20	44,0996	62,4	8,00	63,8826	47,8

$P = 30D_1^2$. Если испытание проводилось при другой нагрузке P_2, то табличное значение H_B нужно умножить на $P_2/30D_1^2$, чтобы получить число твердости образца.

Например, пусть при испытании шариком с диаметром $D_1 = 5$ *мм* от нагрузки $P_1 = 2{,}5D_1^2 = 62{,}5$ *кГ* получился отпечаток диаметром $d_1 = 1{,}5$ *мм*. Сначала вычисляем $d_{10} = 10d_1/D_1 = 10 \cdot 1{,}5/5 = 3{,}00$ *мм*, чему по таблице 13 соответствует $H_{B\,300} = 415$ *кГ/мм²* для нагрузки $P = 30D_1^2 = 750$ *кГ*. Затем для нагрузки $P_1 = 2{,}5D^2$ получаем число твердости материала образца

$$H_B = 415\,\frac{2{,}5D_1^2}{30D_1^2} = \frac{415}{12} = 34{,}5 \text{ кГ/мм}^2.$$

Результаты испытаний записывают по форме, приведенной в таблице 14.

Таблица 14

№ отпечатка	Первое измерение d_1, мм	Второе измерение d_1, мм	Среднее значение d_1, мм	Число твердости по Бринелю H_B, кГ/мм²

Пользуясь числом твердости Бринеля, можно без разрушения образца получить приближенное значение временного сопротивления некоторых сталей, так как для этого существуют простые соотношения, а именно: для хромоникелевой стали (или при $H_B > 175$) $\sigma_в = 0{,}34\ H_B$; для углеродистой стали (или при $H_B > 175$) $\sigma_в = 0{,}36\ H_B$.

Однако метод Бринеля имеет ряд недостатков. По этому методу нельзя испытывать образцы, если их твердость близко к твердости шарика, так как последний сам получает значительные деформации, что искажает результаты испытания. При использовании обычных стальных шариков это является причиной ограничения пробы по Бринелю пределами наибольшей твердости $H_B \approx 400 \div 500$ *кГ/мм²*. Вследствие большой глубины отпечатка нельзя определить твердость специально обработанного поверхностного слоя, так как шарик проникает через этот слой в более мягкую внутреннюю часть. Измерение диаметра отпечатка занимает сравнительно много времени и бывает неточным вследствие выжимания вдавливаемого шариком металла около краев отпечатка. Поэтому появилась необходимость в других способах определения твердости.

3. Определение твердости по Роквеллу. Сущность способа состоит в применении специального алмазного наконечника в виде конуса с углом при вершине в 120° (рис. 28) или стального шарика,

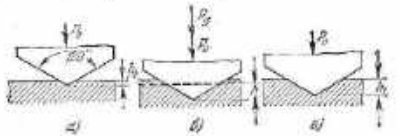


Рис. 28. Определение твердости по Роквеллу: *а* — вдавливание конуса предварительной нагрузкой; *б* — то же, с добавлением основной нагрузки; *в* — после снятия основной нагрузки.

вдавливаемых в металл последовательными нагрузками (предварительной $P_0 = 10$ *кГ* и общей P, состоящей из предварительной и основной P_2).

При действии предварительной нагрузки в 10 *кГ* наконечник проникает в металл на глубину h_0 (рис. 28, *а*); при добавлении основной нагрузки до величины $P = P_0 + P_2$ глубина отпечатка увеличивается (рис. 28, *б*) и после снятия основной нагрузки остается равной h_1 (рис. 28, *в*).

Глубина отпечатка, полученная за счет основной нагрузки P_2, равная $h = h_1 - h_0$, характеризует твердость по Роквеллу. Чем больше глубина h отпечатка, тем меньше твердость. Числа

твердости по Роквеллу связано с глубиной h следующей зависимостью:

для алмазного конуса $H_{RC} = 100 - \frac{h}{0{,}002}$,

для стального шарика $H_{RB} = 130 - \frac{h}{0{,}002}$.

Глубину отпечатка измеряют индикатором (рис. 29), на котором нанесены две шкалы B и C чисел твердости по Роквеллу с одинаковой ценой деления, соответствующей глубине отпечатка в 0,002 *мм*.

Шкала B (красная) предназначена для стальных шариков. Чаще всего применяется шарик диаметром $d = 1{,}59$ *мм*, т. е. $^1/_{16}$", при общей нагрузке, равной $P = 100$ *кГ*. Красная шкала служит для испытания материалов средней и малой твердости, которая в этом случае обозначается H_{RB}. При твердости $H_{RB} < 30$ результаты испытания получаются неточными вследствие большой деформации материала, и тогда нужно применять шарик большего диаметра при другой общей нагрузке P. Если твердость $H_{RB} \geqslant 100$, то необходимо применять алмазный наконечник, так как возможно сплющивание шарика.

Рис. 29. Индикатор для измерения глубины отпечатка и числами твердости по Роквеллу: шкала B для шарика $d = 1{,}59$ *мм* (1/16"), нагрузка 100 *кг*; шкала C для алмаза, нагрузка 150 *кг*.

Для удобства измерения глубины отпечатка шариком начало отсчета берется от цифры 830, которая подводится к стрелке поворотом циферблата при первоначальной нагрузке $P_0 = 10$ *кГ*. Это смещение обусловлено тем, что глубина отпечатка шариком не бывает меньше 0,06 *мм* и не превосходит 0,26 *мм*, что соответствует интервалу от 30 до 130 делений иглой по 0,002 *мм*. При смещенном положении циферблата числа твердости по шкале B находятся в пределах от 100 до 30.

Шкала C (черная) служит для определения твердости алмазным конусом вне зависимости от величины общей нагрузки. При общей нагрузке $P = 150$ *кГ* твердость обозначается H_{RC}. Для применения мягких материалов, у которых $H_{RC} < 20$, применяется стальной шарик, так как алмазный наконечник дает слишком глубокий отпечаток. При $H_{RC} \geqslant 70$ имеет место большое давление на алмаз и он может выкрошиться. Поэтому для твердых материалов и для тонких образцов общую нагрузку на алмаз принимают равной $P = 60$ *кГ*, и тогда твердость обозначается H_{RA}. Отсчет по шкале C всегда производится от нуля. Предварительная нагрузка во всех случаях остается равной 10 *кГ*.

Таким образом, числом твердости по Роквеллу является условная отвлеченная величина, зависящая от глубины отпечатка, образованного различными наконечниками при разной нагрузке.

Нагрузка и наконечник выбираются согласно ГОСТ 9013—59 по таблице 15.

Таблица 15

Примерная твердость по Бринелю H_B, *кГ/мм²*	Обозначение по шкале	Вид наконечника	Общая нагрузка P, *кГ*	Обозначение твердости по Роквеллу	Допускаемые пределы числа
60—230	B	Стальной шарик	100	H_{RB}	25—100
230—700	C	Алмазный конус	150	H_{RC}	20—67
Свыше 700	A	Алмазный конус	60	H_{RA}	Свыше 70

Определение твердости по Роквеллу производится в такой последовательности. Выбрав наконечник и нагрузку, помещают на столик прибора подготовленный образец и прикладывают к нему предварительную нагрузку $P_0 = 10$ *кГ*. Циферблат индикатора поворачивают до совпадения делений 29 и 830 со стрелкой (положение черной стрелки на рис. 29). Затем нагрузку увеличивают до $P = P_0 + P_1$. При этом стрелка индикатора вращается против хода часовой стрелки (пунктир, занимает положение, показанное пунктиром на рис. 29). Выдержав общую нагрузку в течение 4—8 *сек*, снимают основную нагрузку P_1, оставив предварительную, после чего стрелка перемещается на некоторую величину назад (в положение светлой стрелки на рис. 29) и указывает число твердости по Роквеллу, например на рис. 29 следует прочесть $H_{RB} = 71{,}5$ при испытании шариком и $H_{RC} = 41{,}5$ — алмазом. Полученные результаты записывают в журнал, всю нагрузку снимают, образец передвигают на новое место, и испытание повторяется два или более раз, чтобы получить более точное среднее значение числа твердости.

Уменьшение погрешностей при определении твердости по Роквеллу достигается тщательной полировкой поверхности рабочей части алмазного конуса и точным соблюдением его размеров. Необходимо следить, чтобы поверхность образца также была ровной и чисто отшлифованной, причем его толщина должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка, а расстояние между центрами отпечатков или от края образца не менее 2,5 ÷ 3 *мм* для алмазного конуса и не менее 4 *мм* для стального шарика.

Способ Роквелла по сравнению с другими способами имеет существенные преимущества, которые состоят в автоматизации испытательных операций, получении чисел твердости непосредственно по шкале прибора, большой скорости испытаний, требующих всего несколько секунд при подготовленной поверхности образца. Применение наконечника из сплавов твердого материала позволяет производить испытания весьма твердых металлов, чего нельзя сделать по методу Бринелля.

4. Определение твердости алмазной пирамидой. Определение твердости алмазной пирамидой заключается во вдавливании пирамиды в испытываемый металл. Алмазная пирамида имеет квадратное основание и угол $\alpha = 136°$ между противоположными гранями. Число твердости по этому способу принимается равным отношению нагрузки P в килограммах к площади поверхности F в квадратных миллиметрах пирамидального отпечатка (рис. 30) и выражается формулой

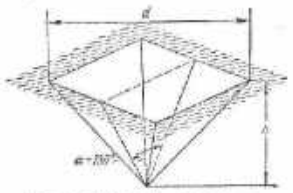


Рис. 30. Пирамидальный отпечаток.

$$H_D = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin\frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1{,}8544\,\frac{P}{d^2}\ [кГ/мм^2],$$

где d — среднее арифметическое значение из длин двух диагоналей отпечатка, измеренных после снятия нагрузки.

Особенность этого метода состоит в том, что для материала с равномерной твердостью все отпечатки для любых нагрузок получаются подобными, площадь их поверхности пропорциональна квадрату диагонали отпечатка d и для всех нагрузок числа твердости получаются одинаковыми. По ГОСТ 2999—59 рекомендуется применять для испытаний одно из следующих значений нагрузок: 5; 10; 20; 30; 50; 100 и 120 $кГ$. Чем больше нагрузка, тем более точным будет результат испытания вследствие получения большого отпечатка. Однако надо следить, чтобы толщина образца была больше десятикратной глубины h отпечатка или больше $1{,}5\,d$, так как при $\alpha = 136°$ отношение $h/d \approx 1/7$. Испытание тонких образцов и тонкого поверхностного слоя производят при тем меньшей нагрузке, чем тоньше образец. Наименьшая допустимая толщина составляет приблизительно 0,3 $мм$ при нагрузке в 5 $кГ$ для закаленной стали. Для твердых материалов не рекомендуется применять нагрузки более 50 $кГ$ во избежание повреждения алмаза.

Нагрузку для определения твердости по пирамиде можно назначать согласно таблице 16 в зависимости от толщины образца и ожидаемой твердости.

Таблица 16

Толщина образца, мм	Нагрузка, $кГ$			
	для $H_D =$ $=10-29\ кГ/мм^2$	для $H_D =$ $=30-99\ кГ/мм^2$	для $H_D =$ $=100-300\ кГ/мм^2$	для $H_D =$ $=300-950\ кГ/мм^2$
0,2—0,5	—	—	—	5—10
0,5—1,0	—	—	5—10	10—20
1—2	5—10	5—10	10—20	20 и больше
2—4	10—30	10—30	20—50	до 120
4 и больше	20 и больше	30 и больше	50 и больше	до 120

Требования чистоты образца и наконечника и условия расположения отпечатков, предъявляемые при испытаниях по методам Бринелля и Роквелла, сохраняются и для испытаний твердости по пирамиде. Выдержка под нагрузкой устанавливается автоматически и регулируется на испытательном приборе. Диагонали пирамидального отпечатка измеряются при помощи микроскопа, являющегося непременной принадлежностью прибора. По среднему значению диагоналей число твердости находят в таблицах, обычно прилагаемых к прибору. Результаты записывают в журнал по форме согласно таблице 14.

Обозначение числа твердости сопровождается индексом, указывающим нагрузку, при которой было произведено испытание. Например, H_{D30} обозначает твердость по пирамиде при нагрузке 30 $кГ$. Хотя H_D не зависит от нагрузки, ее указывают для того, чтобы можно было судить о глубине отпечатка.

Применение алмазной пирамиды имеет следующие достоинства:

1) отпечатки получаются резко очерченные, удобные для измерения;

2) форма отпечатков геометрически подобна, вследствие чего твердость для одного материала получается постоянной независимо от величины нагрузки;

3) твердость по пирамиде в точности совпадает с твердостью по Бринелю для материалов средней твердости, при испытании которых стальной шарик еще не начинает деформироваться, что указывает на большую надежность результатов испытаний по пирамиде;

4) этот метод применим с одинаковым успехом к мягким и твердым материалам и, особенно, для испытания тонких образцов и поверхностных слоев.

5. Определение твердости по Шору. За меру твердости по Шору принимают величину упругой энергии отскока бойка, падающего на образец. Часть кинетической энергии бойка в момент удара затрачивается на создание отпечатка вследствие пластической деформации, а часть затрачивается на упругую деформацию материала под бойком. Энергия упругой деформации заставляет боек отска-

кивать от образца после удара. Оказывается, что чем тверже испытуемый материал, тем меньше его пластическая деформация, тем больше кинетической энергии бойка затрачивается на упругую деформацию материала и тем выше отскакивает боек от образца. Кроме того, высота отскока зависит от материала бойка, от веса и высоты падения.

Для определения твердости по Шору применяют стандартный боек в форме цилиндра с коническим слепком закругленным алмазным конусом. Боек падает со стандартной высоты. Высота отскока стандартного бойка, измеренная в условных единицах, является числом твердости по Шору и обозначается через $H_Ш$. За 100 условных единиц принимается высота отскока бойка от закаленной на мартенсит высокоуглеродистой инструментальной стали. Другими словами, эталоном твердости по Шору является твердость инструментальной стали, принятая равной $H_Ш = 100$.

На величину отскока бойка в значительной степени влияет также модуль упругости, от которого зависит энергия упругой деформации. Некоторые материалы, имеющие низкий модуль упругости, дают сравнительно высокий подскок бойка вследствие относительно большой величины работы упругой деформации. Например, резина и стекло дают большую величину упругого отскока, чем закаленная сталь, и по Шору оказываются более твердыми, что не согласуется с обычными представлениями о твердости. Поэтому метод упругого отскока позволяет сравнивать твердость материалов только с одинаковыми или с близкими модулями упругости, обладающими приблизительно одинаковой способностью к упругой деформации. Этот метод принципиально не применим для сравнения материалов с резко отличными модулями упругости. Сразу говоря, этим методом не только определяется твердость, но также характеризуются и упругие свойства материала.

В современных приборах для определения твердости по Шору высота отскока бойка, т. е. число твердости, фиксируется автоматически (по циферблату). Поэтому удается произвести большое количество испытаний за короткий промежуток времени, что является большим достоинством данного метода.

При испытании нельзя допускать более одного удара бойка по одному и тому же месту испытуемой детали или образца, так как вследствие наклепа металла при повторных ударах получаются более высокие числа твердости. Обычно испытание производят не менее, чем в пяти точках поверхности детали. Среднее арифметическое из этих пяти показаний принимают за искомую твердость, если разность между наибольшим и наименьшим показаниями не превышает пяти единиц.

Для производства испытаний прибор необходимо установить строго вертикально при помощи имеющегося на нем уровня. Поверхность испытуемой детали, а также испытательного столика должны

быть безукоризненно чистыми. Толщина детали должна быть не менее 2 *мм*.

6. Определение твердости царапанием. Сущность метода состоит в нанесении царапин алмазным конусом, обычно с углом заточки 90° (рис. 31). Твердостью по царапанию принимается величина нагрузки $P_{ц}$ в граммах, вызывающая царапину постоянной ширины $b = 10\,\mu$, или иная величина, обратная ширине царапин $b_{ц}$ в миллиметрах, при постоянной нагрузке $P = 50\ Г$, т. е.

$$H_{ц} = \frac{1}{b_{ц}}.$$

Царапины наносят на образцы в продольном и поперечном направлениях специальным прибором (см. § 27, стр. 234). Ширину царапины измеряют при помощи микроскопа на уровне первоначальной поверхности образца без учета валиков материала. Края царапин получаются недостаточно резкими, поэтому для более точных результатов приходится проводить и измерять большое число царапин, иногда по нескольку десятков царапин на один образец. Поэтому скорость таких испытаний чрезвычайно мала.

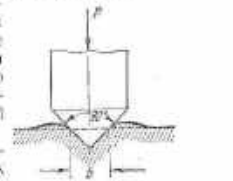


Рис. 31. Алмазный конус для нанесения царапин.

Особенностью этого метода является постоянство твердости по царапанию при всех измеренных степенях наклепа испытуемого материала, что резко отличает метод царапин от других методов, результаты которых, наоборот, зависят от наклепа. Кроме того, наблюдается тесная связь числа твердости $H_{ц}$ с сопротивлением разрушению при разрыве.

7. Микротвердость. Во многих случаях необходимо знать твердость материала и его структурных составляющих в очень малых микроскопических объемах так называемую микротвердость. Определение микротвердости обычно производят методом вдавливания, причем в качестве наконечника применяется четырехгранная алмазная пирамида с квадратным основанием и углом — 136° между противоположными гранями. Другими словами, используется тот же прием, что и для определения обычной осредненной (макроскопической) твердости с использованием наиболее совершенного наконечника. Для определения микротвердости требуется высокая степень точности в качестве изготовленных пирамидок, особенно у со заострением, и весьма совершенная полировка граней. Определение микротвердости возможно только при помощи специальных приборов, снабженных микроскопом с микрометрическим окуляром и механизмом для нагружения и точной установки наконечника.

Число микротвердости H_μ при вдавливании четырехгранной пирамиды вычисляют по среднему значению длин d диагоналей отпечатка точно так же, как и соответствующее ему число H_D, а именно:

$$H_\mu = 1{,}8544\,\frac{P}{d^2}\ [кГ/мм^2].$$

Стандарта для величины нагрузки P на пирамиду пока не существует; в практике определения микротвердости применяются нагрузки в пределах от 1 до 200 $Г$.

Для получения надежных результатов необходимо измерять диагонали нескольких отпечатков и следить, чтобы толщина детали, зерна или кристаллита была не менее десятикратной величины отпечатка. Расстояние между центрами отпечатков или от края зерна должно быть не менее $2d$. Поверхность образца должна быть полированной, причем желательно применять не механическую, а электролитическую полировку, не дающую слоя наклепа.

Структура большинства сплавов состоит из элементов, имеющих различные свойства. В отличие от микротвердости, отражающей осредненные свойства конгломерата различных зерен, анализ микротвердости позволяет изучать и сравнивать отдельные составляющие сплавов по их твердости и выяснить распределение твердости в пределах одного зерна или кристаллита. При этом изучаемое зерно рассматривается как самостоятельный образец, вкрапленный в окружающий материал. Кроме того, измерение микротвердости дает важные результаты для изучения свойств тонких поверхностных слоев, позволяющие, например, оценить глубину упрочненной зоны после обработки поверхности различными способами (обточкой резцом, сверлением, обдувкой дробью, полировкой и т. д.). Когда известна микротвердость, возможен контроль весьма мелких деталей различных точных приборов и механизмов, например часовых механизмов, а также оказалось доступным выяснить распределение деформаций в теле детали, например, после холодной обработки давлением.

8. Сравнение чисел твердости. Условность методов определения твердости лишает возможности дать общий способ пересчета чисел твердости различных материалов. Обычно составляют разные таблицы или номограммы соотношений чисел твердости, имеющих эмпирический характер и пригодных для однородных материалов, главным образом для сталей с одинаковым химическим составом. По этим таблицам можно сопоставлять между собой числа твердости, определенные разными способами. Обычно все показатели твердости материала приводят к твердости по Бринелю, чтобы затем приближенно определить временное сопротивление материала, пользуясь известной зависимостью $\sigma_в = (0{,}30 \div 0{,}36)\,H_B$.

В таблице 17 приведены соотношения чисел твердости по Бринелю — H_B, по Роквеллу — H_R, по пирамиде — H_D и по Шору — H_S.

Таблица 17

Числа твердости						Числа твердости					
по Бринелю H_B	по Роквеллу H_R для шкал			по пирамиде H_D	по Шору H_S	по Бринелю H_B	по Роквеллу H_R для шкал			по пирамиде H_D	по Шору H_S
	A	C	B				A	C	B		
780	84	72	—	1234	107	229	61	20	100	228	33
745	83	70	—	1116	103	223	60	19	99	222	33
712	82	68	—	1022	98	217	60	17	98	217	32
682	81	66	—	941	95	212	59	15	97	214	31
653	80	64	—	868	88	207	59	14	95	208	30
627	79	62	—	804	85	201	58	13	94	201	30
601	78	60	—	746	81	197	58	12	93	197	29
578	78	58	—	694	78	192	57	11	93	192	29
555	77	55	—	650	75	187	57	9	91	185	28
534	76	52	—	600	72	183	56	8	90	183	28
514	75	52	—	567	70	179	56	7	90	178	27
495	74	50	—	551	68	174	55	6	89	174	27
477	74	49	—	536	66	170	55	4	88	171	26
461	73	48	—	502	64	167	54	3	87	166	26
444	73	46	—	474	62	163	53	2	86	162	25
429	72	45	—	450	59	159	53	1	85	160	25
415	72	43	—	435	57	156	52	0	84	156	24
401	71	42	—	423	55	152	—	—	83	152	24
388	71	41	—	401	53	149	—	—	82	149	23
375	70	40	—	390	52	146	—	—	81	146	23
363	70	38	—	380	50	143	—	—	80	143	22
352	69	38	—	361	49	140	—	—	79	140	22
341	68	36	—	344	47	137	—	—	78	138	21
331	67	35	—	333	46	134	—	—	77	134	21
321	67	35	—	320	45	131	—	—	76	131	20
311	66	33	—	311	44	128	—	—	75	129	20
302	66	31	—	303	42	126	—	—	74	127	20
293	65	30	—	293	41	123	—	—	73	123	19
285	65	29	—	285	40	121	—	—	72	121	19
277	64	28	—	278	39	118	—	—	71	119	19
269	64	27	—	270	38	116	—	—	70	116	18
262	63	26	—	261	37	114	—	—	68	115	18
255	63	25	—	250	36	111	—	—	67	113	18
248	62	24	—	249	35	109	—	—	66	110	17
241	62	23	102	240	35	107	—	—	65	109	17
235	61	21	101	235	34	105	—	—	64	107	17

Результаты испытаний на твердость с использованием соотношений таблицы 17 записывают по форме, приведенной в таблице 18.

Таблица 18

Порядковый номер испытания и величина испытываемой величины	Числа твердости					
	по Бринелю				по Роквеллу H_R	по Шору H_S
	1-й диаметр отпечатка, мм	2-й диаметр отпечатка, мм	средний диаметр отпечатка, мм	H_B		
1-е испытание 2-е » 3-е »						
Среднее число твердости						
Приведенное к H_B						
Временное сопротивление $\sigma_в$						

Работа 8. Испытание на ползучесть

1. Общие сведения. Цель работы — на одном из примеров ознакомиться с явлением ползучести и построить кривую ползучести для данного образца стали при заданных постоянной температуре и растягивающей силе.

Кривая ползучести представляет собой график, изображающий зависимость между удлинением образца и временем действия силы. По оси абсцисс (рис. 32) откладывается время, отсчитываемое от начала испытания, а по оси ординат — относительное удлинение образца. На кривой ползучести имеются четыре участка: 1) вертикальная прямая *аб* деформации образца в момент нагружения, 2) участок *бс* неустановившейся ползучести — первая стадия ползучести, 3) прямолинейный участок *cd* установившейся ползучести — вторая стадия, 4) участок *de* ускоренной ползучести после появления на образце шейки — третья стадия.

Угол наклона касательной к кривой ползучести характеризует скорость деформации образца в данный момент времени. Скорость деформации во второй стадии ползучести является постоянной. Величина этой скорости определяет срок службы детали и очень важна для многих случаев практики. Соответствующее напряжение в образце называется пределом ползучести при данной скорости деформации и данной температуре.

Обычно требуется установить величину предела ползучести для заданной скорости деформации при определенной температуре. Для этого приходится получить несколько кривых ползучести при данной температуре, соответствующих разным нагрузкам; затем можно построить кривую зависимости между скоростью деформации во второй стадии ползучести и соответствующим растягивающим напряжением (пределом ползучести).

Построение кривых ползучести является обычно результатом испытаний продолжительностью порядка нескольких часов и даже дней. Длительность испытания зависит от температуры и величины нагрузки. При обычной температуре ползучесть стали практически не наблюдается. Но при высокой температуре ползучесть стали может быть весьма большой.

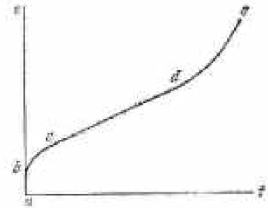


Рис. 32. Первичная кривая ползучести. В стадии установившейся ползучести (cd) удлинение с линейно зависит от времени t.

Практически приходится использовать такие режимы испытания и образцы, чтобы испытание могло быть проведено в течение полутора-двух часов. В случае стали марки Ст. 3 при температуре 450—500° и напряжении 2000—2500 $кГ/см^2$ длительность испытания составляет полтора-два часа. Наибольший интерес представляет вторая стадия ползучести, поэтому испытание образца до разрушения не обязательно. Достаточно обеспечить наступление второй стадии ползучести и определить при этом соответствующую скорость деформации.

Образцы, применяемые для испытания на ползучесть, установлены двух типов: 1) нормальный — диаметр 1 *см*, расчетная длина 10 *см* и 2) удлиненный — диаметр 1 *см*, длина 20 *см*. Форма головок образца зависит от устройства захватов машины.

2. Проведение испытания. Испытание проводится на машине, имеющей то или иное нагревательное устройство (см., например, описание машины в § 33).

Образец предварительно выдерживают при заданной температуре в течение 1 часа. Затем образец плавно нагружают предварительной нагрузкой, равной приблизительно 10% полной заданной нагрузки. Напряжение в образце под предварительной нагрузкой не должно превышать 50—100 $кГ/см^2$. При этой нагрузке присоединяют прибор, предназначенный для измерения удлинений, после чего образец продолжает оставаться под предварительной нагрузкой в течение 5 минут. При этом нужно взять отсчет по прибору и убедиться в том, что он не изменяется.

Затем плавно прикладывают полную нагрузку и снова берут отсчет по тензометру. Далее записи берут через равные промежуточные времена в 2 или 3 минуты. По окончании испытания, если образец не доведен до разрушения, производят разгрузку образца до нагрузки, равной предварительной, и записывают величину остаточной деформации образца.

Таблица 19

Температура . . . . . Напряжение . . . . . .

Время, мин	Отсчет по тензометру (делений)

Форма записи при испытании приведена в таблице 19. Первую колонку этой таблицы — время — следует заполнить заранее.

ГЛАВА II

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Работа 9. Внецентренное растяжение

1. Общие сведения. Если растягивающие силы направлены по оси стержня, то возникает центральное или осевое растяжение. Такой случай рассмотрен в работах 1 и 2. Если же линии действия растягивающих сил смещены от оси стержня на некоторое расстояние e (рис. 33), то такое растяжение называется внецентренным; расстояние e называется эксцентриситетом растягивающей силы P. Опыт на внецентренное растяжение обычно проводится на стальной полосе постоянного сечения.

Цель работы — убедиться на наглядном примере в неравномерности распределения напряжений по сечению внецентренно нагруженного стержня, экспериментально установить закон распределения напряжений и сравнить его с теоретическим.

Нагружая внецентренно установленную на машине стальную полосу, следует замерить при помощи тензометров продольное удлинение, вычислить нормальные напряжения по сечению полосы и построить эпюру напряжений.

2. Подготовка и проведение испытания. Испытание производится на какой-либо из разрывных машин. Мощность машины определяется прочностью образца.

Размеры испытываемого образца должны быть достаточными для размещения нескольких тензометров (не менее трех) по ширине образца. На рис. 33 показано четыре тензометра. Для удобства построения эпюры напряжений следует тензометры размещать на равных расстояниях друг от друга. Удобны для выполнения данной работы электротензометры (см. работу 20) или рычажные тензометры типа Гугенбергера (см. стр. 331). Для упрощения вычислений следует подбирать тензометры с одинаковыми увеличениями.

Укрепление тензометров на образце должно надежно осуществляться с помощью маленьких стеблинок — по одной стеблинке на два тензометра. Возможно также использование пневматических присосок (см. стр. 344).

Длина образца должна быть достаточной для того, чтобы влияние способа приложения нагрузки можно было считать исключенным. Если ширину образца обозначить через b, то длина образца между точками приложения нагрузки должна составлять не менее $l = 4b + s$, где s — база тензометра.

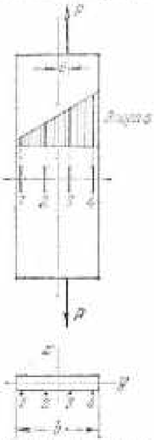


Рис. 33. Эксцентричное растяжение полосы: e — эксцентриситет растягивающей силы, 1, 2, 3 и 4 — тензометры. Нормальные напряжения в сечении полосы распределяются по ширине полосы по линейному закону.

Запись наблюдений по тензометрам производится в лабораторном журнале, форма которого дана в таблице 20.

При некоторой начальной нагрузке в верхней колонке таблицы записывают отсчеты по всем тензометрам. Затем через равные интервалы нагрузки производят запись отсчетов по тензометрам во второй, третьей и т. д. колонках.

В случае полосы толщиной 1 $см$ и шириной 6 $см$, выполненной из стали марки Ст. 3, при эксцентриситете растягивающей силы 1 $см$ начальная нагрузка может составлять 500 или 1000 $кГ$, а ступень нагрузки — 1000 $кГ$; окончательная нагрузка равна 4,5—5,0 $Т$. При нагрузке в 5 $Т$ максимальное напряжение в образце равно 1673 $кГ/см^2$, что меньше предела пропорциональности стали марки Ст. 3.

3. **Обработка результатов испытания.** Вычитая из каждого последующего отсчета предыдущий, вычисляем для каждого тензометра приращения отсчетов. Эти приращения для каждого тензометра приблизительно одинаковы; из них выводим среднее значение приращений.

Приращения отсчетов для каждого тензометра пропорциональны приращению напряжения. Для определения напряжений приращения отсчетов должны быть умножены на

$$\beta = \frac{E}{Ks},$$

где E — модуль упругости материала, K — увеличение тензометра, s — база тензометра.

Теоретически напряжение при эксцентренном растяжении определяется по формуле (рис. 33)

$$\sigma = \frac{P}{F}\left(1 + \frac{e y}{i_x^2}\right),$$

Таблица 20

Нагрузка P						Среднее приращение отсчета Δn	Увеличение тензометра K	$\beta = \frac{E}{Ks}$	Приращение напряжения $\sigma = \beta\Delta n$
Тензометр № 1	Отсчет								
	Приращение отсчета								
Тензометр № 2	Отсчет								
	Приращение отсчета								
Тензометр № 3	Отсчет								
	Приращение отсчета								

где F — площадь поперечного сечения полосы, $i_x = 0{,}288b$ — радиус инерции сечения полосы относительно оси x, y — расстояние от оси x до рассматриваемой точки сечения полосы.

Эпюра напряжений σ по приведенной формуле получается линейной (см. рис. 33). Экспериментальные значения напряжений обычно незначительно отклоняются от теоретических.

Работа 10. Растяжение полосы с отверстием

1. **Общие сведения.** Целью работы является установление характера распределения напряжений в полосе, ослабленной круглым отверстием, и определение величины коэффициента концентрации напряжений. Из теории упругости и из опыта известно, что в пластинке с вырезом, подвергнутой растяжению (или сжатию), напряжения вблизи выреза значительно больше, чем на участках пластинки без выреза.

На рис. 34 представлены эпюры распределения нормальных напряжений в сечении CD полосы. В сечении AB, находящемся в достаточном удалении от отверстия, распределение напряжений равномерно.

Коэффициентом α концентрации напряжений для данного случая называется отношение σ_{max}/σ_n максимального действительного напряжения (у края отверстия) к среднему напряжению. В ослабленном

сечении $\sigma_0 = \frac{P}{t(b-d)}$. Здесь имеется в виду теоретический коэффициент концентрации, так как явление рассматривается при упругих деформациях. Теоретически $\alpha = 3$, если диаметр d отверстия весьма мал по сравнению с шириной b полосы. С увеличением отношения диаметра отверстия к ширине полосы величина α уменьшается.

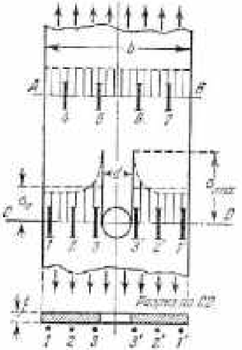


Рис. 34. Исследование пластинки с отверстием. По показаниям тензометров 4—7 напряжения в сечении AB (вдали от выреза) распределены равномерно; тензометры 1—3 и 1'—3' показывают концентрацию напряжений вблизи отверстия.

Тензометры — приборы, позволяющие измерять деформации образца (см. описание тензометра на стр. 33), устанавливают на полосе так, чтобы они измеряли продольные удлинения.

Если изменение отсчета по тензометру равно Δn, а увеличение тензометра — K, то удлинение $\lambda = \Delta n/K$. При одноосном напряженном состоянии [1]), если известно удлинение (укорочение) λ волокна длиной l, то напряжение можно определить по формуле

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{E}{l}\lambda.$$

В нашем случае $l = s$, следовательно, $\sigma = \frac{E}{s}\frac{\Delta n}{K}$.

Данные, получаемые по тензометрам 1, 2, 3 и 1', 2', 3' (рис. 34), позволяют построить эпюру σ в ослабленном сечении CD. Тензометры 4, 5, 6, 7 устанавливают для выяснения распределения напряжений в сечении, удаленном от выреза.

2. Проведение опыта и обработка результатов. Опыт производится на машинах силой 50 или 30 T (описание этих машин дано на стр. 198 и 200). Образцы (стальные и дюралевые) имеют ширину 20—25 *см* и толщину 1,0 *см* или меньше. Диаметр выреза — 5 *см*. Для того чтобы исключить влияние мертвых ходов в тензометрах, образец предварительно нагружают силой P_1, равной 1—2 T. После этого по всем тензометрам берут начальные отсчеты n_1, которые записывают в лабораторный журнал по форме, приведенной в таблице 21. Увеличив затем нагрузку до некоторого значения P_2 (в зависимости от прочности образца принимают $P_2 = 10 - 15 - 20$ T), снова берут отсчеты (n_2) по тензометрам.

[1]) Приближенно напряженное состояние считаем одноосным.

Таблица 21

№ тензометра		Отсчеты по тензометрам		[illegible]	Увеличение тензометра K	База тензометра s	$\beta = \frac{E}{Ks}$	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]						
1									
1'									
2									
2'									
3									
3'									
4									
7									
5									
6									

Далее следует разгрузить образец до значения нагрузки несколько меньше P_1 и снова, подойдя к этой нагрузке (снизу), повторить отсчеты по тензометрам. Они должны совпасть с первоначальными или отличаться от них лишь незначительно (на 0,1—0,2 *мм*).

Приращения $\Delta n = n_2 - n_1$ отсчетов пропорциональны приращениям напряжений σ, т. е.

$$\sigma = E\varepsilon = E\frac{\Delta s}{s} = E\frac{\Delta n}{Ks} = \beta\Delta n, \tag{1}$$

где $\beta = E/Ks$, здесь K — увеличение тензометра. Например, при $K = 1000$, $E = 2\cdot10^6$ $кГ/см^2$, $\beta = 2\cdot10^6/1000\cdot20 = 100$ $кГ/см^2 мм$ и $\sigma = 100\Delta n$ $кГ/см^2$, где Δn в миллиметрах.

Полученные значения σ дают возможность построить искомую эпюру распределения нормальных напряжений в ослабленном сечении CD (рис. 34) образца и установить коэффициент концентрации напряжения.

Построенная таким образом эпюра напряжений не может быть полностью симметричной вследствие неизбежных погрешностей в измерении деформаций и нагружении образца. Более полной явится симметричная эпюра, построенная по средним значениям σ, вычисленным как средние арифметические для симметричных точек 1 и $1'$ (рис. 34), 2 и $2'$, 3 и $3'$, 4 и $4'$, 5 и 6.

Работа 11. Кручение стержней круглого сечения

1. Общие сведения. Цель *работы* — изучить зависимость между нагрузкой и деформацией вала, определить модуль сдвига G материала и главные напряжения в поверхностном слое вала.

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

$$\varphi = \frac{M_к l}{G J_\rho}, \qquad (2)$$

где l — длина вала, $M_к$ — крутящий момент, G — модуль упругости материала при сдвиге (или просто модуль сдвига), он же называется и модулем упругости второго рода, J_ρ — полярный момент инерции площади поперечного сечения вала; для сплошного сечения $J_\rho = \pi d^4/32$, здесь d — диаметр сечения; для полого вала

$$J_\rho = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32},$$

где D — внешний диаметр, d — внутренний диаметр сечения.

Для полого вала, когда толщина стенки t меньше одной четвертой радиуса, применяется приближенная формула (погрешность ее при этом меньше 5%)

$$J_\rho = 2\pi r_{ср}^3 t,$$

где $r_{ср}$ — средний радиус сечения.

Указанная пропорциональность между нагрузкой и деформацией наблюдается в начальной стадии кручения образца; затем, так же как и при растяжении или сжатии, пропорциональность нарушается и наступает быстрое увеличение угла закручивания при незначительном увеличении крутящего момента. Последний возрастает вплоть до разрушения образца. Шейка на образце не образуется. На рис. 35, *а* представлена диаграмма кручения для малоуглеродистой стали, а на рис. 35, *б* — диаграмма для чугунного образца

приблизительно тех же размеров (чугун не подчиняется закону пропорциональности).

Модуль G с модулем упругости первого рода E связан следующим соотношением:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \qquad (3)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Максимальные касательные напряжения при кручении вала определяются по известной формуле

$$\tau = \frac{M_к}{W_\rho}, \qquad (4)$$

где W_ρ — полярный момент сопротивления сечения,

для сплошного сечения $W_\rho = \frac{\pi d^3}{16}$,

для полого сечения $W_\rho = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{16D}$,

для тонкостенной трубы приближенно $W_\rho = 2\pi r_{ср}^2 t$.

Погрешность последней формулы не превышает 3% при $t \leqslant 0{,}1 r_{ср}$.

Максимальные касательные напряжения действуют в поперечных и продольных сечениях вала. Нормальные напряжения в этих

Рис. 35. Диаграмма кручения образцов малоуглеродистой стали

сечениях вала отсутствуют. Следовательно, происходит чистый сдвиг.

Главные напряжения σ_1 и σ_3 параллельны поверхности вала и направлены под углом 45° к образующим. Значения σ_1 и σ_3 можно получить из опыта, если замерить тензометрами деформации образца в указанных направлениях. Теоретически σ_1 и σ_3 равны τ.

Наличие нормальных напряжений в площадках, наклоненных под углом 45° к образующей вала, наглядно подтверждается на опыте разрушением чугунного образца. Чугун, слабо сопротивляющийся растяжению, разрушается при кручении в результате отрыва материала по винтовой поверхности, наклоненной под углом 45° к образующей (рис. 36, *а*).

Разрушение стали при кручении происходит от среза по поперечному сечению (рис. 36, *б*).

Опыты на кручение производятся на машинах, описанных в §§ 16 и 19, либо на установке, описанной ниже.

Рис. 36. Вид цилиндрических образцов, разрушенных при кручении: а — чугунного и б — стального.

2. Настольная установка КМ-600 для испытаний на кручение. Настольная установка КМ-600 предназначена для испытания на кручение тонкостенных труб в пределах упругости. Максимальный крутящий момент равен 600 *кГм*.

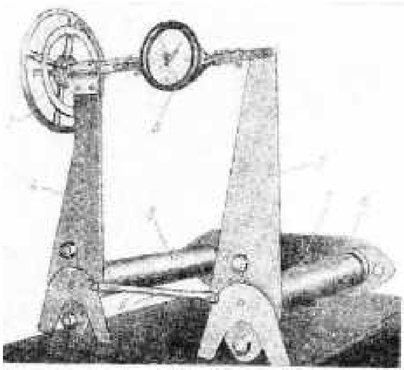


Рис. 37. Настольная установка для испытаний на кручение, максимальный момент 600 кГм: 1 — стальная пластина, 2 и 3 — образцы, 4 и 5 — рычаги, [illegible], 6 — распорка, 7 — [illegible], стягивающий концы рычагов, 8 — динамометр.

Установка показана на рис. 37. К стальной пластине *1* жестко прикреплены своими концами трубы *2* и *3*. К другим концам труб также жестко присоединены рычаги *4* и *5*. Верхние концы рычагов стягиваются винтом. Сила натяжения измеряется динамометром *8*. Винт затягивается вручную при помощи колеса *7*.

С изменением усилия на винте изменяется крутящий момент, действующий на трубы *2* и *3*. Если усилие винта равно P, то момент, закручивающий трубу, равен Ph, где h — длина рычага. Таким образом, крутящий момент пропорционален усилию винта и, следовательно, по градуированной в *кГм* шкале динамометра можно прочесть значение крутящего момента.

Для того чтобы трубы не подвергались изгибу, между ними помещена распорка *6*.

На трубах устанавливают тензометры для измерения напряжений. Края труб оставлены незаделанными и несколько выступают для удобства их обмера. Установка снабжена торсиометром для измерения угла закручивания образца.

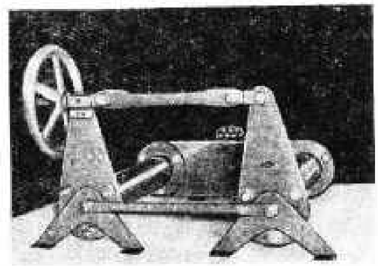


Рис. 38. Вариант настольной установки для испытаний на кручение.

Торсиометр представляет собой индикатор, измеряющий сближение рычагов *4* и *5*. Это сближение пропорционально углу закручивания образца.

Вариант описанной установки, изготовленный СКБ МВССО СССР под названием СМ-25, показан на рис. 38. Здесь пружинный динамометр заменен стержнем, на котором помещается тензометр для измерения усилия.

3. Торсиометр стрелочный. Для измерения углов закручивания применяются стрелочные, зеркальные и другие торсиометры.

Схема стрелочного торсиометра показана на рис. 39. На образце *1*, испытываемом на кручение, укрепляют обжимы *2* и *3* с неподвижно установленными на них стрелками *4* и *5*. При закручивании образца угол φ_2 поворота сечения *2* вала больше угла φ_3 поворота сечения *3*, так как сечение *2* отстоит дальше от заделки *В*, чем сечение *3*. Разность $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_3$ представляет собой угол закручивания

испытуемого вала на длине l между сечениями 2 и 3. Как видно из чертежа, $\Delta\varphi = \Delta n/r$, где Δn — разность приращений отсчетов по дугам II и I, а r — длина стрелки (от оси вала).

Описанное устройство отличается простотой. В работе оно удобно, если податливость заделки B невелика. Стрелочный торсиометр с успехом может быть применен, например, для тарировки стационарного торсиометра на машине КМ-600, описанной выше.

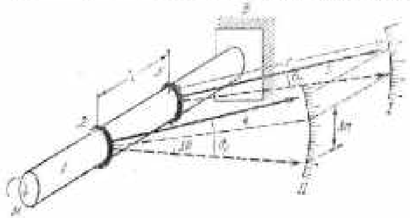


Рис. 29. Схема стрелочного торсиометра. Разность отсчетов Δn пропорциональна приращению закручивающего момента.

На стр. 163—165 описаны другие типы торсиометров — зеркальный торсиометр и торсиометры с подвижной шкалой.

4. Определение модуля сдвига *G*. Модуль сдвига G определяют из следующего равенства:

$$G = \frac{\Delta M_к l}{J_p \Delta\varphi}; \tag{5}$$

здесь $\Delta M_к$ — приращение крутящего момента, соответствующее среднему приращению $\Delta\varphi$ угла закручивания.

Приращение угла закручивания $\Delta\varphi$ вычисляют по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta n_{ср}}{r}, \tag{6}$$

где $\Delta n_{ср}$ — среднее значение приращения разности отсчетов. Эту величину определяют из нижней строки таблицы 22, в которой приведена форма лабораторного журнала записей при пользовании стрелочным торсиометром.

При пользовании зеркалами формулу (6) заменяют такой:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta n_{ср}}{2L}. \tag{7}$$

В случае торсиометра с подвижной шкалой (стр. 165) запись в лабораторном журнале ведут по более простой форме, указанной в таблице 23.

Таблица 22

Крутящий момент M в кГ·см							Приращение крутящего момента ΔM =
Отсчеты по дугам (или линейкам) в см	По дуге I n^{I}						
	По дуге II n^{II}						
Разность отсчетов $n = n^{II} - n^{I}$							
Приращение разности отсчетов Δn							Среднее приращение разности отсчетов $\Delta n_{ср}$ =

Таблица 23

Крутящий момент M в кГ·см					ΔM =
Отсчет по торсиометру n					
Приращение отсчета Δn					Среднее приращение отсчетов $\Delta n_{ср}$ =

Таблицей 22 можно пользоваться и при торсиометре с подвижной шкалой, не заполняя 2-ю и 3-ю строки таблицы. Разность отсчетов прочитывают по шкале и сразу записывают в журнал.

5. Определение главных напряжений. Закон Гука для плоского напряженного состояния выражается так:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x); \tag{8}$$

здесь σ_x и σ_y — нормальные напряжения по взаимно перпендикулярным площадкам;

ε_x и ε_y — относительные удлинения соответственно в направлениях действия σ_x и σ_y.

Из формул (8) имеем:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x). \tag{9}$$

Заменяя относительные удлинения ε_x и ε_y абсолютными Δs_x и Δs_y по формулам

$$\varepsilon_x = \Delta s_x/s \text{ и } \varepsilon_y = \Delta s_y/s,$$

где s — база тензометра, вместо формул (9) получим такие:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}\frac{\Delta_{2x} + \mu\Delta\varepsilon_y}{s}; \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}\frac{\Delta\varepsilon_y + \mu\Delta\varepsilon_x}{s}. \tag{10}$$

Тензометры *1* и *2* (рис. 40) устанавливаются по направлениям, наклонным под углом 45° к образующей образца. По этим направлениям действуют главные напряжения [1]) σ_1 и σ_2, равные друг другу по абсолютной величине, но различные по знаку. Следовательно, и удлинения Δs_1 и Δs_2 по этим направлениям равны друг другу по абсолютной величине и имеют различные знаки. Обозначим

Рис. 40. Расположение тензометров на поверхности вала. Тензометры *1* и *2*, установленные под углом 45° к образующей вала, показывают деформации, одинаковые по условию, но различные по знаку.

$$\Delta s_1 = -\Delta s_2 = \Delta s. \tag{11}$$

Тогда по формулам (10) получим:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\mu}\frac{\Delta s}{s}; \quad \sigma_2 = -\frac{E}{1+\mu}\frac{\Delta s}{s}. \tag{12}$$

Фактически измеренные деформации Δs_1 и Δs_2 могут вследствие неточности опыта несколько отличаться друг от друга и по абсолютной величине. Значение Δs нужно определить как среднее из абсолютных значений Δs_1 и Δs_2, т. е.

$$\Delta s = \frac{1}{2}(|\Delta s_1| + |\Delta s_2|) \quad \text{или} \quad \Delta s = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta n_1}{K_1} + \frac{\Delta n_2}{K_2}\right), \tag{13}$$

где Δn_1 и Δn_2 — разности отсчетов по тензометрам, а K_1 и K_2 — увеличения тензометров.

Запись наблюдений для определения Δn_1 и Δn_2 ведем по форме, указанной в таблице 24.

Определив Δn_1 и Δn_2 из таблицы 24, найдем Δs по формуле (13) и затем главные напряжения σ_1 и σ_2 по формулам (12).

Тензометр *3* (рис. 37), поставленный вдоль образующей, не должен показывать изменений отсчета.

Обычно наблюдения по торсиометру и тензометрам ведут одновременно. Соответственно таблицы 23 и 24 объединяют.

Для проверки полученных экспериментальных значений главных напряжений σ_1 и σ_2 можно воспользоваться тем, что при кручении

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{max},$$

где τ_{max} — максимальное касательное напряжение в поперечном сечении вала, определяемое по формуле

$$\tau_{max} = \frac{M_z}{W_p}. \tag{14}$$

[1]) Рассматривая напряженное состояние как объемное, следует вместо σ_1 и σ_2 писать σ_I и σ_{II}.

Таблица 24

Крутящий момент M_z, кГ см					Приращение крутящего момента ΔM_z =
Отсчеты по тензометрам: 1-й тензометр, K_1 =	Отсчет n_1				
	Приращение отсчета Δn_1				Среднее приращение отсчета $\Delta n_{1ср}$ =
2-й тензометр, K_2 =	Отсчет n_2				
	Приращение отсчета Δn_2				Среднее приращение отсчета $\Delta n_{2ср}$ =
3-й тензометр, K_3 =	Отсчет n_3				
	Приращение отсчета Δn_3				Среднее приращение отсчета $\Delta n_{3ср}$ =

Работа 12. Кручение стержней прямоугольного сечения

1. Общие сведения. В данной работе рассматриваются те же вопросы, что и в предыдущей работе по кручению стержней круглого сечения.

Цель работы — ознакомиться с кручением стержней прямоугольного сечения и его особенностями. При этом следует: 1) определить угол закручивания стального стержня прямоугольного сечения в пределах упругости, 2) определить при помощи тензометров касательные напряжения в точках *1* и *2* (рис. 41) сечения стержня вблизи его поверхности, 3) с помощью резиновой модели установить характер изменения деформации сдвига по ширине образца.

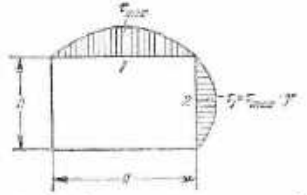


Рис. 41. Эпюра касательных напряжений вблизи края сечения при кручении стержня прямоугольного сечения.

Полученные значения угла закручивания и напряжений в средних точках сторон сечения сравнить с теоретическими.

2. Подготовка и проведение испытания. Опыт проводится на стальном образце. Выполнение второй части задания требует большей мощности образца и машины. Поперечные размеры образца

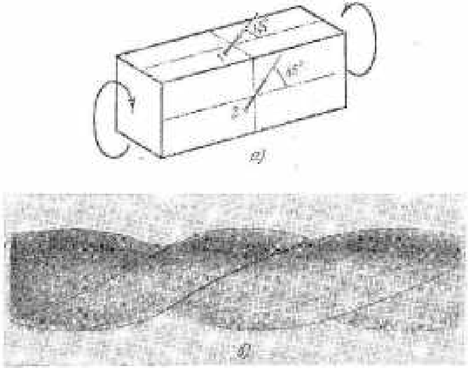


Рис. 42. а — Направления установки тензометров 1—2 для определения наибольших касательных напряжений при кручении стержня прямоугольного сечения; б — большие деформации резиновой модели стержня прямоугольного сечения при кручении: наибольшие сдвиги наблюдаются на середине граней; вблизи ребер сдвиги не наблюдаются.

должны быть тем больше, чем больше база тензометра. В случае применения проволочных электродатчиков с базой 5—8 *мм* может быть использован образец сечением 4 × 6 *см*. Соответствующая мощность машины составляет около 150—200 *кГм*. Опыт можно проводить на машине КМ-500, описанной в работе 11.

Для приближенной оценки напряжений при образцах указанных размеров могут быть использованы тензометры с базой в 10—15 *мм*, а на широкой стороне образца могут быть установлены тензометры с базой 20 *мм*. Результат в этом случае будет лишь незначительно преуменьшен.

Тензометры устанавливают на поверхности образца наклонно к его оси — под углом 45° к образующей (рис. 42а).

Измерение угла закручивания производится торсиометрами, подобными описанным в работе 11. При испытании на машине КМ-500 торсиометра не требуется, так как машина имеет шкалу для измерения малых углов закручивания.

Запись в лабораторном журнале ведется по форме, приведенной в таблице 25.

Таблица 25

Крутящий момент $M_к$, *кГ·см*					Приращение крутящего момента $\Delta M_к$ =
Отсчет по торсиометру n					
Приращение отсчета Δn					Среднее приращение отсчета $\Delta n_{ср}$ =
Отсчет по тензометру 1 n_1					
Приращение отсчета Δn_1					Среднее приращение отсчета $\Delta n_{1ср}$ =
Отсчет по тензометру 2 n_2					
Приращение отсчета Δn_2					Среднее приращение отсчета $\Delta n_{2ср}$ =

3. Сравнение результатов эксперимента с теоретическими данными. Вопрос о кручении сплошного стержня прямоугольного сечения теоретически элементарно не решается. Эта задача решена в теории упругости. Ниже приводим основные результаты этого решения.

Угол закручивания на единицу длины стержня

$$\vartheta = \frac{M_к}{G\alpha a b^3}. \qquad (15)$$

Эпюры касательных напряжений кручения вблизи поверхности стержня в его поперечном сечении имеют вид, примерно показанный на рис. 41. Наибольшее касательное напряжение соответствует середине широкой грани стержня и определяется по формуле

$$\tau_{max} = \frac{M_к}{\beta a b^2}. \qquad (16)$$

Касательное напряжение по середине узкой грани

$$\tau_1 = \gamma \tau_{max}. \qquad (17)$$

Коэффициенты α, β и γ, входящие в формулы (15), (16) и (17), являются функциями отношения a/b сторон сечения стержня, где b — меньшая сторона. Отдельные значения α, β и γ, соответствующие некоторым значениям a/b, приведены в таблице 26.

Таблица 26

a/b	α	β	γ	a/b	α	β	γ
1	0,208	0,141	1,000	4	0,281	0,281	0,745
1,5	0,231	0,196	0,859	6	0,299	0,299	0,743
1,75	0,239	0,214	0,820	8	0,307	0,307	0,742
2	0,246	0,229	0,795	10	0,313	0,313	0,742
2,5	0,258	0,249	0,766	∞	0,333	0,333	0,742
3	0,267	0,263	0,753				

Вблизи ребер стержня касательное напряжение, как это видно из эпюр, равно нулю, в чем можно убедиться, рассматривая прямоугольную сетку на поверхности стержня, выполненного из резины (рис. 125). Сообщая такому стержню значительную деформацию кручения, можно видеть, что первоначально прямоугольные клетки сетки превращаются в параллелограммы. Наибольшему перекосу подвергаются клетки, расположенные посредине широкой грани стержня. Вблизи ребер стержня перекос клеток не наблюдается, т. е. деформация сдвига и, следовательно, касательные напряжения здесь равны нулю.

Рис. 43. Схема испытания пружины.

Работа 13. **Испытание винтовой пружины**

1. Общие сведения. Цель работы состоит в определении осадки пружины и модуля сдвига материала. Испытание выполняют так.

Пружину подвешивают к жесткой опоре вертикально (рис. 43) за один конец ее, выведенный к оси пружины; к другому концу, также выведенному к оси пружины, подвешивают груз. Перемещение нижнего конца пружины под действием груза, называемое осадкой пружины, измеряется визуально или компаратором в зависимости от жесткости пружины. Для наглядности опыта следует размеры пружины подобрать так, чтобы ее осадку можно было измерить непосредственно приставной линейкой. В случае стальной проволоки диаметром 4 *мм* и при диаметре пружины $D = 10$ *см* осадка пружины на один виток от нагрузки $P = 1$ *кГ* составляет около 4 *мм*. При значительном числе витков осадка пружины имеет порядок нескольких

сантиметров; такая осадка достаточно точно может быть измерена линейкой.

Целесообразно нагруженные пружины производить несколькими ступенями для того, чтобы убедиться в линейности зависимости между нагрузкой и деформацией пружины. В случае пружины указанных выше размеров могут быть приняты такие ступени нагрузки: 300, 600, 900 *Г*.

Запись наблюдений в лабораторном журнале ведут по форме, которая дана в таблице 27. В первой колонке записывают значения нагрузки, начиная от нуля. Во второй — отсчеты по линейке или какому-либо прогибомеру, в третьей — приращения отсчетов, которые при равных интервалах нагрузки также приблизительно одинаковы.

Таблица 27

Нагрузка P	Отсчеты по прогибомеру	Приращения отсчетов	Средние приращения отсчета

2. Обработка результатов испытания. По данным результатов испытаний определяют среднее приращение отсчета по прогибомеру, равное величине Δh осадки пружины, соответствующей принятому приращению ΔP нагрузки.

Для пружины с малым шагом витков осадка определяется по формуле

$$h = \frac{8PD^3n}{Gd^4}, \qquad (18)$$

где D — диаметр пружины, d — диаметр проволоки, n — число витков, G — модуль сдвига материала пружины.

На основании формулы (18) модуль сдвига

$$G = \frac{8\Delta PD^3n}{\Delta hd^4}.$$

Следует иметь в виду, что диаметр проволоки определяется как среднее арифметическое из нескольких измерений в различных местах пружины, выполненных с помощью микрометра.

Работа 14. Испытание балки на изгиб

А. Напряжения при изгибе

1. Общие сведения. Цель работы — исследовать закон распределения нормальных напряжений по сечению балки при прямом изгибе и определить главные напряжения в нейтральном слое балки.

Прямым изгибом называем такой изгиб балки, когда действующие силы находятся в одной из двух главных плоскостей балки. При этом балка прогибается в той же плоскости.

Нормальные напряжения σ в поперечном сечении балки при прямом изгибе определяются по формуле

$$\sigma = \frac{My}{J}, \tag{19}$$

где M — изгибающий момент в данном сечении; J — момент инерции сечения балки относительно его нейтральной линии (совпадающей с главной центральной осью инерции сечения); y — расстояние от нейтральной линии до точки сечения, в которой определяется напряжение.

Линейная зависимость, выражаемая формулой (19), графически представляется прямой, показанной на рис. 47 справа.

Наибольшие нормальные напряжения соответствуют точкам, наиболее удаленным от нейтральной линии:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{J} y_{\max} = \frac{M}{W}. \tag{19'}$$

Здесь $W = J/y_{\max}$ — момент сопротивления сечения.

Главные напряжения при изгибе

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}, \tag{20}$$

где $\tau = QS^*/Jb$ — касательное напряжение в поперечном сечении в данной точке.

Здесь Q — поперечная сила в данном сечении; S^* — статический момент площади сечения, расположенной по одну сторону от слоя, в котором определяется напряжение, относительно нейтральной линии сечения; b — ширина сечения в данном месте.

Нейтральный слой балки (где $\sigma = 0$, а $\tau \neq 0$) испытывает чистый сдвиг, следовательно,

$$\sigma_{1,3} = \pm \tau = \pm \frac{QS_0^*}{Jb}, \tag{21}$$

причем S_0^* — статический момент площади полусечения.

Направления главных напряжений в нейтральном слое балки составляют с осью балки углы, равные 45°.

Определяя главные напряжения в нейтральном слое, как этим самым, как видно из формулы (21), находим и значения равных им наибольших касательных напряжений.

2. Испытательные установки. Исследование работы балки на изгиб производится на балках двутаврового сечения. Установка осуществляется по схеме рис. 44. Буквами a — b на схемах обозначены исследуемые сечения.

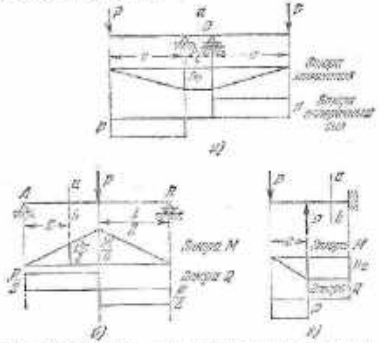


Рис. 44. Схемы балок, испытываемых на изгиб. В сечениях a—b устанавливаются тензометры.

Стационарная установка по схеме рис. 44, *а*, давно применяемая в лабораториях, представляет собой стальную прокатную двутавровую балку № 16 или № 18 длиной 7—8 *м*.

Расстояние между опорами составляет около 1,5 *м*. На концах консолей балка слабжена платформами, на которые при проведении опыта кладут грузы весом 15—20 *кГ*. На такой установке наглядно могут быть исследованы напряжения и деформации изгиба.

На машинах испытывают более короткие балки обычно по схеме рис. 44, *б*. Длина такой балки равна 1—2 *м* в зависимости от типа машины. Для испытания балок на изгиб у машин имеются приспособления в виде траверсов с опорами по концам и приставных ножей, через которые осуществляется нагружение. Пресс Амслера силой 200 *Т* (см. описание пресса в работе 3) снабжен передвижным траверсом *1* (рис. 45) длиной 2 *м* в виде клепаной двутавровой балки устанавливаемой на рабочем поршне *2* гидравлического цилиндра машины.

На опоры *A* и *B*, имеющиеся на траверсе, устанавливают испытываемую балку *3*. Нож упора *4* доводится до соприкосновения с балкой. Затем при помощи насоса повышается давление в цилиндре пресса, чем вызывается подъем траверса и, следовательно, изгиб балки *3*.

Другие машины (см., например, на стр. 219 описание 30-тонной универсальной машины) имеют подобные же устройства для изгиба балок, причем обычно траверсы стационарны и имеют длину 1 *м*.

Описание настольных установок на изгиб см. на стр. 270.

3. Определение нормальных напряжений в поперечном сечении балки. Нормальные напряжения определяются путем измерения удлинений, для чего применяются рычажные тензометры (описание дано на стр. 33) или электротензометры (стр. 154). На рис. 46 показано прикрепление рычажного тензометра к полке балки с помощью струбцинки. Тензометры *1, 2, 3, 4* и *5* (рис. 47) поставлены так, что они измеряют удлинения вдоль оси балки. Определив удлинения, найдем нормальные напряжения в данном поперечном сечении балки на основании линейной зависимости $\sigma = E\varepsilon$, соответствующей основному допущению элементарной теории изгиба об отсутствии нормальных напряжений в продольных сечениях балки.

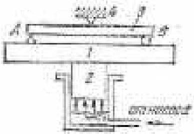


Рис. 45. Изгиб балки на гидравлическом прессе: 1 — подвижный траверс машины; 2 — рабочий цилиндр; 3 — испытываемая балка; 4 — упорный траверс.

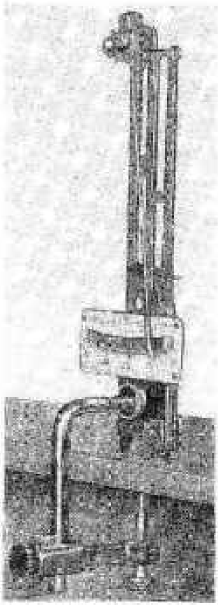


Рис. 46. Рычажный тензометр, установленный на полке двутавровой балки.

Тензометры *1* и *5* расположены на внешних поверхностях полок двутавров, причем на каждой полке устанавливают по два тензометра, из показаний которых при обработке результатов испытания

следует брать среднее арифметическое. Тензометры *2* и *4* установлены на расстоянии одной четверти высоты сечения балки от нейтрального слоя, а тензометр *3* — на нейтральном слое балки.

4. Проведение испытания. Первоначально балку следует загрузить некоторой начальной нагрузкой P_1 для того, чтобы устранить неплотности в соприкосновении балки с опорами и нагружающим

Рис. 47. Расположение тензометров на балке. По данным тензометров 1—5 строят эпюры σ; тензометры 6 и 7, установленные у нейтрального слоя балки под углом 45° к нему, показывают одинаковые по величине, но различные по знаку деформации.

приспособлением. Затем берут отсчеты n_1 по всем тензометрам и записывают их в журнал наблюдений, форма которого дана в таблице 26 [1]).

Увеличив нагрузку до некоторого значения P_2, снова берут отсчеты (n_2). Величина нагрузки P_2 должна заведомо находиться в пределах пропорциональности материала. По разности отсчетов определяются приращения $\Delta\sigma$ напряжений, соответствующие приращению нагрузки $\Delta P = P_2 - P_1$.

С целью проверки упругости материала и для контроля отсчетов рекомендуется после проведения испытания, разгрузив балку несколько ниже начальной нагрузки, снова дать начальную нагрузку и сверить отсчеты по тензометрам с первоначальными.

Величина полной нагрузки P_2 зависит от мощности балки и машины.

Полученные в результате опыта значения $\Delta\sigma$ дают возможность построить диаграмму напряжений, которая получается в виде некоторой ломаной линии (рис. 47), близкой к прямой. На этой же диаграмме наносится для сравнения прямая, получаемая теоретически по формуле (19).

5. Определение главных напряжений. Наиболее просто определить главные напряжения у нейтрального слоя балки. В нейтральном слое нормальные напряжения в поперечном сечении балки равны нулю, и стенка балки здесь находится в состоянии чистого сдвига, которое рассмотрено нами при исследовании кручения в работе 11.

Для экспериментального определения главных напряжений у нейтрального слоя балки устанавливают тензометры *6* и *7* (рис. 47)

[1]) Если испытание проводится с электротензометрами, следует пользоваться формой таблицы, приведенной на стр. 157.

Таблица 28

№ тензометра	Отсчеты по тензометрам, мм: n_1 при нагрузке $P_1 = ...$ кГ	n_2 при нагрузке $P_2 = ...$ кГ	Разность отсчетов $\Delta n = n_2 - n_1$, мм	Увеличение тензометра K	База тензометра s, мм	$\beta = \frac{E}{Ks}$ для тензометров; $\beta = \frac{E}{K(1-\mu)s}$ для тензометров	Приращение напряжения $\Delta\sigma = \beta\Delta n$, кГ/мм²	Среднее приращение напряжения для тензометров
1								
1'								
2								
3								
4								
5								
5'								
6								Средние по абсолютной величине
7								

Примечание. Размещение тензометров показано на рис. 47.

в обоих направлениях, образующих углы 45° с нейтральным слоем. Приращения главных напряжений получим по формулам (12):

$$\Delta\sigma_{1,3} = \pm \frac{E}{1+\mu}\frac{\Delta s}{s}, \qquad (22)$$

где

$$\Delta s = \frac{1}{2}\left(\frac{|\Delta n_6|}{K_6} + \frac{|\Delta n_7|}{K_7}\right). \qquad (23)$$

Здесь:

$|\Delta n_6|$ и $|\Delta n_7|$ — абсолютные значения приращений отсчетов по тензометрам 6 и 7;

K_6 и K_7 — увеличения тензометров 6 и 7;

s — база тензометра.

Подставляя выражение Δs в формулу (22), получим

$$\Delta\sigma_{1,3} = \pm\frac{1}{2}(\beta_6|\Delta n_6| + \beta_7|\Delta n_7|),$$

где

$$\beta_6 = \frac{E}{(1+\mu)sK_6} \quad и \quad \beta_7 = \frac{E}{(1+\mu)sK_7}.$$

В журнале (таблица 28) учитывается, что выражение β содержит теперь в знаменателе множитель $1+\mu$.

Полученные из опыта значения $\Delta\sigma_{1,3}$ сравниваются с теоретическими:

$$\Delta\sigma_{1,3} = \pm\frac{\Delta Q S_0}{Jb} \quad [см. формулу (21)].$$

Б. Деформации балки

1. Общие сведения. Учащийся должен измерить прогибы и углы поворота в отдельных сечениях балки при каком-либо из простых случаев прямого изгиба балки и сравнить полученные данные с теоретическими.

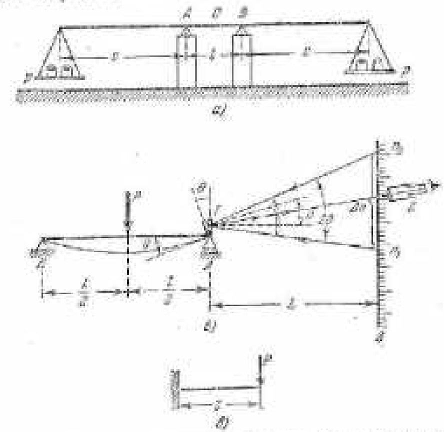


Рис. 48. К определению перемещений при изгибе. Схемы испытываемых балок: а — балка с консолями; б — простая балка с укрепленным на ней зеркалом для измерения угла поворота на опоре; в — консоль.

Приводим теоретические данные для некоторых схем закрепления и нагружения балок.

Схема 1. Балка на двух опорах с консолями — рис. 48, а; эпюры M и Q для этой балки даны на рис. 44, а. Прогиб балки

в точке G — посредине —

$$v_G = -\frac{Pa^2}{8EJ}.$$

Углы поворота в точках A и B над опорами

$$\vartheta_A = -\vartheta_B = -\frac{Pa}{2EJ}.$$

Схема II. Простая балка согласно рис. 48, *б*; эпюры M и Q для этой балки даны на рис. 44, *б*. Балка нагружена силой P, приложенной по середине пролета.

Прогиб под силой

$$v_{max} = \frac{Pa}{48EJ}.$$

Углы поворота на опорах

$$\vartheta_A = -\vartheta_B = \frac{Pa}{16EJ}.$$

Схема III. Консоль нагружена сосредоточенной силой, расположенной на конце (рис. 48, *в*).

Прогиб у свободного конца $v_C = \frac{Pa}{3EJ}$.

Угол поворота здесь же

$$\vartheta_C = \frac{Pa}{2EJ}.$$

2. Проведение опыта. Для измерения перемещений — прогибов и углов поворота — применяются индикаторы и инклинометры (см. стр. 162 и 165).

Запись наблюдений по прогибомерам и угломерам ведут в лабораторном журнале по форме, показанной в таблице 29.

Таблица 29

Прибор		Отсчеты по прибору при нагрузке $P_1 =$	при нагрузке $P_2 =$	Разность отсчетов Δn	Величина перемещений
Прогибомер					$v_{max} =$
Угломеры	№ 1				$\vartheta =$
	№ 2				

Нагружая балку несколькими последовательно увеличивающимися ступенями, можно проверить пропорциональность между перемещениями и нагрузкой.

Искомые перемещения — прогибы v и углы поворота ϑ — определяются как среднее приращения отсчетов Δn, умноженные на цену деления соответствующего прибора. Так, прогиб, измеренный индикатором, будет:

$$v = \Delta n_v \cdot 0{,}01 \text{ в мм},$$

где Δn_v — средняя разность отсчетов по индикатору.

Угол поворота, измеренный при помощи уровенного угломера — инклинометра определится так:

$$\vartheta = \Delta n_\vartheta \cdot 0{,}0001 \text{ в радианах}.$$

Угол поворота по зеркальному инклинометру равен

$$\vartheta = \Delta n_\vartheta \frac{1}{2L}.$$

Сравнивая найденные значения прогибов и углов поворота с теоретическими, нужно иметь в виду, что они соответствуют приращению нагрузки ΔP, и поэтому в теоретические формулы следует вместо P подставлять ΔP.

Работа 13. **Определение положения центра изгиба открытого профиля**

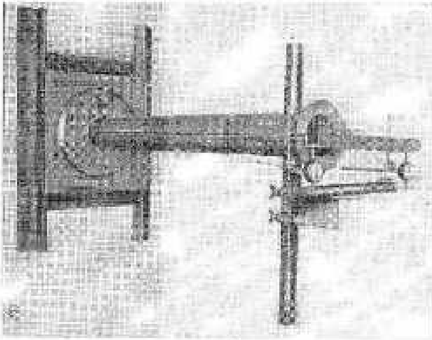
1. Общие сведения. Цель опыта — найти центра изгиба и центр естественного кручения; показать их совпадение.

Центром изгиба бруса в данном сечении называется точка в плоскости сечения, через которую должна проходить поперечная сила (независимо от направления изгиба), чтобы перемещение сечения в своей плоскости было поступательным. При всяком другом положении поперечной силы сечение поворачивается в своей плоскости, т. е. происходит закручивание бруса.

Рис. 49. Профили, затрудняющие для определения центра изгиба.

Опыт проводится на данной консоли[1]) корытного профиля или трубчатого открытого профиля (рис. 49), изготовленного из замкнутой трубы, в которой сделан продольный разрез (рис. 50, *а*). Изучаются перемещения свободного конца консоли; на этом конце имеется фланец, обеспечивающий неизменяемость концевого сечения бруса в своей плоскости. К фланцу по оси симметрии профиля жестко прикреплена рейка *1* (рис. 50, *б*). Груз прикладывается в той или иной точке рейки или перемещается по ней на тележке. Соответствующее перемещение рейки, характеризующее перемещение концевого сечения бруса, измеряется двумя индикаторами (см. стр. 162) *I* и *II*.

[1]) Случай коробчатой балки см. на стр. 281.



а)

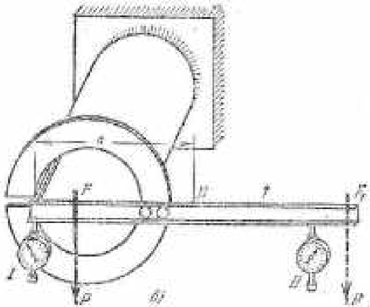


Рис. 50. Размещение аппаратуры для определения центра кручения: а — общий вид испытательной установки; б — схема испытательной установки; 1 — несущая рейка. Установив груз P в центре изгиба D, по индикаторам I и II получаем одинаковые значения прогиба. При всяком другом положении груза рейка поворачивается.

В результате этой работы следует экспериментально установить:

1) положение центра изгиба путем пробных установок груза на рейке;

2) факт закручивания бруса при помещении груза в центре тяжести сечения;

3) совпадение центра поворота концевого сечения бруса при движении груза по рейке с центром изгиба;

4) зависимость угла поворота (угла закручивания бруса) от положения груза.

На опыте выясняется, что при перемещении груза рейка поворачивается вокруг некоторой постоянной точки. Угол поворота рейки, т. е. угол закручивания бруса, оказывается пропорциональным расстоянию от центра поворота, т. е. крутящему моменту.

Одновременно устанавливается, что найденный центр поворота, который можно назвать центром кручения, совпадает с определяемым теоретически центром изгиба.

2. Теоретические данные. Поперечная сила Q в сечении балки реализуется как система касательных усилий. Поэтому центр

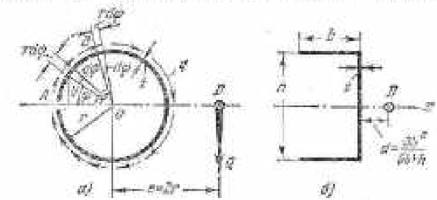


Рис. 51. Положение центра изгиба: а — для круглой трубы, разрезанной по образующей; б — для корытного профиля.

изгиба может определяться как точка, через которую проходит равнодействующая внутренних касательных усилий в сечении.

Погонное касательное усилие при прямом изгибе

$$q = \frac{Q}{J} S, \tag{24}$$

где S — статический момент площади части поперечного сечения, расположенной по одну сторону от точки в сечении, в которой определяется касательное усилие, относительно нейтральной оси сечения.

При вычислении, например, значения q в точке B контура трубчатого открытого профиля (рис. 51, а) под S следует принимать статический момент части AB сечения:

$$S = \int_0^{\psi} y\delta r\, d\psi,$$

где произведение $rd\varphi$ выражает элементарную площадь в сечении, а φ — центральный угол, соответствующий дуге AB.

Учитывая, что $y = r\sin\varphi$, получаем:

$$S = tr^2\int_0^{\pi}\sin\varphi\,d\varphi = tr^2(1-\cos\varphi).$$

Центр изгиба профиля определим, если выразим момент сил q относительно любой точки, например центра тяжести O, и приравняем его моменту их равнодействующей Q, т. е.

$$\int_0^{2\pi} rqr\,d\varphi = eQ; \qquad (25)$$

через e обозначено искомое расстояние от центра тяжести сечения до центра изгиба. Подставляя сюда значение q по формуле (24)

Рис. 53. Различные положения груза относительно центра изгиба: *а* и *б* — груз расположен не в центре изгиба, вызывает закручивание бруса; *в* — груз в центре изгиба не вызывает закручивания бруса; *к* — центр изгиба.

с учетом выражения для S, и имея в виду, что момент инерции сечения $J = \pi r^3 t$, найдем:

$$e = 2r, \qquad (26)$$

т. е. в трубчатом профиле постоянной толщины с разрезом (рис. 51, *а*) центр изгиба D находится на расстоянии, равном диаметру от центра сечения по оси симметрии.

В коробчатом профиле постоянной толщины t (рис. 51, *б*) центр изгиба отстоит от средней линии стенки на расстоянии

$$d = \frac{3b^2t}{4J_x} = \frac{3b^2}{6h+b}, \qquad (27)$$

где b — ширина полки, а h — высота профиля.

Отметим, что формулы (26) и (27) справедливы для достаточно длинных балок. В случае короткой балки центр изгиба смещается к центру сдвига (см. стр. 281).

3. Проведение опыта и обработка результатов. В зависимости от положения силы P торец консоли получает различные перемещения (рис. 52). Для того чтобы измерять эти перемещения, прежде

всего следует взять отсчеты по обоим индикаторам при отсутствии нагрузки. Удобно, чтобы эти отсчеты были одинаковыми, например по 500, что достигается соответствующей установкой индикаторов. Прикладывая затем груз в центре тяжести сечения, заметим, что отсчеты по индикаторам *I* и *II* изменяются неодинаково, т. е. рейка (и, следовательно, концевое сечение консоли) поворачивается.

Теперь приложим груз P в центре изгиба D, найденном теоретически; отсчеты по индикаторам окажутся приблизительно равными. При этом перемещения всех точек сечения одинаковы и равны теоретическому прогибу консоли под действием сосредоточенной силы на конце, т. е. $v = Pl^3/3EJ$. Таким образом, сила P, приложенная в центре изгиба, только изгибает брус, не вызывая его закручивания.

Обратимся к определению положения центра поворота концевого сечения консоли при перемещении груза P по рейке.

Приложим груз в некоторой точке F (рис. 50, *б*) и прочтем на индикаторах соответствующие отсчеты — пусть n_1 и n_2. Отметим эти отсчеты в увеличенном масштабе на равномерных шкалах *I* и *II* (точки *a* и *b* на рис. 53); возвратим отсчеты на шкалах идет сверху вниз. Расстояние между шкалами в уменьшенном масштабе изображает расстояние между индикаторами.

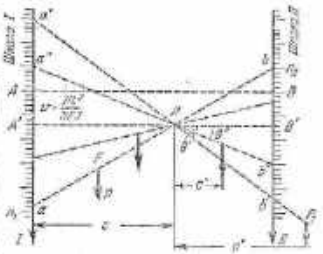


Рис. 53. Графическое определение центра кручения. Повороты жесткого положения рейки (*ab*, *a'b'* и т. д.), указывающие, что центр поворота рейки совпадает с центром изгиба профиля.

Соединяя точки *a* и *b*, получаем прямую, наглядно отображающую поворот рейки (т. е. оси симметрии профиля) при данном положении груза. Перемещая груз P в другую точку, например F_1, и отложив новые отсчеты по индикаторам на шкалах, зафиксируем на чертеже новое положение *a'b'* рейки. Прямые *ab* и *a'b'* пересекаются в точке D; измеряем расстояние c (рис. 53) в масштабе чертежа и сравниваем его с расстоянием (рис. 50) от индикатора *I* до центра изгиба D, найденным теоретически. Устанавливаем совпадение этих величин.

Произведя несколько перестановок груза P и проверив соответствующие положения рейки (на рис. 53 показаны пунктиром), убеждаемся в том, что все положения рейки пересекаются в точке D. Это означает, что торцовое сечение консоли при перемещении груза P поворачивается вокруг точки D.

Пунктирные линии AB и $A'B'$ на рис. 53 показывают соответственно начальное положение рейки и ее положение после нагружения балки силой, приложенной в центре изгиба.

Построив диаграмму поворотов рейки (рис. 53), заметим пропорциональность между углом поворота рейки, т. е. углом закручивания бруса и расстоянием груза от центра изгиба D (пропорциональным крутящему моменту). Угол закручивания мал, поэтому его можно считать пропорциональным приращению отсчета по шкале I или II, отсчитываемому от линии $A'B'$, соответствующей прогибу от изгиба. Отношение отрезков, например $B'b''$ и $B'b'$, на шкале II (рис. 53) равно отношению соответствующих значений угла закручивания θ'' и θ'. Измеряя отрезки $B'b''$ и $B'b'$ и соответствующие плечи c'' и c' силы P, замечаем, что $B'b''/B'b' = c''/c'$. Следовательно, $\theta''/\theta' = c''/c'$.

Форма записи при опыте для $r = 6$ *см* и рейки длиной 48 *см* дана в таблице 30. По данным таблицы 30 строят диаграмму поворотов рейки — рис. 53.

Таблица 30

Отсчеты	Положение груза (отсчет по рейке в *см*)				Вид груза	
	0	5	10	15	До опыта	После опыта
по индикатору I						
по индикатору II						

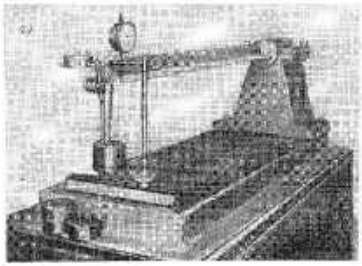
Работа 16. Косой изгиб

1. Общие сведения. Цель работы — ознакомление с косым изгибом консольного бруса и сравнение опытных значений прогиба и напряжений с теоретическими.

При косом изгибе бруса, когда плоскость действия внешних сил не совпадает ни с одной из двух главных плоскостей бруса, направление прогиба не совпадает с плоскостью действия внешних сил.

Брус, на котором проводится опыт, представляет собой защемленный одним концом равнобокий уголок (рис. 54, *а* и *б*). Заделка консоли может быть осуществлена посредством двух цилиндров, из которых внешний укреплен неподвижно, а другой плотно охватывает конец бруса. Поворачивая внутренний цилиндр, можно установить консоль в любое положение относительно направления изгибающей нагрузки.

На рис. 54 показан случай нагружения консоли вертикальной силой P, когда направление ее действия образует с главными плоскостями бруса угол $\alpha_0 = 45°$. Составляющие P_x и P_y (рис. 54, *в*)



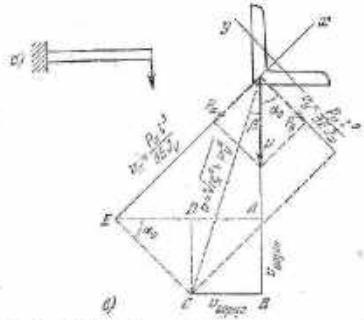


Рис. 54. Косой изгиб равнобокого уголка вертикальной силой: *а* — общий вид нагрузочной установки; *б* — вид сбоку; *в* — вид с торца и схема перемещения. Вертикальная сила P вызывает косой прогиб v.

силы P по главным осям инерции x и y сечения одинаковы и равны $P/\sqrt{2}$. Но моменты инерции J_x и J_y не равны друг другу. Составляющие прогиба по осям x и y на конце консоли равны $v_x = P_x l^3/3EJ_y$, $v_y = P_y l^3/3EJ_x$.

Отсюда вертикальная и горизонтальная составляющие прогиба

$$\left.\begin{aligned} v_{верт} &= OA + AB = v_x\cos\alpha_0 + v_y\sin\alpha_0 = \frac{Pa}{6E}\left(\frac{1}{J_x}+\frac{1}{J_y}\right)\cdot \\ v_{гориз} &= AE - ED = v_x\sin\alpha_0 - v_y\cos\alpha_0 = \frac{Pa}{6E}\left(\frac{1}{J_x}-\frac{1}{J_y}\right)\cdot \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

Тангенс угла β, определяющего направление прогиба, равен отношению $v_{гориз}/v_{верт}$. Следовательно,

$$\beta = \operatorname{arctg}\frac{v_{гориз}}{v_{верт}}. \quad (29)$$

Из опыта можно непосредственным измерением получить значения $v_{верт}$ и $v_{гориз}$ и отсюда величину угла β. Эти величины следует сравнить с их теоретическими значениями.

При испытании на косой изгиб бруса уголкового сечения нужно иметь в виду, что центр изгиба такого бруса не совпадает с центром тяжести сечения. Поэтому, для того чтобы исключить влияние закручивания, следует нагрузку прикладывать к центру изгиба или перемещения $v_{верт}$ и $v_{гориз}$ измерять для центра изгиба, который в рассматриваемом случае находится в точке пересечения осей полок уголка.

2. Определение перемещений. Для измерения горизонтальной и вертикальной составляющих прогиба применяются приборы,

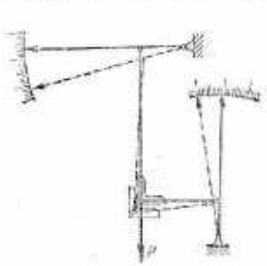


Рис. 55. Схема стрелочного катетометра

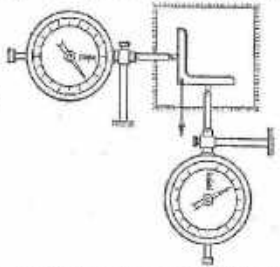


Рис. 56. Катетометр, составленный из индикаторов

называемые катетометрами. На рис. 55 показан рычажной или стрелочный катетометр. Увеличение прибора может изменяться в зависимости от способа установки стрелок. Существуют катетометры и других типов.

Иногда при малых значениях перемещений катетометром могут служить два индикатора, установленных в вертикальном и горизонтальном направлениях, как показано на рис. 56. В случае балки малой жесткости сила пажатия пружины индикатора может искажать величину прогиба.

Нагружая консоль последовательно одинаковыми грузами и фиксируя получаемые прогибы, можно проследить линейную зависимость между прогибом и нагрузкой.

Запись наблюдений при испытании на косой изгиб ведут в форме, указанной в таблице 31.

Таблица 31

Нагрузка P	Вертикальное перемещение		Горизонтальное перемещение	
	Отсчет $a_{верт}$	Приращение отсчета $\Delta a_{верт}$	Отсчет $a_{гориз}$	Приращение отсчета $\Delta a_{гориз}$

Умножая средние приращения отсчетов $\Delta a^{ср}_{верт}$ и $\Delta a^{ср}_{гориз}$ на цены делений $c_{верт}$ и $c_{гориз}$ катетометра по вертикали и по горизонтали, получим приращения прогибов $\Delta v_{верт} = \Delta a^{ср}_{верт}\, c_{верт}$ и $\Delta v_{гориз} = \Delta a^{ср}_{гориз}\, c_{гориз}$ в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответствующие приращению нагрузки ΔP. Определяя эти же величины теоретически по формулам (28), следует вместо P подставить ΔP.

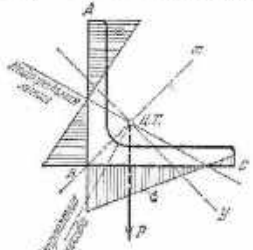


Рис. 57. Эпюра нормальных напряжений в по краю ABC сечения уголка (полка вертикальна). Нейтральная линия перпендикулярна к направлению прогиба; с. т. — центр тяжести сечения.

Угол β между направлениями прогиба и силы P по измеренным значениям $\Delta v_{гориз}$ и $\Delta v_{верт}$ вычисляется по формуле (29).

3. Определение напряжений. Нейтральная линия в сечении балки перпендикулярна к направлению прогиба и проходит через центр тяжести сечения. Проведем нейтральную линию (рис. 57). Теперь можно построить эпюру нормальных напряжений σ по краю ABC сечения. Масштаб этой эпюры пока остается неопределенным.

Теоретически нормальные напряжения при косом изгибе

$$\sigma = -\frac{M_x}{J_x}y - \frac{M_y}{J_y}x, \quad (30)$$

где M_x и M_y — изгибающие моменты в плоскостях y и x.

В нашем случае M_x и M_y одинаковы и равны $Pz/\sqrt{2}$, где z — расстояние до рассматриваемого сечения.

Для точки B $y = 0$ и, следовательно, из формулы (30) имеем:

$$\sigma_B = \frac{M_x}{J_y} x_B = \frac{Pz}{\sqrt{2}\, J_x} x_B.$$

Определив σ_B, устанавливаем этим самым масштаб эпюры σ и, следовательно, можем определить любое значение σ из эпюры, например, в точках A и C. Помещая тензометры в точках A, B и C, можем найти те же напряжения экспериментально. Запись результатов эксперимента ведем по форме, приведенной в таблице 32.

Таблица 32

Тензометр			Отсчеты по тензометрам		Приращения отсчетов $\Delta n = n_1 - n_2$	Вычисляемые Δ	$\Delta = \frac{E}{K\nu}$	Приращения напряжения $\Delta\sigma = \Delta\varphi$
Место расположения	Фабричный номер	Увеличение K	n_1 (при нагрузке P_1)	n_2 (при нагрузке P_2)				
A								
B								
C								

Полученные напряжения сравниваем с вычисленными по теоретической формуле (30).

Работа 17. Распределение нормальных напряжений в сечении кривого бруса при изгибе

1. Общие сведения. Работа имеет целью экспериментально с помощью электродатчиков сопротивления установить закон распределения нормальных напряжений в сечении кривого бруса при изгибе. Для испытания используется кривой брус кругового очертания с прямоугольным поперечным сечением.

При сжатии кривого бруса силой P, приложенной вдоль вертикальной оси, проходящей через центр кривизны (рис. 58), в его опасном сечении 1—5 возникают продольная сила $N = P$ и изгибающий момент $M = PR$. Нормальные напряжения в сечении кривого бруса изменяются по гиперболическому закону[1]

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{S}\frac{y}{\rho}. \qquad (31)$$

[1] Можно пользоваться также формулой другого вида.

Здесь

$F = bh$ — площадь поперечного сечения;

$S = F(R - r)$ — статический момент площади сечения относительно нейтральной оси;

y — расстояние от нейтральной оси до рассматриваемого волокна;

$\rho = r + y$ — радиус рассматриваемого волокна (расстояние от центра кривизны бруса);

$r = \frac{h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ — радиус нейтрального слоя при чистом изгибе;

$R = \frac{R_1 + R_2}{2}$ — радиус центральной оси бруса;

R_1 и R_2 — внутренний и наружный радиусы бруса (рис. 58).

2. Проведение испытания и обработка результатов. До опыта для выяснения закона распределения нормальных напряжений кривого бруса в пяти точках боковой поверхности его опасного сечения предварительно наклеивают электрические датчики сопротивления (работа 28) и закрепляют брус в испытательной машине, работающей на сжатие. Электродатчики подключают к специальному прибору для замера деформаций с ценой деления его шкалы, равной k.

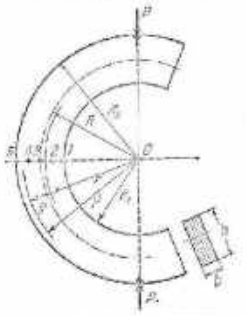


Рис. 58. Сжатие кривого бруса.

Подготовленный таким образом кривой брус нагружают последовательно возрастающими силами $P_1, P_2, \ldots, P_i$ с равной величиной приращения нагрузки. $\Delta P = P_{i+1} - P_i$.

Внутренние волокна бруса сжимаются, а наружные — растягиваются. Вместе с волокнами изменяется длина проволоки электродатчиков и их электросопротивление, что и фиксируется прибором, стрелка которого отклоняется пропорционально деформации волокон. По шкале прибора производят отсчеты показаний при последовательных ступенях нагружения для всех пяти исследуемых точек сечения. Затем для этих точек определяют разности между каждыми двумя последовательными отсчетами, т. е.

$$\Delta n_{i,i+1} = n_{i+1} - n_i,$$

и вычисляют средние разности Δn из всех измерений. Умножая средние разности на цену деления k и модуль упругости E, находят

отдельно для каждой точки сечения среднее приращение напряжения [1])

$$\Delta\sigma = E k \Delta n,$$

соответствующее приращению нагрузки ΔP.

По найденным величинам строят эпюру распределения нормальных напряжений в сечении кривого бруса и сравнивают ее с эпюрой, полученной на основании теоретического расчета.

Результаты испытания записывают в лабораторный журнал по форме, указанной в таблице 33. Можно применить также графический метод обработки результатов испытания с учетом замечания, указанного в сноске на стр. 23.

Таблица 33

№ точек	Нагрузка, кГ				Разность отсчетов			Средняя разность отсчетов, Δn	$\beta = 0$	Среднее приращение напряжения $\Delta\sigma = k\Delta n$
	$P_1 =$	$P_2 =$	$P_3 =$	$P_4 =$						
	отсчеты									
	n_0	n_1	n_2	n_3	Δn_{1-2}	Δn_{2-3}	Δn_{3-4}			
1										
2										
3										
4										
5										

Работа 18. Определение главных напряжений при изгибе и кручении трубы

1. Общие сведения. Цель работы — проверка опытным путем с помощью электротензометров величины и направления главных нормальных напряжений в поверхностном слое тонкостенной трубы при ее одновременном изгибе и кручении.

Опыт проводится на специальной настольной установке (см. стр. 272). Дуралюминиевую тонкостенную трубу, защемленную одним концом (рис. 59), нагружают на свободном конце двумя грузами P_1 и P_2 разной величины. Грузы приложены на расстояниях a_1 и a_2 от оси трубы и создают изгибающие и крутящие моменты в поперечных сечениях. При этом в поверхностном слое трубы возникает плоское напряженное состояние, потому что внешняя поверхность трубы свободна от напряжений и одно из главных напряжений (перпендикулярное к внешней поверхности) равно нулю. Соотношение между главными напряжениями зависит от отношения величин изгибающего и крутящего моментов.

В поперечном сечении трубы на расстоянии a_3 от ее конца выбирают точку m, наиболее удаленную от нейтрального слоя. В этой точке в поперечных сечениях трубы возникают нормальные напряжения изгиба и касательные напряжения кручения (рис. 60). Касательные напряжения изгиба здесь равны нулю. В продольных сечениях согласно закону парности возникают такие же касательные напряжения, как и в поперечных сечениях. Нормальные напряжения в продольных сечениях равны нулю.

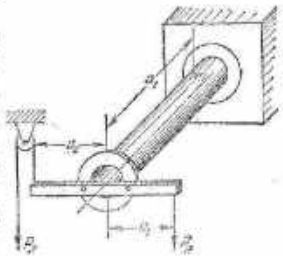


Рис. 59. Установка тонкостенной трубы на изгиб и кручение.

Направление главных напряжений поверхностного слоя заранее не известно и зависит от соотношения между изгибающим и крутящим моментами. Для того чтобы из опыта определить значения двух главных напряжений и их направление, достаточно, как далее показано, измерить удлинения поверхностного слоя по трем произвольно выбранным направлениям. Измерения удобно производить при помощи электротензометров (см. работу 30). На поверхности трубы в точке m наклеивают так называемую розетку из трех проволочных датчиков сопротивления (рис. 61). Оси двух датчиков — x и y — выбраны взаимно перпендикулярными, а ось третьего — u — наклонена на 45° к двум первым. Эти оси называются осями розетки. Ориентировка розеткой на трубе определяется углом β между осью x и образующей mn, параллельной оси трубы.

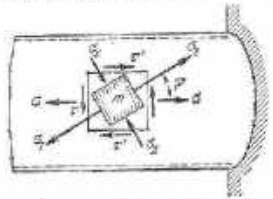


Рис. 60. Напряженное состояние в произвольной точке на поверхности трубы.

2. Определение главных напряжений из опыта. Покажем, что удлинения, измеренные в направлении осей розетки, можно выразить через удлинения по главным направлениям. Например, в на-

[1]) Напряженное состояние, как и при выводе формулы (31), приближенно считаем линейным.

правлении оси x по закону Гука для плоского напряженного состояния удлинение равно

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y).$$

Подставляя сюда значения σ_x и σ_y, выраженные через главные напряжения σ_1 и σ_2, и угол α, измеренный от направления σ_1 до оси x, имеем:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cos 2\alpha - \mu\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2} + \mu\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cos 2\alpha\right)$$

или

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\frac{\sigma_1-\mu\sigma_2+\sigma_2-\mu\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1-\mu\sigma_2-\sigma_2+\mu\sigma_1}{2}\cos 2\alpha\right).$$

Отсюда, приняв во внимание, что

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{E}(\sigma_1-\mu\sigma_2) &= \varepsilon_1 \\ \text{и} \quad \frac{1}{E}(\sigma_2-\mu\sigma_1) &= \varepsilon_2, \end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

получим выражение для ε_x [см. формулу (33)].

Для того чтобы составить аналитические формулы для ε_y и ε_u, нужно в выражение для ε_x вместо α подставить соответственно углы $\alpha + 90°$ и $\alpha + 45°$, измеренные от σ_1 до осей y и u, и учесть, что $\cos 2(\alpha + 90°) = -\cos 2\alpha$ и $\cos 2(\alpha + 45°) = -\sin 2\alpha$. Таким образом, удлинения по осям розетки можно представить в виде

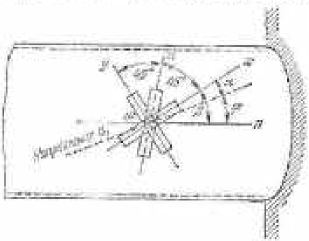


Рис. 61. Розетка из трех проволочных датчиков сопротивления.

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{2}\cos 2\alpha; \qquad (33)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{2}\cos 2\alpha; \qquad (34)$$

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{2}\sin 2\alpha. \qquad (35)$$

Решение уравнений (33) — (35) относительно главных удлинений ε_1, ε_2 и угла α выполняем в следующем порядке.

Складываем почленно уравнения (33) и (34). Полученное равенство

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_y \qquad (36)$$

используем для преобразования уравнения (35), а затем вычитаем почленно уравнение (34) из уравнения (33). В результате преобразований имеем:

$$\left.\begin{aligned} (\varepsilon_1-\varepsilon_2)\sin 2\alpha &= \varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u; \\ (\varepsilon_1-\varepsilon_2)\cos 2\alpha &= \varepsilon_x - \varepsilon_y. \end{aligned}\right\} \qquad (37)$$

Для того чтобы исключить угол α, оба уравнения (37) возводим в квадрат, складываем их и извлекаем корни из обеих частей полученного равенства. Тогда

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \sqrt{(\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2};$$

учитывая зависимость (36) и раскрывая скобки под корнем последнего равенства, выражаем удлинения по главным направлениям в зависимости от удлинений, измеренных по осям розетки:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_u)^2 + (\varepsilon_u-\varepsilon_y)^2}. \qquad (38)$$

Главные напряжения, обусловленные данными опыта, вычисляем по формулам, которые получаются из соотношений (32) в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \text{и} \quad \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1). \end{aligned}\right\} \qquad (39)$$

Направление главных площадок определяется углом α, для которого из уравнений (37) находим:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u}{\varepsilon_x - \varepsilon_y},$$

или

$$\alpha = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}. \qquad (40)$$

Угол между нормалями к поперечному сечению и к главной площадке с напряжением σ_1 равен (рис. 61)

$$\varphi = \beta - \alpha.$$

3. **Теоретический расчет главных напряжений.** Найденные из опыта величины главных напряжений и угла наклона главных площадок нужно сравнить с результатами теоретического расчета.

При нагружении трубы (рис. 59) в исследуемом сечении возникают моменты:

$$\text{крутящий } M_к = P_1 a_1 + P_2 a_2$$

и

$$\text{изгибающий } M_и = (P_1 - P_2)\, a_2.$$

Соответствующие им напряжения в точке m равны

$$\tau = \frac{M_к}{W_p} \quad \text{и} \quad \sigma = \frac{M_{оп}}{W}.$$

Здесь $W_p = \frac{\pi D^3}{16}\left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)$ — полярный момент сопротивления сечения трубы;

$W = \frac{1}{2} W_p$ — осевой момент сопротивления;

D и d — наружный и внутренний диаметры трубы.

В продольных сечениях возникают только касательные напряжения $\tau' = -\tau$ (рис. 38). Для данного плоского напряженного состояния главные напряжения вычисляют по формулам:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}, \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (41)$$

Положение главных площадок определяется углом φ между направлением σ_1 и образующей трубы; этот угол вычисляют по формуле

$$\operatorname{tg} 2\varphi = -\frac{2\tau}{\sigma}.$$

Положительное направление угла φ отсчитывается от направления σ_1 против хода часовой стрелки.

4. Проведение испытания. До испытания устанавливают упругие характеристики материала трубы, проверяют ее размеры, плечи грузов, работу электротензометров и зеркального гальванометра (см. § 33). Следует обратить внимание на высокую чувствительность электродатчиков, которые реагируют даже на незначительное изменение температуры окружающих предметов. Поэтому испытание нужно проводить при постоянной температуре.

Первые отсчеты n_{x1}, n_{a1} и n_{y1} при поочередном включении в цепь трех датчиков розетки производятся по шкале гальванометра без нагружения трубы, т. е. при $P_п = 0$ и $P_л = 0$. Отсчеты по правой от нуля шкале (красной) соответствуют удлинению и берутся с плюсом, по левой (черной) — соответствуют укорочению и берутся с минусом.

Далее, к трубе подвешивают грузы $P_п$ и $P_л$, причем $P_п \geqslant P_л$, и производят отсчеты n_2 снова при поочередном включении всех датчиков. Так же производят отсчеты n_3 при грузах $2P_п$ и $2P_л$. Затем определяют приращения отсчетов $\Delta n = n_{i+1} - n_i$ и вычисляют среднее значение $\Delta n_{ср}$ из этих приращений, соответствующее приращениям грузов $\Delta P = P_{i+1} - P_i$. Зная цену деления с шкалы

гальванометра, которая устанавливается заранее при тарировке прибора, легко получить средние приращения удлинений $\Delta\varepsilon$ по направлению каждого датчика розетки, наклеенной в точке m, по формуле

$$\Delta\varepsilon = \Delta n_{ср} c_г.$$

Результаты опыта записывают по форме, приведенной в таблице 34.

Таблица 34

Нагрузка, кГ	$P_п =$				$\Delta P_1 =$	$\Delta\varepsilon = \Delta n_{ср} c$
	$P_л =$				$\Delta P_2 =$	
Отсчеты по электродатчикам	по оси x	n_x			$\Delta n_{x,\,ср} =$	
		Δn_x				
	по оси a	n_a			$\Delta n_{a,\,ср} =$	
		Δn_a				
	по оси y	n_y			$\Delta n_{y,\,ср} =$	
		Δn_y				

Найденные по заданным направлениям розетки x, a и y величины удлинений $\Delta\varepsilon$ подставляют в формулы (38) и (39), по которым вычисляют приращения главных удлинений $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$ и угол α наклона главной площадки. После этого по формулам (39) вычисляют приращения главных напряжений $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_2$, вызванные приращением нагрузки ΔP. Затем значения $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_2$ сравнивают с результатами теоретического расчета.

Работа 19. **Стесненное кручение**

1. Общие сведения. Цель работы — ознакомление со стесненным кручением тонкостенных стержней открытого профиля. При этом следует определить экспериментально: 1) напряжения в плоскости заделки тонкостенной консоли, нагруженной закручивающим моментом на конце и 2) угол закручивания. Полученные величины сравнить с их теоретическими значениями.

2. Испытательная установка. Опыт может быть выполнен на той же установке, которая применяется для экспериментального определения центра изгиба (см. работу 15). Однако в данном случае весьма важна жесткость заделки, поэтому консоль должна быть приварена к жесткой больванке.

На рис. 62 показано крепление в заделке круглой трубы с продольным разрезом к жесткому основанию в виде сплошной балванки или толстостенной трубы. Жесткое основание затем может крепиться к стене или стойке любым способом, обеспечивающим восприятие крутящего момента.

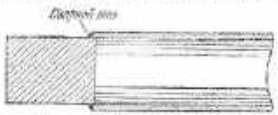


Рис. 62. Крепление тонкостенной трубы в заделке.

Для испытания на стесненное кручение удобна симметричная установка, показанная на рис. 63. Торцы стержня неподвижно закреплены в своих плоскостях, но депланация торцов не стеснена. Нагружение стержня закручивающим моментом осуществляется с помощью фасонки, расположенной в плоскости симметрии установки. Фасонка прикреплена к стержню заклепками. Загружение производится одним грузом с помощью коромысел, как показано на рис. 63.

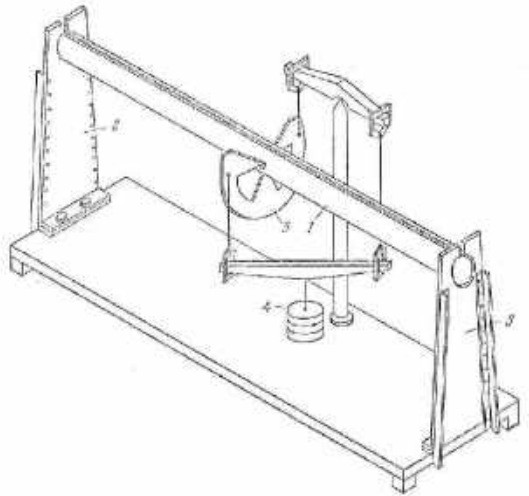


Рис. 63. Испытание тонкостенного профиля на стесненное кручение: 1 — испытуемый профиль; 2 и 3 — опоры; 4 — грузы, висящие через систему рычагов нагружения образца; 1 — фасонка, передающая нагружающий момент на образец (пунктиром показано положение для размещения тензометров).

Расчетная длина стержня должна в несколько раз превышать высоту его сечения. В случае короткого стержня приводимые далее формулы, основанные на теории депланации, недостаточны и должны быть дополнены параметрами, учитывающими деформации сдвига.

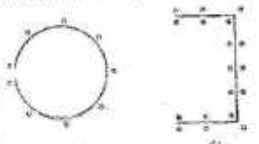


Рис. 64. Размещение тензометров в сечении, испытываемом на стесненное кручение.

3. Измерительная аппаратура. Измерение крутящего момента не представляет затруднений, так как момент создается непосредственным загружением.

Напряжения определяют путем измерения удлинений тензометрами любой системы. Удобны для замера удлинений датчики сопротивления. В случае симметричной испытательной установки тензометры должны быть помещены в плоскости ее симметрии. В случае консольной испытательной установки тензометры располагают вблизи заделки. Размещение тензометров в поперечном сечении стержня показано на рис. 64. Все тензометры направлены вдоль стержня. Форма лабораторного журнала приведена в таблице 35.

Для измерения угла закручивания применяют торсиометры, описанные в работе о кручении круглых брусьев (работа 11).

Таблица 35

База тензометра s = Модуль упругости E =

№ точек замера	Увеличение тензометра K	Отсчеты по тензометру при $M_к$ =		Разность отсчетов по тензометру	Напряжение $\Delta\sigma = \Delta n \frac{E}{K}$
		n_1	n_2	$\Delta n = n_2 - n_1$	

4. Теоретические формулы. Экспериментальные значения напряжений и угла закручивания следует сравнить с теоретическими. Для стержня значительной длины справедливы следующие формулы теории депланации [1]).

Нормальное напряжение в поперечном сечении стержня

$$\sigma = \frac{B}{J_\omega}\omega, \qquad (42)$$

[1]) См. В. З. Власов, Тонкостенные упругие стержни, Стройиздат, 1959.

Угол закручивания консоли, нагруженной моментом L на конце,

$$\psi = \frac{Ll^2}{3EJ_\omega}. \qquad (43)$$

В этих формулах:

B — так называемый бимомент, равный в рассматриваемом случае Ll;

J_ω — секториальный момент инерции поперечного сечения стержня может быть определен в зависимости от формы сечения,

$$J_\omega = \int_F \omega^2 \, dF;$$

ω — удвоенная секториальная площадь контура, ометаемая радиусом-вектором, исходящим из центра изгиба профиля; величина ω отсчитывается от оси симметрии.

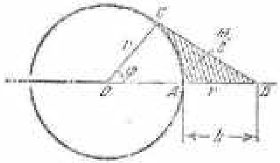


Рис. 65. Напряжения σ в стесненном кручении пропорциональны площади (заштрихованной) между осью симметрии профиля и подвижным радиусом-вектором, исходящим из центра изгиба D.

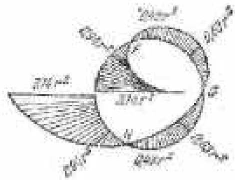


Рис. 66. Эпюра удвоенных секториальных площадей ω, пропорциональных напряжениям σ стесненного кручения.

Для круглого сечения с разрезом (рис. 54, а) было найдено положение центра изгиба (работа 15). Текущее значение ω (на рис. 65 заштрихована площадь, равная $\omega/2$) может быть выражено так:

$$\omega = \left(\frac{1}{2} \cdot 2r \cdot r \sin\varphi - \frac{r^2\varphi}{2}\right) 2.$$

Здесь первый член в скобках — площадь треугольника ODC, второй — площадь сектора OAC.

Упрощая, получим:

$$\omega = r^2 (2\sin\varphi - \varphi). \qquad (44)$$

Далее найдем:

$$J_\omega = \int_F \omega^2 \, dF = 2 \int_0^\pi [r^2 (2\sin\varphi - \varphi)]^2 tr\, d\varphi = 2\pi \left(\frac{\pi^2}{3} - 2\right) tr^5 = 8{,}1 tr^5.$$

Эпюра ω, построенная по уравнению (44), показана на рис. 66. Такой же вид имеет и эпюра напряжений σ, так как напряжение пропорционально секториальной площади ω [см. формулу (42)].

Наибольшее напряжение

$$\sigma_{max} = \frac{B}{J_\omega} \omega_{max} = \frac{Ll}{8{,}10 tr^5} 3{,}14 r^2 = 0{,}386 \frac{Ll}{tr^3}.$$

При $l = 30$ см, $t = 1$ мм, $r = 2{,}3$ см, $L = 50$ кГсм найдем $\sigma_{max} = 620$ кГ/см² и из формулы (43) при $E = 2 \cdot 10^6$ кГ/см² имеем $\psi = 0{,}0132 = 0{,}76°$.

Для швеллера (рис. 67, а)

$$J_\omega = \frac{h^2 b^2}{12} \left[h t_b + 2 d t_b + \frac{2(b-d)^3}{b^2} t_h \right],$$

где $d = \frac{b^2 h^2 t_b}{4 J_x}$ — расстояние центра изгиба от стенки швеллера, причем $J_x = \frac{h^2}{12}(t_h h + 6 b t_b)$ — момент инерции сечения швеллера относительно оси симметрии.

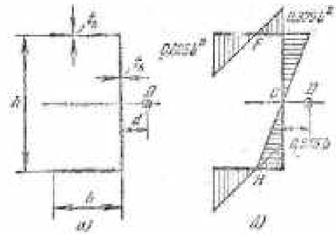


Рис. 67. К стесненному кручению швеллерного профиля: а — форма профиля; б — эпюра удвоенных секториальных площадей ω.

Пусть $t_b = t_h = t = 0{,}05b = 0{,}025\,h$, тогда $d = 0{,}375b$, $J_\omega = 0{,}0146\,b^6$.

Эпюра ω для швеллера имеет вид, показанный на рис. 67, б. Такой же вид имеет эпюра нормальных напряжений стесненного кручения. Наибольшие напряжения имеют место в свободных краях швеллера. При $L = 150$ кГсм, $l = 50$ см, $b = 5$ см и $E = 2 \cdot 10^6$ кГ/см² получим:

$$\sigma_{max} = \frac{B}{J_\omega} \omega_{max} = \frac{150 \cdot 50}{0{,}0146 \cdot 5^6} 0{,}625 \cdot 5^2 = 485 \text{ кГ/см}^2, \; \varphi = 0{,}0137 = 0{,}78°.$$

Нулевые точки на эпюрах ω (рис. 66 и 67, б) являются подходящими точками для крепления фасонок, так как заклепочные отверстия в этих местах не ослабляют сечения стержня при стесненном кручении.

Работа 29. **Действие ударной нагрузки на балку**

1. Общие сведения и теоретические данные. Цель опыта состоит в исследовании действия изгибающего удара. Требуется определить динамический коэффициент при ударе, частоту собственных колебаний балки, логарифмический декремент затухания и сравнить данные опыта с результатами теоретического расчета.

При ударе груза P, падающего на балку с высоты h, наибольший динамический прогиб v_k с учетом массы балки определяется по формуле

$$v_k = v_c \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{v_c \left(1 + k_1 \frac{Q}{P}\right)}}\right).$$

Динамический коэффициент равен

$$\varkappa = \frac{v_k}{v_c} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{v_c \left(1 + k_1 \frac{Q}{P}\right)}} \qquad (45)$$

или

$$\varkappa = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{v_c'}}.$$

Здесь v_c' — статический прогиб от груза и приведенного веса балки, равный

$$v_c' = v_c \left(1 + k_1 \frac{Q}{P}\right) = (P + k_1 Q)\,\alpha; \qquad (46)$$

k_1 — коэффициент приведения массы (для простой балки с грузом посредине пролета $k_1 = 17/35$);

Q — вес балки;

$\alpha = \frac{v_c}{P}$ — статический прогиб от груза $P = 1$ кг.

После удара начинаются свободные (собственные) колебания балки и груза, основную секундную частоту которых можно приближенно определить по формуле

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{v_c'}}.$$

Собственные колебания действительных упругих систем очень быстро затухают. Скорость затухания колебаний зависит от сил сопротивления системы и при сопротивлении, пропорциональном скорости движения, характеризуется логарифмическим декрементом затухания d или коэффициентом затухания α. Логарифмический декремент затухания за один период можно найти, измерив полученные из опыта величины двух последовательных амплитуд

$$d = \ln \frac{v_n}{v_{n+1}} = -\alpha T.$$

Определение d будет более точным, если измерить амплитуды через m периодов колебаний; тогда

$$\ln \frac{v_n}{v_k} = -\alpha m T = md$$

или

$$d = \frac{1}{m} \ln \frac{v_n}{v_k}.$$

Коэффициент затухания (сопротивления) будет

$$\alpha = -\frac{d}{T}.$$

С учетом затухания круговая частота собственных колебаний равна

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2} = \sqrt{\frac{g}{v_c'} - \alpha^2},$$

а секундная частота

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{v_c'} - \alpha^2}. \qquad (47)$$

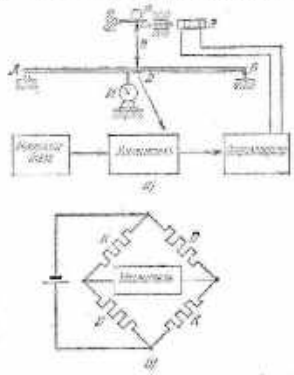


Рис. 68. Действие ударной нагрузки на балку: *а* — схема балки, *б* — измерительный мост

2. Проведение опыта. Исследование удара в данной работе производится на стальной балке AB (рис. 68, *а*). К нижней поверхности балки, посредине ее пролета, приклеены два электродатчика сопротивления D, включенные в измерительный мост (рис. 68, *б*). Компенсационные датчики наклеены на дуралюминиевую консоль, при помощи которой производится балансировка моста. Сигналы от измерительного моста через усилитель, питаемый от выпрямителя тока (рис. 68, *в*), подаются на один из вибраторов осциллографа.

До опыта для определения масштаба производится статическая тарировка осциллограммы следующим образом.

Включают осциллограф (внутренняя крышка осциллографа МПО-2 изображена на рис. 69); канал лампы осциллографа доводят до 5 *в*, наблюдаемых по вольтметру V. К одному из вибраторов, например к вибратору № 8, подсоединяют измерительный мост, включаемый в сеть осциллографа соответственно тумблером *1*. При этом от вибратора № 8 на экране *5* появится световой зайчик,

которой можно перемещать по вертикали (по оси ординат), вращая ту из ручек *2*, которая соответствует вибратору № 8. Этот зайчик приводят в совпадение с зайчиком от какого-либо другого вибратора без тока. Оба зайчика проектируют на середину кинопленки, что контролируют по экрану *5*. При включении развертки оба зайчика будут перемещаться вдоль оси абсцисс и на кинопленке дадут одну прямую.

Посредине пролета балки прикладывают груз $P = 1$ *кГ*, и индикатором *И* (рис. 68, *a*) измеряют единичный прогиб v. Соответственно

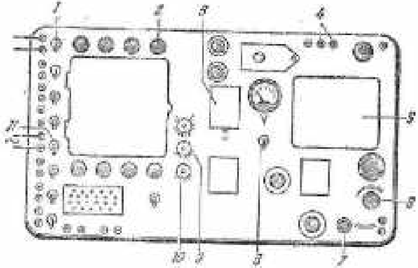


Рис. 69. Внутренняя панель осциллографа МПО-2: *1* — тумблер включения вибратора № 8, *2* — ручка вибратора № 8, *3* — кассета, *4* — клеммы, *5* — экран, *6* — ручка диафрагмы, *7* — кнопка включения фотосъемки, *8* — тумблер включения двигателя, *9* — регулятор длины кадра, *10* — регулятор включения электромагнита, *11* — выключатель вибратора № 4 (отметчика времени).

прогибу v происходит удлинение датчиков *D*, изменяется их сопротивление, нарушающее балансировку моста, и в усилителе (рис. 68, *б*) возникает ток, который подается на вибратор № 8 и вызывает перемещение зайчика по оси ординат.

Таким образом, зайчик вибратора № 8 отодвинется от зайчика вибратора без тока, который остается в это время неподвижным, на *a мм* по вертикали пропорционально величине прогиба v. Затем регулятор *9* (см. рис. 69) длины кадра устанавливают на минимальное деление (около 10 *мм*), включают контакт *8* двигателя, вращающего развертку, и производят фотографирование, нажимая кнопку *7*. На пленке зайчики дадут две прямые, параллельные оси абсцисс. Измерив расстояние *a* между ними, получим масштабный коэффициент осциллограммы, равный

$$k = \frac{v}{a},$$

После тарировки подготавливаем осциллограф для получения на той же пленке осциллограммы удара. Оставив зайчик вибратора № 8 посредине пленки, передвигаем на край пленки зайчик отметчика времени, в качестве которого используется, например, вибратор № 4, присоединяемый к сети переменного тока выключателем *11* и вибрирующий с частотой $f_0 = 50$ *гц*. Регулятор *9* устанавливаем на длину кадра около 200—300 *мм* и ручкой *10* регулируем контакт электромагнита *Э* (рис. 68, *в*) так, чтобы он включился с небольшим опозданием после начала движения пленки и оттянул штифт, удерживающий груз *P*. Электромагнит *Э* присоединяется к осциллографу в клеммах *4* (рис. 69).

Затем, включив тумблеры *1*, *11* и *8* (вибратора № 8, отметчика времени и двигателя), нажимаем кнопку *7* и производим фотосъемку осциллограммы. Кнопку *7* удерживаем нажатой до конца движения пленки, которая автоматически останавливается, пройдя назначенную длину. При этом сперва начинается движение пленки, потом включается электромагнит *Э* и груз сбрасывается на балку.

Колебания балки, возникшие от удара, передаются на вибратор № 8 и фиксируются на пленке. Экспонированную пленку отсекаем и с кассетой *3* передаем в фотолабораторию для проявления.

3. Обработка данных опыта. На проявленной осциллограмме (рис. 70) измеряют: расстояние *s* между тарировочными прямыми, максимальную амплитуду a_{max} и две произвольные амплитуды через *m* периодов, например, a_0 и a_m. При этом амплитуды a_{max} и a_0 могут совпадать. Измерение амплитуд удобно производить компаратором или другим измерительным прибором с увеличительной линзой.

Частота *f* колебаний балки определяется непосредственным подсчетом числа колебаний за 1 *сек*, т. е. на участке $m_0 = 50$ колебаний отметчика времени. Начало или конец подсчета желательно выбирать от вертикали, на которой совпадают вершины амплитуд колебания балки и отметчика времени.

Если в пределах записи имеется совпадение амплитуд в двух точках, как показано на рис. 70, то, подсчитав между этими точками величины *m* и m_0 колебаний балки и отметчика времени, частоту *f* найдем из соотношения

$$\frac{f}{f_0} = \frac{m}{m_0}.$$

Имея полученный по индикатору прогиб v, и следовательно, и статический прогиб $v_c = Pv$ от груза (веса шарика) и зная величины *a*, a_{max}, a_0, a_m и *f*, находим масштаб *k* осциллограммы, динамический прогиб балки $v_д = ka_{max}$, динамический коэффициент κ, логарифмический декремент затухания $\delta = \frac{2{,}3}{m} \lg \frac{a_0}{a_m}$, период колебаний $T = 1/f$ и коэффициент затухания $\alpha = \delta/T$.

Полученные таким образом динамический коэффициент и частоту колебаний сравнивают с их теоретическими значениями, вычисленными по формулам (45) и (47) с учетом веса балки. Для определения прогиба a_0^c по формуле (46) можно воспользоваться прогибом D,

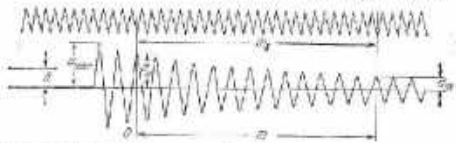


Рис. 70. Вид осциллограммы при действии удара грузом на балку.

измеренным по индикатору, или, зная размеры балки, можно его определить теоретически по формуле

$$a_0^c = \frac{(P + k_д Q) l^3}{48 E J}.$$

При вычислении теоретического значения частоты f по формуле (47) можно использовать коэффициент затухания α, полученный из опыта.

Работа 21. **Колебания груза на пружине**

1. Общие сведения. Для учебной работы по экспериментальному определению периода колебаний системы с одной степенью свободы удобны гибкие пружины. Частота колебаний груза, подвешенного на пружине (рис. 71) незначительной жесткости, может быть настолько малой, что возможно отсчитывать колебания непосредственно без помощи каких-либо приборов. Например, в случае стальной пружины из десяти витков (рис. 71), диаметром $D = 10$ см при диаметре проволоки в 4 мм, груз в 1 кг, подвешенный на пружине совершает около 2,5 колебаний в секунду. Колебания такой частоты вполне могут быть сосчитаны на протяжении 30 или 60 сек. при помощи обычных часов с секундной стрелкой.

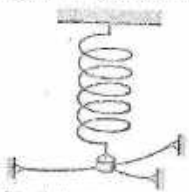


Рис. 71. К определению частоты собственных колебаний груза, подвешенного на пружине.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможности применения теоретической формулы для определения частоты собственных колебаний упруго закрепленного точечного груза с одной степенью свободы в случае реального груза, подвешенного на винтовой пружине малой жесткости. Учащемуся надлежит измерить

при помощи секундомера или часов период собственных колебаний груза и сравнить результат с теоретическим.

2. Проведение испытания. Груз, подвешенный к пружине, укрепляют посредством трех нитей в горизонтальной плоскости, как показано на рис. 71. Нити, расположенные под равными углами друг к другу, препятствуют горизонтальным перемещениям груза, но по вертикали груз имеет свободу перемещения, так как при значительной длине нитей малые вертикальные колебания груза на пружине происходят беспрепятственно, если нити не натянуты. Длина нити должна не менее чем в десять раз превышать амплитуду колебаний груза. Практически часто опыт удается провести без нитей, так как горизонтальные перемещения груза начинаются не сразу (см. далее, п. 4).

Колебательное состояние сообщается грузу в результате принудительного его отклонения от состояния равновесия; оттянув груз рукой вниз, его внезапно отпускают, при этом груз поднимется, после чего начнет совершать колебательное движение по вертикали.

При малых амплитудах частота колебаний не зависит от амплитуды. Для того чтобы убедиться в этом, опыт повторяют при измененной амплитуде.

Допустим, что в течение 30 *сек* груз совершил 75 колебаний. Тогда частота колебаний

$$f = \frac{75}{30} = 2{,}5,$$

а круговая частота

$$k = 2\pi f = 15{,}7 \ \frac{1}{сек}.$$

3. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими. Теоретическая формула для определения круговой частоты собственных колебаний упруго прикрепленной точечной массы при одной степени свободы имеет вид

$$k = \sqrt{\frac{g}{\delta}}, \qquad (48)$$

где g — ускорение при свободном падении, δ — осадка упругой системы, поддерживающей груз, при статическом приложении груза.

В нашем случае цилиндрической винтовой пружины малого шага имеем:

$$\delta = \frac{8PDn}{Gd^4},$$

где D — диаметр пружины, n — число витков, G — модуль сдвига материала пружины, d — диаметр проволоки, P — вес приложенного груза.

4. Связанные колебания. Если осадка пружины (при статическом приложении груза) δ близка к $l/4$, где l — расстояние от точки подвеса пружины до центра тяжести груза, наиболее ярко наблюдается возбуждение боковых колебаний (при отсутствии поперечных связей — нитей). Постепенно энергия вертикальных колебаний переходит в энергию угловых колебаний (раскачивания). В момент наибольшей амплитуды угловых колебаний вертикальные перемещения прекращаются, после чего снова начинаются постепенно возрастающие вертикальные колебания при одновременном уменьшении угловых [1]).

В указанном случае имеет место так называемое параметрическое возбуждение, вызванное тем, что при вертикальных колебаниях периодически с наиболее благоприятной частотой (равной удвоенной частоте угловых колебаний) изменяется длина маятника — параметр, влияющий на величину энергии угловых колебаний. Обратное действие угловых колебаний на вертикальные также попадает в резонанс.

Для пружины указанных выше размеров описанные параметрически связанные колебания происходят при $l = 16$ см.

Работа 22. **Исследование свободных колебаний полосы**

1. Общие сведения и теоретические данные. Экспериментальное исследование свободных изгибных колебаний полосы сводится к определению низших главных частот последовательных видов колебаний и нахождению для каждой частоты положения узловых линий, в точках которых амплитуды колебаний равны нулю. По найденным узловым линиям устанавливают форму колебаний, соответствующую данной частоте.

Опытное определение частот свободных колебаний полосы основано на явлении резонанса, отвечающего резким возрастанием амплитуды. С этой целью к полосе прикладывают периодическую возмущающую силу, постепенно увеличивают частоту ее колебаний и наблюдают за изменением амплитуды колебаний полосы. Частота колебаний возмущающей силы в момент первого резкого увеличения амплитуды (состояние резонанса) совпадает с основной (первой) частотой свободных колебаний полосы. Продолжающееся увеличение частоты возмущающей силы вызывает сначала уменьшение амплитуды, а затем ее вторичное резкое увеличение. В этот момент частота силы совпадает со второй главной частотой полосы. Дальнейшее увеличение частоты возмущающей силы дает при каждом скачке амплитуды последовательные значения главных частот.

[1]) Л. Н. Мандельштам и др., Новые исследования нелинейных колебаний, Гос. изд-во по вопросам радио, 1936.

Положение узловых линий каждой главной формы колебаний можно определить, если насыпать на полосу мелкий песок, который перемещается под влиянием вибрации в места с нулевыми амплитудами. Можно также пользоваться щупом, прикосновение которого к вибрирующим местам полосы вызывает изменение амплитуды при постоянной частоте. Если же щуп приложить к узловым линиям, то амплитуда колебаний не изменится.

Исследуем удлиненную прямоугольную полосу из дуралюмина, защемленную по короткому краю (рис. 72). В этих условиях полосу можно рассматривать как изогнутую балку, с одним заделанным и другим свободным концом. Уравнение поперечных колебаний такой балки-полосы, как системы с бесконечно большим числом степеней свободы, получается из уравнения упругой линии, имеющего вид

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{p_f}{EJ},$$

Рис. 72. Пластинка для исследования колебаний.

здесь p_f — распределенная нагрузка на единицу длины, равная силам инерции массы полосы, возникающим при свободных колебаниях, т. е.

$$p_f = -\frac{p}{g}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}.$$

Дифференциальное уравнение колебаний полосы принимает вид

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\frac{p}{EJg}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2},$$

где v — прогиб полосы; EJ — изгибная жесткость в плоскости колебаний; p — погонный вес полосы; g — ускорение при свободном падении; $\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$ — ускорение движения точек оси полосы.

При колебаниях прогиб v является функцией координаты x и времени t. Прогиб можно представить в виде произведения функции X, зависящей только от координаты x, и гармонической функции $\sin(\omega t + \alpha)$, зависящей только от времени t,

$$v = X \sin(\omega t + \alpha).$$

Здесь ω — круговая частота колебаний.

Берем производные от прогиба v по длине x и по времени t, подставляем их в дифференциальное уравнение колебаний. После

сокращения на $\sin(\omega t + \alpha)$ и введения обозначения

$$\lambda^4 = \frac{\omega^2 \gamma}{EJg} \tag{49}$$

получаем для функции X, характеризующей форму колебаний, однородное линейное дифференциальное уравнение четвертого порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^4X}{dx^4} - \lambda^4 X = 0. \tag{50}$$

Здесь частная производная заменена полной, так как X не зависит от времени. Общий интеграл этого уравнения имеет вид

$$X = A \sin \lambda x + B \cos \lambda x + C \operatorname{sh} x + D \operatorname{ch} \lambda x. \tag{51}$$

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий, которые для консоли (рис. 72) состоят в том, что в заделке (при $x = 0$) прогиб $v = X \sin(\omega t + \alpha)$ и угол поворота сечения $\theta = \frac{\partial v}{\partial x}$ обращаются в нуль, а на свободном конце (при $x = l$) обращаются в нуль изгибающий момент $M = -EJ\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ и поперечная сила $Q = -EJ\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}$. Граничные условия должны выполняться независимо от времени, что приводит к аналогичным условиям для функции X, а именно:

$$\left.\begin{array}{lll} \text{при } x = 0: & 1) \quad X = 0; & 2) \quad \frac{dX}{dx} = 0; \\ \text{при } x = l: & 3) \quad \frac{d^2X}{dx^2} = 0; & 4) \quad \frac{d^3X}{dx^3} = 0. \end{array}\right\} \tag{52}$$

Подставляя в выражение (51) для функции X и в выражение для ее производной значение $x = 0$, из двух первых условий (52) находим, что

$$D = -B \quad \text{и} \quad C = -A.$$

Учитывая этот результат, получаем:

$$X = A(\sin \lambda x - \operatorname{sh} \lambda x) + B(\cos \lambda x - \operatorname{ch} \lambda x). \tag{53}$$

Уравнение (53) в дальнейшем используется для определения форм упругих линий при колебаниях с разными частотами. Для нахождения главных частот составляем выражения второй и третьей производных от X, полагаем в них $x = l$ и согласно двум последним условиям (52) приходим к системе двух однородных уравнений:

$$\left.\begin{array}{l} A(\sin \lambda l + \operatorname{sh} \lambda l) + B(\cos \lambda l + \operatorname{ch} \lambda l) = 0, \\ A(\cos \lambda l + \operatorname{ch} \lambda l) - B(\sin \lambda l - \operatorname{sh} \lambda l) = 0. \end{array}\right\} \tag{54}$$

Тривиальное решение этой системы дает $A = B = 0$. Тогда функции X, а следовательно, и прогиб v станут равными нулю и колебаний не будет. При наличии колебаний постоянные A и B должны иметь значения, отличные от нуля, что возможно только при условии равенства нулю определителя из коэффициентов при постоянных. Выполнив это условие, получаем трансцендентное уравнение

$$\cos \lambda l \operatorname{ch} \lambda l = -1. \tag{55}$$

Это уравнение и служит для определения главных собственных частот колебаний. Построив кривые $y = \cos \lambda l$ и $y = -\frac{1}{\operatorname{ch} \lambda l}$ (рис. 73), легко обнаружим, что уравнение частот имеет бесчисленное множество корней $\lambda_1 l$, $\lambda_2 l$, ..., $\lambda_n l$, определяемых точками пересечения этих кривых. Вычисленные таким образом последовательные корни, соответствующие главным частотам последовательных видов колебаний балки-полосы, имеют значения, приведенные в таблице 36.

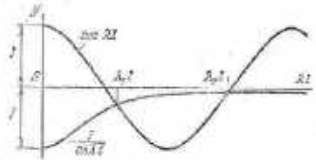


Рис. 73. Графическое определение корней уравнения $\cos \lambda l \operatorname{ch} \lambda l = -1$.

Таблица 36

$i =$	1	2	3	4	5	6	...	n
$\lambda_i l =$	1,875	4,694	7,855	10,996	14,137	17,279	...	$\lambda_n l + \pi$

В зависимости от найденных корней получаем из выражения (49) формулу для главной секундной частоты i-й формы колебания:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{(\lambda_i l)^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJg}{\rho}}. \tag{56}$$

Основная частота получается при $\lambda_1 l = 1{,}875$.

Для того чтобы определить форму колебаний, достаточно из уравнений (54) найти величины, пропорциональные постоянным A и B. На этом основании можно положить:

$$A = \cos \lambda l + \operatorname{ch} \lambda l \quad \text{и} \quad B = -(\sin \lambda l + \operatorname{sh} \lambda l),$$

что удовлетворяет уравнениям (54) при одновременном выполнении условия (55). Тогда выражение (53), определяющее форму колебаний, примет вид

$$X = (\cos \lambda l + \operatorname{ch} \lambda l)(\sin \lambda x - \operatorname{sh} \lambda x) - (\sin \lambda l + \operatorname{sh} \lambda l)(\cos \lambda x - \operatorname{ch} \lambda x).$$

Подставляя сюда последовательные значения $\lambda_i l$, можно при помощи таблиц тригонометрических и гиперболических функций построить упругие кривые главных колебаний и по ним найти узловые линии, в которых амплитуда $X = 0$. Для первых четырех видов колебаний упругие кривые изображены на рис. 74. Для

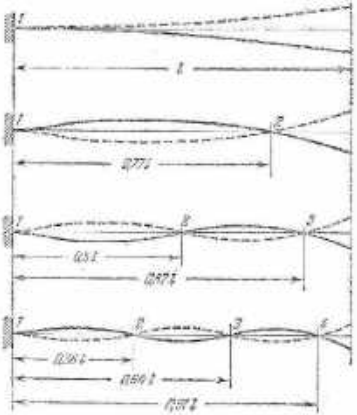


Рис. 74. Упругие линии главных колебаний полосы для четырех первых главных тонов.

них получаются следующие узловые линии, расположенные на расстояниях x от заделки:

при 1-й частоте одна узловая линия $x_1 = 0$;
при 2-й — две линии $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}77l$;
при 3-й — » $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}5l$, $x_3 = 0{,}87l$;
при 4-й — » $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}36l$, $x_3 = 0{,}64l$, $x_4 = 0{,}91l$;
при 5-й — » $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}18l$, $x_3 = 0{,}5l$, $x_4 = 0{,}74l$, $x_5 = 0{,}89l$.

Виды колебаний при промежуточных частотах получаются наложением главных форм колебаний друг на друга.

2. Проведение испытания. Полоса *2* (рис. 75), защемленная коротким краем в массивной опоре, приводится в колебательное движение вибратором *3* (см. § 8 на стр. 171), на который подается переменный ток от звукового генератора *1* типа 31-2А. Звуковой

генератор позволяет менять частоту тока в пределах от 20 до 20 000 *гц*. Одновременно на экране электронного осциллографа (тип ЭО-7) фиксируются колебания полосы. Преобразование механических колебаний конца полосы в электрические и подача их на осциллограф производятся пьезоэлектрическим датчиком *4* (см. § 8 на стр. 176).

До испытания необходимо проверить правильность соединения аппаратуры по схеме рис. 75, установить касание или вибратора и датчика с полосой включить в сеть звуковой генератор и осциллограф и прогреть их в течение 4—5 минут. Включение звукового

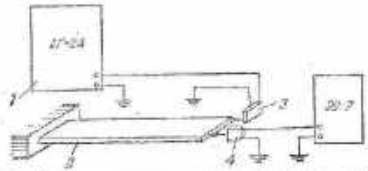


Рис. 75. Схема соединения аппаратуры для исследования колебаний полосы. *1* — звуковой генератор 31-2А, *2* — полоса, *3* — вибратор, *4* — пьезоэлектрический датчик.

генератора производится выключателем *4* (рис. 76), причем загорается сигнальная лампа *5*. После прогрева выполняется предварительная регулировка (установка нуля частоты). Для этого ставят на нуль сначала лимб с надписью «частота» ручкой *3*, потом лимб *9* «расстройка», а затем вращением лимба *2* «установка нуля» стрелку коммутатора *6* приводят также к нулевому положению.

Амплитуду выходного напряжения можно регулировать плавно ручкой *1* «регулировка выхода» или ступенчато переключателями *7* «киловольты» и *8* «переключатель выхода».

Перед включением осциллографа следует ручку *2* с надписью «яркость» повернуть вправо до упора, а ручку *6* «фокус» (рис. 77) поставить в среднее положение. Осциллограф включается тумблером *4* «сеть» и *5* жетя по стрелке, после чего загорается сигнальная лампа и через 2—3 минуты на экране *3* появляется светящаяся точка. Для перемещения точки в центр экрана служат ручки *1* «ось *y*» и *7* «ось *x*». Ручками *2* «яркость» и *6* «фокус» устанавливают желательную яркость и наименьшие размеры светящейся точки.

Для выполнения испытания от звукового генератора подают ток на вибратор и этим возбуждают колебание полосы. Ручкой *3* (рис. 76) постепенно увеличивают частоту подаваемого напряжения и наблюдают за изменением амплитуды колебаний полосы по экрану осциллографа. Пока частота напряжения не совпадет с собственной частотой колебаний полосы, амплитуда остается неизменной.

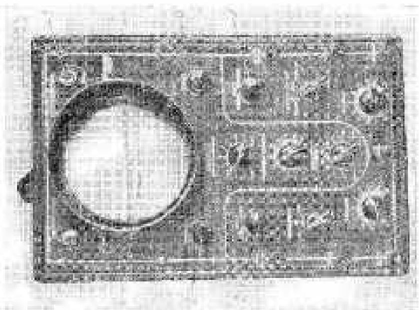


Рис. 77. Кривые осциллографа типа ЭО-7: 1 — ручка [illegible], 2 — регулировка [illegible], 3 — [illegible], 4 — тумблер «сеть», 5 — тумблер [illegible], 6 — регулировка фокуса, 7 — ручка [illegible].

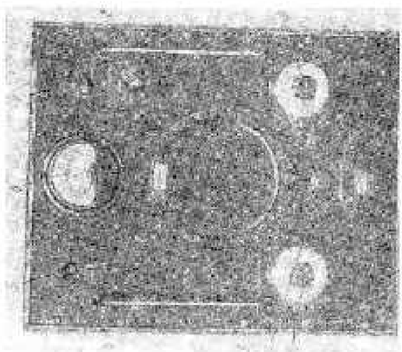


Рис. 78. Передняя панель звукового генератора типа ЗГ-[illegible]: 1 — регулятор выхода, 2 — лимб установки [illegible], 3 — ручка лимба частоты, 4 — выключатель генератора, 5 — сигнальная лампа, 6 — вольтметр, 7 — ступенчатый переключатель «[illegible]», 8 — переключатель [illegible], 9 — лимб [illegible].

Установив момент наиболее резкого возрастания амплитуды (резонанс), прекращают вращение ручки 3; по лимбу «частота» звукового генератора делают отсчет частоты подаваемого напряжения, совпадающей с первой собственной частотой колебаний полосы; по сетке, имеющейся на экране осциллографа, измеряют величину максимальной амплитуды и, насыпав на полосу немного мелкого песку, определяют положение соответствующих узловых линий. Затем снова плавно увеличивают частоту до следующего резонанса. Таким образом, производят отсчеты частот и измерения амплитуд и положений узловых линий для пяти последовательных собственных частот колебаний полосы.

Результаты наблюдений записывают в журнал по форме, указанной в таблице 37.

Таблица 37

Порядок наблюдаемых частот	Число колебаний	Расстояние x от середины до узловых линий (над чертой — x, см, под чертой — $\frac{x}{l}$)					Максимальная амплитуда	
		1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	на экране	действительная
1-я (основная)								
2-я								
3-я								
4-я								
5-я								

ГЛАВА III

ИСПЫТАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Работа 23. Устойчивость стержней при сжатии

1. Общие сведения. Цель работы — воспроизвести некоторые простейшие случаи потери устойчивости прямолинейной формы равновесия стержня при сжатии и экспериментально установить критические значения сжимающей силы. Теоретическая формула для критической силы, формула Эйлера, имеет вид

$$N_{кр} = \frac{\pi^2 E J_{min}}{(\mu l)^2}, \qquad (57)$$

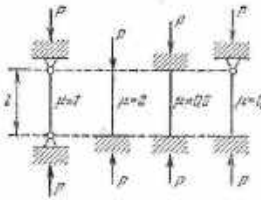


Рис. 79. Значения коэффициента μ приведения длины l некоторых случаев закрепления стержня.

где μ — коэффициент, зависящий от способа закрепления концов стержня (рис. 78), называемый коэффициентом приведения длины.

Формула Эйлера применима, если гибкость стержня $\lambda = \frac{\mu l}{i_{min}}$

здесь $i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F}}$ — минимальный радиус инерции сечения стержня) не меньше предельного ее значения $\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{пц}}}$, соответствующего пределу пропорциональности материала. Предельные значения гибкости: для мягкой стали около 100, для дюраля и древесины около 60. При меньших значениях гибкости λ формула (57) неприменима, так как потеря устойчивости происходит при напряжениях, превосходящих предел пропорциональности. В этих случаях применяются эмпирические формулы и соответствующие им таблицы или графики. Формула Ясинского для критического напряжения $\sigma_{кр} = \frac{N_{кр}}{F}$ имеет вид

$$\sigma_{кр} = a - b\lambda, \qquad (58)$$

Коэффициенты a и b для стали марки Ст. 3 при λ от 40 до 100 имеют значения: $a = 3360$ кГ/см², $b = 14{,}7$ кГ/см². Для древесины (сосна) $a = 293$ кГ/см², $b = 1{,}94$ кГ/см². Эмпирические формулы, особенно для древесины, дают лишь грубо приближенный результат.

Опыты по исследованию устойчивости производятся на машинах или специальных установках. Для этой цели удобны машины малой мощности, допускающие значительную длину испытываемых образцов. К таким машинам относятся, например, 2-тонная машина Амслера (описание однотипной машины ГЗИП-Р5 дано в работе 2) и 3-тонная машина, описанная в § 12 части II.

Более длинные образцы испытывают на специальных установках, схемы которых приведены в § 34 части II.

2. Проведение опыта. Образец устанавливают на машине вертикально. Нагружение производится вручную медленно и плавно. За возрастанием нагрузки и поведением образца нужно непрерывно следить. Прекращение роста нагрузки при возрастании прогиба

Таблица 38

Схема закрепления образца (рисунок)			
Материал			
Модуль упругости E, кГ/см²			
Длина образца l, см			
Поперечное сечение образца (рисунок)			
Площадь сечения образца F, см²			
Момент инерции сечения J_{min}, см⁴			
Радиус инерции сечения $i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F}}$, см			
Коэффициент приведения длины μ			
Гибкость $\lambda = \frac{\mu l}{i_{min}}$			
Формула для вычисления критической силы			
Критическая сила, кГ — Вычисленная			
Критическая сила, кГ — Из опыта			

соответствует критическому значению сжимающей силы. Для наблюдения прогибов при жестких образцах иногда применяют индикаторы, приставляемые к образцу сбоку по одному с каждой из двух противоположных сторон. В таком положении пружины индикаторов уравновешивают друг друга.

При менее жестких образцах для измерения прогиба можно пользоваться приставной шкалой.

Для гибких стержней такие приспособления не требуются, так как прогиб их при критической нагрузке велик и замечается невооруженным глазом.

О степени близости нагрузки к критическому значению можно судить по частоте собственных колебаний стержня, которая уменьшается с нагружением и при критической нагрузке равна нулю. Стержень приводят в колебательное состояние обычно от руки: стержень слегка деформируют и внезапно освобождают.

Форма записи в лабораторном журнале дана в таблице 38.

3. **Способ Саусвелла [5].** Используется зависимость между поперечным прогибом f стержня и сжимающей силой N

$$f = N_{кр}\frac{f}{N} - f_0,$$

где f_0 — начальный прогиб стержня (от которого измеряется f).

Согласно этой формуле критическая сила $N_{кр}$ определяется как угловой коэффициент прямой, построенной по измеренным (посредине стержня) величинам f (откладываются по оси ординат) и соответствующим значениям f/N (на оси абсцисс). Прямую по точкам следует проводить так, чтобы разброс был минимальным. Начальный прогиб f_0 замерять не нужно.

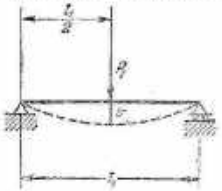


Рис. 78. Загружение деревянного образца для определения изгибной жесткости.

4. **Испытание деревянных образцов.** Древесина — неоднородный материал; значения модуля упругости, которые имеются в справочных таблицах, следует рассматривать лишь как грубо приближенные, особенно для малых образцов. Поэтому при проверке формулы Эйлера деревянные образцы следует предварительно подвергать поперечному изгибу для определения изгибной жесткости EJ образца. Из теории изгиба известно, что формула для прогиба балки (рис. 79), нагруженной сосредоточенной силой посредине, имеет вид

$$v = \frac{P_1 l^3}{48EJ}. \qquad (59)$$

Прогиб v можно получить из опыта; тогда из формулы (59) определится жесткость EJ образца, т. е.

$$EJ = \frac{P_1 l^3}{48v}.$$

Если, например, $P_1 = 15$ кГ и $l_1 = 40$ см, то

$$EJ = \frac{15 \cdot 40^3}{48v} = \frac{20\,000}{v}\ (кГсм^2),$$

где v в сантиметрах.

Сила P_1 должна быть приложена в плоскости наименьшей жесткости образца, и ее величина должна находиться заведомо в пределах пропорциональности между нагрузкой и деформацией. Испытание на изгиб выполняется дважды, т. е. с двух сторон образца. Из двух полученных значений прогиба принимается большее, как соответствующее меньшему значению жесткости и, следовательно, критической силы.

Описанный здесь опытный способ определения жесткости EJ образца в целях единства методики эксперимента может быть применен и к металлическим образцам. При этом вычислительная работа упрощается. Отпадает надобность в вычислении момента инерции J. Радиус инерции i_{min} прямоугольного сечения определяется по формуле

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J}{F}} = \sqrt{\frac{\frac{bh^3}{12}}{bh}} = 0{,}288h, \qquad (60)$$

где h — меньший размер сечения (толщина образца).

В случае круглого сечения $i = 0{,}5\,r$, т. е. радиус инерции равен половине геометрического радиуса.

Работа 24. Изгибно-крутильная форма потери устойчивости

1. **Общие сведения.** Цель работы — исследовать опытным путем изгибно-крутильную форму потери устойчивости. Определим критическую силу центрально сжатого равнобокого уголка с шарнирно опертыми концами, имеющими свободу депланации, но лишенными свободы поворота относительно оси уголка.

Шарнирное опирание стержня в концевой точке его оси допускает свободу поворота конца стержня относительно двух осей, проходящих через эту точку, перпендикулярных к оси стержня, например, главных осей инерции торцевого сечения. Данному условию удовлетворяет наконечник, показанный на рис. 80 в разобранном виде, и на рис. 81 — в собранном. Подкладка (рис. 80, *а*) предназначена для распределения нагрузки по торцу образца;

нижние прорези, расположенные под прямым углом друг к другу, надеваются на конец образца. Коромысло (рис. 80, б) является промежуточным элементом между подкладкой и скобой (рис. 80, в),

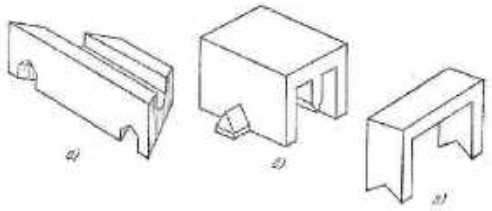


Рис. 80. Детали механизма, осуществляющего пространственный шарнир: а — накладка; б — коромысло; в — скоба.

воспринимающей нагрузку от плиты машины. Коромысло имеет два взаимно перпендикулярных ребра, совпадающих с главными осями инерции торцевого сечения стержня. Относительно этих ребер и возможны повороты торца. На рис. 81 отдельные детали обозначены так же, как и на рис. 80.

2. Теоретические данные. В рассматриваемом случае шарнирного опирания концов стержня при центральном сжатии критическая сила $P_{кр}$, соответствующая изгибно-крутильной форме потери устойчивости, определяется из следующего квадратного уравнения:

$$(P_y - P_{кр})(P_\omega - P_{кр})\, r^2 - P_{кр}^2 a_y^2 = 0, \qquad (61)$$

где

$$r^2 = i_0^2 + \frac{J_x + J_y}{F}, \quad P_y = \frac{\pi^2 E J_y}{l^2}, \quad P_\omega = \frac{1}{r^2}\left(\frac{\pi^2 E J_\omega}{l^2} + G J_k\right),$$

причем F, J_y, J_ω, J_k соответственно — площадь, главные моменты инерции, секториальный момент инерции и жесткостная характеристика поперечного сечения стержня при кручении; a_y — координата центра изгиба в главных осях инерции; E и G — модули упругости материала.

Для равнобокого уголка (рис. 82) с шириной полки a и толщиной t имеем:

$$F = 2at, \quad J_y = \frac{2at^3}{3}, \quad J_x = \frac{2a^3 t}{12},$$

$$J_\omega = 0, \quad J_k = \frac{2at^3}{3}, \quad a_y = \frac{a}{2\sqrt{2}}, \quad r^2 = \frac{a^2}{3}.$$

Положив $a = 20t$, $l = 10a$, $G = \frac{3}{8}E$, из уравнения (61) найдем:

$$P_{кр} = 0{,}036\, Et^2, \qquad \sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{F} = 0{,}00090\, E.$$

При $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ кГ/см^2 и $t = 0{,}15$ см получаем

$P_{кр} = 0{,}036 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 0{,}15^2 = 1700$ кГ и $\sigma_{кр} = 1900$ кГ/см^2.

При $t = 1$ мм найдем $\sigma_{кр} = 850$ кГ/см^2.

Мы определили критическую силу и критическое напряжение для случая изгибно-крутильной формы потери устойчивости. Однако в данном случае возможна потеря устойчивости тонкостенного стержня и по форме плоского изгиба. Выясним, не окажется ли критическое напряжение, соответствующее форме плоского изгиба, меньше полученного выше.

Определим минимальный радиус инерции сечения стержня

$$i_x = \sqrt{\frac{J_x}{F}} = \sqrt{\frac{2a^3}{12 \cdot 2at}} = \frac{a}{2\sqrt{6}}$$

и гибкость стержня

$$\lambda = \frac{l}{i_x} = \frac{10a \cdot 2\sqrt{6}}{a} = 49.$$

При такой гибкости стержень

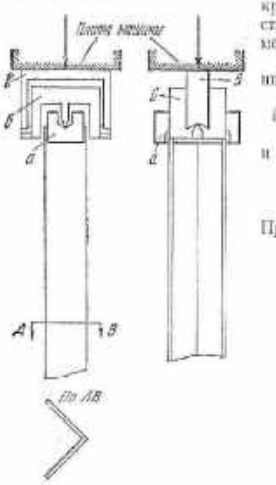


Рис. 81. Нагружение в собранном виде.

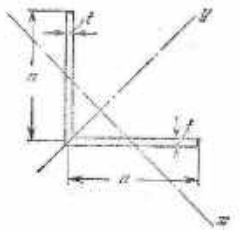


Рис. 82. Равнобокий уголок.

из малоуглеродистой стали теряет устойчивость при сжатии по форме плоского изгиба далеко за пределами пропорциональности, следовательно, при напряжении, значительно большем, чем получено выше для изгибно-крутильной формы потери устойчивости. В случае стержня из легированной стали, применяя формулу

Эйлера, найдем:

$$\sigma_{кр}=\frac{\pi^2E}{\lambda^2}=\frac{\pi^2\cdot2{,}2\cdot10^6}{49^2}=9000\ кГ/см^2.$$

Таким образом, и в этом случае напряжение значительно больше найденного выше. Следовательно, рассматриваемый стержень теряет устойчивость по изгибно-крутильной форме, что и должно быть проверено экспериментально в данной работе.

Работа 25. Устойчивость плоской формы изгиба полосы

1. Общие сведения. Цель работы — ознакомиться с явлением потери устойчивости при изгибе. Определим экспериментально критическую нагрузку для полосы, закрепленной одним концом (рис. 85), и сравним полученные значения критической нагрузки с теоретическими.

Основной частью испытательной установки является стальная или дюралевая полоса, плотно защемленная одним концом и имеющая на другом конце крючки или выступы для подвешивания груза на различной высоте. Ограничители деформации A и B предохраняют образец от порчи при нагружении его критической силой. Нижняя доска станины опирается на стол в трех точках: через неподвижную ножку, расположенную под местом крепления полосы, и две подвижные ножки в виде винтов C и D, которые предназначены для установки испытываемой полосы строго в вертикальной плоскости и ее ось — горизонтально.

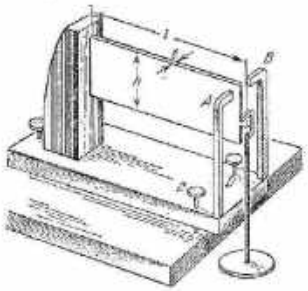


Рис. 85. Изготовлена установка для наблюдения потери устойчивости плоской формы изгиба полосы.

Размеры образца должны быть рассчитаны на непосредственное нагружение (см. ниже п. 3).

2. Проведение опыта. При малых нагрузках полоса не теряет своей плоской формы. При нагрузке, близкой к критической, наблюдается прогиб полосы в направлении, перпендикулярном к ее плоскости. Значительный боковой прогиб является признаком критического состояния балки, соответствующего критической нагрузке; балка при этом ложится на ограничители.

Следует отметить, что критическая нагрузка может оказаться меньше действительной в результате неточной установки испытываемой полосы. В случае продолжительного крена полосы следует попытаться отрегулировать ее положение при помощи установочных винтов C и D.

3. Теоретические данные. Критическая нагрузка в рассматриваемом случае полосы, нагруженной сосредоточенной силой на конце, приложенной в центре тяжести сечения,

$$P_{кр}=4\frac{\sqrt{BC}}{l^2},\qquad(62)$$

где B — минимальная изгибная жесткость балки, C — жесткость балки при кручении.

Величина $B=EJ_{min}$ определяется наименьшим моментом инерции сечения образца.

Крутильная жесткость $C=G\beta b^3\delta$, коэффициент β определяется в зависимости от отношения сторон b/δ сечения полосы[1]). При $\frac{b}{\delta}\geqslant10$ можно принять $\beta=\frac{1}{3}$. В этом случае $C=G\frac{b\delta^3}{3}$.

Полагая модуль упругости G при сдвиге равным $\frac{3}{8}E$, из формулы (62) получим

$$P_{кр}=0{,}3\frac{b\delta^2E}{l^2}.\qquad(63)$$

Например, при $l=100$ см, $b=8$ см, $\delta=0{,}3$ см и $E=7\cdot10^5$ кГ/см² (дюраль) из формулы (63) найдем $P_{кр}=6$ кГ.

[1]) См. В. И. Феодосьев, Сопротивление материалов, «Наука», 1974, стр. 35.

ГЛАВА IV

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Работа 26. **Исследование напряжений в поляризованном свете. Определение цены полосы**

1. Физические основы метода. В инженерной расчетной практике части случаев, когда теоретическое решение задачи или тензометрирование невозможны. В некоторых таких случаях обращаются к оптическому методу исследования на прозрачных моделях. Оптический метод оказался особенно полезным для исследования концентрации напряжений в углах и выточках, где установка тензометров невозможна.

Метод основан на явлении оптической анизотропии многих прозрачных аморфных материалов, наблюдаемом при нагружении их внешними силами. К таким материалам, называемым оптически чувствительными, относятся стекло, целлулоид и многие пластмассы. После снятия нагрузки свойство оптической анизотропии исчезает, что дало основание термину фотоупругость, и самый метод исследования иногда называют методом фотоупругости.

Можно экспериментально установить распределение напряжений в модели исследуемой детали, изготовленной из оптически активного материала. Такое же распределение напряжений существует и в действительной детали, так как характер распределения напряжений не зависит от материала детали, а только от ее формы и вида нагрузки. Напряжения в действительной детали пропорциональны напряжениям в модели [1]).

Рассмотрим случай плоского напряженного состояния. Если на пластинку из оптически чувствительного материала направить луч света (рис. 84), то при отсутствии нагрузки пластинка пропустит свет, не поляризуя его, как все оптически изотропные тела. В нагруженном же состоянии такая пластинка становится двоякопреломляющей и поляризует падающий на нее световой луч в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, совпадающих с направлениями главных напряжений. Эти два плоскополяризованных луча распространяются в материале с различной скоростью и выходят поэтому из пластинки с некоторой разностью фаз. Различие в скоростях зависит от напряжений, оно пропорционально разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ в материале модели в месте прохождения луча. Для пластинки толщиной t разность δ хода лучей (т. е. опережение одного луча от другого), проходящих через пластинку перпендикулярно к ней, выражается так (закон Вертгейма):

$$\delta = t(\sigma_1 - \sigma_2)k. \qquad (64)$$

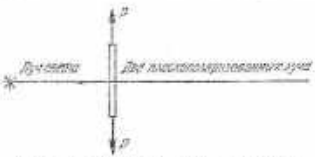


Рис. 84. Образец из оптически чувствительного материала в напряженном состоянии поляризует проходящий через него луч света в направлениях главных напряжений.

Здесь k — постоянная, зависящая от свойств материала и длины световой волны; эту величину называют оптическим коэффициентом. Для упрощения рассуждений предполагаем пока, что свет является монохроматическим.

Разность $\sigma_1 - \sigma_2$ равна удвоенному наибольшему касательному напряжению τ_{max}, поэтому формулу (64) можно написать в таком виде:

$$\delta = 2t\tau_{max}k \qquad (65)$$

или

$$\tau_{max} = \frac{\delta}{2tk}. \qquad (66)$$

2. Полярископ. Изохромы. Сущность оптического метода исследования напряжений наглядно представляется при рассмотрении прибора, называемого полярископом. Схема полярископа изображена на рис. 85. Он состоит из двух поляроидов или призм Николя, называемых поляризатором (*I*) и анализатором (*II*) полярископа.

Представим себе, что луч света пропущен через поляризатор. Этот луч будет поляризованным в главной плоскости поляризатора (плоскость *1,1* на рис. 85, *б*). Луч будет освещать экран *ав*. Вращая теперь анализатор вокруг линии хода луча, можем установить главную плоскость *2,2* анализатора перпендикулярно к главной плоскости *1,1* поляризатора; тогда на экране будет темно. Полярископ в таком положении называется скрещенным. Крест *1,1—2,2*, образуемый при этом главными плоскостями поляризатора и анализатора, называется крестом полярископа.

[1]) Это положение справедливо для всякой плоской задачи теории упругости в пределах односвязной области; если модель изображается многосвязной областью (например, в случае кольца), подобие может не быть полным, но все же точность решения практически достаточна.

Испытываемый нагруженный образец 3 — плоскую модель, изготовленную из листа оптически чувствительного материала толщиной в несколько миллиметров, устанавливают в полярископе между анализатором и поляризатором перпендикулярно к направлению луча. В ненагруженном состоянии образец почти не изменяет освещенности на экране, и если полярископ был установлен

Рис. 85. Схема устройства полярископа: а — схема прохождения луча света; б — расположение главных плоскостей поляризатора и анализатора: 1—1 — главная плоскость поляризатора, 2—2 — главная плоскость анализатора; плоскости 1—1 и 2—2 взаимно перпендикулярны — полярископ скрещен (затемнен), т. е. находится в рабочем состоянии.

накрест, то на экране будет по-прежнему темно. Если же теперь образец подвергнуть действию каких-либо нагрузок, то на экране появится свет.

Поясним причину этого явления. Рассмотрим (рис. 86) элемент $abcd$, вырезанный из образца по главным площадкам. Пусть колебания, соответствующие лучу, выходящему из поляризатора и падающему на образец, происходят с амплитудой a в плоскости $I-I$. Через m и n обозначим амплитуды колебаний, соответствующие лучам, выходящим из образца. Падая на анализатор, скрещенный с поляризатором (пунктирный крест на рис. 86 изображает крест полярископа), эти лучи проходят через него с амплитудами m_1 и n_1. Если бы не было отставания одного луча от другого (т. е. при $\delta = 0$ и, следовательно, при разности фаз $\varphi = 0$), на экране не было бы света, так как амплитуды m_1 и n_1 равны друг другу по абсолютной величине и различны по знаку; колебания взаимно гасили бы друг друга. То же было бы и при $\delta = \lambda$, 2λ, 3λ и т. д., где λ — длина световой волны (это соответствует разности фаз $\varphi = 2\pi$, 4π, 6π, 8π и т. д.).

При всяком другом значении δ (отличном от 0, λ, 2λ, 3λ и т. д.) на экране будет свет, так как интерферирующие колебания, складываясь, дадут колебания, отличные от нуля. Наибольшая освещенность экрана соответствует наибольшей амплитуде результативного колебания, т. е. разностям хода

$$\delta = \frac{1}{2}\lambda, \quad 1\frac{1}{2}\lambda, \quad 2\frac{1}{2}\lambda \quad \text{и т. д.} \tag{67}$$

Величина δ, определяющая освещенность экрана, зависит [см. формулу (64)] от разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$. Изменяя нагрузку и этим самым разность главных напряжений, будем наблюдать изменение освещенности на экране. Пусть в некоторый момент испытания на экране было темно (или, наоборот, была наибольшая яркость); при изменении нагрузки на образец темнота повторится, когда разность хода δ изменится на длину волны λ. Соответствующее изменение разности главных напряжений обозначим через σ_0.

При просвечивании образца пучком параллельных лучей (на рис. 85 границы пучка показаны пунктиром) всем точкам образца, в которых значения $\sigma_1 - \sigma_2$ одинаковы, будут соответствовать одинаковые значения δ и, следовательно, одинаковая освещенность экрана.

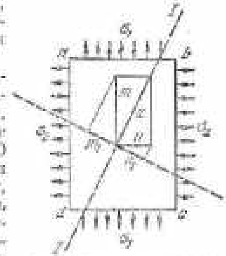


Рис. 86. Амплитуды колебаний в поляризованном свете: a — амплитуда колебания, образуемого плоскополяризованным лучом, выходящим из поляризатора и падающим на образец; m и n — амплитуды колебаний лучей, выходящих из образца $abcd$ и падающих на анализатор; m_1 и n_1 — амплитуды двух интерферирующих колебаний, выходящих из анализатора и падающих на экран.

Вследствие непрерывности поля напряжений в образце такие точки образуют непрерывные последовательности, т. е. линии или полосы, называемые **изохромами** (см. ниже рис. 90 и 92). Так, точки, где $\delta = 0$, λ, 2λ и т. д., образуют темные полосы. Полосу, соответствующую $\delta = \lambda$, будем называть полосой 1-го порядка; полосу, соответствующую $\delta = 2\lambda$, — полосой 2-го порядка, и т. д. Темные полосы на экране разделены светлыми полосами, причем переход от темноты к свету происходит постепенно. Порядок двух соседних темных полос отличается на единицу.

Приращение разности $\sigma_1 - \sigma_2$ главных напряжений, соответствующее изменению порядка полосы на единицу, обозначенное выше через σ_0 и называемое ценой полосы пластинки, определяется экспериментально и составляет предмет настоящей работы. Ниже, в п. 5, описано проведение опыта.

Имея цену σ_0 полосы для пластинки данной толщины t, нетрудно вычислить цену полосы σ_1 для пластинки из того же материала толщиной $t = 1$. Из формулы (64) видно, что если толщина t образца будет, например, уменьшена в некоторое количество раз, то для получения той же разности хода δ разность напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ нужно будет увеличить во столько же раз. Отсюда пропорция $t : 1 = \sigma_1 : \sigma_0$. Следовательно,

$$\sigma_1 = \sigma_0 t. \tag{68}$$

Так как σ_0 измеряется в $кГ/см^2$, а l — в $см$, то размерность σ_0 есть $кГ/см$.

Величину σ_0 будем называть приведенной ценой полосы или ценой полосы для данного материала; она зависит от оптических свойств материала и часто именуется оптической постоянной материала. Иногда за оптическую постоянную принимают величину наибольшего касательного напряжения, равную $\tau_0 = \sigma_0/2$.

В таблице 39 приведены значения оптической постоянной и предела пропорциональности некоторых оптически активных материалов.

Таблица 39

Материал	Оптическая постоянная $\sigma_0 = 2\tau_0$, $кГ/см$	Предел пропорциональности, $кГ/см^2$
Висхолит	72	500
Бакелит	72	450
Целлулоид	30—60	200—400
Стекло	100—300	—

Наибольшей оптической чувствительностью обладают фенолформальдегидные пластмассы — висхолит, бакелит и др., и поэтому они находят наибольшее применение. Однако эти материалы отличаются так называемым краевым эффектом, заключающимся в том, что обработанные механически края образца на экране всегда имеют интерференционные полосы, особенно после длительного хранения. Целлулоид не дает краевого эффекта, но обладает малой оптической чувствительностью. Получили также распространение глифталевая смола (глифталь) и, особенно, эпоксидная смола ЭД-6, обладающие хорошими оптическими качествами и пригодные для изготовления плоских и объемных моделей [1].

По известным цене полосы и ее порядку можно определить разность главных нормальных напряжений (и, следовательно, максимальное касательное напряжение), одинаковую для всех точек средней линии данной полосы:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{max} = \sigma_0 n = \frac{\sigma_0}{l} n, \qquad (69)$$

где n — порядок полосы.

[1] Н. И. Григорьевский, А. К. Прейс, М. С. Акутин и П. С. Грачева. Модели из эпоксидной смолы ЭД-6 в поляризационно-оптическом методе исследования напряжений. «Заводская лаборатория», 1957, № 4.

И наоборот, зная напряжения и порядок полосы, можно определить цену полосы:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{n} l = \frac{2\tau_{max}}{n} l. \qquad (70)$$

Если пользоваться не монохроматическим, а белым светом, то на экране наблюдаются цветные полосы, окрашенные в цвета спектра, так как длины волн цветов спектра различны и они оказываются в наивыгоднейших условиях интерференции (см. равенство 67) при различных значениях напряжений. Все точки одной какой-либо изохромы (одноцветной полосы) соответствуют точкам образца с одинаковой разностью главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ и, следовательно, одинаковым наибольшим касательным напряжением $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$. При изменении напряжений в какой-либо точке образца (вследствие, например, изменения внешней нагрузки) будет изменяться окраска в соответствующей точке экрана. Появление одного и того же цвета будет соответствовать каждый раз одному и тому же приращению разности $\sigma_1 - \sigma_2$, составляющему цену изохромы. Цена изохромы определяется по той же формуле (70).

Описанный метод определения разности главных нормальных напряжений или наибольшего касательного напряжения по картине изохром называется методом полос. Другой метод — визуальный — основан на применении особого оптического прибора, при помощи которого определяют разность хода δ, а затем по формуле (66) вычисляют напряжение. Наибольшее распространение имеет метод полос.

3. Изоклины. Изостаты. Помимо описанных темных полос — изохром, на экране появляются также темные полосы другого происхождения — изоклины. Поясним их появление, способ их удаления, а также их использование.

Если плоскость $I-I$ (рис. 86) колебания лучей, вышедших из поляризатора, параллельна какой-либо из главных площадок в данной точке образца (иными словами, если крест поляроидов совпадает с крестом главных площадок), то разложения луча не происходит; на экране в данном месте будет темная точка. Такие точки в непрерывном поле напряжений образуют темные линии, называемые изоклинами. Во всех точках одной изоклины направления главных площадок параллельны направлениям креста поляроидов.

Вращая нагруженный образец или, наоборот, вращая поляроиды (поляризатор и анализатор в скрещенном состоянии), а образец оставляя неподвижным, заметим, что изоклина перемещается по изображению образца; система же изохром, как обусловленная только величиной δ, при этом, конечно, остается без изменения.

Каждому положению полярископа относительно образца соответствует вполне определенная изоклина (а иногда и не одна). На рис. 87, *а* совмещены изоклины для круглого диска, сжатого двумя сосредоточенными силами в диаметральном направлении. Изоклины соответствуют значениям угла между крестом полярископа и линией действия сил, равным 5°, 10°, 15° и т. д.

На каждой изоклине изображены крестиками соответствующие положения креста полярископа, совпадающего с крестом главных площадок. Для всех точек одной изоклины наклон крестиков один и тот же.

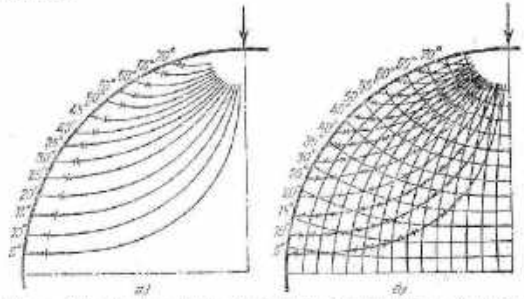


Рис. 87. Оптическое исследование круглого диска, сжатого по диаметру (изображена четверть диска): *а* — изоклины; *б* — построение изостат.

Нанеся достаточное количество крестиков (рис. 87, *б*) на изоклинах, можем провести ряд кривых, параллельных главным площадкам и, следовательно, главным напряжениям. Эти кривые, взаимно-перпендикулярные друг другу, суть изостаты или траектории главных напряжений, изображающие поле напряжений в образце.

Изоклины иногда мешают наблюдению изохром. Для того чтобы удалить изоклины, располагают на пути хода лучей в полярископе, например, слюдяные пластинки определенной толщины по обе стороны образца (на рис. 85, *а* они показаны пунктиром и обозначены буквами *A* и *B*), ориентированные своими главными сечениями под углом 45° к кресту полярископа и скрещенные между собой. Слюда поляризует проходящий через нее свет в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. Толщина пластинок такова, что разность хода получаемых двух лучей по выходе из пластинки составляет четверть длины волны применяемого монохроматического света; следовательно, разность фаз по выходе из первой пластинки равна

$\pi/2$. Такие два плоско-поляризованные лучи с равными амплитудами и разностью фаз, равной $\pi/2$ (а также $1\frac{1}{2}\pi$, $2\frac{1}{2}\pi$ и т. д.), составляют луч, который называют поляризованным по кругу, так как результативное колебание в проекции на плоскость, перпендикулярную к лучу, в этом случае приводится к движению по окружности (при разности фаз, отличной от $\frac{\pi}{2}$, $1\frac{1}{2}\pi$, $2\frac{1}{2}\pi$, ..., поляризация происходит по эллипсу). Другая пластинка (*B*) превращает круговую поляризацию обратно в плоскую. Лучи, поляризованные по кругу, не реагируют на направление главных площадок в образце, и изоклин на экране не будет.

В случае белого света можно получить круговую поляризацию только для одного какого-либо цвета спектра. Обычно толщину пластинок рассчитывают на средний в спектре желтый цвет, длина волны которого равна 0,5896 микрона (остальные цвета спектра будут при этом поляризованы по эллипсам).

4. Полярископ зеркальный. Выше рассмотрен полярископ с поляроидами или призмами Николя. Такие полярископы удобны в работе и широко применяются в настоящее время. Но они имеют ограниченное поле просвечивания, определяемое размерами поляроида. Существуют полярископы, основанные на поляризации света при отражении его от зеркала. Поляризатором и анализатором в них являются морблитовые зеркала. Эти полярископы более громоздки, чем поляроидные, но зато они допускают исследование моделей большей величины — до 0,5 м и больше в поперечнике — без перестановки их в полярископе.

Устройство зеркального полярископа системы Белоусова—Зайцева показано схематически на рис. 88 в двух проекциях. Источник света в виде многочисленных электрических ламп помещается под куполом, окрашенным в белый цвет с целью наибольшего отражения света. Лучи, падающие на зеркало *2* (поляризатор) под углом, равным углу полной поляризации (56°55'), отражаются от него поляризованными в вертикальной плоскости. Другое такое же зеркало *3* (анализатор), расположенное вертикально под тем же углом к лучу, гасит этот луч. Образец помещается по-прежнему между поляризатором и анализатором. При нагружении образца, как и ранее, глаз наблюдателя, находящийся в точке *б*, заметит появление света, т. е. изохромы, на изображении образца в зеркале *3*.

5. Определение цены полосы из опыта на чистый изгиб. Исследуя в полярископе модель балки, подвергаемой чистому изгибу, нетрудно определить цену изохрома (см. выше, п. 2).

На рис. 89 показана схема нагружения балки при испытании на чистый изгиб. Сосредоточенная сила *P* передается на испытываемую балку посредством стальной скобы *аб*, на протяжении

которой балка испытывает чистый изгиб. Балку изготовляют из оптически чувствительного материала постоянной толщины t. Длина ее L равна 10—20 см в зависимости от размеров полярископа.

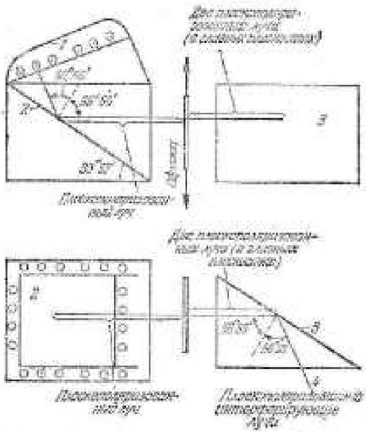


Рис. 88. Схема [illegible]: 1 — призмы, в которых [illegible], 2 и 3 — [illegible] зеркала.

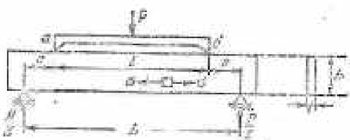


Рис. 89. Схема загружения балки для испытания на чистый изгиб.

При чистом изгибе касательные напряжения в поперечных и продольных сечениях балки отсутствуют, следовательно, нормальные напряжения в этих площадках являются главными. Одно из них, σ_2 (вертикальное), равно нулю. Следовательно, разность главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ в данном случае представится одним

напряжением σ_1, параллельным оси балки, определяемым по известной формуле

$$\sigma = \frac{M}{J} y. \qquad (71)$$

На рисунке 89 показано напряженное состояние элемента, выделенного в растянутой нижней зоне балки.

Вдоль балки в зоне чистого изгиба напряжения не изменяются, так как изгибающий момент M постоянен, а по высоте сечения напряжения изменяются по линейному закону. Поэтому изохромы (рис. 90) на участке чистого изгиба представляют собой прямые полосы, параллельные оси балки, расположенные на равных расстояниях друг от друга. Цифры, поставленные у каждой полосы, указывают порядок полосы. Нулем обозначена нейтральная ось

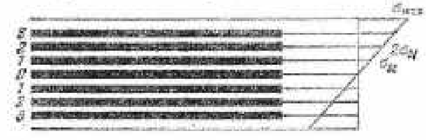


Рис. 90. Зона чистого изгиба балки [illegible].

балки. Две ближайшие к нейтральной оси полосы первого порядка, расположенные одна сверху, а другая снизу от нее, соответствуют $\delta = \lambda$, где λ — длина волны света. Напряжение здесь равно цене полосы $\sigma_{н}$. Следующие две полосы второго порядка соответствуют разности хода 2λ и, следовательно, вдвое большему значению напряжения — $2\sigma_{н}$ и т. д.

Цену полосы найдем, деля σ_{max} на число полос (или промежутков между ними) m:

$$\sigma_{н} = \frac{\sigma_{max}}{m}.$$

Число m может быть и дробным, если верхний интервал будет неполным.

Величина σ_{max} определяется по формуле (71)

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W},$$

где (см. рис. 89):

$$M = \frac{P}{2} c,$$

$$W = \frac{th^2}{6}.$$

Форма записи при проведении опыта дана в таблице 40.

Таблица 40

Нагрузка P, кГ	Изгибающий момент $M = \frac{P}{2}\,c$, кГ/см	Момент сопротивления сечения балки $W = \frac{Bh^2}{6}$, см³	Максимальное напряжение $\sigma_{max} = \frac{M}{W}$, кГ/см²	Количество интервалов, n	Цена полосы $\sigma_{ш} = \frac{\sigma_{max}}{n}$, кГ/см²	Приведенная цена полосы $\sigma_{ц} = \frac{\sigma_{max}}{n}\,t$, кГ/см

При большом краевом эффекте край образца исключается из рассмотрения; замеряется средний шаг полос d в средней части образца, и цена полосы вычисляется по формуле

$$\sigma_{ш} = \frac{M}{J}\,d$$

или

$$\sigma_{ц} = t\,\frac{M}{J}\,d,$$

где $J = Bh^3/12$ — момент инерции сечения образца.

Получаемая цена полосы $\sigma_{ц}$ относится к листу материала толщиной, равной единице (1 *см*), и измеряется в *кГ/см*.

Работа 27. Определение краевых напряжений в поляризованном свете

1. Общие сведения. В рассмотренной выше задаче чистого изгиба балки (работа 26, п. 5) одно из главных напряжений равно нулю, что облегчило решение задачи оптическим методом. Такое же напряженное состояние всегда имеется вблизи свободного края пластинки, нагруженной только в срединной плоскости. Для того чтобы убедиться в этом, рассмотрим бесконечно малый элемент вблизи свободного края пластинки (рис. 91). Касательные напряжения на всех гранях элемента вследствие закона парности должны быть одинаковыми по абсолютной величине. Но на свободной грани они равны нулю; следовательно, на остальных гранях бесконечно малого элемента касательные напряжения можно считать равными нулю. Из равновесия элемента заключаем также, что на грани, противоположной свободной, нет нормальных напряжений, т. е. возможны только нормальные напряжения, параллельные свободной

грани, показанные на рис. 91, *г*. Таким образом, разность главных напряжений на краях балки представляется одним напряжением, которое полностью и определяется из картины полос.

В настоящей работе предлагается, пользуясь оптическим методом, построить эпюры нормальных напряжений по верхним или нижним кромкам консолей и затем определить значения коэффициента концентрации напряжений в местах, где резко изменяется высота сечения балки. Для того чтобы выяснить зависимость коэффициента концентрации от формы входящего угла, рассматриваются различные случаи сопряжения: под тупым углом, под прямым углом и с закруглением.

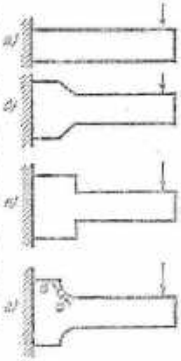


Рис. 91. Исследуемые типы балок.

2. Построение эпюр краевых напряжений по изохромам. Исследуем концентрации напряжений во входящих углах. На рис. 92 показаны изохромы для консоли с прямым входящим углом (конец консоли, несущий груз, находится справа за пределами рисунка). Пронумеруем полосы по верхнему краю консоли соответственно их порядку, начиная от средней линии балки. Напряжение в точке, где на край выходит полоса, имеющая порядок I, равно $\sigma_{ш}$. В точке выхода полосы 2 напряжение равно $2\sigma_{ш}$ и т. д. Откладывая в одном масштабе эти напряжения, как показано на рис. 92, построим эпюру краевых напряжений.

Эпюра краевых напряжений прямолинейна на всем своем протяжении, за исключением участка ее вблизи угла. Здесь наблюдается быстрое возрастание напряжений. Коэффициентом $\alpha_{к}$ концентрации напряжений называется отношение наибольшего действительного напряжения σ_{max} в месте концентрации к номинальному напряжению $\sigma_{ном}$, получаемому теоретически без учета концентрации, т. е.

$$\alpha_{к} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ном}}. \qquad (72)$$

Согласно теории изгиба балок в случае консоли постоянного сечения закон изменения краевого напряжения $\sigma = M/W$ следует закону изменения изгибающего момента и в данном случае изображается прямой. На рис. 92 эта прямая показана пунктиром. Искомое отношение $\alpha_{к} = \sigma_{max}/\sigma_{ном}$ можно получить как отношение соответствующих ординат, взятых из чертежа. В нашем случае $\alpha_{к} = 1{,}5$. При тупом угле значение $\alpha_{к}$ меньше; при закруглении $\alpha_{к}$

равно единице или близко к ней, т. е. концентрации напряжений в этом случае не наблюдается.

В работах 26 и 27 был изложен метод определения разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$. Сумму этих же величин можно

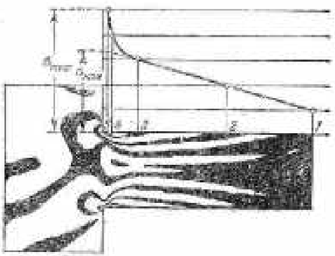


Рис. 92. Определение коэффициента концентрации α_k по эпюре главных напряжений.

определить, замеряя изменение толщины модели в данном месте, выражающееся теоретически так: $\varepsilon = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$. Зная разность и сумму главных напряжений, можно найти и самые напряжения. Изменение толщины модели измеряется при помощи приборов, описание которых имеется в специальной литературе.

Работа 28. Определение нормальных напряжений методом муаров

1. Однородное поле напряжений. На поверхность плоского образца (рис. 93, *а*) нанесем систему прямых равноотстоящих полос *I* (рис. 93, *б*) с шагом *d* порядка 0,1—0,01 *мм*. Эти полосы дают серый тон поверхности образца и каждая в отдельности глазом не различима. Затем образец подвергнем растяжению силой *P*; шаг полос *II* увеличится (рис. 93, *б*): $d_1 > d$. Для определения деформации ε_y на растянутый образец наложим стекло с эталонной системой полос *I* (аналогичной системе полос, нанесенной на образец до его деформирования) таким образом, чтобы какая-нибудь полоса прикладываемого стекла совпала с линией защемления образца *A—A*. При наложении системы *I* на систему *II* возникает новая, вполне различимая глазом, система муаровых полос *III* со значительно большим шагом *l*. (рис. 93, *б*). В рассматриваемом случае однородной деформации это будет система прямых параллельных равноотстоящих полос. На рис. 93 видно, что темные муа-

ровые полосы *III* образуются там, где светлые промежутки системы *I* перекрываются темными полосами системы *II*. Ближайшей к заделке (*A—A*) муаровой полосе соответствует перемещение *v* точек образца вдоль оси *y* под действием силы *P*, равное половине шага эталонной системы полос, т. е. $v = d/2$. Следующей полосе соответствует перемещение, равное $\frac{3}{2}d$, далее $\frac{5}{2}d$ и т. д.; при переходе

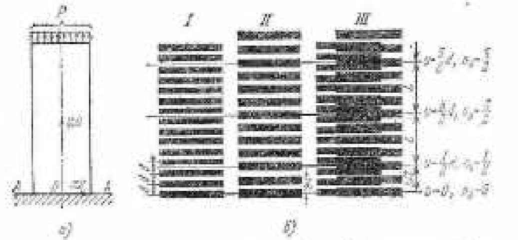


Рис. 93. Образование муаровых полос: *а* — образец, *б* — полосы до деформации (I), после деформации (II), после наложения системы I на систему II (III).

от одной муаровой полосы к смежной перемещение изменяется на величину, равную величине шага эталонной сетки.

Перемещение произвольной точки образца

$$v = nd, \tag{73}$$

где *n* — порядковый номер муаровой полосы. В данном случае *n* есть дробное число: $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ и т. д.

2. Неоднородное поле напряжений. Муаровая картина на рис. 93 является результатом однородной деформации, когда $\varepsilon_y = \text{const}$. В случае $\varepsilon_y = f(y)$ муаровые полосы будут по-прежнему параллельными оси *x*, но уже не будут равноотстоящими. В общем случае $\varepsilon_y = f(x, y)$ муаровая картина есть поле не пересекающихся, но и не параллельных полос. Все приведенные выше рассуждения справедливы и в этом случае при рассмотрении малого участка *dx* вдоль оси *x*.

На рис. 94 показана пластинка с круглым отверстием (см. работу 10). На правой половине образца была нанесена система продольных (вертикальных) полос с шагом $d_u = 0{,}030$ *мм*. В результате наложения эталонного стекла на деформированный образец получена представленная муаровая картина полос $u = \text{const}$, изображающих поле распределения перемещений $u = u(x, y)$. Аналогично для получения *v* была нанесена система поперечных полос (на левой

положение образца) с шагом $d_n = 0{,}023$ *мм*. Фото дано в масштабе $1 : k_1$ ($k_1 = 0{,}5$).

Деформации ε_x и ε_y выражаются через приращения du и dv перемещений следующим образом:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{d_u}{L_x}, \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \approx \frac{d_v}{L_v}, \tag{74}$$

где L_x и L_v — расстояния между соседними муаровыми полосами.

Определим величины ε_x для сечения между точками I—I по муаровой картине полос. Продольная светлая полоса $u = \text{const}$, совпадающая с осью y симметрии образца, будет полосой нулевого порядка $n_u = 0$. Смежной с ней светлой полосе соответствует смещение $u = -d_u$ точек образца в направлении x, равное величине шага эталонной сетки $d_u = 0{,}020$ *мм* (знак минус отвечает смещению влево). Следующей полосе соответствует смещение $u = -2d_u$ и т. д. Над фотографией муаровой картины $u = u(x, y)$ наносим ряд горизонтальных прямых через расстояние d_u, взятое в масштабе $1 : k_2$ ($k_2 = 0{,}002$), куда переносим точки пересечения

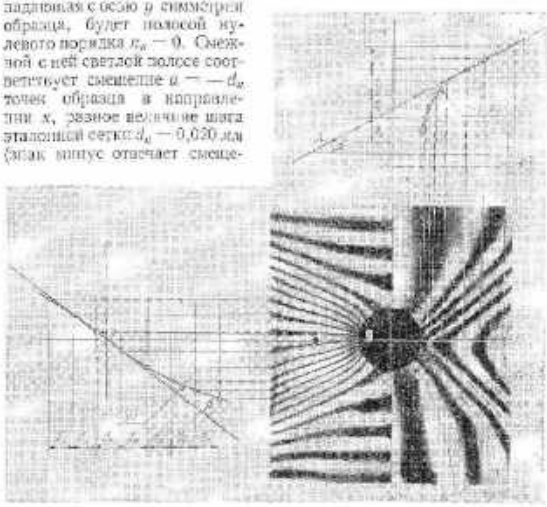


Рис. 94. Построение эпюр перемещений u для сечения между точками I—I и v для прямоугольного края образца.

муаровых полос с осью I—I, учитывая порядок полос. Соединив полученные точки кривой, получим график зависимости $u = u(x)$. Угол α наклона к оси x касательной AB к кривой в данной ее точке определяет величину $\partial u/\partial x$ или, согласно первому из выражений (74), величину деформации ε_x в данном месте. Например, в точке I

$$\varepsilon_x^{\text{I}} = -(\operatorname{tg}\alpha)\frac{k_2}{k_1} = -0{,}55 \cdot \frac{0{,}002}{0{,}5} = -0{,}00220.$$

Аналогично получим значения ε_v, построив график зависимости $v = v(y)$, как показано на рис. 94 слева. Угол β наклона касательной к кривой в заданной точке к оси y определяет величину ε_y. Например, в точке I

$$\varepsilon_y^{\text{I}} = (\operatorname{tg}\beta)\frac{k_3}{k_1} = 1{,}30 \cdot \frac{0{,}0023}{0{,}5} = 0{,}00598,$$

где $k_3 = 0{,}0023$ — масштаб по оси v.

3. Техника эксперимента. Так как при исследовании методом муаровых полос на поверхность образца наносится тонкая сетка, к поверхности образцов предъявляются высокие требования. Наиболее существенные из них — плоскостность и чистота поверхности (▽8—▽9). Нанесение системы параллельных полос на поверхность образца осуществляется переносом ее с эталона (изготовленного из неорганического стекла) с помощью контактной фотопечати.

При испытании на образец, который находится в захватах испытательной машины, накладывают эталон и закрепляют прижимами. Для контрастности муаровой картины эталон предварительно поливают вазелиновым маслом. Контролем правильности установки эталонной сетки («свидетеля») при этом является отсутствие муаровых полос. При нагружении образца возникает и визуально наблюдается описанная выше муаровая картина.

Иногда частота муаровых полос недостаточна для точного определения деформаций. Для повышения частоты муаровых полос при одном и том же деформированном состоянии объекта может быть применен так называемый дифференциальный муар. На образец наносится сетка с частотой $n_{обр}$, а в качестве сетки-свидетеля используется сетка с частотой $n_{св}$, несколько большей в случае сжатия и меньшей в случае растяжения образца. Таким образом, на деформированное поле, вызванное нагружением образца, накладывается однородное фиктивное «деформированное поле», вызванное несовпадением частот сеток. Действительная деформация при этом

$$\varepsilon = \varepsilon_{н.п} - \varepsilon_{фикт}, \tag{75}$$

где $\varepsilon_{н.п}$ — деформация, определенная непосредственно по муаровой картине (без учета несовпадения частот сеток), и

$$\varepsilon_{фикт} = \left(\frac{1}{n_{обр}} - \frac{1}{n_{св}}\right) n_{св}. \tag{76}$$

4. Определение напряжений. По известным деформациям ε_x и ε_y можно определить напряжения по формулам (см. формулы (9) на стр. 73)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x). \qquad (77)$$

Продолжим обработку муаровой картины перемещений u и v (см. рис. 94). Она была получена с применением дифференциального муара. Шаг полос сетки-свидетеля на правой стороне образца $d_{пр} = 0{,}020016$ *мм*, на левой $d_{лев} = 0{,}02296$ *мм*. По формуле (76), учитывая, что $d = 1/a_i$, получаем

$$\varepsilon_{x\,факт} = \frac{0{,}020000 - 0{,}020016}{0{,}020016} = -0{,}00080,$$

$$\varepsilon_{x\,факт} = \frac{0{,}02300 - 0{,}02296}{0{,}02296} = 0{,}00160.$$

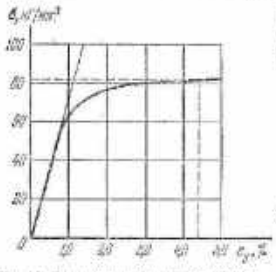


Рис. 93. Диаграмма растяжения материала образца.

Для точки *1* по формуле (75)

$$\varepsilon_x' = -0{,}00220 + 0{,}00080 = -0{,}00140,$$

$$\varepsilon_y' = 0{,}00598 - 0{,}00160 = 0{,}00438$$

и по второй из формул (77) при $E = 6700$ *кГ/мм²* и $\mu = 0{,}33$

$$\sigma_y' = \frac{6700}{1-0{,}33^2}(0{,}00438 - 0{,}33 \cdot 0{,}00140) = 28{,}5\ кГ/мм^2.$$

Для точки *3* аналогично найдем $\sigma_y'' = 53{,}0$ *кГ/мм²*.

На рис. 93 изображена диаграмма растяжения материала образца (высокопрочный алюминиевый сплав). Рассмотренные точки *1* и *2* находятся в области упругих деформаций. Точка *3* находится, по-видимому, в области пластических деформаций. Расстояние между соседними полосами по вертикали в точке *3* с учетом масштаба фотографии

$$L_3'' = 1{,}0 \cdot 0{,}5 = 0{,}5\ мм.$$

По второй из формул (77)

$$\varepsilon_{y\,изм}'' = \frac{0{,}023}{0{,}5} = 0{,}0460$$

и по формуле (75)

$$\varepsilon_y'' = \varepsilon_{y\,изм}'' - \varepsilon_{y\,факт} = 0{,}0460 - 0{,}0016 = 0{,}0444.$$

По диаграмме растяжения (см. рис. 93) видим, что полученная деформация ε_y'' является пластической. Так как точка *3* расположена у свободного края отверстия ($\sigma_x = 0$), имеем здесь одноосное

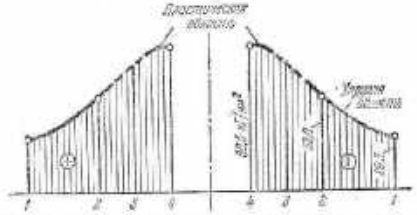


Рис. 95. Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении образца по центру отверстия.

напряженное состояние (см. работу 27, п. 1). Пользуясь непосредственно диаграммой растяжения, получаем при $\varepsilon_0 = 0{,}0144 = 4{,}44\%$ напряжение в точке *3* $\sigma_y'' = 80{,}5\ кГ/мм^2$. Эпюра напряжений σ_y для сечения *1—1* показана на рис. 95.

Работа 29. Исследование изгиба пластинки методом муаров

1. Общие сведения и теоретические данные. Наблюдение муаровых полос при изгибе пластинки производится с помощью установки, состоящей из экрана *1* (рис. 97), изогнутого по цилиндрической поверхности радиуса R, фотоаппарата с объективом *2* и фотопленкой *3* и исследуемой пластинки *4*. На поверхность экрана *1* параллельно ее образующей наносится система черных очень узких полосок с шагом d (растр), а гладкой поверхности испытуемой пластинки *4* придается отражательная способность. Экран имеет устройство для вращения его около оси, проходящей через центры объектива и пластинки.

Вначале на пленку *3* фотографируется отражение растра от ненагруженной пластинки (сетка-свидетель). При нагружении пластинка *4* изгибается и нормали N к ее поверхности (как и касательные к ней) по всех точках отклоняются. Отражение растра становится искаженным. Оно фотографируется снова на ту же пленку *3*. После проявления негатива получается совмещение полосок свидетеля с искаженными от изгиба пластинки полосками растра, что и дает муаровую картину. Но она получается иначе и от других деформаций, нежели в случае плоской задачи (работа 28).

До нагружения точка M_1, взятая на произвольной полоске A растра (см. рис. 97), отражается точкой K пластинки в точку K' негатива на неискаженной полоске A_0 (сетки-свидетеля).

Темные полоски A растра на негативе после его проявления становятся светлыми, но на рис. 97 ее отражение A_1 изображено темным, как оно получается на отпечатке с этого негатива. Поэтому и дальнейшем вместо негатива будем приводить отпечаток с истинным изображением отраженного растра.

После нагружения, когда пластинка изогнется, ее поверхность в точке K получит наклон на угол φ (нормаль N отклонится в положение N_1). Теперь в точке K' отпечатка (точнее, — негатива) отразится от K уже другая точка M_2 на другой полоске E растра. Отражением последней на отпечатке будет искаженная полоска E'.

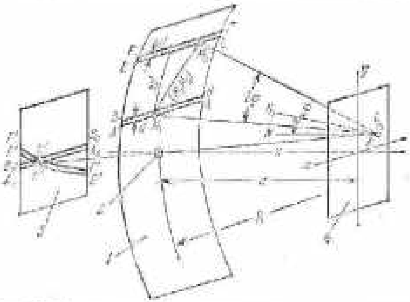


Рис. 97. Принципиальная схема установки для получения муаровых полос фотографированием: 1 — экран, 2 — объектив, 3 — негатив, 4 — испытуемая пластинка.

В общем случае угол $\varphi = \varphi(x, y)$ является пространственным. Его составляющую

$$\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x} = w_x$$

определяет проекция дуги (M_1M_2) на плоскость yOz, перпендикулярную к полоскам растра. Эта проекция равна расстоянию между центрами полосок A и E растра. Она измеряется числом n светлых промежутков, заключенных между A и E, умноженным на шаг d полосок, $AE = nd$.

Оказывается, что если отношение радиуса R экрана к расстоянию a (см. рис. 97) между пластинкой и объективом близко к $R/a \approx 3$, то для определения w_x можно с достаточной степенью точности пользоваться зависимостью

$$w_x = n\frac{d}{2a} = n\lambda. \qquad (78)$$

Аналогичная зависимость получается для составляющей $\varphi_y = \partial w/\partial y = w_y$. С этой целью необходимо повернуть экран вокруг оси z на 90° и расположить полоски растра перпендикулярно к плоскости xOz. Тогда проекция дуги между новыми точками M_{1y} и M_{2y} на плоскость xOz, равная новому числу m, светлых промежутков между новыми полосками A_y и E_y приводит к формуле

$$w_y = m\frac{d}{2a} = m\lambda. \qquad (79)$$

Точка K' (см. рис. 97) пересечения на отпечатке полоски A_1 с искаженной полоской E' определяет положение точки K пластинки, где угол наклона равен w_x.

Такой же наклон w_x получает поверхность пластинки в точке L (одной из смежных с точкой K), определяемой на отпечатке пересечением L' полоски B_1 свидетеля (смежной с A_1) с искаженной полоской F' (смежной с E'), потому что расстояние $BF = AE = nd$.

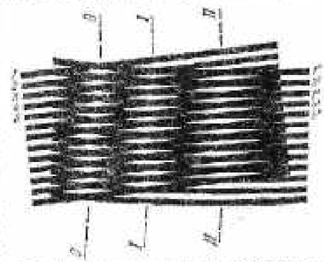


Рис. 98. Увеличенный отпечаток после двойного фотографирования.

Переходя подобным образом от полоски к полоске, найдем геометрическое место точек с одинаковыми наклонами поверхности пластинки $w_x = \text{const}$.

Линии одинаковых углов w_x проходят посредине муаровых полос. В этом легко убедиться на увеличенном изображении проявленного отпечатка (рис. 98) после двойного фотографирования (до и после нагружения) пластинки, отражающей растр. Пусть его полоски расположены перпендикулярно к оси y. Обозначим через 1, 2, 3, ... темные полоски сетки-свидетеля на отпечатке (они соответствуют темным же полоскам растра) и через 1', 2', 3', ... эти же полоски после нагружения (искаженные). Пересечения одноименных полосок свидетеля и искаженного растра 1 с 1', 2 с 2', 3 с 3', ... лежат на линии 0, проходящей по диагоналям светлых параллелограммов, образующих светлую муаровую полосу, т. е. по ее середине. Кроме того, между одноименными полосками число светлых промежутков $n = 0$ и, следовательно, по формуле (78) в этих точках $w_x = 0$. Это значит, что по линии 0 поверхность пластинки не получила наклона вдоль оси y.

Следующая светлая муаровая полоса проходит по линии 1, соединяющей пересечения полосок 2 с 1', 3 с 2', 4 с 3', ... между

этими полосками заключен один светлый промежуток (расстояние между их центрами везде равно шагу d), $n = 1$. Угол наклона поверхности пластинки к оси y в точках муаровой линии I по формуле (78) получается равным $w_x = 1\frac{d}{2a} - \lambda$.

Далее, муаровая линия II соединяет пересечения полосок 3 с $1'$, 4 с $2'$, 5 с $3'$, ..., между которыми заключены уже два светлых промежутка, $n = 2$ и $w_y = 2\frac{d}{2a} - 2\lambda$ и т. д. При переходе от одной муаровой полосы к соседней угол наклона w_y поверхности пластинки изменяется на величину

$$\lambda = \frac{d}{2a}, \tag{80}$$

которую принято называть ценой деления поля муаровых полос при изгибе. Число n светлых промежутков между пересекающимися на отпечатке полосками растра, равное числу шагов d, заключенному между точками M_1 и M_2 (см. рис. 97), представляет собой порядок муаровой полосы. Порядок светлых муаровых полос отпечатка выражается целыми числами: $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ Порядок темных муаровых полос отличается на половину и выражается дробными числами: $n = \pm 0{,}5$; $\pm 1{,}5$; $\pm 2{,}5, \ldots$

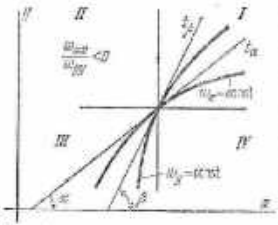


Рис. 99. Пересечение муаровых линий $w_x = const$ и $w_y = const$.

Все сказанное по поводу угла w_y полностью относится и к углу w_x, только для этого экран должен быть повернут на 90° и полоски растра расположены перпендикулярно к оси x. При этом цена деления остается прежней $\lambda = d/2a$, а порядок полос представит по формуле (79) новое число m, которое по-прежнему для светлых полос выражается целыми числами, а для темных — дробными.

Положение начальной (нулевой) муаровой полосы и знаки порядка полос устанавливаются из граничных условий и на основе их качественного анализа. Этот анализ выполняется по формулам, составленным для точки пересечения двух муаровых линий (рис. 99): $w_x = \frac{\partial w}{\partial x} = const$ и $w_y = \frac{\partial w}{\partial y} = const$ в следующем виде:

$$w_{xx}\cos\alpha + w_{xy}\sin\alpha = 0, \tag{81}$$

$$w_{yx}\cos\beta + w_{yy}\sin\beta = 0, \tag{82}$$

$$K = w_{xy}^2(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{ctg}\alpha - 1), \tag{83}$$

Здесь

$$w_{xx} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad w_{yy} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad w_{xy} = w_{yx} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

— кривизны поверхности пластинки; α и β — углы между касательными t_α и t_β и положительным направлением оси x; K — гауссова кривизна поверхности пластинки в данной точке.

Прогибы пластинки в какой-либо точке P прямой, параллельной оси y (или оси x), можно найти, пользуясь муаровой картиной, по формуле

$$w_P = \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{P}(w_{i-1,y} + w_{i,y})\,\Delta y_i, \tag{84}$$

где $w_{i,y}$ — угол наклона на i-й муаровой линии; Δy_i — отрезок, параллельный оси y между смежными муаровыми линиями $i-1$ и i.

Линию прогибов можно также получить графически методом построения веревочного многоугольника.

Для определения напряжений по муаровой картине нужно сначала определить кривизны w_{xx}, w_{yy} и w_{xy} путем численного или графического дифференцирования муаровых полос $w_x = const$ и $w_y = const$ или непосредственно по муаровой картине полос постоянных кривизн $w_{xx} = const$, $w_{yy} = const$ и $w_{xy} = const$.

В точках у поверхности пластинки напряжения определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Et}{2(1-\mu^2)}(w_{xx} + \mu w_{yy}), \\ \sigma_y &= -\frac{Et}{2(1-\mu^2)}(w_{yy} + \mu w_{xx}), \\ \tau_{xy} &= Gt w_{xy}. \end{aligned}\right\} \tag{85}$$

2. Проведение испытания. Для испытания взята стеклянная консольная пластинка в виде прямоугольного равнобедренного треугольника с катетами $l = 275$ *мм* и толщиной $t = 1{,}6$ *мм* (рис. 100). Пластинка защемлена по катету x в специальной раме, укрепленной на отдельном столе. На этой раме подвешены кронштейны с передвижными штифтами и мерными линейками для фиксации сил в любой точке пластинки. Испытуемая пластинка нагружается одной силой $P = 1$ *кГ* в точке $x_P = 262$ *мм* и $y_P = 238$ *мм*.

На раме другого стола закреплен экран при помощи кольцевого подшипника, который позволяет свободно вращать его вокруг своей оси и фотографировать пластинку с отражением растра в нужных положениях. Сзади экрана на столике той же рамы укреплен фотоаппарат. Принципиальная схема установки показана на рис. 97.

Для получения муаровых полос $w_y = const$ экран ставится вертикально, чтобы полоски растра были перпендикулярны к оси y

(горизонтальны), и производится двойное фотографирование его отражения от пластинки до и после ее нагружения силой P. На полученной фотографии появляются муаровые полосы $w_y = \text{const}$ (рис. 101, *а*). Затем экран поворачивается на 90°, чтобы полоски растра стали перпендикулярны к оси x (вертикальны). Повторяется двойное фотографирование пластинки с отражением растра до и после ее нагружения той же силой P. На новом снимке четко видны муаровые полосы $w_x = \text{const}$ (рис. 101, *б*).

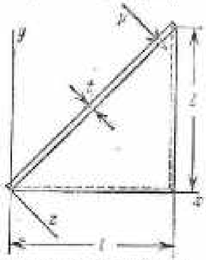


Рис. 100. Модель треугольной пластинки.

3. **Обработка результатов.** На снимках полей муаровых полос $w_y = \text{const}$ и $w_x = \text{const}$ нужно аккуратно провести строго посередине их муаровые линии и определить цену их деления. Она одинакова для обеих систем и равна $\lambda = d/2a = 0{,}00245$ *рад* для нашей пластинки. В целях получения более полной информации для проведения качественного анализа совмещают обе картины муаровых линий на одном чертеже (рис. 102, *а*).

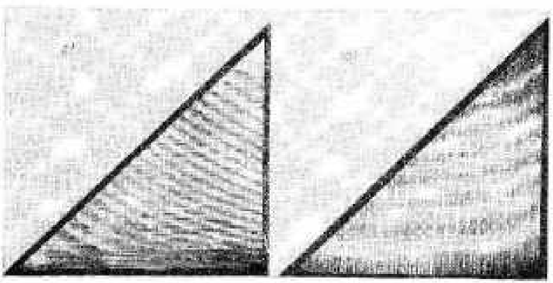


Рис. 101. Фотографии муаровых полос треугольной пластинки: *а* — муаровые полосы $w_y = \text{const}$, *б* — муаровые полосы $w_x = \text{const}$.

Для нашей пластинки получилось, что касательные l_β везде проходят через второй и четвертый квадранты системы осей x и y с началом на пересечении муаровых линий. Знаки $\sin\beta$ и $\cos\beta$ разные, и по формуле (82) находим, что по всей поверхности пластинки

кривизны w_{yy} и $w_{xy} = w_{yx}$ одного знака. Касательные l_α и l_β проходят в разных квадрантах, следовательно, произведение $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta$ везде отрицательно, а формулы (81) и (82) дают $w_{xx} = w_{yy} \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta$, т. е. знаки кривизны w_{xx} и w_{yy} должны быть разными. Кроме того, для такого положения касательных гауссова кривизна $K < 0$ или из формулы (83), $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{ctg}\alpha < 1$. Это указывает на то, что поверхность изогнутой пластинки получилась антикластической, т. е. одна часть поверхности располагается по одну сторону плоскости, касательной к ней в какой-либо точке, другая часть — по другую сторону этой плоскости.

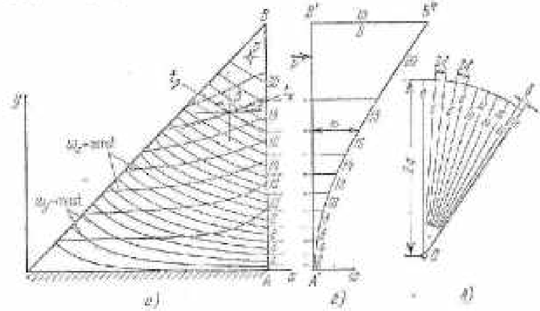


Рис. 102. Качественный анализ и определение прогибов по картине муаровых полос: *а* — совмещение муаровых линий $w_y = \text{const}$ и $w_x = \text{const}$, *б* — кривая прогибов по линии AB, *в* — пучок лучей $w_y = n\lambda$.

Знак кривизны w_{yy} выбираем положительным для данного случая из условия получения положительного прогиба в направлении оси z от нагрузки P (см. рис. 100).

4. **Прогибы пластинки.** Применим графическое построение кривой прогибов, например, края AB (рис. 102, *а*), параллельного оси y. Для этого нужно воспользоваться картиной муаровых линий $w_y = \text{const}$. Из условия защемления катета x и рассмотрения картины муаровых полос устанавливаем, что линия $w_y = \text{const}$ нулевого порядка, $n = 0$, пересекает прямую AB в точке A. К точке B порядок каждой линии увеличивается на единицу, т. е. на каждой линии углы наклона поверхности пластинки к оси y в этих местах прибавляется на цену деления $\lambda = d/2a$.

Ввиду большого числа муаровых линий $w_y = \text{const}$ будем принимать во внимание из них только линии четных порядков. Они разбивают край AB на отдельные отрезки, которые делим пополам

и сносим средние точки на прямую $A'B'$, представляющую собой проекцию пластинки на плоскость zOy (рис. 102, *б*). От этой проекции на уровне средних точек проводим прямые в направлении прогиба w. Рядом в выбранном масштабе строим пучок лучей (рис. 102, *в*). Для этого по дуге радиуса $2a$ откладываем участки $2d$, равные удвоенному шагу растра (соответствующие четным линиям), и соединяем их границы с полюсом O. Угол между смежными лучами составляет цену деления четных муаровых линий, равную $2k$.

Так как в точке A поверхность пластинки вследствие заделки не наклоняется, нулевой луч пучка проводим вертикально (по оси y) и параллельно ему проводим от точки A' нулевой участок кривой прогибов до горизонтали, идущей на уровне середины отрезка $A-2$ края пластинки. Следующие участки кривой продолжаем по цепочке по правилам построения пересечного многоугольника. Нумерацию порядка муаровых линий, соответствующих им участков кривой и лучей пучка для наглядности сохраняем одинаковыми. Например, порядку 12 муаровой линии соответствует наклон участка *12* кривой прогибов, проведенного параллельно лучу *12* пучка от конца участка *10* до начала участка *14*. Последний участок, *20*, получает приращение угла наклона только на величину $d/2a$. Построенная кривая $A'B''$ определяет величины прогибов края AB пластинки в выбранном масштабе.

Так же строятся линии прогибов по любой прямой вдоль оси y или вдоль оси x.

Прогиб любой точки K на прямой AB можно определить и численно по формуле (84). Для этого нужно измерить все отрезки Δy_i, на которые делит муаровые линии $w_y = \text{const}$ прямую AB, и определить углы наклона $w_{i,y} = nk$ на каждой муаровой линии. После подстановки их значений в формулу (84) в нашем случае получаем

$$w_K = \lambda\,(0{,}5\cdot\Delta y_1 + 1{,}5\cdot\Delta y_2 + 2{,}5\cdot\Delta y_3 + \ldots).$$

Работа 30. **Электротензометрирование**

1. Электротензометр. В настоящее время широко применяется тензометрирование с помощью проволочных электродатчиков. Особенно удобны электродатчики для изучения быстро протекающих деформаций (при ударе, колебаниях, внезапной потере устойчивости и т. п.), когда тензометры, обладающие инерцией, неприменимы.

Устройство проволочного электротензометра основано на изменении электрического сопротивления проволоки вследствие ее растяжения или сжатия [1]. Основной частью прибора является

[1] Существуют и другие типы электротензометров: емкостный, индукционный, пьезоэлектрический (см. § 8) и др.

тонкая, обычно манганиновая или константановая [1], проволока диаметром 0,015—0,03 *мм*, уложенная несколькими параллельными петлями (рис. 103), называемая датчиком электротензометра. Длина s петли называется базой датчика. Датчик наклеивают на испытываемый образец, причем между образцом и проволокой прокладывают изолирующий слой бумаги толщиной 0,02—0,05 *мм*.

При растяжении или сжатии образца проволока изменяет свое сопротивление, что может быть измерено при помощи мостовой схемы с чувствительным гальванометром.

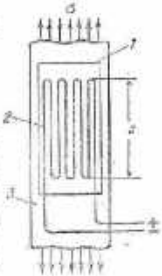


Рис. 103. Схема проволочного электродатчика: 1 — бумажная изоляция, 2 — датчик, 3 — образец.

Деформация датчика и изменение его сопротивления связаны линейной зависимостью

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma}\,\frac{\Delta r}{r},$$

где ε — относительное удлинение; r — сопротивление датчика, обычно равное 100 или 200 *ом*; Δr — приращение сопротивления датчика, соответствующее деформации ε; γ — безразмерная величина, называемая чувствительностью материала датчика, более или менее постоянная для данного материала (для константановой проволоки $\gamma = 1{,}7 \div 2{,}1$).

Величина γ может быть определена из опыта. Наклеив датчик на образец, прикрепляют к этому же образцу какой-либо другой тензометр. Нагружая затем образец, замеряют приращение Δr сопротивления датчика и удлинение ε образца по тензометру. В результате измерений вычисляют

$$\gamma = \frac{\Delta r/r}{\varepsilon}.$$

Датчики описанного типа применяются при температуре от —40 до 70°.

2. Балансировка мостика. На рис. 104 показана схема подключения датчика A к мостику Уитстона. Датчик является одним плечом мостика; другое плечо составляет такой же датчик B, называемый компенсационным, наклеенный на отдельную

[1] Константан — сплав меди (60%) и никеля (40%); манганин — сплав меди (84%), никеля (4%) и марганца (12%). Сопротивление обоих сплавов, особенно последнего, мало зависит от температуры. Однако сильных источников тепла всегда стараются избегать вследствие разницы в коэффициентах теплового расширения датчика и испытываемой детали. Нельзя допускать во время опыта освещения датчика солнцем или обогревания лампой.

пластинку, сделанную из того же материала, что и испытываемый образец. Сопротивление компенсационного датчика должно равняться сопротивлению активного датчика A, и температурные условия должны быть одинаковыми для обоих датчиков. Два остальные плеча мостика представляют собой также равные сопротивления и обычно равные сопротивлению r датчика. В таком состоянии мостик является сбалансированным, и при пропускании через него тока последний идет только по плечам мостика, а гальванометр G, включенный в измерительную диагональ мостика, не покажет тока.

Практически не удается изготовить плечи мостика вполне равного сопротивления. Поэтому смонтированный мостик обычно подвергают уточняющей балансировке; пластинку, на которую наклеен

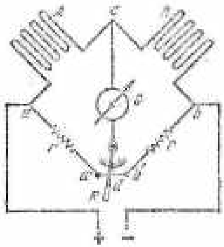


Рис. 104. Простейшая схема электротензометра: A — активный (рабочий) датчик, B — компенсационный датчик, r — постоянные сопротивления, G — гальванометр, R — ручка реохорда, 3 — точка контакта ручки с реохордом.

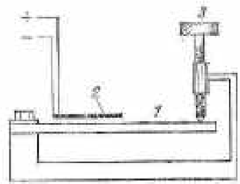


Рис. 105. Приспособление для балансировки мостика: 1 — металлическая консоль, на которую наклеивается датчик; 2 — датчик B; 3 — винт для деформации консоли.

компенсационный датчик, защемляют на одном конце (рис. 105), а свободный конец образовавшейся консоли сгибают вниз или вверх при помощи винта 3 (чем изменяется сопротивление компенсационного датчика) до полного сбалансирования моста. Регулятор такого типа может изменять сопротивление датчика на 0,5%, т. е. около 0,5—1,0 ом.

Нагружая испытываемый образец и, следовательно, деформируя наклеенный на образец датчик A, мы заметим присутствие тока в гальванометре; разбалансировка мостика обусловливается тем, что сопротивление активного датчика A становится не равным неизменившемуся сопротивлению компенсационного датчика B. Изменение отсчета по гальванометру пропорционально деформации образца.

Чаще однако, вместо того чтобы измерять изменение силы тока в мостике, измеряют пропорциональное ему изменение сопротивлений плеч ad и bd, которое должно быть достигнуто посредством реохорда a′b′ для приведения мостика снова в балансированное состояние.

У рычага реохорда R имеется дуговая шкала. На опыте можно установить, какому относительному удлинению образца соответствует одно деление шкалы. Эта величина относительного удлинения называется ценой деления измерителя. В случае линейного напряженного состояния приращение напряжения определяется по формуле

$$\sigma = cE\Delta n$$

где Δn — разность отсчетов по шкале гальванометра, c — цена деления шкалы измерителя, E — модуль упругости материала испытываемой детали.

Цена деления прибора зависит от чувствительности гальванометра. Применяя зеркальный гальванометр, можно получить $c = 10^{-6}$.

Таблица 47

№ датчика	n — отсчеты по датчикам: при нагрузке P_1	n — отсчеты по датчикам: при нагрузке P_2	Разность отсчетов Δn	$\beta = \Delta n$ (для датчиков 1—3); $\beta = \frac{\Delta n}{1-\mu}$ (для датчиков 4—7)	Приращение напряжения $\Delta\sigma = \beta\Delta\sigma$	Среднее приращение напряжения (для датчиков 1 и 8, 2 и 5, 6 и 7)
1						
8						
9						
3						
4						
2						
5						
6						Среднее по несходящим измерениям
7						

Примечание. Размещение датчиков см. на рис. 47.

Однако практически более удобными являются менее чувствительные гальванометры в сочетании с усилителями тока. Измеритель с электронным усилителем дает возможность измерить относительное удлинение порядка 10^{-6}, что соответствует напряжению в стали 20 *кГ/см*^{2}.

3. **Проведение опыта.** Пусть, например, опыт, описанный в работе 14, проводится с электротензометрами.

Запись в журнале при этом ведется по форме, приведенной в таблице 41, где через *c* обозначена цена деления шкалы измерителя.

После проведения опыта следует вернуться к начальной нагрузке и проверить начальные отсчеты.

Обработка результатов опыта помещена в описании работы 14.

ЧАСТЬ II

ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

ГЛАВА V

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 1. Штангенциркуль и микрометры

Для измерения наружных и внутренних размеров деталей применяют штангенциркули и микрометры.

Штангенциркули изготовляются различных размеров. В лабораторной практике применяются штангенциркули с пределами измерения от 0—125 до 0—500 *мм*.

Штангенциркуль (рис. 106) для измерения в пределах 0—125 *мм* состоит из штанги *2*, оканчивающейся губками *1* и *3*, и свободно передвигаемой по штанге рамки *4* с такими же губками.

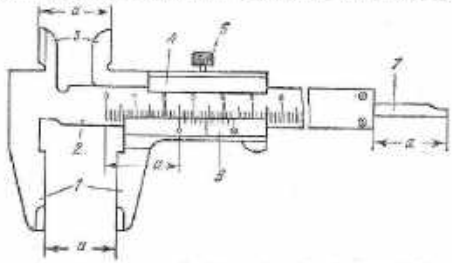


Рис. 106. Штангенциркуль 0 — 125 *мм*: *1* — губки, *2* — штанга, *3* — губки, *4* — рамка, *5* — стопор, *6* — нониус, *7* — линейка.

На штанге *2* имеется шкала с делениями от 0 до 125 *мм* через один миллиметр, а на рамке нанесены 10 делений нониуса *6*, позволяющего делать отсчеты с точностью до 0,1 *мм*. На тыльной стороне штангенциркуля к рамке *4* прикреплена линейка *7*, скользящая в канавке штанги и предназначенная для измерения глубин. Рамка *4* снабжена стопорным винтом *5*, которым она закрепляется на штанге неподвижно, при необходимости получить наиболее размера.

Измерение наружных размеров производится между губками 1, для чего рамку нужно передвинуть до соприкосновения внутренних граней губок с деталью, располагая штангенциркуль строго в плоскости измерения. Внутренние размеры определяются положением наружных граней губок 3 при упирании их во внутренние поверхности детали. Для измерения глубины нужно конец линейки 7 упереть в дно детали, а торец штанги — в ее верхнюю грань.

Число целых миллиметров размера и отсчитывается по шкале штанги по нулевому штриху нониуса 6; число десятых долей миллиметра определяется тем штрихом нониуса, который окажется совмещенным с каким-либо штрихом шкалы.

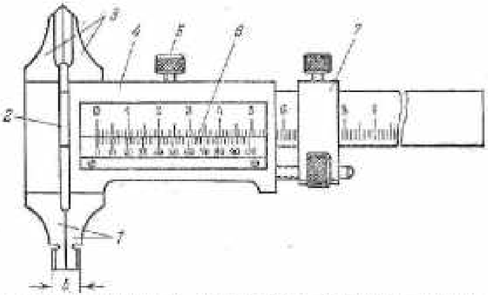


Рис. 107. Штангенциркуль 0—300 мм: 1 — губки для измерения, 2 — штанга, 3 — губки для разметки, 4 — рамка, 5 — стопор, 6 — нониус, 7 — дополнительная рамка.

Штангенциркули с пределами измерения до 0—300 мм изготовляются с двусторонним по отношению к штанге расположением губок: губки 1 для измерения и 3 — для разметки (рис. 107). Эти штангенциркули имеют дополнительную рамку 7 со своим стопорным винтом и специальным микрометрическим винтом для продольной подачи рамки 4 при точной установке размера. Шкала нониуса 6 нанесена на отдельной линейке, прикрепленной к рамке 4 винтами, что допускает продольную регулировку нониуса. Эта шкала имеет 50 делений и поэтому точность измерения достигает 0,02 мм. Минимальный возможный для измерения внутренний размер, равный расстоянию b между наружными краями сомкнутых губок, маркирован на одной из них. Величину b нужно добавлять к отсчету по нониусу при измерении внутренних размеров.

Штангенциркули других размеров с верхним пределом измерения более 300 мм отличаются от описанных тем, что имеют односторонние губки только для измерения.

М и к р о м е т р ы предназначены для измерения наружных размеров с точностью до 0,01 мм.

Микрометр (рис. 108) состоит из скобы 1, на одном конце которой укреплена пятка 2, а на другом — гильза 5. Внутри гильзы передвигается микрометрический винт 3, приводимый в движение барабаном 6. На гильзе нанесена продольная черта и поперечные штрихи через 1 мм. По штрихам, расположенным от продольной

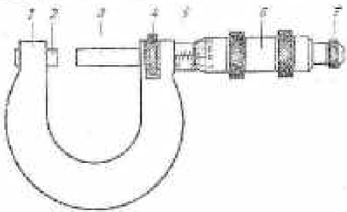


Рис. 108. Микрометр: 1 — скоба, 2 — пятка, 3 — микрометрический винт, 4 — стопор, 5 — гильза, 6 — барабан, 7 — головка с трещоткой.

черты вниз и отмеченным цифрами через каждые 5 мм, производится отсчет целых миллиметров. Штрихи, проведенные от продольной черты вверх, делят пополам каждый миллиметр нижней шкалы.

Барабан 6 заканчивается конусом, по окружности которого расположена шкала из 50 равных делений. Шаг резьбы микрометрического винта равен 0,5 мм. Следовательно, при одном обороте барабана 6 микрометрический винт 3 и барабан получают продольное перемещение относительно гильзы на 0,5 мм, а шкала конического края барабана проходит все 50 делений. Таким образом, цена одного деления шкалы барабана составляет 0,01 мм.

Сотые доли миллиметра до величины 0,5 мм прочитываются по шкале конического края барабана 6 непосредственно, если ближайшим к этому краю является нижний поперечный штрих гильзы 5. Если же у края барабана 6 находится верхний поперечный штрих гильзы, как показано на рис. 108, то к числу сотых миллиметра, прочитанных по шкале барабана, нужно добавлять 0,5 мм. Например, на рис. 108 микрометр показывает, что измеряемое расстояние равно 5,51 мм.

У микрометров с нижним пределом измерения, равным нулю, при соприкосновении между собой измерительных поверхностей

пятки и винта конический край барабана совпадает с нулевым штрихом гильзы, а нулевой штрих шкалы барабана — с продольной чертой гильзы. Если нижний предел измерения микрометра отличен от нуля, то подобное совпадение нулевых штрихов соответствует расстоянию между измерительными поверхностями пятки и винта, равному этому нижнему пределу, к которому нужно добавлять отсчет, прочитанный по шкалам микрометра.

Полное измерительное перемещение микрометрического винта всех микрометров с верхним пределом измерения до 300 *мм* включительно составляет 25 *мм*. Микрометры с верхним пределом измерения более 300 *мм* имеют измерительное перемещение винта в 100 и 200 *мм*.

Барабан 6 на свободном конце снабжен головкой 7 с трещоткой. При вращении головки 7 барабан вращается до тех пор, пока деталь не окажется зажатой между измерительными поверхностями винта и пятки с определенным давлением, после чего головка 7 проворачивается с трещоткой. Этим обеспечивается постоянное измерительное усилие микрометрического винта и исключается влияние деформаций детали на точность измерений.

Стопорный винт 4 предназначен для неподвижного закрепления микрометрического винта при заданном размере.

Существуют специальные микрометры с циферблатом, предназначенные главным образом для измерения толщины листов и лент. Такие микрометры изготовляются со следующими пределами измерений: 0—5, 0—10 и 0—25 *мм*. Отличительной особенностью этих микрометров является наличие подвижной стрелки, связанной с барабаном, и неподвижного циферблата, укрепленного на скобе вместе с гильзой. Циферблат заменяет шкалу барабана; стрелка, вращаясь вместе с барабаном, указывает на циферблате сотые доли миллиметра. Диаметр циферблата значительно превосходит диаметр барабана, и поэтому деления, отмечающие сотые доли миллиметра, крупнее на циферблате, чем на шкале барабана, что позволяет на глаз определять и тысячные доли миллиметра.

§ 2. Индикатор для измерения линейных смещений[1])

Устройство индикатора для линейных измерений показано схематически на рис. 109. Штифт *1* прижимается пружиной к поверхности 2, перемещения которой в направлении штифта требуется измерить. Круглая коробка *3* индикатора с укрепленной в ней системой шестерен и циферблатом поддерживается неподвижно особым штативом. Перемещения упорной поверхности 2 вызывают перемещения штифта *1*, который вращает при этом стрелку *4* посредством зубчатых передач. Одно деление циферблата соответствует

1) Другое название — мессура.

0,01 *мм* перемещения штифта, а полный оборот стрелки соответствует 1 *мм* перемещения штифта. Перемещение штифта непосредственно отсчитывают в миллиметрах по линейной шкале от 0 до 10 *мм*.

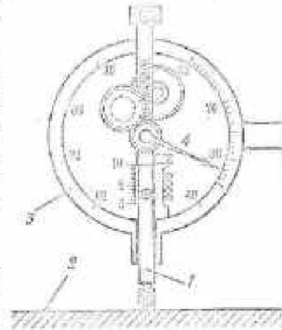


Рис. 109. Схема индикатора для линейных измерений: 1 — штифт, [illegible]

Индикаторы широко распространены в практике линейных измерений. Существуют индикаторы описанного типа, имеющие точность 0,001 *мм*.

Часто индикатор является составной частью более сложного прибора, например динамометра.

§ 3. Измерители углов закручивания (торсиометры)

1. Торсиометр зеркальный. Рассмотрим устройство зеркального торсиометра (рис. 110).

На вале устанавливают две струбцинки, плотно охватывающие вал, и на каждой струбцинке укрепляют зеркало *1*, на которое направляется зрительная труба 3. Рядом с трубой помещается вертикальная линейка, обращенная шкалой к зеркалу. Зеркало

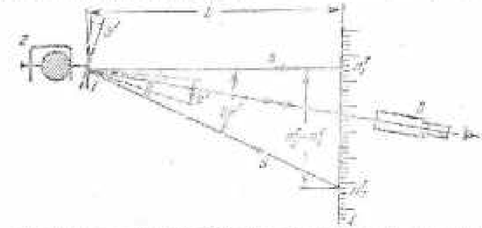


Рис. 110. Схема зеркального торсиометра: 1 — зеркало, 2 — струбцинка, несущая зеркало, 3 — зрительная труба, 4 и 5 — линейка, видимая в трубе при различных положениях зеркала.

устанавливают так, чтобы в трубу можно было видеть изображение линейки, по которому берется отсчет. Пусть отсчет до нагруже-

ния образца равен n_1^1. После нагружения образца и поворота струбцинки на угол δ^1 прочитывают отсчет n_2^1. Угол между соответствующими лучами 4 и 5 равен (как видно из чертежа) $2\delta^1$. Так как угол δ^1 мал, то можно принять, что $2\delta^1 = (n_2^1 - n_1^1)\frac{1}{L}$, где L — расстояние между зеркалом и линейкой. Отсюда $\delta^1 = (n_2^1 - n_1^1)\frac{1}{2L}$.

Так же определяется и угол поворота $\delta^{II} = (n_2^{II} - n_1^{II})\frac{1}{2L}$ другой струбцинки. Разность $\delta^{II} - \delta^I$ равна углу $\Delta\theta$ закручивания образца на длине l между струбцинками:

$$\Delta\theta = [(n_2^{II} - n_1^{II}) - (n_2^I - n_1^I)]\frac{1}{2L} = \frac{\Delta n}{2L}, \qquad (86)$$

где $\Delta n = (n_2^{II} - n_1^{II}) - (n_2^I - n_1^I)$ — приращение разности отсчетов по линейкам.

2. Торсиометр с подвижной шкалой. В случае податливой заделки, как, например, на жалобе, описанной в § 16, весь образец в процессе испытания поворачивается на значительный угол. В этом случае следует пользоваться торсиометром с подвижной шкалой.

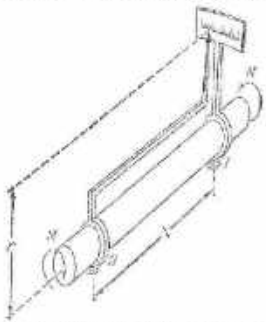


Рис. 111. Схема измерения угла поворота сечения II вала относительно сечения I торсиометром с подвижной шкалой.

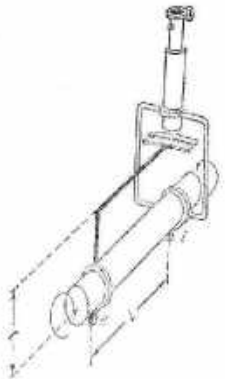


Рис. 112. Торсиометр с подвижной шкалой: 1 — микроскоп.

Пусть требуется определить угол поворота сечения II вала (рис. 111) относительно сечения I. В этих сечениях располагают обжимающие кольца. К одному из них крепится линейная (или

угловая) шкала в плоскости, перпендикулярной к оси образца. К другому кольцу крепится стрелка, конец которой выходит к названной шкале. При закручивании образца конец стрелки покажет изменение отсчета по шкале. Разделив приращение отсчета на длину r стрелки (считая от оси вала), получим искомый угол закручивания вала между сечениями I и II.

Если деформации малы, визирным приспособлением может служить оптическая труба — микроскоп; на рис. 112 показан такой угломер: к кольцу I прикреплен микроскоп, а к кольцу II — шкала, которая при закручивании образца перемещается перед объективом микроскопа.

Часто вместо микроскопа можно применить индикатор, как это показано на рис. 113. Индикатор замерит линейное смещение с точностью до 0,01 *мм*. Пружина индикатора может несколько деформировать палец, в который упирается штифт индикатора. Поэтому нельзя допускать обратных движений при снятии отсчетов.

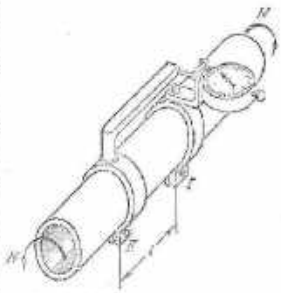


Рис. 113. Торсиометр с индикатором.

§ 4. Инклинометры

1. Инклинометр зеркальный. Инклинометром называется приспособление или прибор, предназначенный для измерения угла поворота сечения балки при изгибе. Этот угол можно считать равным углу наклона оси балки (отсюда и название прибора — инклинометр, что означает наклономер).

Существуют инклинометры различных систем.

Зеркальные инклинометры устраиваются подобно зеркальным угломерам, применяемым для измерения угла закручивания (см. § 3). Зеркало 1 (рис. 110) неподвижно укрепляют в сечении балки, где требуется измерить угол поворота ϑ. До нагружения балки в зеркале прочитывают посредством трубы отсчет n_1 по шкале. После нагружения балки и поворота сечения, а следовательно, и зеркала на угол ϑ отсчет по шкале изменится; обозначим новый отсчет через n_2. Разность отсчетов $\Delta n = n_2 - n_1$, деленная на расстояние L между зеркалом и шкалой, дает угол 2ϑ, т. е.

$$\vartheta = \frac{\Delta n}{2L}.$$

2. Инклинометр уровенный. Устройство уровенного инклинометра показано схематически на рис. 114. Цилиндрический уровень 1 вмонтирован на массивной металлической подставке 2. Конец *А* уровня неподвижно оперт на эту подставку. Конец *В* может подниматься либо опускаться при помощи микрометрического винта 3. Поворот гайки винта отмечается по шкале, нанесенной на гайке. Поворот гайки на одно деление соответствует изменению угла наклона оси уровня на 0,0001 радиана. Инклинометр неподвижно устанавливают на поясе балки, причем ось уровня должна быть параллельна оси балки. Нагрузив балку, пузырек уровня устанавливают с помощью винта 3 в среднее положение, а по шкале на гайке винта берут отсчет. При новой нагрузке снова приводят пузырек к среднему положению и снова берут отсчет по шкале и т. д. Базу инклинометра (длину подставки) можно уменьшить, применяя дополнительную подставку меньшего размера.

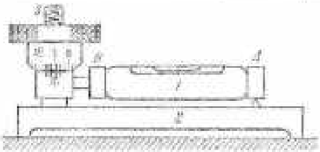


Рис. 114. Инклинометр уровенный: 1 — цилиндрический уровень, 2 — подставка, лежащая на испытываемой балке, 3 — подвижный микрометрический винт уровня с делениями на головке.

3. Инклинометр стрелочный. В случае гибкой балки удобно простое устройство, показанное на рис. 115. К балке жестко

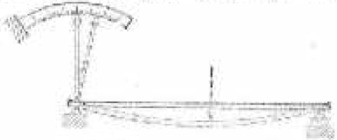


Рис. 115. Инклинометр стрелочный.

прикреплена стрелка. При нагружении балки стрелка поворачивается вместе с балкой и на неподвижной дуговой шкале указывает угол поворота данного сечения балки.

Указанным способом измеряют углы поворота сечений балки, расположенных над опорами, что обычно и требуется.

§ 5. Делительная машина

Условия испытаний во многих случаях требуют предварительного деления образцов на равные участки, а иногда даже нанесения сетки делений. Деление образцов на равные участки выполняется на специальной делительной машине (рис. 116).

Делительная машина состоит из небольшой полой станины 3, подвижных салазок 5, скользящих по станине и ее направляющих в виде продольных пазов с прокладками пластинок жести, механизма для передвижения салазок в продольном направлении и механизма для передвижения в поперечном направлении резца 4, наносящего деления на образец. В нижней части салазок имеется зубчатая рейка 13, находящаяся в зацеплении с собачкой 9 механизма передвижения салазок. Шаг зубцов рейки равен 5 *мм*.

Круглый или плоский образец располагают на салазках между съемными центрами, фиксирующими его в строго продольном направлении, и зажимными винтами 7 прикрепляют его неподвижно к салазкам. Салазки с укрепленным на них образцом передвигают

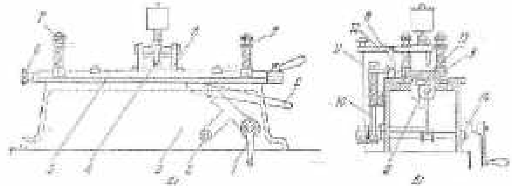


Рис. 116. Делительная машина: *а* — фасад, *б* — разрез. 1 — рукоятка, 2 — неподвижная ось, 3 — станина, 4 — резец, 5 — салазки, 6 — регулировочный винт, 7 — зажимные винты, 8 — рычаг, 9 — собачка, 10 и 11 — тяги, 12 — эксцентрик, 13 — зубчатая рейка, 14 — муфта.

вправо, предварительно приподняв вверх выступающую из станины часть собачки 9 и освободив ее этим от зацепления с зубчатой рейкой салазок. Установив салазки 5 так, чтобы начало делений образца находилось под резцом 4, опускают собачку 9 и передвигают салазки до упора в нее одного из зубцов рейки. Затем точно под резцом устанавливают точку на образце, выбираемую для нанесения начального деления, что выполняется регулировочным винтом 6, при вращении которого салазкам сообщается небольшое поступательное движение независимо от зубчатой рейки 13.

Механизм передвижения салазок состоит из рукоятки 1, двух эксцентриков, насаженных на ось рукоятки внутри станины, и фасонной качалки с собачкой 9. Качалка одним концом надета на неподвижную ось 2, другим — шарнирно соединена с собачкой 9, а третьим — упирается в один из эксцентриков внутри станины. При вращении рукоятки 1 эксцентрик толкает качалку, а собачка 9 передвигает салазки влево на один или два зубца в зависимости от того, в какой из двух эксцентриков упирается качалка. При упирании качалки в передний эксцентрик салазки передвигаются влево на один зубец, при упирании в задний — на два зубца. Под

рукояткой на ее оси имеется муфта *14* для переключения эксцентриков. Качалка все время удерживается прижатой к эксцентрику при помощи пружины и после передвижения салазок влево возвращается в исходное положение, увлекая за собой собачку *9*, которая приходит в зацепление с очередным зубцом рейки.

Таким образом, при каждом обороте рукоятки *1* образец передвигается в продольном направлении на один шаг, равный 5 или 10 *мм* по желанию.

На оси рукоятки *1* снаружи тыльной стороны станины насажены еще два эксцентрика, принадлежащих механизму для перемещений резца *4*. Первый эксцентрик, смежный с задней стенкой станины, предназначен для передвижения резца перпендикулярно к образцу при нанесении делений, а второй — для подъема резца при его обратном ходе.

При вращении рукоятки *1* первый наружный эксцентрик нажимает на рычаг, насаженный на неподвижную ось *2* снаружи станины, и посредством тяги *10* опускает вниз хвостовую часть вертикальной рамки *8*. Рамка имеет неподвижную ось вращения, прикрепленную к стойкам на верхней поверхности станины. Отклоняясь от вертикального положения вследствие опускания своей хвостовой части, рамка увлекает коромысло *12* с резцом *4*, расположенное на верхней оси рамки. Этот резец под тяжестью груза, имеющегося на коромысле, прочерчивает на образце поперечную риску. Тяга *10* имеет на верхнем конце резьбу и гайку для регулирования хода резца и винтовую пружину, возвращающую рамку *8* и резец *4* в исходное положение.

Второй наружный эксцентрик, вращаясь вместе с осью рукоятки *1*, нажимает на конец второго рычага, надетого на неподвижную ось *2* в плоскости эксцентрика. Другим концом этот рычаг соединен с тягой *11*, висящей на заднем плече коромысла *12*. Таким образом, нажатие второго эксцентрика на его рычаг вызывает подъем резца.

Начало подъема резца совпадает с началом его возвращения в исходное положение и с началом продольного перемещения салазок *5* на один шаг влево. Когда эти движения заканчиваются и резец под тяжестью груза снова упирается в образец, начинает действовать первый наружный эксцентрик, вызывая отклонение рамки *8* и перемещение резца по образцу. Одновременно фасонная качалка внутри станины под действием пружины начинает движение вправо, и собачка *9* переходит в новое зацепление с зубчатой рейкой *13* через один или два зубца. Последовательность движений резца и салазок остается все время неизменной и может легко регулироваться, потому что все четыре эксцентрика, вызывающие движение, расположены на одной оси.

Иногда разметочные риски, нацарапанные резцом, получаются настолько глубокими, что разрушение образца происходит в их плоскости. Для того чтобы избежать влияния рисок на разрушение

образца, его поверхность предварительно зачерняют, протерев ее крепким раствором медного купороса. Груз, давящий на резец, снимают с коромысла, а резец поворачивают тыльной стороной по направлению движения, чтобы он не царапал образец своим острием. Тогда на зачерненной поверхности образца получаются риски, совершенно не изменяющие прочности образца, но достаточно ясные и тонкие.

§ 6. Тензометры рычажные

1. Тензометр Алстова. Устройство тензометра Алстова показано на рис. 117. Это — тензометр рычажной системы, как и описанный в работе 5 тензометр системы Гуггенбергера. Но вместо стрелки здесь имеется микрометрический винт с лимбом *1*, по которому и производятся отсчеты.

Планка *2* прижимается к поверхности *3* испытываемого образца при помощи струбцинки, не изображенной на рисунке. Планка имеет неподвижную опору *4* и подвижную опору *5*. Опору *4* заранее устанавливают на определенном расстоянии *s* от опоры *5*. Расстояние *s* — база тензометра; максимальное значение базы без удлинителя составляет 60 *мм*. Опора *5*, выполненная в виде призмы, в случае деформации поверхности испытываемого образца будет поворачиваться. Вместе с призмой поворачивается и прикрепленный к ней рычажок *6*. Отношение высоты призмы к длине рычажка равно 1 : 5. Следовательно, перемещение верхнего конца рычажка равно замеряемому удлинению, увеличенному в пять раз. Это перемещение определяется при помощи микрометрического винта по разности отсчетов на лимбе *1* до и после деформации.

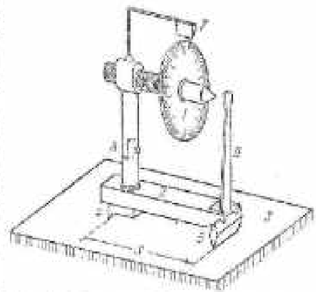


Рис. 117. Тензометр Алстова: *1* — лимб винта, *2* — планка, *3* — испытываемая деформирующаяся образец, *4* — неподвижная опора, *5* — подвижная опора в виде призмы, *6* — рычажок, *7* — указатель отсчета на лимбе, *8* — стойка, несущая [illegible].

Отсчеты на лимбе берут по неподвижному указателю *7*. Для того чтобы взять отсчет, нужно, поворачивая рукой лимб, довести заостренный конец винта до соприкосновения с рычажком *6*. Момент контакта определяется замыканием электрической цепи;

при этом вспыхивает лампочка (электропроводка на рис. 117 не показана). Ток напряжением 4—6 в подводится к микрометрическому винту, а отводится через рычажок 6; в стойке 8, поддерживающей винт, имеется изолирующая прокладка.

После взятия отсчета следует отвести винт обратно от рычажка, чтобы обеспечить ему возможность свободного перемещения при удлинении образца. Этого делать не нужно, если образец при испытании не удлиняется, а укорачивается.

Шаг микрометрического винта равен 0,5 *мм*. Лимб разделен на 100 делений. Следовательно, поворот лимба на одно деление означает перемещение винта вдоль его оси на 0,005 *мм*. Это соответствует, как выше указано, удлинению образца на 0,001 *мм*. Таким образом, цена деления шкалы тензометра Аистова равна 0,001 *мм*.

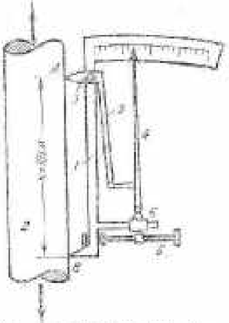


Рис. 118. Тензометр МИЛ. 1 — планка, 2 — образец, 3 — коленчатый рычаг, 4 — стрелка, 5 — ползун, 6 — винт, регулирующий положение стрелки.

2. Тензометр МИЛ[1]. Тензометр МИЛ служит для измерения удлинения образца при статическом нагружении. От описанного в работе 2 зеркального тензометра он отличается тем, что не требует применения оптических труб. Шкала отсчетов здесь находится непосредственно на приборе.

Схема прибора изображена на рис. 118. Планка *1* притягивается к образцу *2* пружинной струбцинкой, не показанной на рис. 118. Конец *B* планки имеет неподвижную опору — зубец, а у конца *A* шарнирно прикреплен коленчатый рычаг *3*. Острием короткого плеча рычаг опирается на образец и является подвижной опорой для планки *1*. Длина *s*, равная расстоянию между точками опоры планки, — база тензометра; она обычно равна 10 *см*. При нагружении образца и, следовательно, изменении *s*, коленчатый рычаг *3* вращается вокруг шарнира. Длинное плечо рычага связано со стрелкой *4*, и поворот рычага вызывает перемещение стрелки.

Отсчеты делают по верхнему концу стрелки на дуговой равномерной шкале. Увеличение прибора — около 500—600. Цена деления шкалы устанавливается тарировкой и указывается в паспорте прибора.

[1] Сокращенное название по фамилиям конструкторов тензометра Ю. Н. Морозова и А. П. Ильина.

Нижний конец стрелки шарнирно прикреплен к ползуну *5*, положение которого может быть изменено с помощью винта *6*. Этим пользуются для установки стрелки на определенный отсчет по шкале. На рис. 118 показана половина прибора. Прибор состоит из двух тензометров, расположенных симметрично по обе стороны образца и стянутых одной пружиной.

Наличие двух тензометров позволяет исключить влияние неизбежной эксцентричности нагрузки; удлинение образца определяется как среднее по показаниям двух тензометров.

§ 7. Планиметры

Планиметр предназначен для механического измерения площадей путем обводки по плану, изображенному в каком-либо масштабе. Существует много разных систем планиметров. Наиболее широкое распространение получили полярные (круговые) планиметры.

Основными элементами полярного планиметра (рис. 119) являются счетный механизм и два рычага — полюсный *2* и обводный *8*.

Обводный рычаг представляет собой квадратную штангу *8*, на одном конце которой имеется вертикальная игла *9* с пружинкой; на этой игле шарнирно укреплена ручка. Держа ручку пальцами, обводят иглой контур измеряемой площади. Ножка *10*, прикрепленная к ручке снизу, служит опорой рычага в этом конце и при обводке контура скользит по бумаге. Высоту ножки можно регулировать ее винтом так, чтобы игла не царапала бумагу.

На другом конце штанги *8* на нее надета квадратным отверстием рамка *4* счетного механизма. На вращающейся оси, расположенной в рамке параллельно обводному рычагу, сидит счетное колесико *5* со шкалой по его ободу; оно является второй опорой рычага. По другую сторону штанги *8* к рамке *4* прикреплено еще одно небольшое колесо, которое служит третьей опорой обводного рычага *8* и придает ему и всему планиметру устойчивость в горизонтальной плоскости.

Полюсный рычаг *2* имеет на одном конце стойку *3* с шаровым окончанием. Этой стойкой осуществляется шарнирное соединение полюсного рычага *2* с обводным *8*. Для этого стойка вложена в специальное углубление с полушаровым дном, сделанное в рамке *4* между иглой *9* и счетным колесиком *5* на прямой, проходящей через иглу параллельно штанге *8*. На другом своем конце полюсный рычаг снабжен грузом *1* с острием в центре его нижней плоскости. Для работы с планиметром острие груза *1* накалывают на бумагу, на которой изображена измеряемая площадь. Острие груза является неподвижным полюсом планиметра. Таким образом полюсный рычаг *2* может только вращаться около неподвижного полюса, при этом стойка *3* будет описывать окружность. Обводный рычаг *8*

может перемещаться вместе со стойкой 3 и одновременно поворачиваться около ее вертикальной оси.

При обводке иглы 9 по контуру измеряемой площади в случае движения обводного рычага 8 вдоль своей оси счетное колесико скользит по бумаге и отсчет на его шкале будет неизменным. Если же рычаг движется перпендикулярно к своей оси вместе со стойкой 3 или поворачивается около оси стойки, когда она неподвижна,

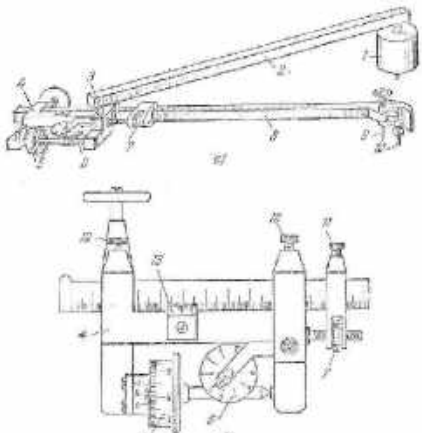


Рис. 119. Полярный планиметр: *а* — общий вид; *б* — счетный механизм; *1* — груз; *2* — полюсный рычаг; *3* — стойка; *4* — рамка; *5* — счетное колесико; *6* — циферблат; *7* — микрометрический винт; *8* — обводной рычаг; *9* — игла; *10* — гайка; *11* — стопор; *12* — микрометрический винт; *13* — конус.

то счетное колесико *5* вследствие трения будет катиться по бумаге, и отсчет на его шкале будет изменяться. При сложном движении обводного рычага *8* колесико будет катиться с одновременным проскальзыванием.

Вместе со счетным колесиком вращается его ось, которая при помощи бесконечного винта в свою очередь вращает циферблат *6*, имеющий десять делений. Каждое деление этого циферблата соответствует одному обороту колесика. Ободок колесика разделен на десятые и сотые доли, а по конусу, укрепленному на ремне рядом с колесиком, можно отсчитывать тысячные доли. Таким образом, отсчет, выражаемый в тысячных долях окружности ободка счетного колесика, составляется из следующих четырех цифр: первая — число тысяч — определяется по показаниям стрелки циферблата *6*; вторая и третья — число сотен и десятков — по шкале счетного колесика *5*; четвертая — число единиц тысячных долей — по конусу. Например, на рис. 119, *б* показания шкал соответствуют числу 2373. Цифры на шкалах счетного колесика *7* и циферблата *6* надписаны в таком порядке, что при обводке контура иглой *9* по ходу часовой стрелки показания всех шкал возрастают, а в случае движения иглы против хода часовой стрелки — убывают.

В зависимости от величины измеряемой площади длину обводного рычага можно изменять в сравнительно больших пределах. Для этого на верхней грани штанги *8* нанесена шкала, а на рамке *4* предусмотрены нониус *13* и микрометрический винт *7*, которые служат для точной установки длины рычага. Для этого сначала освобождают все стопорные винты и передвигают штангу *8* приблизительно на желательную длину. Затем зажимают штангу стопором *11* и доводят микрометрическим винтом *7* точно до нужной длины по нониусу *13*, после чего окончательно закрепляют винтами *12*.

Установку планиметра на плане лучше всего производить так, чтобы полюс находился вне контура измеряемой площади. Только в случае особой необходимости следует располагать (вкалывать) полюс планиметра внутри контура площади. При выборе полюса нужно сделать примерную обводку контура для того, чтобы убедиться в отсутствии необходимости перенося полюса или изменения длины обводного рычага.

Когда полюс выбран, ставят обводную иглу в произвольную, но приемлемую точку контура, принимаемую за начальную, и делают по шкалам счетного механизма первый отсчет n_1. Затем обводят иглой весь контур, стараясь по возможности точнее следить за всеми его изгибами; дойдя до начальной точки, делают второй отсчет n_2. В случае обхода контура по часовой стрелке второй отсчет будет больше первого.

В зависимости от положения полюса вне или внутри контура измеренную площадь F вычисляют по одной из следующих формул:

при полюсе вне контура $F = C\,(n_2 - n_1)$; (87)

при полюсе внутри контура $F = C\,(n_2 - n_1 + q)$. (88)

Здесь C и q — постоянные числа планиметра. К планиметру обычно прилагается табличка, в которой приведены значения постоянных чисел при разных длинах обводного рычага и для разных наиболее употребительных масштабов.

В случае необходимости постоянные числа планиметра легко определить: для того чтобы найти постоянное C, обводят планиметр

ром контур, фактическая площадь F_0 которого известна (например, квадрат на миллиметровой бумаге), обязательно при полюсе вне контура и берут отсчеты n_1 и n_2. В масштабе 1 : m площадь F, очерченная этим контуром, будет:

$$F = mF_0 = C(n_2 - n_1).$$

Отсюда

$$C = \frac{mF_0}{n_2 - n_1}.$$

Меняя значения m, вычисляют соответствующие величины C для различных масштабов.

Для того чтобы найти постоянную q, обводят контур два раза: один раз берут отсчеты n_1 и n_2 при полюсе вне контура, а другой — n_1' и n_2' при полюсе внутри контура. Так как в обоих случаях площадь остается одной и той же, то

$$C(n_2 - n_1) = C(n_2' - n_1' - q)$$

или

$$q = (n_2' - n_1') - (n_2 - n_1).$$

Для повышения точности измерения нужно обводить контур несколько раз при разных положениях планиметра и его полюса и вычислять средние значения отсчетов n_1 и n_2 из всех измерений. Чтобы компенсировать ошибки, вызванные вследствие отклонения плоскости счетного колесика от перпендикуляра к обводному рычагу, следует при повторных обходах контура чередовать расположение счетного колесика то справа, то слева от рычагов.

§ 8. Вибраторы

1. Электромагнитный адаптер. При исследовании колебаний полосы[1] в качестве вибратора, т. е. возбудителя колебаний, применяется электромагнитный звукосниматель (адаптер), схема которого изображена на рис. 120, *а*. При использовании адаптера по прямому назначению для воспроизведения звука его игла *1*, следуя по извилинам звуковой бороздки, совершает колебания, соответствующие по частоте и форме записанному звуку. Вместе с иглой совершает колебания якорек *2*, укрепленный внутри катушки *3* с большим числом витков проволоки. Катушка помещена в магнитном поле между железными приставками *4* постоянного магнита *5*, и при колебаниях якорька в ней индуктируется переменный ток (рис. 120, *б*), который подается на телефон или громкоговоритель.

[1] Работа 22.

Для того чтобы адаптер работал как вибратор, должен происходить обратный процесс. Для этого через катушку *3* пропускают, например, от звукового генератора переменный ток, сообщающий

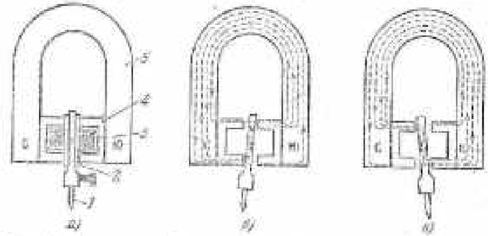


Рис. 120. Электромагнитный звукосниматель (адаптер): *а* — схема устройства прибора; *б* и *в* — схема движения поля: *1* — игла, *2* — якорек, *3* — катушка, *4* — железные приставки, *5* — магнит.

колебания якорька и иглы *1*. Игла касается детали и вызывает колебания с частотой подаваемого на вибратор тока.

2. Пьезоэлектрический адаптер. Колебания звуковой частоты удобно снимать пьезоэлектрическим адаптером (датчиком), основанным на так называемом эффекте пьезоэлектричества, т. е. электричества от давления. Эффект заключается в том, что на противоположных гранях некоторых кристаллов (кварца, сегнетовой соли

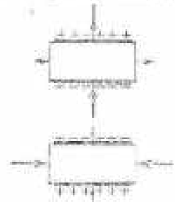


Рис. 121. Эффект пьезоэлектричества.

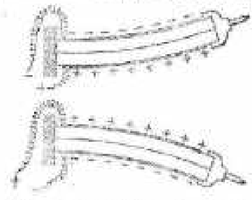


Рис. 122. Пластинка пьезоэлектрика при изгибе.

и др.) при давлении возникают электрические заряды, равные по величине, но противоположные по знаку. Величина зарядов пропорциональна давлению, а знаки зависят от его направления поперек или вдоль кристалла (рис. 121). Пластинка из такого кристалла, покрытая на противоположных гранях тонкими слоями металла

(обкладками), составляет пьезоэлемент, на обкладках которого возникают заряды разных знаков при давлении. Для того чтобы разные заряды возникали при изгибе, применяют пьезоэлементы из двух соединенных (склеенных) последовательно кристаллических пластинок с обкладками на внешних гранях. При изгибе в обкладке вогнутой грани появляются отрицательные заряды, а в обкладке выпуклой грани — положительные (рис. 122). Заряды растут с увеличением прогиба и меняют знак с переменой кривизны.

Такой элемент, зажатый одним концом и имеющий на другом конце наконечник, является пьезоэлектрическим адаптером. Когда его игла упирается в вибрирующую деталь, то и элемент вибрирует с той же частотой и амплитудой, что и деталь.

Механические колебания детали преобразуются в электрические, возникающие в обкладках элемента, и могут быть зафиксированы при помощи осциллографа.

§ 9. Осциллографы

Осциллографом называется самопишущий прибор, предназначенный для регистрации быстро меняющихся во времени величин. Различают две основные группы осциллографов: вибраторные (шлейфовые) и электронные (лучевые).

В вибраторных осциллографах измерительным устройством является механизм магнитоэлектрической системы, который называется вибратором (шлейфом). Подвижная часть вибратора обладает некоторым моментом инерции, поэтому вибраторные осциллографы являются инерционными приборами и могут применяться для исследования периодических процессов, частота которых не превышает нескольких тысяч гер.

В электронных осциллографах измерения производятся при помощи электронно-лучевой трубки, на экране которой наблюдается исследуемое явление. Электронные осциллографы практически безынерционны и их можно применять для изучения очень быстро протекающих процессов.

1. Вибраторные осциллографы. Основными элементами вибраторного осциллографа являются: блок вибраторов, оптическая система, приспособления для наблюдения и фотографирования.

Чаще всего изготовляют осциллографы трех-, шести- и восьмивибраторные, чтобы иметь возможность вести наблюдения и регистрацию нескольких процессов одновременно.

Магнитоэлектрический вибратор (рис. 123) состоит из постоянного магнита *1*, в воздушном зазоре которого находится петля из тонкой серебряной или бронзовой ленты *2*. Петля натянута на изолирующие призмы *3*. На лентах петли укреплено зеркальце *4*.

Если по петле пропустить ток, то от его взаимодействия с магнитным полем ленты прогнутся в противоположные стороны, на участке между опорными призмами *3*, и зеркальце *4* повернется около своей вертикальной оси. При переменном токе возникнет колебание зеркальца около этой оси и вместе с ним колебание светового луча, отражаемого зеркальцем. Эти колебания повторяют колебания тока, проходящего в петле вибратора.

Механизм вибратора помещается в пластмассовый корпус, в котором на уровне зеркальца имеется окошечко с линзой. Для быстрого успокоения колебаний петли корпус вибратора заполняют специальным маслом.

Обычно осциллографы снабжают вибраторами с различной частотой собственных колебаний и различной чувствительностью к току, чтобы иметь возможность применить вибратор, наиболее подходящий к условиям эксперимента.

Оптическая система состоит из осветительной части, предназначенной для распределения лучей света между вибраторами и для освещения колеблющегося зеркальца, из устройства (от зеркальца до фотобумаги), обеспечивающего резкий и тонкий штрих записи, и из устройства для визуального наблюдения записываемого явления.

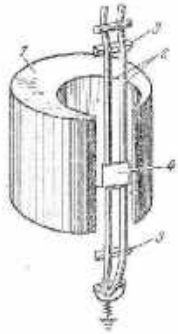


Рис. 123. Магнитоэлектрический вибратор: *1* — магнит, *2* — петля, *3* — опорные призмы, *4* — зеркальце.

Принципиальная схема оптической системы восьмивибраторного осциллографа (тип МПО-2) изображена на рис. 124. От лампы *1* свет проходит через конденсаторную линзу *2* и диафрагму *3*, разделяющую световой поток на лучи по числу вибраторов. Отделенный луч направляется системой зеркал на зеркальце *4* одного из вибраторов через линзу *5* в окошечке его корпуса. Далее, часть колеблющегося луча, отраженного от зеркальца, направляется зеркалом сквозь цилиндрическую линзу *7* и фокусируется на кинопленку, приводимую в движение барабаном *6*. Остальная часть колеблющегося луча проходит через увеличительную линзу *8*, попадает на кинопленку вращающегося барабана *9* и отражается от него на матовый стеклянный экран *10* для непосредственного наблюдения. На рис. 124 ход луча указан стрелками.

Если барабаны *6* и *9* неподвижны, то при колебании зеркальца *4* светлым зайчиком вибратора прочертят на кинопленке и на экране полосы, параллельные образующим барабанов. При вращении барабанов вместо полосы на экране получится световая кривая колебаний, а на фотопленке после ее проявления эта кривая получится

в виде осциллограммы (рис. 125, а). Процесс образования кривой колебаний от вращающегося барабана называется р а з в е р т к о й.

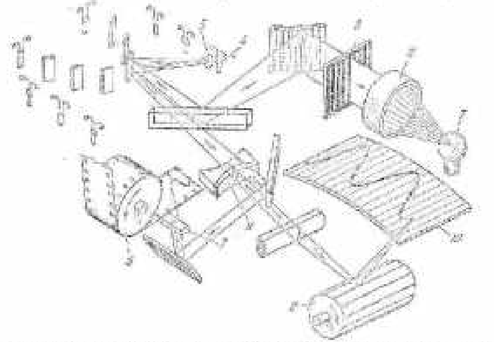


Рис. 124. Схема оптической системы восьмишлейфового осциллографа: 1 — лампа, 2 — конденсорная линза, 3 — диафрагма, 4 — зеркальца вибраторов, 5 — линзы в окошечках корпусов вибраторов, 6 — барабан развертки, 7 — цилиндрическая линза, 8 — увеличительная линза, 9 — фотографический кассетный барабан, 10 — экран.

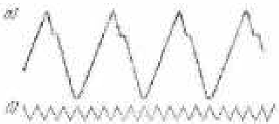


Рис. 125. Осциллограммы: а — изучаемого колебания, б — отметчика времени.

Барабаны приводятся во вращение от электродвигателя, причем скорость вращения обычно может изменяться в значительных пределах.

Масштаб ординат кривой (амплитуды колебаний) определяется чувствительностью вибратора, а масштаб абсцисс (оси времени) устанавливается специальным приспособлением — отметчиком времени; его точно установленные колебания фиксируются на фотопленку в виде периодической кривой (рис. 125, б). Отметчиком времени может служить один из вибраторов.

Существует несколько типов осциллографов, отличающихся конструктивным устройством.

2. Осциллограф МПО-2. *Универсальный магнитоэлектрический переносный осциллограф* МПО-2 [1]) является одним из наиболее

[1]) Конструкция инж. В. О. Арутюнова, Н. И. Белобжеского, А. М. Данского и Б. А. Сейбера.

совершенных вибраторных осциллографов. Он смонтирован в чемодане размерами 50 × 38 × 20 см. Его оптическая схема изображена на рис. 124.

Восемь вибраторов осциллографа расположены по три стороны прямоугольной свечки. Вибраторы не требуют регулировки, все они взаимно заменяемы и автоматически включаются в сеть после установки в свои гнезда. Внешние сотрясения и вибрация двигателя не передаются на вибраторы вследствие хорошей амортизации блока с гнездами для вибраторов; это позволяет использовать осциллограф в любых условиях. Петли вибраторов имеют частоту собственных колебаний в воздухе от 1200 до 10 000 гц.

Отметчиком времени является микрофонный зуммер, собранный в корпусе вибратора и настроенный на частоту 500 гц. Возможно также использование в качестве отметчика времени одного из вибраторов, через который для этого пропускается переменный ток городской сети, с частотой 50 гц.

Запись производится на кинопленку, высокая чувствительность и прочность которой позволяют при выдержанной длительности накаливания (6 а) получать с большой скоростью плавную и мелкую запись без ущерба для четкости. Скорость движения пленки регулируется коробкой скоростей в пределах от 0 до 5 м/сек. В зависимости от скорости движения пленки устанавливается накал лампы.

Пленка приводится в движение однофазным асинхронным двигателем, питаемым переменным током 127 или 220 в. Сцепление двигателя с лентопротяжным механизмом осуществляется электромагнитной муфтой, управление которой можно вынести за пределы осциллографа, для чего предусмотрены специальные зажимы. Это позволяет производить автоматическую и дистанционную съемку. Источник питания можно заменить двигателем постоянного тока 24 в, причем одновременно автоматически переключаются на 24 в электромагнитная муфта, осветительная лампа и отметчик времени.

Осциллограф МПО-2 снабжен специальными автоматическими устройствами. Одним из них является регулятор длины кадра, останавливающий движение пленки, как только она пройдет заданную длину, устанавливаемую заранее в пределах от 0,1 до 5 м. Другое устройство в заданный момент после начала движения пленки автоматически замыкает или размыкает контакты, через которые подаются сигналы на осциллограф от исследуемого процесса. Эти устройства позволяют точно согласовывать начало и конец записи с длиной кадра. Кроме того, имеется указатель неизрасходованного запаса пленки.

Все управление осциллографом вынесено на внутреннюю крышку чемодана (рис. 126). Присоединение к сети переменного тока производится в штепселе *13* шнуром с прямой и обратной штепсельными вилками. До включения осциллографа контактную колодку *12* устанавливают на напряжение 127 или 220 в и ставят предохрани-

тель *11* на 2 *а*. Для постоянного тока 24 *в* нужно сменить двигатель в контактную колодку и поставить предохранитель на 6 *а*.

Осциллограф включают, вращая рукоятку *16* реостата накала лампы, причем одновременно включится вольтметр и осветится

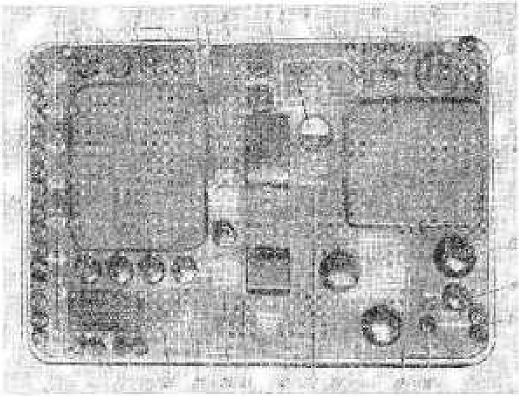


Рис. 129. Внутренняя крышка осциллографа МПО-2 с пультом управления и сигнальными устройствами: *1* — зажимы вибраторов, *2* — тумблеры включения вибраторов, *3* — рукоятки вращения вибраторов, *4* — гнезда вибраторов, *5* — указатель запаса пленки, *6* — приемная кассета, *7* — рукоятка регулирования диафрагмы, *8* — вольтметр, *9* — лампа, *10* — зажимы включения исследуемой сети, *11* — предохранитель, *12* — контактная колодка, *13* — зеркальце, *14* — экран, *15* — ручка регулирования развертки, *16* — рукоятка реостата включения накала, *17* — [illegible], *18* — кнопка съемки, *19* — таблица скоростей, *20* — ручки коробки скоростей, *21* — выключатель двигателя, *22* — зарядная кассета, *23* — ручка длины кадра, *24* — регулятор контактов, *25* — выключатель отметчика времени, *26* — сетка, *27* — зажимы вибраторов мощности.

контрольный глазок на крышке лампы *9*. Накал ламп устанавливается той же рукояткой *16* по вольтметру *8*: для минимальных скоростей движения пленки накал должен составлять 2—3 *в*, для максимальных — 7—8 *в*.

Вибраторы подбираются так, чтобы их собственные частоты были в три — четыре раза больше частоты исследуемого процесса, и вставляются в любые гнезда *4*, расположенные под крышкой. Они присоединяются к исследуемой сети в зажимах *1* и включаются тумблерами *2*. Отметчик времени вставляется в гнездо № 1 и включается тумблером *25*. Если для отметчика времени используется один из

вибраторов, то он присоединяется в соответствующем ему зажиме *1* к сети переменного тока с частотой 50 *гц*. Гнезда № 4 и № 5 вибраторов предназначены также для так называемых вибраторов мощности, позволяющих исследовать колебания мощности, измерить количество расходуемой энергии, определить мгновенную мощность и т. д. В этом случае вибраторы мощности присоединяют к сети в зажимах *27*.

Диафрагма регулируется рукоятками *7*, нижней для гнезд № 1—4, верхней для гнезд № 5—8. Узкую щель диафрагмы применяют при исследовании медленных процессов; при быстрых процессах щель нужно увеличить.

Размещение осциллограммы на пленке производится вращением вибраторов при помощи рукояток *3*. Одновременно световые зайчики, отражаемые вибраторами, передвигаются по вертикали (по оси ординат) на экране *14*. Для лучшей видимости экран снабжен боковыми створками. Кривые на экране *14* наблюдаются только при скоростях движения барабана от 250 *мм/сек* и более. Скорость вращения зеркального барабана (развертки) изменяется рукояткой *15*.

Управление коробкой скоростей производится при неподвижном двигателе рукоятками *20*, которые нужно сначала приподнять кверху, а затем повернуть так, чтобы на пересечении их указателей в таблице *19* стояла нужная скорость движения пленки.

Кинопленку, свернутую в рулон эмульсией наружу, вставляют в кассету в темной комнате. Зарядная кассета вмещает до 5 *м* пленки. Выдвинув крышку кассеты и вложив пленку, оставляют снаружи конец длиной 10—15 *см*, чтобы затем при установке кассеты *22* в ее гнездо можно было вставить пленку в щель между направляющими лентопротяжного механизма и заметить перфорацией на шипы ведущего барабана. Одновременно с установкой кассеты автоматически происходит сцепление ведущего барабана с двигателем. Приемную кассету *6* вставляют в гнездо и открывают в ней щель для пленки. Вся пленка длиной 5 *м* переходит из зарядной кассеты в приемную только при скорости движения не более 2 *м/сек*. При скорости движения 5 *м/сек* удается перенести в приемную кассету не более 1,5 *м* пленки. Перед съемкой устанавливают длину кадра рукояткой *23* и включают двигатель тумблером *21*. Регулятор *24* можно установить на длине пленки, после прохождения которой автоматически включают контакты исследуемой сети, присоединяемые в этом случае в зажимах *10*, где два из них предназначены для размыкания и два — для замыкания тока.

Съемку производят, нажимая на кнопку *18*, которая включает лентопротяжный механизм только при условии установки рукоятки *23* на любое положение от 0 до 5 *м*. При этом на все время съемки под сеткой *26* появляется световой сигнал и поворачивается рукоятка *5*, отмечающая оставшийся запас пленки. Съемка прекра-

пается автоматически как только будет исчерпана назначенная длина кадра или будет отпущена кнопка 16. Для дистанционного управления съемкой служит кнопка 17.

3. Электронные осциллографы. Широкое применение электронные осциллографы получили для наблюдения и фотографирования кривых напряжений и силы тока при очень высоких частотах колебаний, недоступных для вибраторных осциллографов. Электронные осциллографы позволяют также исследовать весьма кратковременные импульсные явления. Такие осциллографы являются приборами, реагирующими на изменение напряжения тока, и поэтому любые электрические и неэлектрические явления, которые можно преобразовать в изменения напряжения тока, доступны исследованию при помощи электронного осциллографа.

Основным измерительным элементом электронного (катодного) осциллографа является электронно-лучевая трубка. Ее основными преимуществами по сравнению с вибраторами являются ничтожно малое потребление мощности от испытываемого источника напряжения и отсутствие инерции. Электронный осциллограф позволяет исследовать процессы, частота которых достигает сотен мегагерц.

Действие осциллографа основано на свойстве движущихся электронов изменять направление движения под действием электрических или магнитных сил, например при прохождении в пространстве между двумя заряженными параллельными пластинами. Существует полная аналогия между пучком электронов, проходящим через электрические поля, и световым лучом, проходящим через преломляющие среды. Поэтому системы, предназначенные для отклонения электронного пучка, называются электронными линзами или призмами, а законы изменения направления движения электронов составляют предмет электронной оптики.

Электронно-лучевые трубки различают по способу получения пучка движущихся электронов: с холодным катодом (трубки высокого напряжения) и с горячим (трубки низкого напряжения). В последнее время чаще применяют трубки с горячим катодом.

Электронно-лучевая трубка (рис. 127) представляет собой коническую колбу с удлиненной горловиной, заканчивающейся цоколем 1 с металлическими выводами. В начале горловины помещается электронная пушка — устройство для создания фокусированного пучка электронов. Источник электронов состоит из подогревного катода 2, выполненного в виде небольшого цилиндра с излучающим слоем на его торцевой поверхности и расположенного внутри так называемой сетки 3, представляющей собой металлический цилиндр с выходным отверстием малого диаметра. Сетка имеет относительно катода отрицательный потенциал, изменением которого можно регулировать плотность электронов в пучке и таким образом менять яркость светящегося катодного пятна. Благодаря сетке электроны, вылетающие из раскаленного катода, движутся в виде узкого пучка —

электронного луча. Этим осуществляется предварительная фокусировка луча.

В состав электронной пушки входят также цилиндры 4 и 5, на которые подается положительный относительно катода потенциал. Цилиндры 4 и 5 называют соответственно первым и вторым анодом. Потенциал первого анода можно менять, что обеспечивает окончательную фокусировку электронного луча, для улучшения которой первый анод, как и сетка, снабжается диафрагмой с малым отверстием. Электроны получают ускорение вследствие возникающей между катодом и анодом разности потенциалов. Конечная скорость

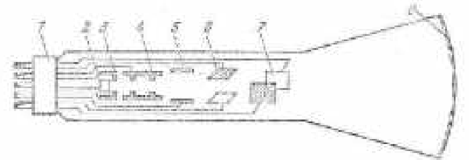


Рис. 127. Схема электронно-лучевой трубки: 1 — цоколь, 2 — катод, 3 — сетка, 4 — первый (фокусирующий) анод, 5 — второй (ускоряющий) анод, 6 — пластины вертикального отклонения, 7 — пластины горизонтального отклонения, 8 — экран.

электронов определяется потенциалом второго анода, который называется также ускоряющим анодом в отличие от первого — фокусирующего анода. Потенциал ускоряющего анода в процессе работы электронно-лучевой трубки обычно поддерживается неизменным.

Из электронной пушки электронный пучок попадает на внутреннюю торцевую поверхность расширенного конца колбы, называемую экраном 8. Экран покрывается специальными составами, обладающими способностью светиться под действием электронной бомбардировки в точке, на которую падает электронный луч. В зависимости от состава покрытия экрана свечение может длиться или только пока касается луч, или некоторое время и после его исчезновения.

Между пушкой и экраном помещаются отклоняющие пластины (электронные призмы): две в горизонтальных плоскостях — электроды вертикального отклонения 6 и две в вертикальных — электроды горизонтального отклонения 7. Если приложить переменные напряжения одновременно к обеим парам отклоняющих пластин, то электронный луч будет прочерчивать на экране кривые, называемые фигурами Лиссажу. Форма этих фигур зависит от сдвига фаз, соотношения амплитуд, частот и формы кривых напряжений, подаваемых на пластины. Прикладывая на одну пару пластин напряжение, для которого известна форма кривой, амплитуда и частота, а на другую пару — напряжение, связанное с исследуемым процессом, можно

из получаемой фигуры Лиссажу судить о частоте и сдвиге фазы исследуемого явления и построить соответствующую кривую.

Процесс получения на экране кривых, характеризующих изменения напряжений, подаваемых на пластины трубки, называется развёрткой. Для того чтобы была возможность наблюдать на экране непосредственно кривую исследуемого напряжения, пользуются так называемой непрерывной (линейной) разверткой по времени. С этой целью на пластины горизонтального отклонения подают напряжение, имеющее пилообразную кривую (рис. 128). В течение одного периода T это напряжение сначала равномерно возрастает или убывает до определённой величины, а затем очень быстро возвращается к начальному значению. Светящееся пятно при этом перемещается на экране по горизонтали с определённой постоянной скоростью и

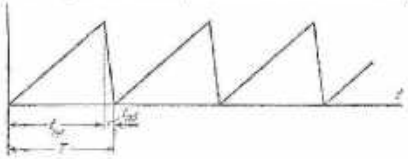


Рис. 128. Пилообразная кривая напряжения.

быстро возвращается к началу прямой. Если одновременно подавать исследуемое напряжение на пластины вертикального отклонения, то электронный луч опишет на экране кривую этого напряжения.

Время падения пилообразного напряжения, соответствующее на экране обратному ходу пятна по горизонтали, должно составлять весьма малую долю его полного периода T, чтобы возможно меньшая часть исследуемого колебания происходила за время $t_{об}$ обратного хода электронного луча. Кроме того, обратный ход должно затемнять, и тогда явления, происходящие за время обратного хода, не будут накладываться на кривую прямого хода электронного луча.

При совпадении периода исследуемого напряжения с временем полного горизонтального перемещения луча на экране появится кривая, соответствующая одному периоду. Если частота исследуемого напряжения превосходит n раз частоту пилообразного напряжения, то кривая на экране охватит n периодов и в общем случае будет перемещаться по экрану в горизонтальном направлении. В частном случае кратного отношения частот обоих подаваемых на пластины напряжений конная исследуемого напряжения будет начинаться всегда в одной и той же точке по горизонтали, и ее изображение на экране получится неподвижным и станет доступным для детального исследования. Такой подбор частот напряжений, подаваемых на трубку, называется синхронизацией.

Для процессов, протекающих очень короткое время (импульсивных) применяется так называемая ждущая развертка; при такой развертке одновременно с началом импульса, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины, на горизонтально отклоняющие пластины в определенном масштабе подается напряжение, исчезающее в конце импульса. Затем это напряжение как бы ждет нового импульса для повторения процесса. Таким образом, обеспечивается синхронизация напряжений, а масштаб горизонтального отклонения является мерой длительности импульса.

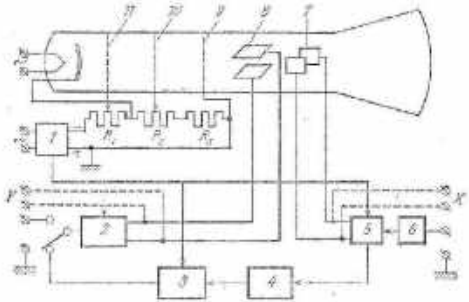


Рис. 129. Схема электронного осциллографа: *1* — электронный, *2* — усилитель, *3* — генератор развертки, *4* — синхронизатор, *5* — усилитель, *6* — выключатель, *7* и *8* — усилители горизонтального и вертикального отклонений, *9* и *10* — второй и первый аноды, *11* — сетка.

Для получения нужного напряжения применяется так называемый генератор развертки, являющийся одним из важнейших узлов осциллографа. Электрическая схема осциллографа показана на рис. 129. Обычно в осциллографах используется генератор развертки *3* пилообразного напряжения, но для специальных исследований (например, фигур Лиссажу) удобна круговая или спиральная развертка. Применяется также ждущая развертка, позволяющая определять форму кратковременных импульсов с изменением их длительности и амплитуды. Электрические схемы специальных разверток иногда выполняются в виде отдельных приставок, напряжение с которых подается на пластины горизонтального отклонения при выключенном генераторе *3* пилообразного напряжения. Для непосредственной подачи напряжения на отклоняющие пластины служат отдельные входы X и Y (см. рис. 129).

Существует много схем генераторов развертки, обеспечивающих получение колебаний в очень большом диапазоне частот, от низких

до чрезвычайно высоких. Меняя частоту генератора развертки, добиваются синхронизации частот развертки и сигнала, при которой изображение на экране неподвижно. Схема электрического устройства для тонкой настройки частот называется синхронизатором. Синхронизация может быть внутренней, при которой на развертку подается часть усиленного исследуемого напряжения, или внешней, когда к генератору развертки подключается внешнее синхронизирующее напряжение. Если внешнее напряжение берется от сети, то синхронизация называется сетевой.

Чувствительность электронно-лучевых трубок очень мала (около 0,1 *мм* на 1 *в*) и требует усиления напряжений. Достаточное отклонение электронного луча достигается в осциллографах применением усилителей *2* и *3*, которые обычно бывают резистивно-скоростного типа. Усилители увеличивают чувствительность осциллографов по напряжению до величины порядка единиц и десятков сантиметров на 1 *в*.

Коэффициент усиления напряжения, подаваемого усилителем *2* на пластины *8* вертикального отклонения, можно регулировать. Он гораздо превосходит коэффициент усиления усилителя *3* пластин *7* горизонтального отклонения, потому что генератор развертки создает напряжение с настолько большой амплитудой, что часто отпадает надобность в его усилении. Иногда даже требуется ослабление пилообразного напряжения, что достигается с помощью ослабителя *6*.

Все элементы осциллографа питаются от сети переменного тока через выпрямитель *1*. На электронно-лучевую трубку питание поступает с делителя напряжения $R_1 - R_2 - R_3$. Делитель напряжения R_1 предназначен для управления яркостью электронного пятна путем изменения напряжения на сетке *11*, а потенциометр R_3 — фокусировкой на первом аноде *10*. Превышение постоянного напряжения второго анода *9* в четыре — шесть раз по сравнению с первым анодом обеспечивается делителем (потенциометр) R_2.

Электронный осциллограф получил очень большое распространение для измерения и исследования самых разнообразных электрических и неэлектрических процессов. Для больших удобств изучения разнообразных процессов осциллографы изготовляют различных типов, отличающихся между собой деталями отдельных устройств.

4. Электронный осциллограф типа ЭО-6М. Осциллограф ЭО-6М позволяет наблюдать кривые периодических процессов и фигуры Лиссажу, рассматривать импульсы, измерять их длительность и амплитуду. Этот осциллограф состоит из: электронно-лучевой трубки; усилителей вертикального и горизонтального (с синхронизацией) отклонения; генератора непрерывной (пилообразной) и ждущей развертки; калибратора амплитуды и длительности импульсов; блока питания с делителем напряжения.

Чувствительность усилителей при частоте 100 *кгц* составляет не менее 24 и 30 *мм* соответственно для вертикального и горизонтального отклонений на 1 *в* эффективного напряжения. Развертки имеют непрерывные — шесть диапазонов частот в интервале от 2 *гц* до 200 *кгц*, ждущие — четыре диапазона для рассматривания импульсов длительностью от 0,5 до 250 *мк сек* с частотой следования от 100 *гц* до 10 *кгц*.

Осциллограф ЭО-6М собран на специальном шасси, заключенном в металлический кожух. Шасси состоит из вертикальной панели (передней стенки кожуха), на которой расположены все органы управления с соответствующими надписями, и двух горизонтальных панелей, на которых расположены электронно-лучевая трубка, лампы усилителей, выпрямителей, генератора развертки, трансформаторы и прочие детали.

Питание подается от сети переменного тока напряжением 115, 127 или 220 *в* при частоте 50 или 100 *гц*. До присоединения прибора к сети необходимо переключатель, расположенный в задней стенке кожуха, установить на напряжение сети и поставить соответствующий предохранитель: на 2 *а* для напряжения 115 или 127 *в*, или на 1 *а* для 220 *в*.

Различают следующие группы органов управления, расположенных на передней стенке осциллографа (рис. 130): органы управления электронным лучом, развертками, синхронизацией, входным сигналом и усилением, амплитудой и длительностью импульсов, вспомогательные органы.

Управление электронным лучом осуществляется при помощи ручек *1*, *2*, *3* и *4*. Ручка *3* предназначена для фокусировки изображения, а ручка *2* — для установки яркости так, чтобы изображение на экране *5* было наиболее четким. При помощи ручек *4* и *1* изображение можно перемещать соответственно по горизонтали (ось *x*) и по вертикали (ось *y*); это позволяет расположить изображение в нужном месте экрана *5* электронно-лучевой трубки.

Управление генератора развертки производится переключателями *7* и *8* и ручкой *9*. Для выбора типа развертки — непрерывная или ждущая — предназначен переключатель *8* с надписью «горизонтальное отклонение». Установкой переключателя *8* на метку усилитель генератор развертки выключается с одновременным подключением усилителя синхронизации к вертикальным пластинам электронно-лучевой трубки, что дает возможность увеличить горизонтальное отклонение луча помощью развертки. При помощи переключателя *7* устанавливается нужный диапазон непрерывной или ждущей развертки. Ручка *9* с надписью «частота плавно» позволяет менять собственную частоту непрерывной развертки и длительности ждущей в пределах выбранного диапазона.

Синхронизация напряжений производится переключателем *10*, ручкой *11* и тумблером *6*. Переключатель *10* позволяет назначить

род синхронизации: внутреннюю (от исследуемого сигнала), внешнюю (внешним сигналом, синхронным с исследуемым) или сетевую.

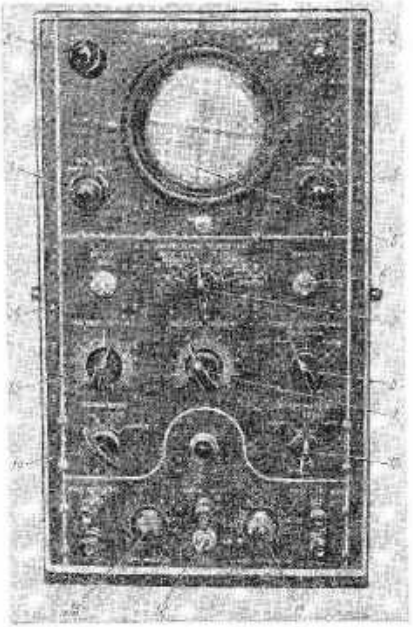


Рис. 136. Передняя панель осциллографа МО-1М, с органами управления: *1*, *2*, *3* и *4* — ручки управления электронным лучом; *5* — экран; *6* — тумблер подачи запускающего импульса ждущей развертки; *7*, *8* и *9* — переключатели и управления генератором развертки; *10* и *11* — переключатель и ручка усиления синхронизации; *12* — тумблер включения в сеть; *13* — усиление исследуемого сигнала; *14* — регулировка входного сигнала; *15* и *16* — регулятор калибратора.

Ручкой *11* с надписью «синхронизация горизонтального усиления» регулируется синхронизирующее напряжение, а при выключенном генераторе развертки — горизонтально отклоняющее напряжение.

Тумблер *6* с надписью «запуск» предназначен для подачи запускающего импульса ждущей развертки.

Регулировка входного сигнала выполняется переключателем *14* с надписью «ослабление». Этот переключатель дает возможность ослабить исследуемый сигнал в отношении 1 : 1, 1 : 10 и 1 : 100. Ручка *13* предназначена для плавного увеличения вертикального отклонения до нуля от максимальной величины.

Управление калибратором длительности и амплитуды импульса производится тумблером *16* и ручкой *15*. При включении тумблера *16* с надписью «метки» на экране *5* вместе с импульсом возникают калибрационные метки в виде ярких черточек в темных промежутках. Зная количество меток, укладывающихся на импульсе, и цену каждой метки, легко определить длительность импульса. Цена метки зависит от диапазона ждущей развертки и равна 0,5 *мк сек*, 1 *мк сек*, 5 *мк сек* и 20 *мк сек* соответственно четырем диапазонам. При помощи ручки *15*, имеющей надпись «калибрационный сигнал», подбирается амплитуда стабилизированного напряжения, равная амплитуде исследуемого сигнала или отличающаяся от нее в определенном отношении. Затем соответственно делению шкалы, на котором остановится указатель ручки *15*, определяют величину амплитуды импульса по графику, наклеенному на внутренней стороне передней крышки осциллографа.

К вспомогательным органам управления относятся: тумблер *12* с надписью «сеть» для включения прибора в сеть; клеммы с надписями «выход верт. усил.» для исследуемого напряжения, «внешн. синхр.» — для внешнего синхронизирующего напряжения, «выход гориз. усил.» — для наблюдения фигур Лиссажу, «земля» — для подключения корпуса исследуемых объектов.

Ввиду сложности управления осциллографом работа с ним требует навыка и опыта. Во избежание порчи прибора и с целью получения правильных результатов пользование осциллографом разрешается только после тщательного его изучения при соблюдении требований инструкции по эксплуатации прибора или под наблюдением опытных специалистов.

5. Магнитоэлектрический осциллограф ОТ-24-51. Многоканальный магнитоэлектрический осциллограф завода «Геофизика» типа ОТ-24-51 (рис. 131, *а*) имеет разочные вибраторы, группируемые в блоке электромагнита, и предназначен для проведения тензометрических измерений в диапазоне низких частот без промежуточного усиления.

Применение рамочных вибраторов позволяет получить чувствительность (выраженную в *мм/ма*) того же порядка, что и у стрелочных гальванометров постоянного тока. Успокоение создается при помощи электромагнитного момента, поэтому внешнее сопротивление при работе с этими гальванометрами должно быть по величине близким к критическому.

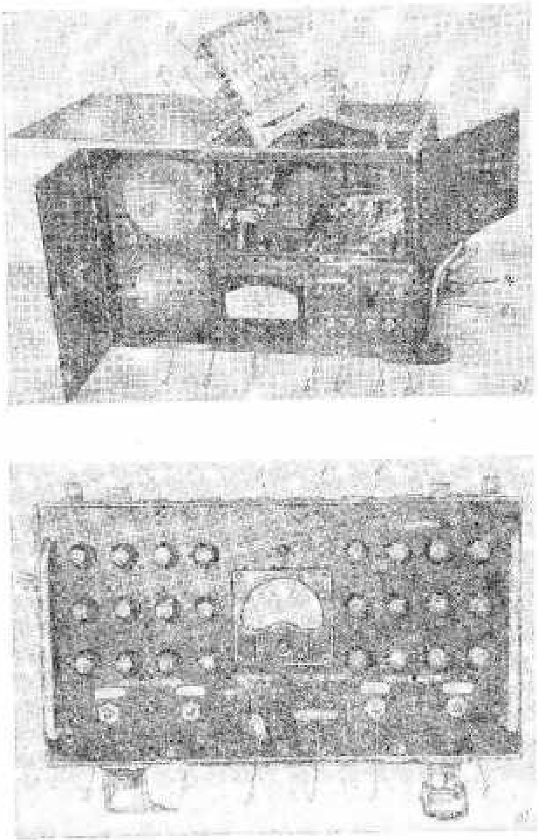


Рис. 131. Магнитоэлектрический осциллограф [illegible]: а — осциллограф; б — блок балансировки (передняя панель).

Мощность, потребляемая рамочными вибраторами, немного меньше, чем мощность, потребляемая петлевыми вибраторами. Практически все рамочные вибраторы пригодны для работы с тензодатчиками без применения усилителей. Частота исследуемого процесса при этом ограничена десятками герц (табл. 12).

Таблица 12

Тип вибратора	Частота собственных колебаний в воздухе, гц	Сопротивление, ом	Ток при отклонении на 100 мм на бумаге, ма	Потребляемая мощность при отклонении на 100 мм на бумаге, вт
I	400	36	0,5	$9\cdot10^{-6}$
II	200	56	0,1	$0,56\cdot10^{-6}$
III	120	56	0,05	$14\cdot10^{-8}$
IV	70	41,5	0,01	$0,45\cdot10^{-8}$
V	35	36	0,002	$1,44\cdot10^{-10}$

Осциллограф имеет 24 канала для тензометрических измерений и три канала для вспомогательных отметок.

Запись ведется на бумаге шириной 200 мм. Скорость записи изменяется от 5 мм/сек до 1 м/сек с помощью ступенчатого редуктора. Специальный отметчик времени, работающий от камертонного прерывателя, дает возможность отсчитывать интервалы времени в 0,01 сек. Мотор для движения фотобумаги, электромагнит (один для всех вибраторов), лампы осветителя вибраторов питаются от сети постоянного тока (напряжение 24 в). Питание мостов осуществляется от независимых источников, напряжение которых может быть выбрано в соответствии с сопротивлением применяемых датчиков.

К осциллографу придан специальный блок балансировки (рис. 131, б), позволяющий осуществить баланс мостов при неравенстве сопротивлений датчиков, не превышающем ±1%. Кроме этого, блок балансировки допускает раздельное включение питания мостов (выключатели 5). По имеющемуся миллиамперметру 1 с помощью переключателя 2 этого питания можно определить токи каждой группы мостов. Предусмотрен общий выключатель питания 3 и специальное тарировочное устройство, которое при нажатии кнопки 4 тарировки позволяет нанести тарировочные импульсы на осциллограмму. Соединение блока балансировки с осциллографом и мостами осуществляется кабелями, снабженными штепсельными разъемами. На рис. 131, а показан осциллограф с открытыми дверцами передней панели и обозначены цифрами: 1 — верхняя кассета; 2 — приемная кассета; 3 — вибраторы, установленные в блоке электромагнита 15; 4 — шунты к вибраторам, позволяющие регулировать их чувствительность; 5 — отметчик времени; 6 — осветители для зеркал вибраторов. По прибору 7 можно переклю-

чением ручки *8* определить напряжение питания осциллографа, величину тока подмагничивания и, наконец, величину внешнего сопротивления, подключаемого к любому из вибраторов; для определения величины внешнего сопротивления необходимо нажать кнопку *9* с номером проверяемого канала.

Выключатели *10*, *11*, *12* и *13* (рис. 131, *а*) включают соответственно: мотор для протяжки бумаги; экраны осветителей *6*, если это необходимо для работы; электромагниты блока вибраторов и питание осветителей *5*. Отметчик времени включается своим тумблером *14*.

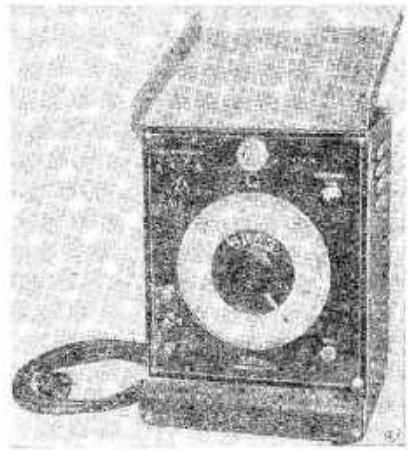
Для исследования деформаций необходимо на исследуемом объекте наклеить активные и компенсационные датчики и собрать полную схему обычного моста. Питание к мостам подается с помощью блока балансировки, а в измерительную диагональ после блока балансировки включается непосредственно вибратор. Регулятор чувствительности *4* (рис. 131, *а*) вибратора ставится в положение, обеспечивающее минимальную чувствительность. Нажатием кнопки *9* с номером канала проверяют по прибору *7* величину эквивалентного сопротивления внешней цепи. Если оно соответствует расчетному, то кнопкой *9* отключают прибор *7* и включают вместо него соответствующий вибратор. После этого одним из выключателей *5* блока балансировки (рис. 131, *б*) подается питание к измерительному мосту. Включают выключатели *13* и *12* и проверяют по прибору *7* напряжение питания осциллографа и ток в обмотке электромагнита *15* (рис. 131, *а*). Наблюдая за положением зайчика на бумаге, постепенно увеличивают чувствительность вибратора вращением ручки *16* (рис. 131, *а*), доводя ее до максимальной, и одновременно ручками *6* «балансировка» (рис. 131, *б*) балансируют мост, добиваясь отсутствия тока в вибраторе. После того как все работающие каналы проверены и сбалансированы, производят запись процесса. Для этого устанавливают нужную скорость движения бумаги и (при закрытых дверцах осциллографа и включенных выключателях *13*, *12*, *14*) включением выключателя *10* (рис. 131, *а*) производят необходимую запись.

§ 10. Электронный измеритель деформаций

Прибор (рис. 132, *а*) предназначен для измерения статических и медленно изменяющихся деформаций с помощью проволочных тензодатчиков.

Измерительная мостовая схема прибора (рис. 132, *б*) содержит в качестве плеч постоянные сопротивления (R_1 и R_2), смонтированные в самом приборе, активный и компенсационный датчики с сопротивлениями R_x и $R_к$ (на испытываемом объекте).

Уравновешивание моста достигается перемещением подвижного контакта *1* реохорда *2*.



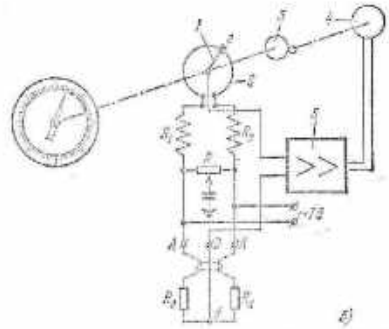


Рис. 132. *а* — Электронный измеритель деформаций; *б* — Принципиальная схема измерения деформаций; *1* — подвижной контакт; *2* — реохорд; *3* — усилитель; *4* — делитель; *5* — редуктор.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 127—220 в с частотой 50 гц. При нагружении испытываемого элемента конструкции сопротивление активного тензодатчика изменяется. Между точками A и B возникает разность напряжений, которая подается на вход усилителя 3. При этом начинает работать двигатель 4, через редуктор 5, связанный с подвижным контактом реохорда с показывающей стрелкой прибора. Работа двигателя и перемещение контакта реохорда происходит до тех пор, пока мост не будет сбалансирован. Шкала прибора проградуирована в значениях относительной деформации. Цена деления составляет $1 \cdot 10^{-5}$.

Прибор рассчитан на работу с тензодатчиками с сопротивлением от 70 до 600 ом и чувствительностью от 1,9 до 2,2. Прибор имеет шкалу с двумя стрелками (см. рис. 132, а).

На передней панели прибора расположены: шкала с показывающими стрелками, ручки указатели чувствительности датчиков, ручка и индикатор фазовой балансировки, выключатель, клемма «земля» и три клеммы для присоединения измерительного полумоста.

К клемме K присоединяется компенсационный тензодатчик, к клемме A — активный и к клемме O — общая точка соединения активного и компенсационного тензодатчиков.

Указатель чувствительности ставится в положение, соответствующее чувствительности применяемых тензодатчиков. Затем прибор включается в сеть и после прогрева в течение 20 *мин* производится с помощью ручки «фазировка» балансировка реактивной компоненты входного сигнала, возникающей из-за различной емкости соединительных проводов в плеч моста по отношению к земле. Перед началом измерения фиксируется начальный отсчет. Истинная величина деформации равна разности между измеряемым и начальным (нулевым) отсчетами.

При измерении деформации в нескольких точках необходимо применить переключатель.

§ 11. Аппаратура для измерения статических и динамических деформаций

Аппаратура типа 8-АНЧ-7М предназначена для измерения в весьма точках динамических и статических деформаций, возникающих в деталях машин и других конструкциях при их работе.

Для регистрации процессов, протекающих с повышенной частотой, используются петлевые вибраторы, которые имеют высокую собственную частоту. Мощности, получаемой в измерительной диагонали моста, недостаточно для того, чтобы вибратор можно было включать непосредственно в измерительную диагональ. Для повышения этой мощности требуется или увеличение мощности датчиков, или применение усилителей. Аппаратура представляет собой

усилительное устройство, состоящее из восьми одинаковых усилителей, получающих питание от блока генератора I (рис. 133) и блока выпрямителей (рис. 134).

Рассмотрим работу одного усилительного канала, так как все остальные работают аналогично (рис. 135).

Работа канала происходит следующим образом: блок питания $БП$ преобразует сетевое напряжение переменного тока в другие необходимые напряжения постоянного и переменного токов и питает ими генератор несущей частоты $Г$, усилитель мощности $УМ$ и усилитель

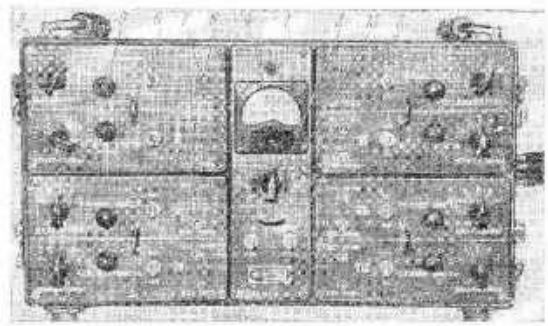


Рис. 133. Усилительное устройство: *1* — блок генератора, *2* — выключатель сети, *3* — балансировочная головка, *4* — прибор регулировки, *5* — переключатель диапазонов, *6* — выключатель сигнала, *7* — ось регулятора канала, *8* — ось регулятора усиления, *9* — ручка балансировки моста, *10* — выключатель напряжения.

канала $У$. Полумост $П$ (внутри прибора) и полумост $Д$ на испытываемом объекте образуют измерительный мост, который получает напряжение питания от генератора несущей частоты $Г$ через усилитель мощности $УМ$. В результате воздействия деформаций измерительный мост выходит из равновесного состояния и в его диагонали появляется модулированное напряжение разбаланса. Это напряжение усиливается усилителем канала $У$ и подается на фазочувствительный детектор $ФД$, который из модулированного напряжения выделяет модулирующий сигнал. Величина модулирующего сигнала пропорциональна измеряемой деформации. Получающиеся при этом составляющие несущей частоты задерживаются фильтром $Ф$. Выходное напряжение, полученное после фильтра $Ф$, подается на магнитоэлектрический вибратор $В$ осциллографа.

Напряжение сети питания аппаратуры: 110 и 220 *в* переменного тока с частотой 50 *гц* и 115 *в* — с частотой 400 *гц*.

Число одновременно исследуемых процессов — от 1 до 8. Полоса частот, пропускаемая усилительным устройством, — от 0 до 500 *гц*.

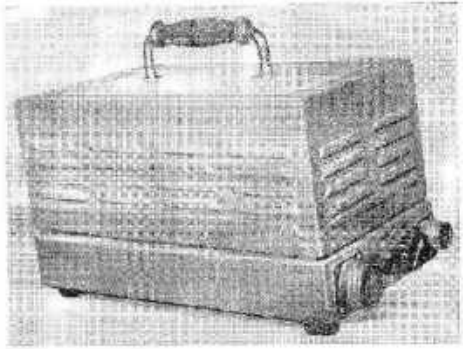


Рис. 134. Блок электронный.

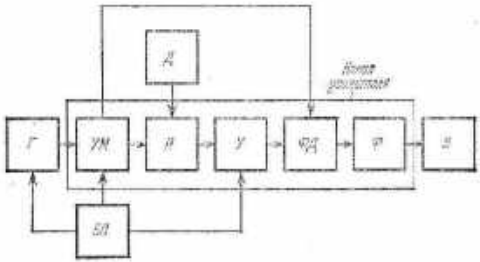


Рис. 135. Блок-схема усилительного канала.

Применяемые датчики должны иметь сопротивление от 70 до 400 *ом*. Предельная длина кабеля от точки замера до усилителя 25 *м*.

Для измерения деформаций предусмотрены три диапазона. Аппаратура имеет устройство для создания тарировочного импульса. Подготовка аппаратуры к работе заключается в следующем (см. рис. 133):

1) Соединив аппаратуру с датчиком (с помощью специальных кабелей и разъемов на задней стороне усилительного устройства), включить выключатель *2* и прогреть аппаратуру в течение 15 *мин*.

2) Переключатель диапазонов *5* поставить в положение 0, переключатель *6* — в положение *М А*, переключатель *3* — в положение, соответствующее регулируемому каналу (против его номера).

3) Поворотом ползунка сопротивления, ось которого *7* выведена на лицевую панель под отвертку, произвести регулировку нуля аппаратуры, добиваясь установки на нуль стрелки прибора *4*.

4) Для проверки коэффициента усиления аппаратуры перевести переключатель *5* в положение *К* (на вход аппаратуры подключается при этом тарировочный сигнал) и переключатель *3* — в положение, соответствующее номеру регулируемого канала. Если прибор *4* не будет показывать ровно 30 *ма*, произвести регулировку усиления поворотом ползунка сопротивления, ось которого *8* выведена на лицевую панель под отвертку.

5) Переключатель *6* поставить в положение *Ш* (шлейф). При этом выход канала подключается к вибратору.

Так регулируются все восемь каналов. У неработающих каналов переключатель *3* должен быть установлен в положение 0.

При работе сначала записываются нулевые нагрузки и после этого производится запись осциллограмм при приложении рабочих нагрузок. Для записи тарировочного сигнала переключатель *10* переводится в положение «тара» (тарировка), а затем снова в положение «изм» (измерение) — рабочее положение переключателя.

ГЛАВА VI

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ВИНТОВЫЕ МАШИНЫ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ РЫЧАГОМ

§ 12. Разрывная машина силой до 50 *Т*

Испытательные машины винтового или шпиндельного типа широко распространены в лабораторной технике. Усилие, передаваемое на испытываемый образец, создается в этих машинах при помощи одного или двух винтов.

Ниже описываются машины, в которых сила, возбуждаемая винтом, измеряется при помощи горизонтального неравноплечего рычага, как в десятичных весах. Машиной такого типа является описанный в работе 1 пресс Гагарина.

На рис. 135 показана схема машины для испытаний на растяжение и сжатие системы Мор и Федергаф силой до 50 *Т*. Винт *1* машины приводится в движение гайкой *2*, укрепленной на подшипниках, не позволяющих ей смещаться вверх и вниз; гайка соединена посредством червячной передачи *3* со шкивом мотора или ручного привода. К верхней части винта присоединен захват *4* машины, в котором закрепляется одна головка образца *5*. Другая головка образца закрепляется в верхнем захвате *6* машины, подвешенном шарнирно к рычагу *7*. При повороте гайки винт *1* поступательно перемещается вниз, что вызывает растяжение образца. Усилие винта через образец передается рычажной системе силоизмерителя *7—10*.

Рычаг *7* при увеличении нагрузки наклоняется, поворачиваясь на опоре *8* по часовой стрелке (опора *8* расположена с некоторым эксцентриситетом *e* относительно линии действия нагрузки). При этом тяга *9*, связывающая рычаг *7* с нижним рычагом *10*, поднимает последний; для приведения рычага *10* снова в горизонтальное положение груз *Q* следует несколько передвинуть по рычагу в сторону его свободного конца.

Увеличение плеча *a* груза *Q* относительно точки опоры рычага *10* пропорционально увеличению усилия, действующего на образец. На рычаге *10* нанесена шкала нагрузок, по которой можно прочесть значение нагрузки на образец, соответствующее данному положению подвижного груза *Q*; в момент взятия отсчета указатели *11* должны совпадать. В зависимости от величины груза *Q* пользуются шкалами от 0 до 50 *Т* или от 0 до 5 *Т*.

При помощи рукоятки *12*, связанной с винтом *1* двумя коническими шестернями, можно быстро перемещать винт *1* от руки при

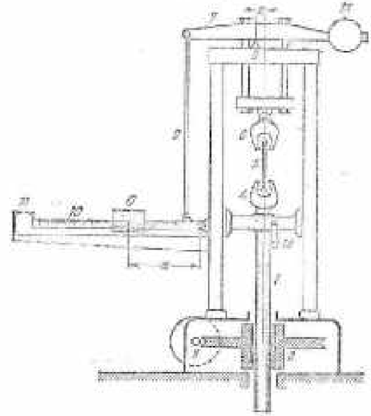


Рис. 135. Схема разрывной машины силой до 50 *Т*: *1* — винт, *2* — гайка, *3* — червяк, *4* и *6* — захваты машины, *5* — образец, *7—10* — рычажная система силоизмерителя, *11* — указатель, *12* — рукоятка для установки нижнего захвата, *13* — противовес, *Q* — передвижной груз, уравновешивающий усилие винта.

установке образца. После установки образца рукоятка *12* закрепляется стопором. Противовес *13* уравновешивает рычажную силоизмерительную систему при отсутствии образца и нулевом положении груза *Q*.

При определении модуля упругости и предела пропорциональности и вообще при таких испытаниях, когда удлинения образца незначительны, нагружение его производится от руки. При больших удлинениях нагружение ведется при помощи мотора.

Машина снабжена диаграммным аппаратом, посредством которого может быть получена в небольшом масштабе диаграмма

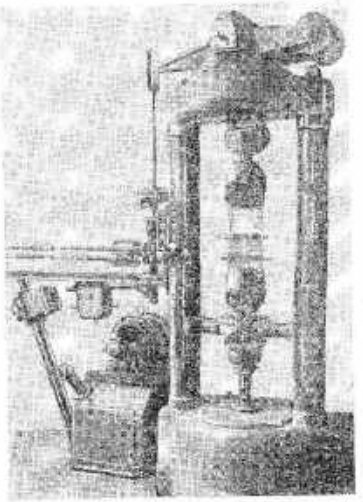


Рис. 137. Общий вид машины для испытаний на растяжение силой до 10 *Т*.

растяжения. Масштабы диаграммы: по оси деформаций 2 : 1 или 1 : 1, по оси нагрузок 300 *кГ* в 1 *мм* или 30 *кГ* в 1 *мм* в зависимости от величины груза *Q*. Машина работает только на растяжение.

На рис. 137 показан общий вид машины.

§ 13. Универсальная машина силой до 30 *Т*

Универсальная машина MAN силой до 30 *Т*, показанная на рис. 138, так же как и описанная выше разрывная машина силой до 50 *Т*, обладает механическим силовозбудителем и рычажным силоизмерителем. Нагружение производится от руки или при помощи мотора.

Рукояткой *1* с помощью бесконечной цепи *2* приводится в движение горизонтальный вал *3*. Этот вал посредством червячных передач вращает вертикальные винты *4*, перемещающие рабочий траверс *5*. Опускание траверса вызывает растяжение образца *6*, помещаемого сверху, и сжатие или изгиб образца *7*, помещаемого внизу. Таким образом, машина может быть использована для испытаний на растяжение, сжатие или изгиб, поэтому она называется универсальной. Во всех случаях сила передается раме *8*, подвешенной в точке *A* к рычагу *9*. Рычаг имеет неподвижную опору в точке *B*. Другим концом рычаг *9* опирается посредством стержня *10* на короткое плечо нижнего рычага *11*, имеющего на длинном плече груз *Q*, который может перемещаться вдоль рычага *11*. Если рычаг *11* занимает горизонтальное положение, то груз *Q* полностью уравновешивает силу, действующую на образец. Эта сила пропорциональна

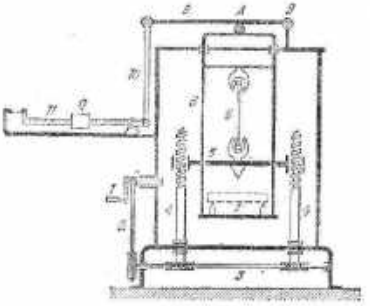


Рис. 138. Схема универсальной машины силой до 30 *Т*: *1* — рукоятка привода, *2* — бесконечная цепь, *3* — горизонтальный вал червячной передачи, *4* — винты, *5* — траверс, *6* и *7* — испытываемые образцы, *8* — рама подвижная в точке *A*, *9* — *11* — рычажный силоизмеритель, *Q* — передвижной груз, уравновешивающий усилие опыта.

плечу груза на рычаге *11*, и ее значение указывает стрелка, прикрепленная к грузу, на равномерной шкале, нанесенной на рычаге *11*. В зависимости от величины груза *Q* максимальная сила машины равна 30 или 3 *Т*; соответственно на рычаге *11* имеются две шкалы нагрузок.

Нагружение образца в пределах пропорциональности производится вручную. По достижении текучести дальнейшее растяжение образца осуществляется при помощи мотора. До включения мотора необходимо предварительно снять рукоятку ручного привода.

Машина имеет приспособление для получения диаграммы растяжения или сжатия. Масштабы диаграммы: по оси деформаций 4 : 1, по оси нагрузок 400 *кГ* в 1 *мм*.

Для испытаний на изгиб предусмотрен стационарный траверс.

§ 14. Машина для испытаний на растяжение и сжатие силой до 3 *T*

На рис. 139 показана схема машины для испытаний на растяжение и сжатие силой 3 *T* с рычажным силоизмерителем.

Траверс *A* машины перемещается при помощи винтов *2* и *3*, приводимых в движение рукояткой *4* (эта часть машины подобна силовозбудительному устройству в машинах, описанных в §§ 12 и 13). При опускании траверса *A* происходит нагружение образца *1*, который верхним своим концом крепится к раме, опертой на сложный рычаг. Нагрузка, воспринимаемая рамой от образца, уравновешивается передвижным грузом *Q*, расположенным на рычаге *5*.

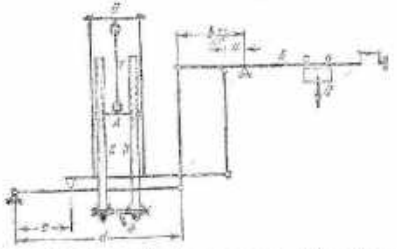


Рис. 139. Схема машины системы Мор и Федерсаф для испытаний на растяжение и сжатие силой до 3 *T*: *1* — образец, *2* и *3* — винты, *4* — рукоятка передачи, *5* — рычаг силоизмерителя, *Q* — уравновешивающий груз.

На этом рычаге имеется шкала нагрузок от 0 до 3000 *кГ* через 10 *кГ*. При пользовании нонпусом точность отсчета по шкале составляет 1 *кГ*.

Машина может работать и на сжатие. Для этого траверсы *A* и *B* меняют местами и снабжают упорными плитами.

Соотношение между плечами рычагов машины выбрано так $\left(\frac{a}{b} = \frac{c}{d}\right)$, что положение груза *Q* не зависит от положения образца на плите.

Машина удобна для испытания тонкостенных цилиндров на сжатие, так как ее упорные плиты имеют большие размеры.

§ 15. Разрывная машина силой до 1,5 *T*

Станина машины (рис. 140) состоит из корпуса *1* и колонны *2*. Верхний конец колонны является опорой для рычага *3*, несущего верхний захват *4* машины. Нижний захват *5* укреплен на тяговом

винте *6* машины. Головки испытываемого образца *7* закладываются в захваты *4* и *5*, причем предварительно захват *5* устанавливается на требуемой высоте с помощью рукоятки *8*, вращающей винт *6* через посредство двух конических шестерок.

Нагружение образца производится ручным приводом *9* или электромотором, вращающими гайку винта *6* (гайка находится внутри корпуса *1*). Винт при этом движется поступательно вниз и растягивает образец. Сила, растягивающая образец, передается на рычаг *3* и посредством стремени *10* уравновешивается на измерительном рычаге *11* передвижным грузом *Q*. Передвижение груза *Q* осуществляется при помощи рукоятки *12*, приводящей в движение горизонтальный винт *13*, установленный на измерительном рычаге *11*. Вращение винта заставляет груз *Q* скользить по рычагу. При совпадении указателей *14* по шкале, нанесенной на рычаге, прочитывают значение силы, растягивающей образец.

Общий вид машины показан на рис. 141.

Машина имеет диаграммный аппарат, позволяющий записать графически зависимость между нагрузкой на образец и его деформацией. Схема устройства диаграммного аппарата показана на рис. 142.

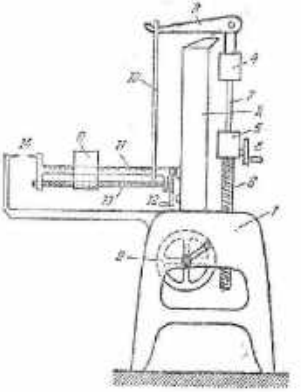


Рис. 140. Схема разрывной машины системы Мор и Федерсаф силой до 1,5 *T*: *1* и *2* — станина, *4* и *5* — захваты, *6* — тяговый винт, *7* — испытываемый образец, *8* — установочная рукоятка, *9*, *10*, *11* и *13* — рычажные пары — силоизмеритель, *12* и *13* — уравновешивающий груз *Q*, *9* — рукоятка ручного привода для нагружения образца (при работе с мотором снимается).

Диаграммный барабан *1* установлен на вертикальной оси. Тонкая нить *2*, прикрепленная одним концом к подвижному захвату машины *4*, а на другом несущая груз, охватывает шейку барабана полным оборотом. При перемещении захвата *4* поворачивается барабан; угол поворота барабана пропорционален перемещению захвата, которое можно считать равным полному удлинению образца, так как другой захват *5* практически остается неподвижным.

На поверхность барабана *1* предварительно накладывают бумагу, на которой при повороте барабана приставной карандаш 6

чертит диаграмму. Карандаш укреплен на вертикальном штоке, связанном с механизмом передвижения груза Q, уравновешивающего силу упругости образца. Шток перемещается от той же рукоятки 7, что и груз Q.

Таким образом, на оси абсцисс на диаграмме откладывается абсолютное удлинение образца, а по оси ординат — нагрузка.

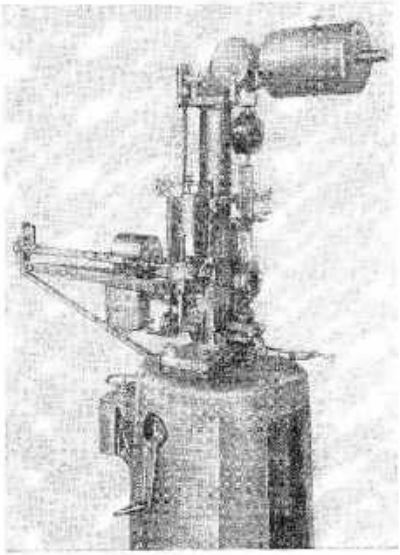


Рис. 141. Общий вид машины для испытаний на растяжение силой 125 *т*.

Масштаб удлинений равен двум, так как диаметр шейки барабана вдвое меньше диаметра барабана. Масштаб нагрузок зависит от величины противовеса Q. Нормальная величина противовеса соответствует при крайнем его положении на измерительном рычаге максимальной силе машины — 1500 *кГ*. В случае образца малых размеров целесообразно заменить противовес меньшим; это увеличит точность измерения нагрузки. Меньший противовес соответствует в крайнем своем положении силе 150 *кГ*. При нормальной величине противовеса 1 *см* по оси ординат на диаграмме соответствует 167 *кГ* нагрузки на образце.

Ось координат на диаграмме наносят до испытания. Для того чтобы провести ось абсцисс, дают образцу некоторую, весьма малую нагрузку при помощи рукоятки 9 ручного привода (рис. 140), затем той же рукояткой осторожно уменьшают ее до нуля. После этого ручную вспомогательную диаграммный барабан вокруг его оси на полный оборот, и при этом карандаш прочертит ось абсцисс. Ось ординат проводят также при нулевом значении нагрузки, вращая рукоятку 12; при этом карандаш прочертит вертикальную линию — ось нагрузок.

Следует помнить, что до включения мотора нужно снять рукоятку 9 ручного привода.

§ 16. Машина на кручение до 600 *кГ·м*

На рис. 143, *а* дан общий вид машины на кручение системы Ольсен, возбуждающей крутящий момент до 600 *кГ·м*. Схема машины изображена на рис. 143, *б*. Образец 1 закрепляется в захватах 2 и 3. Захват 2 присоединен к силовозбудительной части машины, а захват 3 — к силоизмерительной. Машина приводится в движение электромотором или от руки. Посредством системы зубчатых и фрикционной передач захвату 2 сообщается вращательное движение вокруг его оси, которая совпадает с осью образца; при этом образец закручивается.

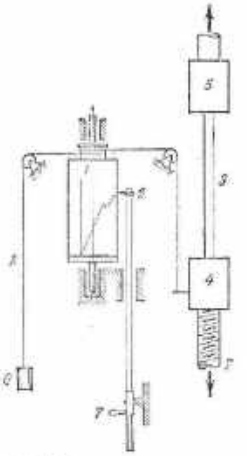


Рис. 142. Схема диаграммного аппарата испытательной машины силой до 1,5 *т*: 1 — диаграммный барабан, 2 — грузовая нить, 3 — растягиваемый образец, 4 — подвижный захват машины, 5 — неподвижный захват, 6 — карандаш по кругу, отмечающий с механизмом передвижения груза, 7 — рукоятка вертикального штока.

Крутящий момент, передаваемый образцом на захват 3, воспринимается системой рычагов, где уравновешивается передвижным грузом Q.

Устройство машины позволяет производить нагружение образца с малой или большой скоростями. Закручивание возможно только по часовой стрелке. Если необходимо производить закручивание

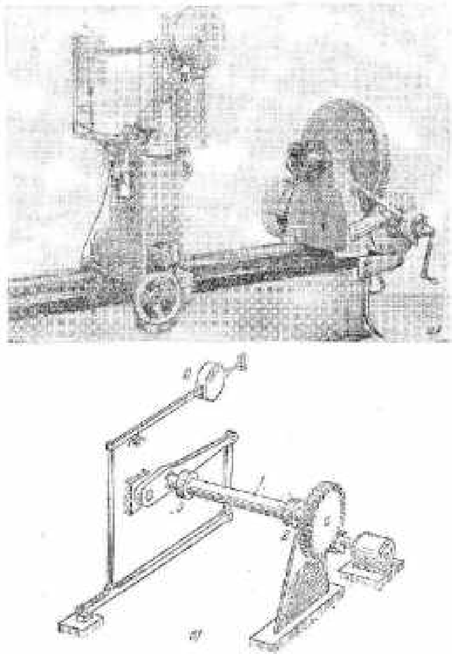


Рис. 143. Машина на кручение с рычажным силоизмерителем: а — общий вид машины; б — схема устройства машины: 1 — образец, 2 — [illegible], 3 — захват, соединенный с силоизмерителем, 4 — [illegible] груз.

образца против часовой стрелки, силоизмерительную часть машины следует повернуть другой стороной к образцу, переставив соответственно захват 3.

ГЛАВА VII

МАШИНЫ ВИНТОВЫЕ С МАЯТНИКОВЫМ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЕМ

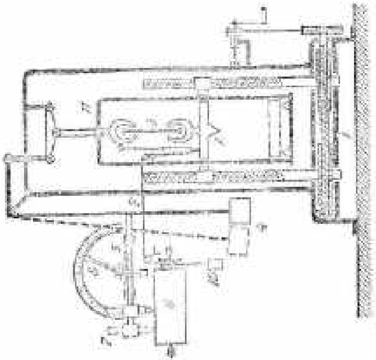
§ 17. Универсальная машина WPM силой до 6 Т

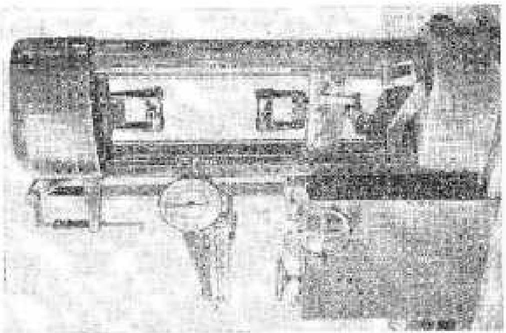
Силовозбудителем универсальной машины WPM (ГДР), как и у машин, описанных в предыдущей главе, является винт, но измерение силы осуществляется не простым, а коленчатым рычагом, так называемым маятником. В настоящее время маятниковые машины широко распространены. К этому типу относится и машина ГЗИП-Р5, описанная в работе 2.

Машина системы WPM силой до 6 Т (рис. 144) приспособлена для статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб.

Схема машины показана на рис. 145. Горизонтальный вал 1 приводится в движение от руки или мотором. Посредством червячной передачи вал вращает два вертикальных винта машины, перемещающих траверс 2. Перемещение траверса вниз вызывает растяжение образца 3, помещаемого в захваты машины. Усилие образца передается на коленчатый рычаг — маятник, несущий груз 4, и вызывает отклонение маятника (показано пунктиром). Отклонение маятника пропорционально усилию, действующему на образец. Соединенная с маятником рейка 5 показывает это усилие на диаграммном барабане 6, прочерчивая пером 7 на поверхности барабана линию вдоль образующей в масштабе 500 или 50 кГ в 1 см (в зависимости от величины груза 4). На рис. 145 пунктиром показано положение пера 7, соответствующее отклоненному положению маятника. Перемещение рейки 5 вызывает поворот стрелки, показывающей усилие машины на шкале 8.

Удлинение образца фиксируется на диаграммном барабане 6 при помощи нити 9. Одним своим концом эта нить прикреплена к верхнему захвату машины, далее она огибает блок, прикрепленный к траверсу 2, и посредством еще двух блоков передается на шейку барабана, охватывая ее полным оборотом, и натягивается грузом 10. Изменению расстояния между верхним захватом машины и траверсом соответствует поднятие или опускание груза 10, причем барабан





поворачивается; при этом перо 7 прочерчивает по окружности барабана линию, длина которой в 4 раза превышает указанное изменение расстояния между захватами машины, равное удлинению образца [1]). Одновременно отклоняется маятник, поэтому на барабане изображается зависимость между нагрузкой и деформацией, т. е. диаграмма растяжения, описанная в работе I.

Удлинение образца замеряется также в натуральную величину, как смещение траверса относительно рамы 11, на которой имеется миллиметровая шкала.

При испытаниях на сжатие и изгиб испытываемые образцы помещаются в нижней части рамы, как показано на рис. 145 пунктиром.

§ 18. Разрывная машина ИМ-12А

Разрывная машина ИМ-12А [2]) силой 12 Т (рис. 146) предназначена для статических испытаний на растяжение цилиндрических и плоских образцов. Применяя специальные приспособления, на этой машине можно производить испытания на сжатие и срез.

Схема машины показана на рис. 147. Нагружающий механизм состоит из тягового винта 1, зубчатой гайки 2 и червяка 3. Этот механизм расположен во внутренней полости станины машины. Червяк одним концом соединен с валом редуктора посредством дисковой муфты. Вращение червяка вызывает поворот гайки и поступательное перемещение винта, верхний конец которого имеет захват 4 для закрепления испытываемого образца 5. Гайка опирается на крышку станины посредством шарикоподшипника 6.

Силоизмерительная часть машины ИМ-12А состоит из системы рычагов: рычага первого рода 7 с отношением плеч $a : b = 1 : 60$ и коленчатого рычага с противовесом Q, называемого маятником. К короткому плечу рычага 7 подвешен верхний захват машины. Усилие тягового винта 1, передаваемое на рычаг через образец 5, вызывает поворот рычага (показан пунктиром). Длинное плечо рычага 7 связано шарнирно с кривошипом маятника посредством тяги 9 и вызывает, следовательно, отклонение маятника. Это отклонение тем больше, чем больше усилие, действующее на образец. На шкале 17 силоизмерителя проставлены значения усилий, соответствующие отклонению маятника. Величина усилия отмечается указателем, находящимся на рейке 18, которая передвигается в горизонтальном направлении поводком 19 с прорезью, укрепленным жестко на маятнике 8.

[1]) Возможно установить и другой масштаб деформаций, а именно 2 : 1; 5 : 1 или 10 : 1.

[2]) Машина сконструирована в ЦНИИТМАШ Н. В. Кудрявцевым и Я. И. Чеплашкиным.

Плавность опускания маятника после разрушения образца обеспечивается автоматическим гидравлическим тормозом. При опускании маятника поршень тормоза *10* поднимается вверх, вытесняя масло из нижней части цилиндра *11* в верхнюю. Скорость этого процесса можно регулировать изменением размера щели, соединяющей обе части цилиндра. Для уменьшения трения цилиндр

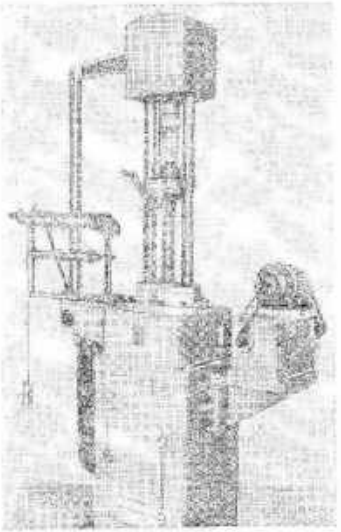


Рис. 141. Общий вид машины УМ-12А для испытания на растяжение.

тормоза поддерживается в непрерывном вращательном движении при помощи специального электромотора.

Машина имеет диаграммный аппарат, автоматически записывающий на бумаге в большом масштабе диаграмму растяжения, подобный аппарату на прессе Гагарина. Бумага предварительно наматывается на ролик *12*, а свободный конец листа заправляется на поверхности ведущего барабана *13*. Этот барабан во время

работы машины вращается вокруг своей оси при помощи системы зубчатых колес цилиндрических *14* и конических *15*. Угол поворота барабана пропорционален углу поворота гайки *2* и, следовательно, перемещению плиты *1*, последнее можно считать практически равным удлинению образца. Таким образом, перо *16*, укрепленное на рейке *18*, фиксирует на окружности диаграммного барабана *13* удлинения образца, масштаб изображения удлинений

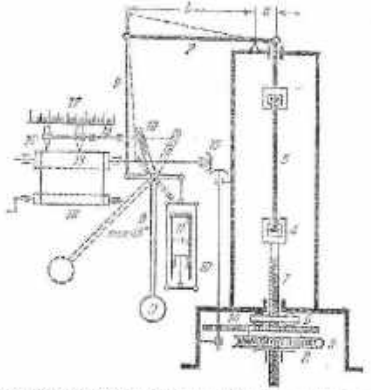


Рис. 142. Схема разрывной машины УМ-12А: *1* — плита; *2* — гаечная гайка; *3* — червяк; *4* — червячное зубчатое колесо; *5* — образец; *6* — неподвижная плита; *7* — рычаг силоизмерителя; *8* — маятник; *9* — ось; *10* — поршень; *11* — цилиндр тормоза; *12* — ролик для намотки бумаги; *13* — диаграммный барабан; *14* и *15* — зубчатые колеса барабана; *16* — перо; *17* — весы силоизмерителя; *18* — рейка-ползун; *19* — поводок, перемещающий каретку.

зависит от соотношения размеров барабана и шестерен *14* и *15* и подобран равным 100 : 1.

Одновременно перо *16* вместе с рейкой движется вдоль оси барабана, как указывалось выше, причем это перемещение пропорционально нагрузке. В итоге получаем на бумаге кривую, представляющую полную диаграмму растяжения, т. е. зависимость между удлинением образца и нагрузкой.

Диаграммный аппарат фиксирует не только удлинение образца, но и деформацию нагруженных частей машины, а также перемещение верхнего захвата машины вследствие поворота рычага *7*. Поэтому, чтобы определить удлинение образца, по полученному по

диаграмме значения удлинения нужно вычесть результат влияния указанных факторов, пользуясь графиком тарировки машины, проведенной на коротком мощном образце, деформацией которого можно пренебречь.

Наибольшее расстояние между захватами машины равно 318 *мм*. Расстояние между стойками станины в свету — 165 *мм*. Наибольший выход тягового винта из гайки — 300 *мм*.

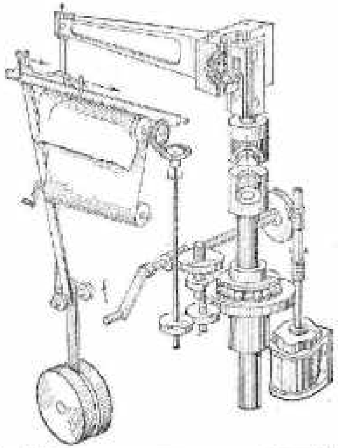


Рис. 148. Перспектива схемы взаимосвязи движущихся частей машины (см. рис. 147).

Нагружение образца на машине производится при помощи электромотора (мощностью 0,7 *квт* при числе оборотов 1400 в минуту) через редуктор. Последний позволяет изменить скорость нагружения. Нормальная скорость соответствует удлинению образца на 2 *мм* в 1 минуту. При большей скорости удлинение составляет 10 *мм* в минуту.

Перемена направления движения винта машины производится переключением электромотора.

Существует машина силой до 4 *Т*, аналогичная с описанной.

На рис. 148 показана в перспективе взаимосвязь движущихся частей машины.

§ 19. Машина на кручение до 30 *кГм*

Общий вид машины показан на рис. 149, а схема машины дана на рис. 150. Образец неподвижно закрепляется в двух захватах *1* и *2*. При помощи рукоятки *4* приводится в движение система зубчатых передач, соединенная с захватом *2*. Для работы с меньшей скоростью имеется червяк, на который в этом случае переставляют

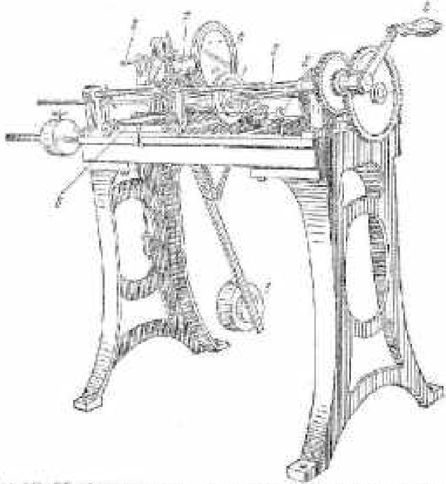


Рис. 149. Общий вид машины на кручение с маятниковым силоизмерителем (*8* — ползун, [illegible] *1* с [illegible], остальные обозначения см. на рис. 150).

рукоятку *4*. При повороте захвата *2* происходит закручивание образца *3*; закручивающий момент уравновешивается маятниковым противовесом *Q*. По отклонению маятника можно определить крутящий момент, действующий на образец; он равен произведению Qa, где a — отклонение противовеса по горизонтали от исходного положения (рис. 150, *а*).

Значения крутящего момента указываются на круговой шкале *9* стрелкой, вращаемой маятником при его движении посредством ползуна *8*, и автоматически записываются на диаграммном бара-

бане 7, так как ползун снабжен карандашом, опертым на барабан. Таким образом, на барабане фиксируется в определенном масштабе вдоль образующей цилиндра значение крутящего момента. Значения угла закручивания образца отмечаются на барабане вдоль развертки тем же карандашом вследствие вращения барабана вокруг своей оси. Вращение диаграммного барабана 7 производится приводом от захвата 2 машины (привод показан на рис. 149), поэтому угол поворота барабана пропорционален углу поворота захвата 2. Следовательно, на барабане получается кривая зависимости крутящего момента от угла поворота захвата 2. Масштабы графика

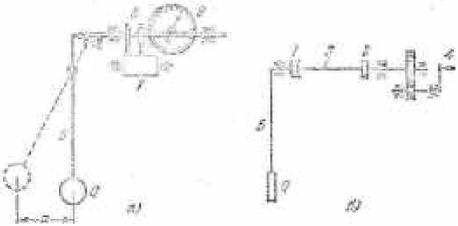


Рис. 150. Схема машины на кручение с маятниковым силоизмерителем: [illegible]

при полном грузе на маятнике: по оси моментов — 300 кГм в 1 см, по оси углов — 1 радиан в 1 см диаграммы. При половинном грузе на маятнике (без двух добавочных гирь) масштаб нагрузок диаграммы вдвое больше, т. е. 150 кГсм в 1 см.

Угол поворота захвата 2 можно наблюдать, помимо диаграммы, на двух круговых шкалах, вращающихся от того же привода, что и диаграммный барабан 7. Одна шкала дана в градусах, другая — в полных оборотах захвата (шкалы на рис. 150 не показаны).

Поскольку захват 1 машины также поворачивается на угол, равный углу отклонения маятника, то для определения угла закручивания образца нужно из значения угла, показываемого на барабане (или на шкале), вычесть угол отклонения маятника. Для измерения угла отклонения маятника на оси маятника имеется градусная шкала.

Существующие машины описанного типа дают крутящий момент до 3, 6 и 30 кГм.

ГЛАВА VIII

МАШИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ

§ 20. Универсальная машина силой до 10 *Т*

В большинстве современных испытательных машин силовозбудителем является цилиндр, в который под давлением нагнетается масло. Одна из таких машин, пресс Амслера силой до 200 *Т*, описана в работе 3. В настоящей главе рассмотрено несколько типовых гидравлических машин и установок для статических испытаний.

Общий вид и схема универсальной гидравлической машины системы Мор и Федергаф силой до 10 *Т* показаны соответственно на рис. 151 и 152.

Верхний упорный траверс *1* машины неподвижен. Подвижная часть, укрепленная на поршне *2* гидравлического цилиндра *3*, представляет собой раму *4*, охватывающую упорный траверс *1* сверху и снизу. Таким образом, движение поршня может вызывать сжатие (изгиб) или растяжение образца в зависимости от того, где помещен образец. Поэтому машина называется универсальной.

Нагрузка, передаваемая на траверс, воспринимается системой рычагов, показанной на рис. 152, и уравновешивается маятниковым противовесом *Q*. Максимальное отклонение маятника соответствует нагрузке на образец в 2, 5 или 10 *Т* в зависимости от величины противовеса.

Машина имеет диаграммный аппарат (на рис. 152 не показан), масштаб нагрузок на котором соответственно равен 20, 50 или 100 *кГ* в 1 *мм*; масштаб деформаций можно установить на 4 : 1, 2 : 1 или 1 : 1.

При работе с универсальной гидравлической машиной следует иметь в виду, что, устанавливая в начале опыта поршень *2* у упорного траверса *1* при помощи насоса, нужно до момента соприкосновения образца с траверсом уменьшить подачу масла, чтобы не вызвать гидравлического удара, грозящего повреждением гидравлической системы.

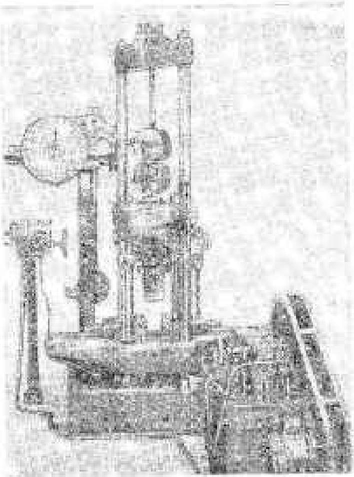


Рис. 131. Общий вид гидравлической машины для испытаний на растяжение, сжатие и изгиб силой до 10 Т.

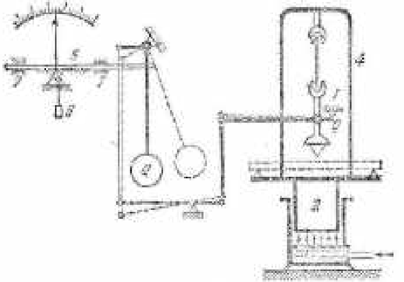


Рис. 132. Схема универсальной гидравлической машины силой 10 Т: 1 — [illegible] траверс, 2 — поршень, 3 — гидравлический цилиндр, 4 — [illegible] рама, 5 — [illegible], 6 — груз, [illegible], 7 — [illegible].

§ 21. Универсальная машина силой до 20 Т для длинных образцов

Рассматриваемая универсальная машина предназначена для испытаний на сжатие и растяжение длинных образцов. В машине имеются стол для испытаний на изгиб и приспособление для испытания тросов на разрыв. Длина образцов, испытываемых на сжатие, может достигать 305 *см*, на растяжение — 135 *см*, а при дополнительном устройстве 185 *см*; длина образцов, испытываемых на изгиб, может достигать 110 *см*. Наибольшая общая высота машины равна 635 *см*.

Машину (рис. 133) устанавливают на фундамент на уровне пола, а верхнюю неподвижную поперечину *16*, соединенную с колоннами *12*, прикрепляют кронштейнами к стене. Внутри станины *8* при помощи рукоятки перемещается по вертикали шпиндель *9*, к которому присоединен нижний захват. Верхний захват привинчен снизу к подвижному траверсу *13*. Этот траверс одновременно является столом для образцов на изгиб и нижней опорой для сжатых образцов. Тягами *14*, имеющими винтовую нарезку в верхней своей части, траверс *13* подвешен к траверсу *18*, что образует подвижную силовую раму, опирающуюся на поршень рабочего цилиндра *17*. При нагнетании масла в рабочий цилиндр его поршень поднимает эту раму, вызывая растяжение образца, закрепленного в нижнем испытательном пространстве, и сжатие или изгиб в верхнем испытательном пространстве.

Верхней опорой сжатых образцов является поперечина *15*, неподвижно закрепляемая на одном из пяти уровней, которые фиксируются выточками в колоннах *12*; верхний уровень фиксируется поперечиной *16*. Для того чтобы поперечину *15* было легче передвигать вдоль колонн *12*, она уравновешена двумя грузами на тросах, перекинутых через блоки поперечины *16*.

Для подъема подвижного траверса *13* при установке нужного расстояния между захватами или опорами сжатых образцов служит червячная передача в траверсе *18*, приводимая в действие при помощи бесконечной цепи *19*. Высота подъема траверса *13* или расстояние между нижними захватами ограничивается длиной нарезной части тяг *14* и не превосходит 135 *см*. При необходимости это расстояние можно увеличить, для чего тяги *14* нужно удлинить, надев на них трубы и закрепив их гайками под траверсом *13*.

Давление масла в рабочем цилиндре *17* создается при помощи эксцентрикового насоса *1* с двумя плунжерами, смонтированного на стойке чугунного литья, которую устанавливают рядом с машиной на полу и крепят болтами. При движении плунжеров колебания давления выравниваются регулятором подачи масла, поэтому насос работает без толчков. Картер насоса является также частью масляного бака, и поэтому механизм получает хорошую смазку.

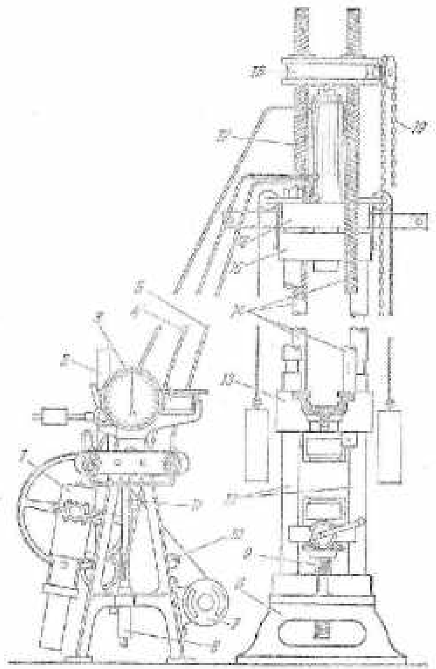


Рис. 153. Универсальная машина [illegible] до 20 Т для испытания образцов: 1 — насос, 2 — маятник, 3 — циферблат манометра, 4 — трубка к манометру от рабочего цилиндра, 5 — трубка от насоса к рабочему цилиндру, 6 — цилиндрик манометра, 7 — электромотор, 8 — станина насоса, 9 — шпиндель, 10 — [illegible], 11 — тяга [illegible], 12 — [illegible], 13 — [illegible], 14 — [illegible], 15 — [illegible], 16 — [illegible], 17 — рабочий цилиндр, 18 — траверс, 19 — [illegible].

При помощи ременной передачи насос приводится в действие электромотором 7, расположенным на стойке справа. Возможен также ручной привод при помощи рукоятки, надеваемой непосредственно на вал насоса. Под электромотором расположен его выключатель 10.

Насос подает масло по трубке 5 к рабочему цилиндру 17 машины, который посредством трубки 4 сообщается с вертикальным цилиндриком 6 манометра. Поршень цилиндрика действует на тягу 11, и отклоняет маятник 2 манометра. Короткий рычаг маятника перемещает зубчатую рейку позади циферблата 3 манометра и вращает его стрелку. Манометр снабжен диаграммным аппаратом.

Рассмотренная стойка с насосом и маятниковым манометром является независимым агрегатом, который по желанию может быть присоединен и к другой испытательной машине.

§ 22. Универсальная 30-тонная машина для испытаний при сложном нагружении

Рассмотрим устройство универсальной машины для испытания образцов в условиях сложного напряженного состояния, которое создается совместным действием растяжения или сжатия с кручением и внутренним давлением. Предельное нагружение на растяжение или сжатие составляет 30 Т, на кручение — 200 кГм и на внутреннее давление — 300 кГ/см². Конструкция машины позволяет создавать каждый вид нагружения отдельно и в любой комбинации с другими при независимом измерении усилий во всех случаях.

Основными частями машины являются (рис. 154):

с т а н и н а с зажимными устройствами, цилиндром для передачи продольного усилия, приспособленным для закручивания образцов и месдозами для измерения крутящего момента;

г и д р а в л и ч е с к и е с и л о в о з б у д и т е л и растяжения — сжатия и внутреннего давления с насосами, моторами, компрессором, баллонами сжатого воздуха, пусковыми и регулирующими устройствами;

д о с к а м а н о м е т р о в с маслопроводами и переключателями для независимого измерения крутящего момента и внутреннего давления в пустотелых образцах, а также давления в баллонах сжатого воздуха; сюда же относятся диаграммные манометры для записи кривых внутреннего давления в образце (по времени) и угла закручивания (по усилию);

м а я т н и к о в ы й с и л о и з м е р и т е л ь при растяжении — сжатии с цилиндром, маятником и диаграммным аппаратом;

м е х а н и ч е с к и й п р и в о д для кручения с мотором, регулятором скорости и гибким валом.

Станина машины (рис. 155) имеет неподвижные колонны 2 и неподвижный траверс, в который вмонтирован рабочий цилиндр 9

с плунжером 10, несущим подвижную перекладину с тягами и подвижным испытательным столом 7.

Для испытаний на растяжение служат захваты 3 и на сжатие — захваты 8 с комплектом специальных приспособлений для закрепления образцов. Расстояние между захватами 3 рассчитано на испытание образцов длиной до 600 мм, при этом 350 мм достигается за счет

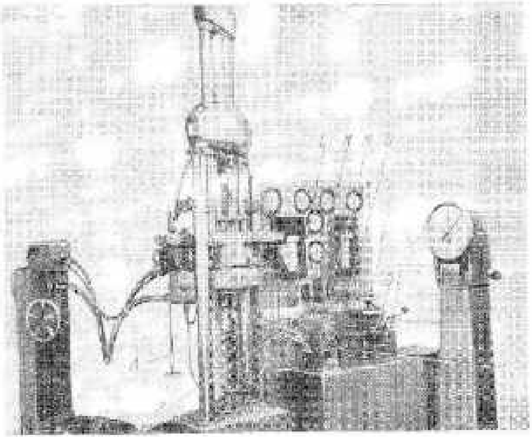


Рис. 134. Универсальная 30-тонная машина для испытаний при сложном нагружении. А — [illegible] Б — [illegible] В — [illegible] Г — [illegible] Д — [illegible] Е — [illegible] Ж — [illegible] З — [illegible] И — [illegible] К — [illegible] Л — [illegible]

перемещения шпинделя нижнего захвата 3, приводимого в движение мотором, и 250 мм — за счет хода плунжера 10. Между опорными плоскостями захватов 8 допускается расстояние от 50 до 300 мм.

Вместе с захватами 3 и 8 на одной оси с ними вращается внутри стола 7 шестерня, находящаяся в зацеплении с червяком, прикрепленным неподвижно к столу 7. Стол имеет боковые приливы, где расположены месдозы 5, поршни которых упираются в колонны 2, и поэтому стол закрепляется от вращения.

Для возбуждения продольной силы и внутреннего давления служат шестиплунжерные насосы 18 и 22, приводимые в действие моторами 20 и 25 и управляемые рукоятками 17 и 24 (грубая регулировка) и штурвалами 16 и 23 (точная регулировка).

Насос 18 нагнетает масло из запасного бака 19 по трубке 11 в рабочий цилиндр 9, вследствие чего плунжер 10 поднимается вместе с перекладиной, тягами и столом 7 и образец сжимается

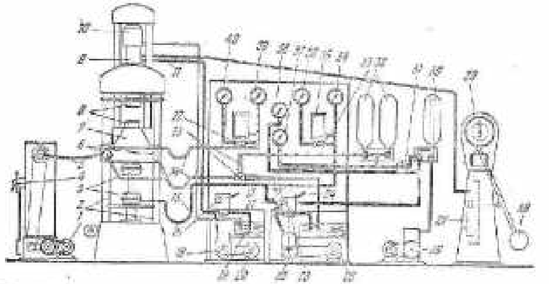


Рис. 135. Гидравлическая схема универсальной 30-тонной машины для испытаний при сложном нагружении: 1 — мотор, 2 — [illegible] 3 — [illegible] 4 — штурвал, 5 — [illegible] 6 — месдозы, 7 — испытательный стол, 8 — захваты на сжатие, 9 — рабочий цилиндр, 10 — плунжер, 11 — [illegible] к рабочему цилиндру, [illegible] 19 — бак для масла, 20 — мотор, [illegible] 25 — мотор, [illegible] 27 — цилиндр силоизмерителя, 28 — маятник, 29 — [illegible] 30 — баллон для [illegible] давления, 31 — вентиль, [illegible] 37 и 38 — [illegible] для баллонов, 39 и 40 — манометры для месдоз.

или растягивается. При этом давление масла в цилиндре 9 увеличивается и по трубке передается на поршень цилиндра 27 силоизмерителя. Поршень действует на тягу и отклоняет маятник 28 пропорционально усилию, возникающему в образце.

Верхний короткий конец маятника толкает зубчатую рейку, связанную со стрелками шкалы 29 и пером диаграммного аппарата, которое перемещается по горизонтали. К маятнику можно подвешивать грузы с марками A, B и C в трех комбинациях. В зависимости от величины этих грузов шкала имеет три предела измерения с соответствующей ценой деления, и диаграмма получает по горизонтали соответствующий масштаб сил: при грузе A пределы измерения 0 — 5000 кГ, цена деления 10 кГ, масштаб сил на диаграмме 1 мм : 33,3 кГ; соответственно при грузах A + B пределы 0 — 15 000 кГ, цена 25 кГ, масштаб 1 мм : 100 кГ; при грузах A + B + C пределы 0 — 30 000 кГ, цена 100 кГ, масштаб 1 мм : 200 кГ.

Для того чтобы избежать заклинивания поршня в цилиндре 27 силоизмерителя и уменьшить влияние трения между стенками поршня и цилиндра на точность показаний шкалы 29, цилиндр 27 вращается специальным мотором, включаемым автоматически одновременно с насосом 18. В верхней части цилиндра 27 имеется тормозной кран, предназначенный для плавного опускания маятника после разрушения образца и для предупреждения резкого падения давления в масляной системе.

В процессе испытания подвижной стол 7 перемещается вверх на величину продольной деформации образца при сжатии или растяжении. Это перемещение при помощи рейки, прутковых валов и шестерен связано с движением диаграммной ленты, на которой перо прочерчивает по вертикали отрезки, пропорциональные деформации образца. Масштаб деформации на диаграмме зависит от передаточного числа шестерен и устанавлел в двух ступенях 1 : 1 и 1 : 2.

При повышении давления в рабочем цилиндре 9 небольшое количество масла просачивается в зазор между стенками плунжера 10 и цилиндра, смазывает их, собирается в канавке вверху цилиндра и сливается по трубке в запасный бак 19.

Для испытания на внутреннее давление в неподвижных захватах 3 (нижнем) и 8 (верхнем) предусмотрены сверления, через которые образец заполняется маслом. В просверленные отверстия плотно завинчивается трубка, соединяющая гибким шлангом высокого давления 15 через вентиль 21 с насосом 22, подающим масло из запасного бака.

Для того чтобы поддержать постоянным давление в образце при его расширении в процессе опыта, на тыльной стороне щита с манометрами расположены баллоны 30 и 32 для сжатого воздуха. При испытаниях с малым давлением (до 100 *атм*) достаточным компенсатором давления является сжатый воздух одного баллона 30; при большом давлении необходимо подключить баллоны 32. Последние предназначены также для заполнения маслом мерсдозы 6.

До испытания баллоны сжатого воздуха должны быть предварительно заряжены. Для этой цели закрывают вентиль 31, расположенный справа у доски с манометрами, и вентиль 21 — на стойке управления насосом 22; затем включают мотор компрессора 26 и в баллон 30 нагнетают воздух до давления в 10 *атм*, что контролируется по манометру 38. Если нужно зарядить баллоны 32, то вентиль 31 должен быть открыт, и давление измеряется еще и по манометру 37. Как только давление воздуха в баллонах достигнет 10 *атм*, мотор компрессора нужно выключить. Тогда обратный клапан в баллоне 30 автоматически закроет выход воздуха из баллона. После этого включают мотор 25, и насос 22 будет нагнетать масло в баллон 30, а при открытом вентиле 31 — и в баллоны 32, до требуемого давления, но не более 300 *атм*.

Регулировка подачи масла в баллоны производится при помощи рукоятки 24 и штурвала 23, а измеряется манометрами 38 и 37.

При нагнетании масла воздух в баллонах сжимается и образует воздушную упругую подушку. Для того чтобы нагрузить образец постоянным внутренним давлением, нужно медленно и осторожно открыть вентиль 21, и тогда трубки, идущие от образца, соединяются с трубками от баллонов. При этом под действием воздушной упругой подушки давление в образце, предварительно наполненном маслом, а также в манометрах 34 и 36 и манометре-самописце 35 увеличится до установленного в баллонах предела. Манометр 36 предназначен для более точного измерения давления, не превосходящего 100 *атм*, для чего нужно предварительно открыть вентиль 33; если имеется вероятность того, что давление в образце превысит 100 *атм*, то нужно обязательно закрыть вентиль 33 и измерять давление только по манометру 34 до 300 *атм*. Можно также включить манометр-самописец 35, дающий диаграмму изменения внутреннего давления во времени.

В головке баллонов размещены дифференциальные клапаны, пропускающие масло из баллонов только при малой разности давлений; если же давление или баллонов резко падает, то клапаны вовсе не пропускают масло. Поэтому из пустотелого образца при разрушении вытекает только незначительное количество масла.

Перед испытанием на кручение нужно зарядить до давления в 300 *атм* баллоны 32 и посредством их наполнить маслом мерсдозы 6, манометры 37, 40 и второй манометр-самописец, для чего необходимо осторожно открыть вентили 13. В верхней части мерсдоз и манометров имеются винтовые пробки, которые следует вывернуть, чтобы удалить воздух. Как только в отверстиях покажется масло, пробки нужно туго завернуть на свои места. Наполнение маслом продолжается до тех пор, пока поршни мерсдоз не упрутся своими роликами в направляющие планки колонн 2 и пока давление масла не повысится до величины 1 *кГ/м* по показаниям манометров 39 и 40. Закрытием вентилей 13 доступ масла из баллонов в мерсдозы и манометры прекращается.

После этого в захватах закрепляют образцы со специальными квадратными головками, входящими в гнезда квадратных вкладышей. Выемки для квадратных вкладышей имеются во всех захватах 3 и 8, что позволяет производить испытание на кручение при одновременном действии растяжения или сжатия.

Крутящая нагрузка на образец создается мотором 1, через систему цепных передач, гибкий вал 5 и червячную передачу. Мотор 1 вращает шестерню, расположенную внутри стола 7, вместе с прикрепленными к ней захватами 3 (верхним) и 8 (нижним) и головкой образца. Другая головка образца остается неподвижной вместе с нижним захватом 3 или верхним захватом 8; чтобы не вращаться, эти захваты закреплены перекладинами, упирающимися в колонны 2.

Скорость нагружения регулируется штурвалом *4*, вращением которого изменяется передаточное число цепной передачи от мотора на гибкий вал *5*. Эта скорость установлена в пределах, позволяющих закручивать образец на угол от 80 до 120° в 1 минуту.

Сопротивление образца закручиванию передается на стол через захваты, шестерню и червяк. При этом масляным *6* упираются своими поршнями в колонны *2*; давление масла в масляных увеличивается пропорционально крутящему моменту и передается по верхнему участку гибкого шланга *14* на манометры *39* и *40*, градуированные в *кГм*. Манометр *40* предназначен для измерения крутящего момента величиной до 80 *кГм* и включается открытием вентиля *12*. Если крутящий момент в образце может превысить 80 *кГм*, то вентиль *12* обязательно нужно закрыть и измерение производить только по манометру *39* до максимального момента в 200 *кГм*. Манометр-самописец позволяет получить диаграммы зависимости крутящего момента от времени или от угла закручивания.

Подготовка и пуск машины производятся в следующем порядке.

а) Испытания на растяжение или сжатие.

1. Устанавливают требуемый предел измерения завешиванием или снятием грузов маятника *26* и переводят регулятор тормозного клапана цилиндра *27* на метку соответствующего предела измерения. При необходимости получения диаграммы испытаний приводят в зацепление малую диаграммную ленту с шестерней круглого вала согласно выбранному масштабу и переставляют перо на крайнюю нулевую линию диаграммной ленты.

2. Образец закрепляют в специальных зажимах. Предварительно нижний захват *8* перемещают на требуемое для образца расстояние посредством мотора, расположенного на основании станины и включаемого итоговым переключателем *A* (рис. 154). Верхняя кнопка переключателя предназначена для включения движений захвата вверх, нижняя — вниз, средняя — для остановки. При испытаниях на сжатие предварительная установка расстояния между захватами *8* (рис. 155) осуществляется нагнетанием масла в рабочий цилиндр *9*.

3. Включают мотор *26*, нажимая на верхнюю кнопку выключателя *C* (рис. 154). От мотора начинает действовать насос *18* (рис. 155), управление которого производится рукояткой *17* и штурвалом *16*. При совпадении нулевой метки диска управления с неподвижной стрелкой насос не подает масло в цилиндр *9* и образец не нагружается. Чтобы образец нагрузить, нужно нажать на рукоятку *17* и переместить ее влево, тогда насос начнет подавать масло в цилиндр, создавая в нем давление. Вместе с рукояткой поворачивается также и диск управления. Метки на диске указывают скорость подъема плунжера *10* для случая, когда образец отсутствует.

В процессе испытания скорость нагружения наблюдают по манометру *39* и ее точную регулировку выполняют штурвалом *16*, при вращении которого диск управления поворачивается медленно.

4. При разрушении образца рукоятку *17* поворачивают вправо до упора, тем открывают сливной клапан, и масло из цилиндра *9* стекает в бак по трубке *11*. Выключают мотор *26*, делают отсчеты по манометру *39* и вынимают образец из захватов.

б) Испытания на внутреннее давление.

1. Закрепляют густотельный образец в захватах и плотно привинчивают трубку гибкого шланга *13* к неподвижному захвату (нижней захват *3* или верхний — *8*), имеющему сверление для пропуска масла.

Чтобы наполнить образец маслом, надо соединить его внутреннюю полость с насосом *22*, для чего открывают вентиль *21*, поворачивая его штурвал влево. После этого включают мотор *25*, нажимая на верхнюю кнопку выключателя *E* (рис. 154). Когда образец наполнен маслом, вентиль *21* (рис. 155) закрывают вращением штурвала вправо и, нажимая на нижнюю кнопку выключателя *E*, останавливают мотор. Подачу масла насосом *22* регулируют при помощи рукоятки *24* и штурвала *23* так же, как и для насоса *18*.

2. Заряжают баллоны *30* и *32* сжатым воздухом, для чего, нажимая на верхнюю кнопку выключателя *K* (рис. 154), включают мотор компрессора *26* (рис. 156). Одновременно следует убедиться в том, что вентили *21* и *13* закрыты. Когда по манометрам *38* и *37* давление воздуха в баллонах достигает 10 *атм*, компрессор выключают, нажимая на нижнюю кнопку выключателя *K* (рис. 154). Затем включают мотор насоса *22*. При закрытом вентиле *21* масло поступает в баллоны *36* и *32* и давление в них увеличивается. После того как давление в баллонах достигнет требуемого значения, но не более 300 *атм*, что наблюдают по манометрам *38* и *37*, насос *22* выключают.

Если требуется зарядить только один баллон *30*, то поворачивая вправо штурвал *F* (рис. 154), предварительно закрывают вентиль *31* (рис. 156) и давление измеряют только по манометру *38*.

3. Устанавливают требуемый предел измерения. Для измерения давления в образце величиной не более 100 *атм* предназначен манометр *35*, который включают при помощи вентиля *33*, поворачивая штурвал *G* влево (рис. 154). В случае большего давления манометр *36* обязательно надо выключить, вращая штурвал *G* вправо до отказа, и измерять давление только по манометру *34* (рис. 155). Манометр-самописец включают перестановкой вверх рычага, расположенного на правой боковой стороне корпуса.

4. Регулируют поступление масла в образец для создания в нем внутреннего давления осторожным и медленным открыванием вентиля *21*. Величину давления в образце контролируют по манометру *36* и *34*.

После разрушения образца или по окончании испытаний закрывают вентиль *21*, рукоятку *24* управления насосом поворачивают вправо до отказа, сливают масло из системы в запасной бак и вынимают образец из захватов.

в) Испытания на кручение.

1. Устанавливают пределы измерения, включая или отключая манометр *40* при помощи штурвала *1*, (рис. 154).

2. Вращая штурвалы *B* и *D* влево, открывают вентили *13* (рис. 155) и наполняют мессдозы *6* и манометры *39* и *40* маслом из предварительно заряженных баллонов *32*.

3. Закрепляют образец с квадратными головками в захватах с квадратными вкладышами.

4. Включают мотор *1*, нажимая на верхнюю кнопку выключателя *H* (рис. 154), и регулируют скорость нагружения образца при помощи штурвала *4*.

5. По окончании испытаний образец вынимают из захватов и масло сливают из мессдоз и манометров, для чего открывают нижний вентиль *13*, вращая штурвал *D* вправо.

При комбинированных испытаниях подготовка и пуск машины производятся для каждого вида нагружения в указанном порядке.

ГЛАВА IX

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТВЕРДОСТЬ

§ 23. Пресс Бринеля (тип Альфа)

Пресс Бринеля применяется для испытания металлов на твердость вдавливанием в образец стального шарика. Этот пресс развивает силу давления до 3000 *кГ* и является устройством с гидравлическим силовозбудителем и ручным приводом в действие.

Конструкция и схема работы пресса Бринеля приведены на рис. 156. В массивной чугунной литой станине *1* смонтирован подъемный винт *3*. Винт получает поступательное движение вдоль своей геометрической оси при поворачивании маховика *2*. Подъемный винт заканчивается столом *4*, на котором устанавливается образец.

В гнезде верхней части станины *1* расположен рабочий цилиндр *7*, имеющий две расточки: нижнюю (большую) диаметром D_1 и верхнюю (малую) диаметром D_2. Геометрическая ось цилиндра составляет с осью штемпеля *6* и подъемного винта *3* одну прямую, которая является силовой осью пресса.

Поршень нижней расточки рабочего цилиндра *7* опирается на штемпель *6*, заканчивающийся стальным шариком *5*, диаметр которого выбирается в соответствии с условиями испытания по таблице 12 (см. стр. 47). По этой же таблице устанавливают величину груза *Q*, равного весу коромысла *9* с гирями. Коромысло опирается на поршенек верхней расточки диаметром D_2.

При помощи ручного насоса *8* в цилиндр *7* нагнетается масло до тех пор, пока коромысло *9* с гирями не всплывет. Груз *Q* вызывает в цилиндре *7* давление, равное

$$p = \frac{Q}{\frac{\pi D_2^2}{4}}.$$

Это давление, действуя на поршень нижней расточки, передается на штемпель *6* в виде силы *P*, равной

$$P = p\frac{\pi D_1^2}{4}.$$

Таким образом, давление P на образец зависит от груза Q и диаметров цилиндра 7. Оно выражается следующим равенством:

$$P = Q\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2. \qquad (69)$$

Непосредственно с цилиндром 7 соединяется динамометр 10, циферблат которого показывает величину силы P, передаваемой

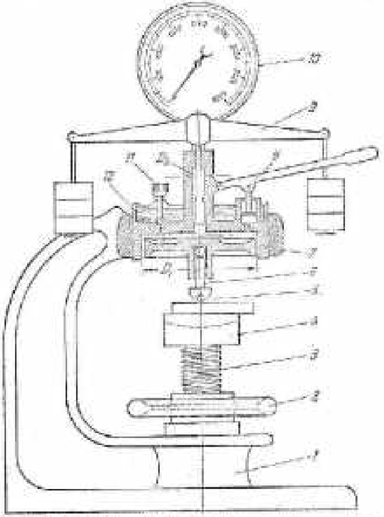


Рис. 156. Пресс Бринеля (тип Альфа): 1 — станина, 2 — маховик, 3 — подъемный винт, 4 — стол, 5 — шарик, 6 — шпиндель, 7 — рабочий цилиндр, 8 — ручной насос, 9 — коромысло, 10 — динамометр, 11 — головка клапана, 12 — маслосборный резервуар.

на образец, что позволяет контролировать вес гирь, подвешенных к коромыслу 9.

Испытание твердости на прессе типа Альфа производится в следующем порядке. Подвесив гири, соответствующие выбранному диаметру стального шарика 5 и установив образец на столе 4, поднимают последний до плотного касания образца с шариком 5.

Закрывают клапан маслосборного резервуара 12, вращая головку 11 клапана, и нагнетают масло насосом 8 в цилиндр 7 до тех пор, пока коромысло 9 не всплывет. При этом динамометр 10 будет показывать нагрузку P, соответствующую диаметру шарика. Коромысло 9 выдерживают в взвешенном состоянии установленное для опыта время, после чего отвинчивают головку 11 и выпускают масло из цилиндра 7. Затем, вращая маховик 2, опускают стол 4, снимают образец и измеряют диаметр отпечатка в двух взаимно-перпендикулярных направлениях при помощи специальной пластинки (см. рис. 27), микроскопа или лупы.

§ 24. Прибор для определения твердости по Роквеллу

Устройство прибора для определения твердости по Роквеллу базируется на методе вдавливания алмазного конуса или стального шарика малого диаметра. На рис. 157 изображена схема прибора

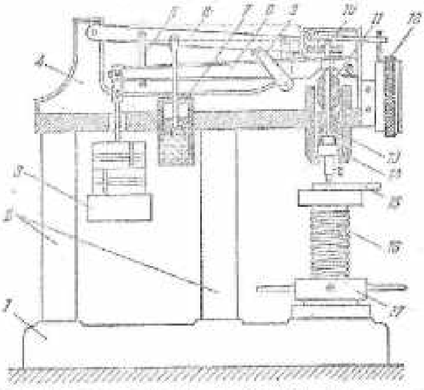


Рис. 157. Прибор для определения твердости по Роквеллу: 1 — станина, 2 — стойка, 3 — грузы, 4 — поперечина, 5 — серьга, 6 — рычаг, 7 — масляный тормоз, 8 — грузовой рычаг, 9 — подвеска, 10 — рычаг индикатора, 11 — шпиндель, 12 — индикатор, 13 — калиброванная пружина, 14 — столик, 15 — образец, 16 — винт, 17 — маховик.

ГЗИП для определения твердости по Роквеллу. Прибор состоит из станины 1, жестко соединенной стойками 2 с массивной фасонной поперечиной 4. На станине имеется вертикальный винт 16 с маховиком 17 для подъема винта и столика с образцом 15. На одной верти-

кальной оси с винтом, являющейся силовой осью прибора, в поперечине 4 смонтирована втулка. Внутри втулки находится штемпель 14 со сменным наконечником, оканчивающимся алмазным конусом или стальным шариком, калиброванная пружина 13 и двойная призма 11. На призму опирается грузовой рычаг 8, скрепленный при помощи болта своим правым концом с поперечиной 4 и несущий на другом конце сменные грузы 3. Этот конец подвешен серьгой 5 к поддерживающему рычагу 6, с неподвижной осью на левом конце, подъемной защелкой 9 на правом и масляным тормозом 7 посредине. К торцу поперечины 4 жестко прикреплен индикатор 12, штифт которого повешен на рычаг 10, опирающийся в свою очередь на стержень штемпеля 14. Этот стержень свободно проходит в отверстия тарелки калиброванной пружины 13, призмы 11 и грузового рычага 8.

Испытание на приборе ГЗИП производится в следующем порядке. Выбрав по таблице 15 (см. стр. 53) нагрузку P, подвешивают соответствующие ей грузы 3 на рычаг 8. Нагрузка в 60 $кГ$ на штемпель получается от веса рычага, подвесок и нижнего несъемного груза. На него укладывают второй груз, увеличивающий нагрузку на 40 $кГ$, для испытаний шариком при $P = 100$ $кГ$ и третий груз, увеличивающий нагрузку на штемпель еще на 50 $кГ$, для испытаний алмазным конусом при $P = 150$ $кГ$.

Подготовленный образец 15 помещают на столик вертикального винта 16 и поднимают его до соприкосновения с наконечником. Дальнейший подъем винта производится осторожно медленным вращением маховика 17. При этом поднимается штемпель, пружина 13 и призма 11 до упора последней в грузовой рычаг 8, после чего пружина 13, создающая начальную нагрузку P_0, начинает сжиматься, а штемпель 14 продолжает подниматься и своим стержнем упирается в рычаг 10, посредством которого поднимается штифт индикатора 12.

Подъем винта продолжают, одновременно наблюдают за циферблатом индикатора 12 и прекращают, как только стрелки циферблата займут вертикальное положение, причем малая стрелка должна дойти до красной точки (см. рис. 29). В таком положении сжатая пружина 13 передает на штемпель, а следовательно, и на образец начальную нагрузку $P_0 = 10$ $кГ$. Тогда рифленый ободок индикатора вместе с циферблатом поворачивают до совпадения делений $C0$ и $B30$ с большой стрелкой (см. рис. 29). Затем переводом защелки 9 в наклонное положение освобождают поддерживающий рычаг 6 и включают этим основную нагрузку, передаваемую грузовым рычагом 8 на штемпель и образец.

Для плавного приложения основной нагрузки служит масляный тормоз 7; опускание рычага 6 задерживается вследствие медленного протекания масла через мелкие отверстия поршня.

Действие основной нагрузки выдерживают 4—8 сек (продолжительность работы масляного тормоза) до замедления движения

стрелки индикатора, во всяком случае не более 1 *сек* после ее остановки. Затем снимают основную нагрузку, плавно поворачивая защелку 9 в вертикальное положение, и производят отсчет числа твердости по шкале индикатора 12. Вращая маховик 17 в обратном направлении, опускают винт и столик с образцом вниз и окончательно разгружают образец.

§ 25. Прибор для определения твердости алмазной пирамидой

На рис. 138 изображен настольный прибор ГЗИП для испытаний на твердость алмазной пирамидой. Процесс испытания на этом приборе автоматизирован и производительность его значительно выше производительности других аналогичных приборов.

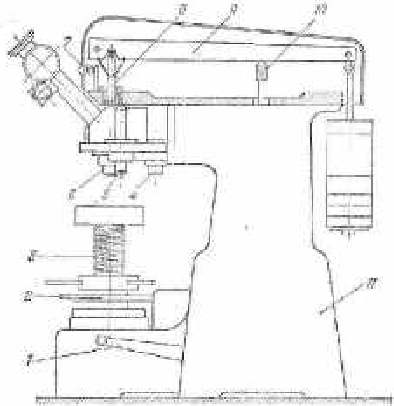


Рис. 138. Прибор для определения твердости алмазной пирамидой: 1 — [illegible], 2 — [illegible], 3 — подъемный винт, 4 — [illegible], 5 — штемпель, 6 — [illegible], 7 — [illegible], 8 — [illegible] штемпель, 9 — грузовой рычаг, 10 — [illegible], 11 — [illegible].

Прибор ГЗИП имеет подъемный винт 3 с маховиком и столом для поднесения образца под штемпель 5 с пирамидальным алмазным наконечником. Штемпель и микроскоп, смонтированные на общей подвеске, могут поворачиваться около вертикальной оси головки 4

станины прибора, что позволяет совместить с осью винта (силовой осью прибора) объектив 6 микроскопа или ось штемпеля 5. Нагрузка на штемпель 5 передается от грузового рычага 9 через промежуточный штемпель 8, всегда прижатый к рычагу двумя пружинами.

На длинном плече рычага подвешены сменные грузы, при помощи которых можно получить нагрузку на штемпель от 5 до 120 кГ. Под кожухом 11 на станине прибора расположен масляный тормоз с тяжелым грузом, позволяющий регулировать продолжительность нагружения образца в пределах от 10 до 30 сек; здесь же расположена система рычагов для автоматического опускания и подъема штыря 10, поддерживающего грузовой рычаг и тем самым снимающего нагрузку со штемпеля.

До испытания прибор приводят в рабочее состояние. С этой целью подвешивают соответствующие грузы на рычаг 9; ось штемпеля 5 поворотом фиксатора около оси головки 4 до упора совмещают с осью промежуточного штемпеля 8 и переводом рукоятки 1 винт вводят механизм грузового привода. Подготовленный образец помещают на испытательный столик и слегка прижимают его винтом 3 к чашке алмазного наконечника. Чехол навернут на втулку с резьбой штемпеля 5, чтобы предохранить алмазную пирамиду от механических повреждений и облегчить установку первоначальных минимальных зазоров между штемпелями 5 и 8, а также между алмазом и образцом.

Испытание начинают нажатием на спусковую педаль 2. Этим приводят в действие масляный тормоз и связанную с ним систему рычагов грузового механизма. Тогда груз, укрепленный на штоке поршня масляного тормоза, начинает опускаться; вместе с ним опускается штырь 10, освобождается грузовой рычаг 9 и нагрузка передается на алмаз в течение установленного времени. Дальнейшее опускание груза вызывает через систему рычагов подъем штыря 10, и алмаз разгружается. Продолжительность нагружения регулируется заранее специальным винтом, расположенным на крышке масляного тормоза, а во время испытания отмечается сигнальной лампочкой 7, которая гаснет при нагружении и загорается после разгрузки. Таким образом, процесс испытания происходит автоматически и совершенно однообразно.

После испытания образец освобождают от алмаза, опустив винт 3 вращением маховика на пол-оборота, и совмещают объектив микроскопа с силовой осью прибора. Затем при помощи микрометрического винта устанавливают микроскоп так, чтобы отпечаток получился в фокусе точно по центру объектива, и последовательно измеряют обе диагонали отпечатка. Записав результаты в журнал, возвращают штемпель 5 на силовую ось прибора и производят повторное испытание, но в другом месте образца.

§ 28. Прибор Шора

Прибор Шора предназначен для определения твердости методом упругой отдачи. Этот прибор (рис. 139) состоит из станины со стойкой 2, по которой перемещается подвижная фасонная втулка 3 со стопорным винтом 4. На втулке подвижно укреплена медная трубка 7, внутри которой находится коническая бойка с алмазным наконечником. Вверху к трубке 7 присоединен индикатор 6, а внизу — коробка 10 с уровнем 9 и механизмом для подъема и опускания бойка. На тыльной стороне к трубке прикреплена зубчатая рейка 5, сцепленная с шестерней маховика 8, при помощи которого трубку можно перемещать по вертикали.

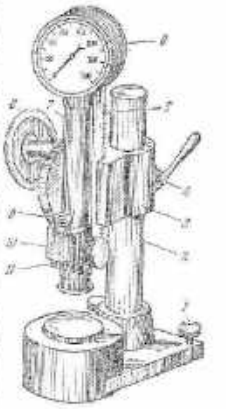


Рис. 139. Прибор Шора: 1 — винтовая ножка, 2 — стойка, 3 — фасонная втулка, 4 — стопор, 5 — зубчатая рейка, 6 — индикатор, 7 — медная трубка, 8 — маховик, 9 — уровень, 10 — коробка, 11 — опускная ручка.

До испытания подвижную втулку 3 закрепляют стопорным винтом 4 на высоте, необходимой для размещения образца на испытательном столике, и посредством двух винтовых ножек 1, расположенных в станине, прибор устанавливают точно по уровню 9, чтобы обеспечить строго вертикальное падение бойка. Вращая маховик 8, опускают медную трубку 7 и плотно, но не слишком сильно, прижимают ее колпачком к образцу.

Затем поворачивают ручку 11 в направлении хода часовой стрелки до упора. В этот момент боек диаметром около 18 мм автоматически освобождается и падает на образец, прижатый колпачком к трубке 7. После удара боек отскакивает от образца на высоту, характеризующую твердость материала, и в этом положении задерживается шариками, свободно сидящими в конической втулке, охватывающей боек внутри трубки 7. Все это время ручка 11 прижата к упору. Отпущенная ее, освобождающая находящуюся в ней пружину, под напором которой специальная рейка внутри трубки 7 перемещается по вертикали и поворачивает стрелку индикатора на угол, пропорциональный высоте отскока бойка. Показание стрелки на циферблате индикатора и является числом твердости по Шору. Циферблат разделен на 140 равных делений, условно обозначающих твердость по Шору, причем твердость инструментальной стали принята за 100 делений.

Записав показание стрелки в журнал, вращением маховика *8* поднимают медную трубку *7* и освобождают образец для следующего испытания.

Если приходится испытывать крупную деталь, не помещающуюся в испытательном пространстве прибора, то из гнезда втулки *3* вынимают трубку *7*, ставят ее на деталь и, придерживая левой рукой в строго вертикальном положении, производят удар бойком, вращая ручку *11* правой рукой.

Основное достоинство прибора Шора состоит в его большой производительности, позволяющей быстро определить однородность материала, влияние на твердость температуры отжига, поверхностной обработки и т. д., не оставляя при этом заметных следов на поверхности образца.

§ 27. Прибор для определения твердости царапанием

Прибор для определения твердости царапанием (рис. 160) состоит из подвижной каретки *1* со столом *2* для образца, из рычага *4* и двух грузов. Каретка *1* перемещается в двух взаимно-перпендикулярных направляющих, идущих в поперечине рычага *4*. Испытательный стол *2* имеет шаровую опорную поверхность, позволяющую устанавливать образец в горизонтальном положении. Рычаг *4* опирается призмами *6* на стойку, расположенную посредине рычага. В конце

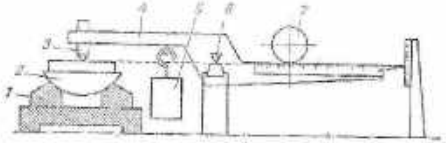


Рис. 160. Прибор для определения твердости царапанием: *1* — каретка, *2* — стол, *3* — винтовой упор, *4* — рычаг, *5* — противовес, *6* — призма, *7* — груз.

левого плеча рычага *4* над каретной укреплен алмазный конус *3*, в противоположном конце имеется стрелка, указывающая отклонение рычага от горизонтального положения. На левом плече рычага подвижной неподвижный противовес *5*, на правом — имеется линейка с делениями, вдоль которой перемещается груз *7*.

Для испытания образец помещают на столе *2* и устанавливают его по уровню так, чтобы верхняя плоскость образца была строго горизонтальной. Груз *7* перемещают в крайнее левое положение, и тогда на алмаз передается давление в 50 *Г*. Передвигая каретку *1* несколько раз перпендикулярно и параллельно рычагу *4*, прочерчивают алмазом несколько параллельных царапин на образце.

Ширину царапин измеряют при помощи точного микроскопа и принимают среднее значение из всех измеренных царапин. Величина, обратная средней ширине царапины, полученной при грузе 50 *Г*, и является числом твердости по царапанию.

§ 28. Прибор для определения микротвердости

По своему конструктивному оформлению приборы для определения микротвердости принципиально не отличаются от соответствующих им приборов для определения макротвердости. Эти приборы выполняются в виде отдельных установок, состоящих из микроскопа с микрометрическим окуляром для измерения отпечатков и из механизма для нагружения и точной установки наконечника.

На рис. 161 изображена схема одного из таких приборов конструкции ЦНАИИ. Прибор имеет стойку *1* с массивным основанием. По стойке при вращении верхнего колпака передвигается втулка *2* с кронштейном, по направляющим кронштейна в свою очередь перемещается тубус *4* при помощи крезальеры и микрометрического винта. Сверху на тубус насажен наклонный окулярный микрометр *3* для измерения отпечатков, а снизу прикреплен кронштейн, на котором смонтирован штемпель *6* с нагрузочным устройством и центрирующий объектив микроскопа *9* со специальным осветителем. Штемпель *6* заканчивается алмазной пирамидой с квадратным основанием и с углом в 136° между противоположными гранями. Под тубусом на станине размещен испытательный столик *7*, который при помощи микрометрических винтов можно перемещать вместе с образцом в двух направлениях горизонтальной плоскости, что необходимо для точной установки образца.

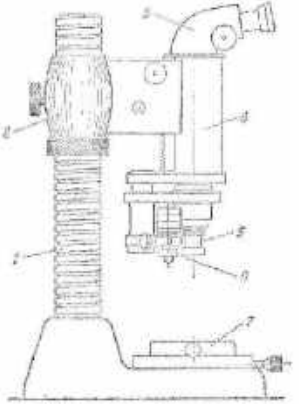


Рис. 161. Прибор для определения микротвердости: *1* — стойка, *2* — втулка, *3* — окулярный микрометр, *4* — тубус, *5* — объектив микроскопа, *6* — штемпель, *7* — испытательный столик.

Для испытания на столике *7* размещают образец, добиваясь строго горизонтального положения его рабочей поверхности,

выбирают на ней место отпечатка и центрируют его в поле микроскопа. Точно над выбранным для отпечатка местом вместо объектива микроскопа *5* устанавливают штемпель *6* с алмазом, нагружают его заданной силой и выдерживают под нагрузкой необходимое время (обычно от 5 секунд для твердых и до 3 минут для мягких материалов). Затем нагрузку снимают, объектив возвращают на прежнее место над полученным микроотпечатком и при помощи окулярного микрометра *3* измеряют длину диагонали отпечатка.

В некоторых моделях прибора штемпель и микроскоп закреплены на кронштейне неподвижно в точно фиксированных положениях. Тогда образец, после выбора под микроскопом места для испытания передвигают со столиком под штемпель для создания отпечатка и возвращают снова под микроскоп для измерения длины диагонали отпечатка.

Обычно прибор снабжается установкой для фотографирования микроструктур и отпечатков.

ГЛАВА X

МАШИНЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

§ 29. Универсальная машина WPM силой до 100 *Т* с пульсатором

Универсальная машина WPM (ГДР) предназначена для испытаний на растяжение, сжатие или изгиб при многократном повторении нагрузки. Машина позволяет осуществлять статические нагрузки на образец до 100 *Т* и пульсирующие при двустороннем нагружении до 50 *Т*. Пульсирующая нагрузка прикладывается с частотой 250 и 500 циклов в 1 минуту. Для поддержания постоянной амплитуды заданной пульсирующей нагрузки машина снабжена специальным регулятором.

Машина состоит из четырех основных частей (рис. 162): станины с цилиндром и захватами; силовозбудителя с насосом, мотором и управляющим устройством; пульсатора с мотором и регулирующим устройством; силоизмерителя с маятником, шкалами нагрузки и направляющим устройством.

Рассмотрим эти части машины.

Станина имеет массивное основание, в котором на опорной закреплен нижний захват *1* машины. Захват при помощи мотора, расположенного на основании, перемещается в вертикальном направлении для установки образца при испытании на растяжение. Двумя стальными колоннами основание станины соединено с верхним неподвижным траверсом, в который монтирован рабочий цилиндр *3*. На его поршне *4* укреплена подвижная рама, состоящая из траверса, двух тяг, пропущенных через сквозные отверстия неподвижного траверса, и из верхнего захвата *2*.

При нагнетании масла в цилиндр *3* поршень *4* поднимает подвижную раму вместе с захватом *2*. При этом образец, расположенный в нижнем испытательном пространстве, будет растягиваться, а образцы, расположенные между захватом *2* и неподвижным траверсом будут испытывать сжатие или изгиб. Верхняя удлиненная плоскость захвата *2* служит столом, на котором размещаются опоры для испытания образцов на изгиб или нижняя опорная плита для образ-

цов на сжатие. В первом случае к основанию цилиндра 3 подвешивается специальная призма, во втором — нижняя опорная плита.

Габариты машины позволяют производить испытания на растяжение образцов длиной от 150 до 500 *мм*, на сжатие — высотой до 400 *мм* и на изгиб — пролетом от 50 до 1200 *мм*.

В захваты *1* и *2* вставляют сменные клиновые губки, имеющие закаленные рифленые поверхности. Два комплекта губок предназначены для круглых образцов диаметрами от 20 до 40 *мм* и от 40 до

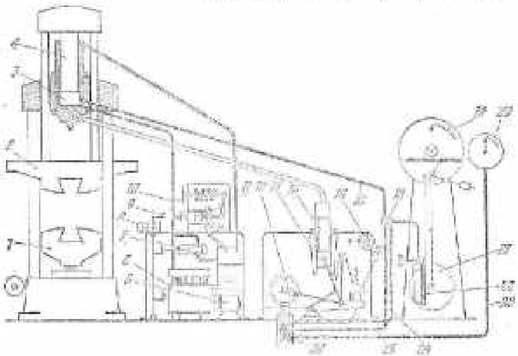


Рис. 132. Схема универсальной машины WPM силой до 100 *T* с пульсатором: *1* и *2* — захваты, *3* — рабочий цилиндр, *4* — поршень, *5* — мотор, *6* — насос, *7* — обратный клапан, *8* и *9* — штурвал и рукоятка регулировки подачи масла, *10* — маслопровод к рабочему цилиндру, *11* — [illegible], *12* — коленчатый вал, *13* — кулиса, *14* — плунжер пульсатора, *15* — [illegible], *16* — маслопровод к силоизмерителю, *17* — скалка, *18* — [illegible], *19* — [illegible], *20* — [illegible], *21* — [illegible], *22* — цилиндр силоизмерителя, *23*, *24* и *25* — манометры, *26* — [illegible].

60 *мм* и один комплект — для плоских образцов толщиной до 35 *мм* и шириной до 125 *мм*. Кроме того, имеются отдельные захваты для образцов с заплечиками и резьбой.

Силовозбудитель универсальной машины WPM представляет собой 12-цилиндровый насос *6*, приводимый в действие мотором *5*. По маслопроводу *10* насос подает масло в рабочий цилиндр *3* для осуществления статической нагрузки на образец. Силовозбудитель смонтирован в металлическом кожухе и располагается рядом со станиной.

На кожухе помещается колонка управления скоростью подачи масла. Для быстрого изменения скорости (грубая регулировка) служит рукоятка *9*, а для медленного (точная регулировка) — штур-

вал *8* с червячной передачей. Поворачивая рукоятку *9* против хода часовой стрелки, вначале закрывают обратный клапан *7*, соединяющий трубку *10* с масляным баком, а затем увеличивают отверстие для масла, нагнетаемого в рабочий цилиндр.

Для регулировки скорости подъема поршня *4* на диске колонки управления имеются метки, указывающие перемещение поршня в *мм/мин*. При положении рукоятки управления на нулевой метке обратный клапан *7* закрыт и в рабочем цилиндре *3* поддерживается постоянное давление без подъема поршня *4*. Чтобы выпустить масло из рабочего цилиндра, следует открыть обратный клапан *7*, повернув рукоятку управления по ходу часовой стрелки за нулевую метку.

Точная регулировка скорости подачи масла осуществляется при помощи штурвала *8* с выполнением тех же операций, что и при повороте рукоятки *9*, но только в медленном темпе.

Включение и выключение мотора *5* производится кнопочным выключателем, расположенным на колонке управления. Масло, просачивающееся из рабочего цилиндра, накапливается в его верхней части и сливается по специальной трубке в запасный масляный бак.

Пульсатор смонтирован позади испытательной машины и силовозбудителя; он предназначен для осуществления пульсирующей нагрузки, которая возникает при попеременном снижении и восстановлении давления в рабочем цилиндре. Пульсатор состоит из цилиндра, сообщающегося маслопроводом большого сечения с рабочим цилиндром, и поршня (плунжера) *14*, приводимого в действие от электромотора. Вращение мотора передается на коленчатый вал *12*, к которому присоединен четырехзвенный механизм, приводящий в движение кулису *13*. Кулиса толкает плунжер *14* только вверх, обратный же ход плунжера обеспечивается давлением масла в цилиндре пульсатора. Таким образом осуществляется пульсация давления масла в рабочем цилиндре, что и приводит к пульсации нагрузки, передаваемой на образец верхним захватом *2*.

Величина пульсирующей нагрузки зависит от хода плунжера *14* или толкающей его кулисы. Изменение хода кулисы установлено в пределах от 0 до 60 *мм*; оно осуществляется вращением штурвала *15*, который через червячную передачу и шпиндель перемещает в вертикальном направлении «хвост» скалки *17*. При этом скалка поворачивается около своего нижнего неподвижного шарнира. В крайнем положении скалки, когда ось ее верхнего шарнира совпадает с осью шарнира кулисы *13*, последняя достигает своей самой верхней точки и при вращении коленчатого вала *12* остается неподвижной, т. е. пульсации не происходит. С опусканием хвостовика скалки *17* ход кулисы *13* от ее верхней точки пропорционально увеличивается и появляется пульсация нагрузки.

Частота пульсации определяется скоростью вращения коленчатого вала *12*; она изменяется перестановкой приводных ремней

на ступенчатых шкивах электромотора и коленчатого вала и составляет 250 или 500 циклов в 1 минуту. Возможно также плавное изменение частоты пульсации, если применять мотор постоянного тока, а включение производить через реостат. Кроме того, машина имеет специальное дополнительное устройство, которое позволяет замедлить изменение нагрузки в пределах 5 ÷ 20 циклов в 1 минуту. С коленчатым валом связан счетчик оборотов, отмечающий каждые 100 циклов.

Для того чтобы заданная максимальная пульсирующая нагрузка не изменялась в процессе испытания, предусмотрен регулятор, при помощи которого поддерживается необходимое давление в рабочем цилиндре. Регулятор постоянства давления (нагрузки) состоит из поршневого клапана *11*, соединенного с маслопроводом *10*, проходящего от насоса *6* к рабочему цилиндру *3*. Клапан прижимается специальной пружиной, натяжение которой и скорость подачи масла насосом *6* регулируются так, чтобы при максимальной нагрузке на образец через клапан *11* протекало небольшое количество масла, отводимое в бак. Если пульсирующая нагрузка начнет увеличиваться или уменьшаться, то клапан будет пропускать соответственно большее или меньшее количество масла, а давление сохранится постоянным. При значительном уменьшении пульсирующей нагрузки клапан закроется, утечка масла прекратится и нужное давление быстро восстановится под влиянием действия насоса *6*.

Существует регулятор постоянства нагрузки, основанный на другом принципе. Такой регулятор состоит из двух электромагнитов, связанных со стрелкой силоизмерителя, указывающей максимальную нагрузку, и с золотной управления подачи масла в рабочий цилиндр. При отклонении стрелки силоизмерителя от заданного значения максимальной нагрузки включается соответствующий электромагнит. Через систему рычагов магнит перемещает рукоятку *9* в сторону увеличения или уменьшения скорости подачи масла, и в рабочем цилиндре устанавливается нужное давление.

Силоизмеритель позволяет определить как статическую, так и динамическую нагрузку, действующую на образец. Для измерения статической нагрузки открывают вентиль *16*; тогда цилиндр *22* силоизмерителя соединяется по маслопроводу *16* непосредственно с рабочим цилиндром *3*. Давление рабочего цилиндра, возникающее при действии насоса *6*, передается в цилиндр *22* и через его поршень действует на тягу, соединенную с маятником *21*. Отношение усилия тяги к усилию в образце равно квадрату отношения диаметров цилиндра *22* и рабочего цилиндра *3*.

Перемещение тяги вызывает отклонение маятника *21*, тем уравновешивается усилие тяги. Вместе с этим пропорционально горизонтальной проекции отклонения маятника *21*, т. е. пропорционально усилию тяги, перемещается зубчатая рейка, увлекающая за собой стрелку, которая указывает на круговой шкале *19* нагрузку, действующую на образец.

Шкала *19* градуирована на три разных предела измерения в зависимости от величины груза маятника *21*. Когда подвешена одна гиря с меткой *A*, измерение производится по внешней шкале в пределах от 0 до 20 *T* (цена деления 50 *кГ*); при двух гирях с метками *A* и *B* — по средней шкале в пределах от 0 до 50 *T* (цена деления 100 *кГ*); при трех гирях с метками *A*, *B* и *C* — по внутренней шкале от 0 до 100 *T* (цена деления 200 *кГ*).

К силоизмерителю относится также устройство для получения диаграммы зависимости между деформацией и статической нагрузкой образца. Перемещение подвижного захвата *2*, связанного с деформацией образца, вызывает через фрикционную и шестеренчатую передачи вращение барабана, расположенного под шкалой *19*. Барабан несет в вертикальном направлении диаграммную ленту, на которой специальное перо отмечает по вертикали деформацию образца в натуральную величину или увеличенную в два раза.

Перемещение пера по горизонтали связано с положением маятника *21* и пропорционально нагрузке на образец. Наибольшее горизонтальное перемещение пера при предельной нагрузке равно 150 *мм*. При нагрузке в 1 *T* перемещение пера составляет 7,5 *мм*, 3 *мм* или 1,5 *мм* в соответствии с принятым пределом измерения в 20, 50 или 100 *T*.

Для того чтобы не допустить превышения установленной предельной нагрузки, на шкале *19* предусмотрен контакт, выключающий электромотор *5* нагнетательного насоса, как только стрелка дойдет до последнего деления шкалы.

Для измерения пульсирующей нагрузки прежде всего перекрывается вентиль *16* непосредственное соединение цилиндра *3* с цилиндром *22* и с маслопровод *19* включается золотник *26* пульсатора. Сердечник золотника связан через коническую шестерню с коленчатым валом *12* и вращается вместе с ним. При положении коленчатого вала, когда плунжер *14* находится в самой верхней точке, золотник *26* соединяет маслопроводы *25* и *24* между собой, и наибольшее давление, возникающее в этот момент в цилиндре *3*, передается в цилиндр *22*. Через пол-оборота вала *12* плунжер переходит в свое нижнее положение, а золотник *26* устанавливается так, что маслопроводы *25* и *23* оказываются соединенными. При этом в цилиндре возникает наименьшее давление, которое через золотник и маслопровод *23* передается на манометр *29*. При новом другом положении плунжера золотник завершает маслопроводы *24* и *23*, сохраняя в них постоянное давление. Таким образом, по шкале *19* отсчитывают максимальную, а по манометру *29* минимальную пульсирующую нагрузку на образец.

Позади стрелки, указывающей максимальную пульсирующую нагрузку, манометр *29* снабжен двумя контактными стрелками, при

помощи которых выключается привод машины, как только отклонение от заданного значения минимальной нагрузки достигнет величины, ограниченной контактными стрелками.

Проведение испытаний. До испытания образец закрепляют в соответствующих захватах машины, устанавливают нужный предел измерения при помощи грузов маятника *21* и регулируют нулевое положение стрелки на шкале *19*.

При статических испытаниях прежде всего открывают вентиль *18* для непосредственного соединения цилиндра *3* с цилиндром *22* и от маслопровода *10* отключают клапан *11* регулятора постоянства нагрузки. Затем включают мотор *5*, и насос *6* начинает подавать масло в рабочий цилиндр *3*. Скорость подачи масла регулируют ручкой *9* и штурвалом *8* в соответствии с желаемой скоростью возрастания нагрузки на образец, что наблюдают по движению стрелки шкалы *19*.

По окончании испытания вследствие разрушения образца или вследствие достижения требуемой нагрузки выключают мотор *5* и масло из цилиндра *3* отводится в запасный бак после открытия клапана *7*. Поршень *4* возвращается в исходное положение, а стрелка останавливается на нулевом делении шкалы *19*.

Для испытания образца на пульсирующую нагрузку сначала вентилем *18* закрывают непосредственное соединение цилиндров *3* и *22* и одновременно в маслопровод *16* включают золотник *26* пульсатора. Поворачивая штурвал *15*, поднимают «хвост» скалки *17* до соприкосновения ее верхнего шарнира с кулачком *13*, что соответствует нулевому положению стрелки, связанной со штурвалом *15*. При этом плунжер *14* пульсатора занимает свое самое верхнее положение.

Затем включают мотор *5* нагнетательного насоса *6* и мотор пульсатора, вращающий коленчатый вал *12* и золотник *26*. Давление в рабочем цилиндре поднимается до установленного для данного испытания максимального значения пульсирующей нагрузки. Плунжер *14* остается неподвижным и пульсации не происходит, а золотник *26* попеременно включает оба манометра, поэтому стрелки максимального *19* и минимального *20* манометров показывают одинаковую максимальную нагрузку.

Теперь, открыв соответствующий вентиль, к маслопроводу *10* присоединяют клапан *11* регулятора постоянства нагрузки. Штурвалом *8* регулируют скорость подачи масла с одновременным натяжением пружины клапана *11* так, чтобы при неизменной максимальной нагрузке по клапану *11* прокачивалось наибольшее количество масла. После этого при помощи штурвала *15* опускают «хвост» скалки *17*, и плунжер *14* получает свободный ход вниз из своего верхнего положения, создавая этим пульсирующую нагрузку на образец. Опускание плунжера продолжается до получения желаемой величины минимальной нагрузки, после чего контактными

стрелками манометра *20* устанавливают узкие пределы изменения минимальной нагрузки, и начинается процесс испытания.

Контактные стрелки вместе с регулятором постоянства нагрузки ограничивают амплитуду пульсации в заданных пределах на протяжении всего испытания. После разрушения образца автоматически выключается привод машины при помощи контактных стрелок. Вместе с этим выключается и счетчик пульсаций, соединенный с коленчатым валом *12*.

Величина пульсации определяется свободным ходом плунжера, предусмотренным в пределах от 0 до 60 *мм*. Максимальная пульсирующая нагрузка не должна превосходить 50 *Т*.

§ 30. Универсальная машина силой до 50 *Т* с пульсатором на 10 *Т* двойного действия

Универсальная машина с пульсатором двойного действия предназначена для динамических и статических испытаний образцов круглого и прямоугольного сечений на растяжение или сжатие. Возможно также испытание на изгиб образцов произвольного сечения. Машина допускает переменную (пульсирующую) нагрузку до 10 *Т* и статическую до 30 *Т*. Переменные нагрузки создаются пульсатором, допускающим 750, 1000, 1500 и 2000 пульсаций в 1 минуту.

Нормальное расстояние между зажимами машины для испытаний на растяжение или сжатие установлено в пределах от 0 до 500 *мм*. Однако специальные приспособления позволяют увеличить это расстояние до 500 *мм*. Имеются также отдельные опорные устройства для испытаний на изгиб образцов пролетом в 500 и 200 *мм*.

Машина состоит из следующих основных частей (рис. 163):

I — станина с тремя цилиндрами и зажимными устройствами;

II — два силовозбудителя с насосами, моторами и управляющими устройствами;

III — пульсатор с мотором, баллоном высокого давления и регулирующим устройством;

IV — силоизмеритель с манометрами, манометрами и переключателями.

Станина имеет основание и две поперечины, верхнюю и среднюю, соединенные колоннами *8* в неподвижную силовую раму (рис. 164). В основании станины и в ее верхней поперечине укреплены два рабочих цилиндра *7* и *14*. Поршни этих цилиндров прикреплены к подвижным траверсам *6* и *12*, соединенным между собой тягами *9*, свободно проходящими сквозь отверстия в средней неподвижной поперечине *10*. Поршни, траверсы и тяги составляют и образуют подвижную силовую раму, перемещаемую по вертикали давлением, создаваемым в цилиндрах.

Образец закрепляется зажимами в испытательном пространстве между неподвижной поперечиной *10* и траверсой *6* подвижной силовой рамы. При нагнетании масла в нижний рабочий цилиндр *5* эта рама поднимается вверх и вызывает сжатие образца. При нагнетании масла в верхний цилиндр *14* рама перемещается вниз и образец растягивается. Если масло подается одновременно в оба

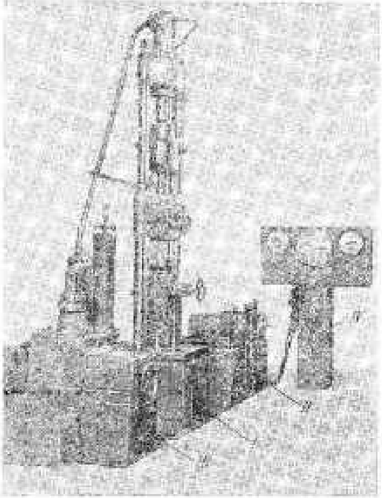


Рис. 163. Общий вид универсальной машины силой до 50 т с пульсатором до 10 т двойного действия: I — машина, II — силовозбудитель, III — пульсатор, IV — измеритель силы.

рабочих цилиндра, то в образце возникает усилие от разности давлений в цилиндрах, передаваемых на подвижную раму. При этом пульсатором можно попеременно изменять давление в нижнем цилиндре *5*, что и создает пульсирующую нагрузку на образец.

Поперечина *10* и траверс *6* снабжены специальными приспособлениями для закрепления образцов на сжатие и растяжение. Эти приспособления состоят из нескольких комплектов различных

зажимных губок для круглых и плоских гладких образцов, для образцов с заплечиками и с нарезными головками, а также специальные опоры для испытаний на изгиб. Закрепление образцов на растяжение в зажимных губках производится при помощи штурвалов *7* и *15*; дополнительное закрепление на сжатие выполняется при помощи штурвалов *32* и *11*.

Внутрь верхнего траверса *12* вмонтирован дополнительный цилиндр, поршень которого упирается в среднюю поперечину *10*.

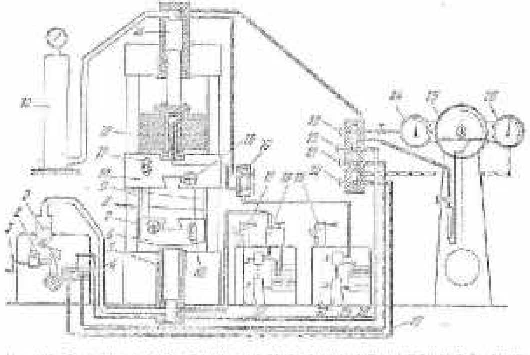


Рис. 164. Схема универсальной машины с пульсатором двойного действия: 1 — штурвал пульсатора, 2 — [illegible], 3 — поршень, 4 — золотник, 5 — нижний рабочий цилиндр, 6 — средний подвижный траверс, 7 — штурвал зажима на растяжение, 8 — захваты, 9 — тяги, 10 — неподвижная поперечина, 11 — штурвал зажима на сжатие, 12 — верхний подвижный траверс, 13 — [illegible], 14 — верхний рабочий цилиндр, 15 — штурвал зажима на растяжение, 16 — переключатель масла, 17 и 19 — [illegible], 18 — [illegible], 20, 21, 22 и 23 — вентили [illegible], 24, 25 и 26 — манометры, 27, 28 и 29 — маслопроводы, 30 и 31 — насосы, 32 — штурвал зажима на сжатие.

Этот цилиндр предназначен для подъема траверса *12* с тягами *9* при изменении габаритов испытательного пространства.

Два одинаковых силовозбудителя машины представляют собой 12-цилиндровые насосы, приводимые в действие отдельными моторами. Насос *31* первого силовозбудителя нагнетает масло в нижний рабочий цилиндр *5*. Насос *30* второго силовозбудителя нагнетает масло в верхний рабочий цилиндр *14* и в дополнительный цилиндр, расположенный в траверсе *12*. Распределение масла между этими цилиндрами осуществляется переключателем *16*, верхний вентиль которого открывает доступ масла к цилиндру *14*, а нижний — к дополнительному цилиндру.

Для того чтобы давление в цилиндре *5* вследствие просачивания масла или по другим причинам не изменялось в процессе испытания, предусмотрен регулятор постоянства нагрузки *18*, расположенный на кожухе первого силовозбудителя. При работающем насосе регулятор *18* автоматически увеличивает или уменьшает подачу масла в цилиндр *5* при малейших изменениях давления в нем.

Управление скоростью подачи масла в рабочие цилиндры осуществляется при помощи ручек (грубая регулировка) или штурвалов (точная регулировка), расположенных на одинаковых колонках управления *17* и *19* обоих силовозбудителей. На этих же колонках укреплены конечные выключатели для электромоторов, приводящих в действие соответствующие поршневые насосы *31* и *30*.

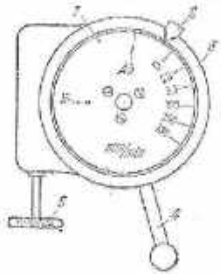


Рис. 165. Колонка управления подачи масла универсальной машины с пульсатором двойного действия: *1* — диск, *2* — стрелка, *3* — штурвальной обод, *4* — ручка грубой регулировки, *5* — штурвал точной регулировки.

Для ускорения подачи масла и увеличения давления в рабочем цилиндре нужно вращающийся диск *1* (рис. 165) колонки управления повернуть против хода часовой стрелки ручкой *4* с шаровой головкой, предварительно отжав ее книзу. При необходимости точной регулировки скорости подачи масла диск медленно поворачивают штурвалом *5*. Метки на диске показывают скорость перемещения на холостом ходу подвижной силовой рамы в *мм/мин*. Нулевая метка диска, подведенная к стрелке *2*, укрепленной на неподвижном ободе *3*, указывает, что давление в рабочем цилиндре не увеличивается, а масло перекачивается насосом в запасной бак. Чтобы выпустить масло из цилиндра, нужно выключить насос, а ручку *4* передвинуть по ходу часовой стрелки так, чтобы нулевая метка диска передвинулась вправо за неподвижную стрелку *2*.

Пульсатор приводится в действие электромотором, выключатель которого находится на передней стенке кожуха пульсатора. Электромотор при помощи вала и эксцентрично насаженного на него шатуна вызывает качание кулисы *2* (рис. 164) около шарнира, соединяющего ее с задвижкой. Задвижка при вращении штурвала *1* и проходящего в ней винта может передвигаться по горизонтали на расстояние до 240 *мм*, увлекая за собой кулису *2*.

В верхнюю наклонную грань кулисы упирается роликом поршень *3*. В начальном положении кулисы, отвечающем нулевой метке на линейке, расположенной справа на кожухе пульсатора, поршень *3* упирается в кулису над шарниром задвижки и достигает своей высшей точки в цилиндре пульсатора. Качание кулисы в этом ее положении не вызывает движения поршня *3*. Передвижение кулисы от начального положения позволяет поршню *3* несколько опуститься. Тогда качание кулисы вызывает ход поршня до его высшей точки, что создает пульсацию давления в рабочем цилиндре *5*, соединенном с цилиндром пульсатора трубкой большого сечения.

Пульсатор изменяет давление только в нижнем цилиндре *5*, а давление в верхнем рабочем цилиндре *14* остается на постоянном заданном уровне. С этой целью цилиндр *14* соединяется другой трубкой большого сечения с баллоном высокого давления *13*, содержимое которого является как бы пружиной, смягчающей изменения давления, называемого деформацией образца при пульсации.

Частота пульсаций зависит от режима работы мотора, делающего 1500 и 3000 *об/мин* и соединенного с валом пульсатора при помощи ремня и ступенчатого шкива с передаточными числами 1/2 и 2/3. Включение мотора на 1500 *об/мин* и положение ремня на большой шкив вала дает 750 пульсаций в 1 минуту, на малый шкив дает 1000 пульсаций. Переключение мотора на 3000 *об/мин* дает соответственно 1500 и 2000 пульсаций в 1 минуту.

Вал пульсатора при помощи шестеренчатой передачи вращает золотник *4* синхронно с качанием кулисы *2* и ходом поршня *3*. В верхнем положении поршня *3* давление в цилиндре *5* достигает максимальной заданной величины. В этот момент золотник *4* занимает положение, открывающее доступ масла из цилиндра *5* к максимальному манометру *25* по трубке *28*. Через пол-оборота вала поршень *3* опускается в нижнее положение, насколько позволяет кулиса при данной регулировке. Давление в цилиндре *5* снижается до заданного минимального значения, и золотник *4* открывает доступ к минимальному манометру *26* по трубке *27*. Во всех промежуточных положениях золотник закрывает сообщение цилиндра *5* с обоими манометрами.

Силоизмеритель состоит из трех независимых манометров. Маятниковый манометр *25* предназначен для измерения максимального давления в цилиндре *5* при пульсирующей нагрузке, а также давления в рабочих цилиндрах *5* или *14* при статических испытаниях. Манометры *26* и *24* предназначены только для динамических испытаний. Манометром *26* измеряется минимальное давление пульсирующей нагрузки в цилиндре *5*, а указателем *24* — давление только в верхнем цилиндре *14*, которое при пульсации остается постоянным.

Манометры сообщаются с рабочими цилиндрами через переключатель, расположенный на стойке силоизмерителя. Для пульсирующей нагрузки открывают вентили *29* и *23* переключателя, а вентили *22* и *33*, предназначенные для статических испытаний, закрывают. В этом положении переключателя верхний цилиндр *14*

сообщается непосредственно с манометром *24*, а нижний цилиндр *5* — через золотник *4* с максимальным *25* и минимальным *26* манометрами. Для статического растяжения открывают только вентиль *23*, а для сжатия — только вентиль *22*, остальные должны быть закрыты. При этом манометр *25* соединяется через вентиль *23* с верхним рабочим цилиндром *14* и через вентиль *22* с нижним цилиндром *5*.

Подготовка испытаний и запуск машины производятся в следующем порядке.

Динамические испытания. В зажим нижнего траверса *6* вставляют образец и закрепляют его на растяжение, прижав штурвал *7*. Кнопкой на колонке *17* включают мотор насоса *31* и, регулируя ручкой той же кнопки подачу масла в цилиндр *5*, поднимают траверсу *6* с тем, чтобы образец уперся в зажим поперечины *10*. Здесь его закрепляют на растяжение штурвалом *13*. После этого, выключив левый насос, включают кнопкой на колонке *19* правый насос *30* при закрытом нижнем и открытом верхнем вентиле переключателя *16*; регулируя работу насоса *30* ручкой и штурвалом колонки *19*, нагнетают масло в верхний цилиндр *14* до предельной назначенной для данного испытания величины растягивающей силы, показываемой манометром *24* при закрытом вентиле *23*. При этом образец будет натянут в зажимных губках; теперь его закрепляют на сжатие при помощи штурвалов *32* и *11*, которые зажимают образец по вертикали специальными клиньями, расположенными внутри захватов. Таким образом, захватывается полное закрепление образца как на растяжение так и на сжатие для испытания на пульсирующую нагрузку.

Далее, отворачивая штурвал *1*, перемещают кулису *2* в начальное положение и открывают вентиль *22*, оставляя закрытыми остальные вентили переключателя; вновь включают насос *31* и нагнетают масло в нижний цилиндр *5* до назначенной для данного испытания предельной величины сжимающей силы, показываемой манометром *25*.

Предельные растягивающие и сжимающие силы назначают так, чтобы при любом диапазоне пульсации в пределах до 10 *T* нагрузка на поршни рабочих цилиндров всегда оставалась не менее 5 *T*. Это вызвано необходимостью максимально смягчить влияние ударов пульсирующей нагрузки и инерционных сил, возникающих вследствие колебания сравнительно большой массы подвижной силовой рамы. Ограничение диапазона пульсации в 10 *T* означает, что если нужно при наибольшем диапазоне пульсации испытать образец на сжатие, например, силой в 3 *T*, то растягивающая нагрузка образца не может быть больше 10 — 3 = 7 *T*. В данном примере нужно назначить предельную силу, действующую на поршень верхнего цилиндра *14* и измеряемую по манометру *24*, величиной в 7 + 5 = 12 *T*, а на поршень цилиндра *5* — измеряемую по манометру *25*, величиной в 12 + 3 = 15 *T*. Тогда в верхнем положении поршня *3* пульсатора, т. е. при максимальном давлении в нижнем цилиндре, образец будет сжат силой, равной 15 — 12 = 3 *T*; в нижнем положении поршня *3*, т. е. при минимальном давлении в том же цилиндре *5*, которое по манометру *26* не должно быть меньше 5 *T*, образец будет растянут силой, равной 12 — 5 = 7 *T*.

Пусть для другого примера образец должен испытать переменную нагрузку от + 2 до — 6 *T*, т. е. с диапазоном пульсации в 8 *T*. Тогда предельная сила по манометру *24* для верхнего поршня должна быть равной 2 — 5 = 7 *T*, а по манометру *25* для нижнего поршня 7 + 6 = 13 *T*. При испытаниях на переменное растяжение и пределах от 0 до — 10 *T* для обоих поршней силовой подвижной рамы нужно, чтобы предельные силы составляли по 15 *T*. При переменных сжатии в пределах от 0 до 10 *T* для верхнего поршня предельная сила должна быть равна 5 *T*, а для нижнего — 15 *T*. Во всех рассмотренных случаях минимальный манометр *26* должен показывать нагрузку в 5 *T*.

После достижения в рабочих цилиндрах давлений, соответствующих предельным силам, накладывают ремень мотора пульсатора на большой или малый шкив, чтобы получить требуемую частоту пульсаций; теперь закрывают вентиль *22*, открывают нижние вентили *20* и *21* и включают мотор пульсатора при помощи выключателя, расположенного под штурвалом *1* на передней стенке кожуха пульсатора. Пуск пульсатора производится обязательно при малых оборотах и при начальном положении кулисы *2*, когда ее качание еще не вызывает пульсации поршня *3*. Это необходимо, чтобы предохранить машину от резкого нагружения.

При включении пульсатора наблюдают, чтобы все манометры показывали заданные значения сил, причем первоначально манометры *25* и *26* должны показывать одинаковую максимальную силу. Для этого давление в рабочих цилиндрах поддерживают на постоянном уровне, регулируя непрерывно в процессе испытания работу насосов силовозбудителей при помощи колонок управления *17* и *19*.

Если требуется, то переключают мотор на большую скорость и затем при помощи штурвала *1* передвигают кулису *2*, создавая этим в нижнем рабочем цилиндре попеременное уменьшение давления по отношению к его максимальному значению (пульсацию). Показания минимального манометра *26* согласно передвижению кулисы постепенно уменьшаются до назначенной для испытания величины минимальной нагрузки, обычно равной 5 *T*. Одновременно с приведением штурвала *1* продолжают регулировку дополнительной подачи масла насосами в рабочие цилиндры до получения устойчивых показаний по всем манометрам, после чего кулису закрепляют, исключая возможные перемещения вследствие тряски машины.

Наконец, включают регулятор постоянства нагрузки и устанавливают на манометрах *24* и *26* ограничительные контактные стрелки,

с помощью которых автоматически выключается привод машины, когда отклонения от заданных нагрузок превзойдут установленные пределы. Одновременно с пульсатором автоматически включается и выключается счетчик оборотов, отмечающий каждые 100 пульсаций; он расположен на правой стенке кожуха пульсатора.

По окончании испытаний, когда вследствие начинающегося разрушения образца нагрузки резко уменьшаются, привод машины выключается автоматически и счетчик отмечает число циклов нагружения до разрушения образца.

Статические испытания на растяжение. Образец закрепляют сначала в нижнем подвижном траверсе *6*, подведят его верхний конец в захваты поперечины *10* и закрепляют там штурвалом *15*. Затем открывают вентиль *23* при закрытых других вентилях стойки манометров. Нажимая кнопку на колонке *19*, включают мотор насоса *30* и производят регулировку подачи масла в верхний рабочий цилиндр *14* ручкой и штурвалом колонки управления *19*. Наблюдение за растягивающей нагрузкой ведут только по маятниковому манометру *25*.

Статические испытания на сжатие. Образец закрепляют сначала так же, как и при испытании на растяжение, а потом штурвалом *22* и *11* зажимают его для испытания на сжатие, но без предварительного натяжения, как это делают для динамических испытаний. Затем открывают вентиль *22*, закрывают остальные вентили стойки манометров и включают насос *31*. Подачу масла в нижний рабочий цилиндр регулируют при помощи колонки управления *17* с одновременным наблюдением за величиной сжимающей нагрузки по манометру *25*.

Для испытаний на изгиб поршень нижнего цилиндра с подвижной траверс *6* разъединяют и прикрепляют к ним две призмы. На плите основания машины укрепляют две опоры двустороннего действия с прогибом в 500 *мм*. Образец закрепляют в опорах и зажимают между призмами. Затем производят испытание на изгиб сжимающей нагрузкой и тем же порядке, что и на растяжение — сжатие.

§ 31. Маятниковый копер для ударной пробы надрезанных образцов

Для определения ударной вязкости металлов наибольшее распространение получили маятниковые копры. Такие копры изготовляются с различными пределами изменения энергии, затрачиваемой на излом образца при ударе. При испытании стандартных образцов согласно ГОСТ 9454—60 применяют маятниковые копры с запасом энергии не более 30 *кГм*, так как большой избыток энергии, остающейся после удара, отрицательно влияет на точность измерения. Для того чтобы получить сравнимые результаты испытаний, необходимо иметь запас энергии, обеспечивающий скорость движения маятника к моменту удара по образцу в пределах 4—7 *м/сек*. Обычно применяют копры, имеющие пределы измерения энергии 0,5, 5, 15 и 30 *кГм*. Для многих копров запас энергии можно изменять ступенями в пределах заданной мощности соответственно вязкости материала образца. Существуют копры мощностью до 250 *кГм* для испытания на удар специальных образцов.

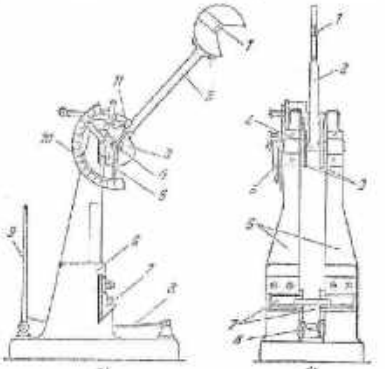


Рис. 156. Схема устройства маятникового копра: *а* — фасад, *б* — вид сбоку; *1* — боек (нож), *2* — маятник, *3* — зубчатый диск, *4* — ось маятника, *5* — стрелка, *6* — станина, *7* — шкала, *8* — тормозной рычаг, *9* — упорный, *10* — подвижной сектор, *11* — защелка.

Маятниковый копер (рис. 156) состоит из чугунной станины *6*, выполненной в виде массивной фундаментной плиты с двумя вертикальными колоннами, маятника *2* и измерительного устройства.

Вверху на колоннах станины помещается горизонтальная ось *4*, свободно вращающаяся в шариковых подшипниках. На этой оси в промежутке между колоннами насажен маятник *2*, состоящий из стержня подвеса и тяжелого молота в виде плоского диска. Молот имеет глубокий вырез, на дне которого закреплен нож *1* из закаленной стали, являющийся бойком маятника. Ударная грань ножа точно совпадает с прямой, проходящей через центр оси *4* и центр тяжести маятника. В нерабочем состоянии маятник свободно висит и прямая, соединяющая его центр тяжести с центром оси *4*, строго вертикальна.

Внизу, на уровне ножа вертикально висящего маятника, к колоннам станины привинчены две стальные закаленные опоры *7* со сменными прокладками разной толщины. Опоры — передвижные, что позволяет путем смены прокладок устанавливать нужное расстояние между опорами (пролет образца), а также высоту опорных площадок применительно к размерам изучаемых и испытанию образцов.

Под опорами *7* между колоннами проходит тормозной ремень *8*, укрепленный на фундаментной плите станины. При натягивании ремня рукояткой *9* он прижимается снизу к маятнику, качнувшемуся после удара и, вызывая торможение, постепенно останавливает его.

Измерительное приспособление копра представляет собой неподвижный сектор *10*, укрепленный на одной из колонн станины концентрично с осью *4* маятника. На секторе имеется шкала с делениями в градусах или в единицах работы. Стрелка *5* измерительного приспособления плотно надета на ось *4*, вследствие чего она вращается вместе с осью и маятником.

До испытания маятник поднимают на исходную высоту и удерживают по заведенном положении при помощи специальной защелки *11*. Копры с переменным запасом энергии снабжаются зубчатым диском *3*, насаженным на ось *4* и соединенным жестко со стержнем подвеса маятника. В этом случае защемлением защелки за соответствующие зубцы диска можно поднимать маятник на различную исходную высоту. Затем на опорах *7* свободно размещают надрезанный образец, не закрепляя его. Надрез располагают в сторону по направлению удара и строго по центру опор с тем, чтобы удар ножа маятника пришелся по грани образца, противоположной надрезу. Для быстрого и точного размещения образца на опорах следует пользоваться специальными шаблонами.

Высоту опорных площадок, устанавливаемую сначала для серии испытаний образцов одного размера, выбирают так, чтобы средняя ось образца находилась на уровне середины ножа (центра удара) в момент вертикального положения маятника.

После поднятия маятника в исходное положение и установки образца на опорах для производства удара нажимают на рукоятку защелки *11* и освобождают маятник от защемления. Свободно падающий маятник, проходя через низшие положения, ударяет по образцу, разрушает его и затем взлетает на некоторую высоту.

Определение углов взлета маятника после удара производится при помощи измерительного приспособления. Копры, у которых стрелка *5* надета на подвижную ось вращения маятника, имеют неподвижный упор вверху около нулевого деления шкалы измерительного сектора *10*. При движении маятника из исходного положения до конца взлета после удара стрелка *5* прижимается к этому упору и удерживается неподвижно на нулевом делении шкалы. При обратном движении маятника (от высшей точки взлета вниз) стрелка вследствие трения движется вместе с маятником. После нескольких

колебаний маятник остановится в вертикальном положении и стрелка укажет на деление шкалы, соответствующее углу взлета. Числовые деления измерительной шкалы таких копров возрастают сверху вниз.

У некоторых копров стрелка надета на неподвижную ось концентрично с осью вращения маятника. Тогда упор для стрелки стоит на пальце, связанном с вращающейся осью маятника; при вертикальном положении последнего упор задерживает стрелку на

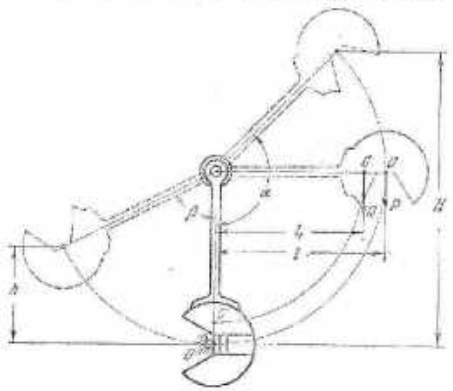


Рис. 167. Схема работы маятникового копра.

нулевом делении шкалы. При падении и последующем взлете маятника упор толкает стрелку и оставляет ее на делении, соответствующем углу взлета. В этом случае числовые деления шкалы возрастают снизу вверх.

Для того чтобы уменьшить прогиб стержня подвеса и вредную вибрацию маятника после удара, расстояние l (рис. 167) от центра оси вращения маятника до центра удара O делают несколько больше расстояния l_1 от той же оси до центра тяжести C маятника. Центру удара соответствует так называемый приведенный к этой точке вес P маятника; он определяется из условия уравновешивания маятника в горизонтальном положении и должен удовлетворять равенству $Pl = Ql_1$, где Q — действительный вес маятника.

При отсутствии на опорах образца маятник, свободно падающий с исходной высоты H, пройдет между опорами и поднимется на

некоторую высоту H_1. Вследствие затраты небольшого количества энергии на преодоление вредных сопротивлений высота взлета H_1 немного меньше исходной высоты H. Пренебрегая малой величиной вредных потерь живой силы маятника, можно принять, что $H_1 = H$.

Когда на пути маятника встретится образец, то при достаточной силе удара маятник сломает его и взлетит на высоту h. Количество затраченной на излом образца энергии при совпадении центров C и O равно

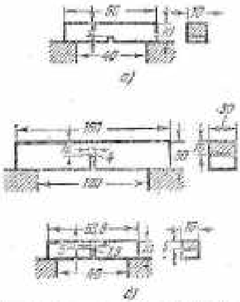


Рис. 168. Образцы для испытания на ударную вязкость: а — основной стандартный образец; б — большой и малый образцы с глубоким надрезом.

$$A = P(H - h). \tag{90}$$

Здесь A — работа, затрачиваемая на излом, равная абсолютной ударной вязкости.

Исходную высоту H (или для более точного подсчета высоту подъема маятника при холостом ходе) выразим через длину l и угол подъема α (рис. 152):

$$H = l + l \sin(\alpha - 90^\circ) = l(1 - \cos\alpha).$$

Обозначим через β угол взлета маятника после удара, аналогично найдем:

$$h = l - l\cos\beta = l(1 - \cos\beta).$$

Учитывая найденные значения H и h, получаем абсолютную ударную вязкость в виде

$$A = Pl(\cos\beta - \cos\alpha). \tag{91}$$

Формула (91) остается справедливой и для случая, когда центр удара O не совпадает с центром тяжести C маятника. Из зависимости между приведенным весом P и действительным весом Q следует:

$$A = Ql_1(\cos\beta - \cos\alpha).$$

Согласно ГОСТ 9454—60 ударная вязкость равна

$$a = \frac{A}{F}\ кГм/см^2, \tag{92}$$

где F — площадь сечения образца в плоскости надреза. Для облегчения вычислений пользуются специальными таблицами, дающими величины ударной вязкости по измеренным значениям углов α и β.

Иногда на измерительной шкале наносят деления не в градусах, а в единицах работы. Тогда обозначив через A_0 и A_1 отсчеты по

шкале соответственно при холостом ходе и при ударе, ударная вязкость определится по формуле

$$a = \frac{A_0 - A_1}{F}. \tag{93}$$

Согласно ГОСТ 9454—60 образцы должны иметь стандартные размеры и установленный для каждого образца надрез. Основной стандартный образец для испытания на ударную вязкость должен иметь размеры, указанные на рис. 168, а. Для некоторых испытаний применяют также большой и малый образцы с глубоким надрезом (рис. 168, б).

Маятниковые копры можно использовать также для испытаний на ударный разрыв образца. Для этого копры снабжают специальными выступающими упорами, которые прикрепляются болтами к станине вместо опор. В гнездо с нарезкой на тыльной стороне молота маятника навинчивается нарезная головка, обычно круглого образца. На другую головку навинчивается легкая, но достаточно жесткая поперечина. Молот поднимается в исходное положение вместе с образцом. При падении маятника в момент его прохождения через вертикаль поперечина ударяется о выступающие упоры и происходит ударный разрыв образца.

§ 32. Универсальная машина силой до 10 T с электронным силоизмерителем и нагревательным устройством

Универсальность рассматриваемой машины типа УМЭ-10Т [1]) состоит не только в том, что на ней можно производить испытания металлических и пластмассовых образцов на растяжение, на сжатие или на изгиб при статическом приложении нагрузки, но главным образом в том, что она позволяет осуществлять циклическое нагружение с любым коэффициентом асимметрии цикла при заданных деформациях или нагрузках в пределах ее грузоподъемности от $+10$ до $-10\ T$. Наибольшая частота циклической нагрузки машины составляет 10 циклов в минуту. К тому же все эти нагрузки можно задавать как в условиях обычной температуры, так и в условиях повышения температуры образца до 1200 °С. Наконец, машина имеет электронный силоизмеритель и диаграммный аппарат, позволяющий записывать в большом масштабе кривую зависимости усилия от деформации образца.

На рис. 169 схематически изображен общий вид машины. Неподвижно связанное с фундаментом основание 1 колонны 2 и верхний неподвижный траверс 3 составляют жесткую раму испытательной

[1]) Серийный выпуск этих машин осуществляется Армавирским заводом испытательных машин.

машины. К верхнему траверсу прикреплен упругий шарнир и динамометр *4*, представляющий одно целое с шарниром. Непосредственно к динамометру крепятся верхние сменные захваты в зависимости от вида образцов и характера испытаний. Аналогичные захваты крепятся на нижнем упругом шарнире, присоединенном к нижнему подвижному траверсу *5*.

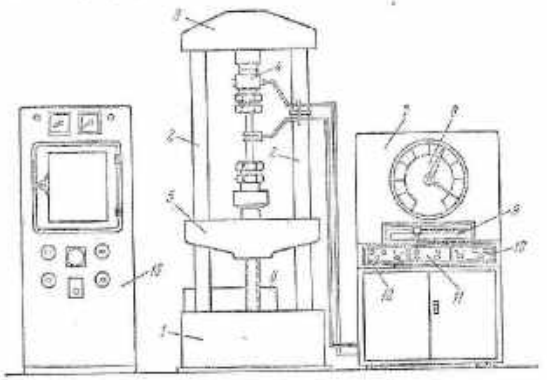


Рис. 169. Схема универсальной машины ценой 10 *Т* с электронным силоизмерителем и нагревателем: *1* — основание, *2* — колонны, *3* — неподвижный траверс, *4* — динамометр, *5* — подвижный траверс, *6* — коробка передач, *7* — пульт управления, *8* — силоизмеритель, *9* — диаграммный аппарат, *10* — канал силы, *11* — контактные устройства, *12* — канал деформации, *13* — нагреватель.

Машина снабжена комплектом захватов для испытаний круглых и плоских металлических или пластмассовых образцов как в обычных условиях, так и в условиях повышенных температур. В последнем случае на специальные захваты образца монтируется лучистая печь, при помощи которой образец нагревается до заданной температуры. Чтобы увеличить устойчивость системы, расположенной между верхним и нижним траверсами, состоящей из захватов и образца, при испытаниях на сжатие или на знакопеременное нагружение верхний и нижний упругие шарниры заменяются жестким соединением путем установки притертых втулок. Для испытания на изгиб вместо нижнего упругого шарнира к траверсу *5* крепится специальный стол, на котором монтируются образцы на изгиб.

Габариты машины позволяют получить расстояние между захватами (длину образца), равное 900 *мм* для испытаний при комнатной температуре и 400 *мм* при повышенной температуре. Расстояние между опорами при испытаниях на изгиб можно менять в пределах от 100 до 700 *мм*.

Позади машины жестко присоединена к основанию коробка передач *6* с электродвигателем, обеспечивающая десять скоростей перемещения подвижного захвата в диапазоне от 0,005 до 100 *мм/мин*.

Рядом с машиной расположен пульт управления *7*. В пульте установлен электронный силоизмеритель с циферблатом *8*, диаграммный аппарат *9* барабанного типа, счетчик числа циклов, электронная и электроприводная аппаратура и органы управления машиной, содержащие канал силы *10*, контактные устройства *11* и канал деформации *12*.

Силоизмеритель имеет по три шкалы нагрузок для статических и циклических испытаний с разной ценой делений. Шкалы *А*, *Б* и *В* служат для измерения предельных статических нагрузок в 2, 5 и 10 *Т* и имеют цену делений по 4, 10 и 20 *кГ* соответственно (нуль циферблата расположен слева). Предельные циклические нагрузки по этим шкалам (нуль циферблата посередине) меняются соответственно в пределах ±2, ±5 и ±10 *Т* с ценой делений 8, 20 и 40 *кГ*. Это позволяет выбирать бо́льшую точность измерений.

Деформации на диаграммном аппарате можно получать в следующих масштабах: 1000 : 1, 500 : 1, 200 : 1, 100 : 1. Наибольший размер получаемой диаграммы «сила — деформация» составляет 500 × 500 *мм*.

Машина УМЭ-10Т имеет нагревательное устройство *13*, изготовляемое в виде отдельной приставки к машине. В принципе эту приставку можно приспособить и к другой испытательной машине. К нагревательному устройству относится лучистая печь, термостат и шкаф управления. Лучистая печь монтируется при помощи специальных захватов непосредственно на образце. Нагреватели печи повышают температуру воздуха в пространстве вокруг образца, расположенном внутри печи, и этим нагревают образец. Максимальная температура нагрева лучистой печью металлических образцов составляет 1200 °С. Для нагрева пластмассовых образцов предназначен термостат. Его наибольшая температура доходит до 400 °С.

Электропитание к нагревателям и вода для охлаждения печи, захватов и тензометров подаются от распределительной колонки. Шкаф управления нагревом содержит потенциометр ЭПП-09 и служит для поддержания заданной температуры на образце, ее регулирования и регистрации. На рис. 170 приведена фотография общего вида машины.

Кинематическая схема машины показана на рис. 171. Нагрузка, задаваемая при испытаниях образцу *2*, действует на динамометр *1*, неподвижно закрепленный при помощи упругого шарнира на верхнем

траверсе машины. Динамометр представляет собой полый упругий цилиндр с наклеенными на нем фольговыми датчиками омического сопротивления, которые являются рабочими плечами измерительных мостов (см. рис. 104). Динамометр служит для измерения силы, возникающей в образце в любой момент испытаний.

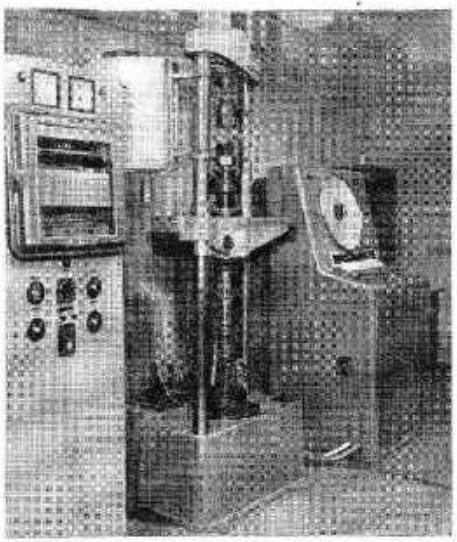


Рис. 179. Общий вид универсальной машины УМЭ-10Т.

Измерение продольных деформаций образца выполняется при помощи съемных электротензометров *3*, устанавливаемых непосредственно на рабочую часть образца. Электротензометр представляет собой упругую скобу с наклеенными на ней фольговыми датчиками сопротивления, аналогичными датчикам динамометра *1*. Базу тензометра можно изменять в пределах от 0,1 до 50 мм. Выбранная база измерений фиксируется специальными винтами тензометра перед установкой его на образец.

Нагрузка на образец *2* передается от его нижнего захвата, укрепленного на траверсе *5*, имеющем возможность свободно перемещаться строго вдоль колонн машины, что обеспечивается направляющими втулками *4* с вмонтированными в них шариками.

Поступательное перемещение траверсе *5* получает при помощи грузового винта от вращения червячного редуктора *6*, расположенного внутри основания машины. Для знакопеременного циклического нагружения необходимо обеспечить передачу нагрузки без

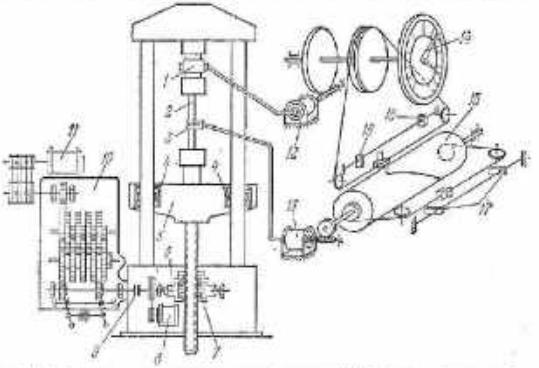


Рис. 171. Кинематическая схема универсальной машины УМЭ-10Т: *1* — динамометр, *2* — образец, *3* — тензометр, *4* — направляющие втулки, *5* — подвижный траверс, *6* — червячный редуктор, *7* — упругая муфта, *8* — электродвигатель, *9* — муфта, *10* — коробка передач, *11* — двигатель привода, *12* — двигатель силоизмерителя, *13* — двигатель барабана, *14* — цифробок, *15* — барабан, *16* и *17* — выключатели.

вяких люфтов. Это достигается жестким закреплением образца в специальных захватах и установкой в колесе редуктора *6* разрезной гайки *7*, предназначенной для предварительного устранения люфтов в соединении между червячным редуктором и грузовым винтом.

Электродвигатель *8*, расположенный в основании машины, приводит во вращение червячный редуктор при необходимости свободного подъема или опускания траверсе *5* и предназначен только для установочных целей.

Рабочее вращение червячного редуктора, а следовательно, и нагружение образца осуществляется двухскоростным асинхронным электродвигателем привода *11*, смонтированным на коробке передач *10* и включаемым из пульта управления. Коробка передач жестко

прикреплена к основанию машины и обеспечивает следующие соотношения между числами оборотов ее вторичного и первичного валов: 1 : 1, 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000 и 1 : 10 000. С первичным редуктором электродвигатель связан через коробку передач при помощи электромагнитной муфты *9*. Благодаря всему этому и получается десять возможных скоростей перемещения подвижного захвата (скоростей нагружения образца) в диапазоне от 0,005 до 100 *мм/мин*.

При нагружении образца упругие элементы динамометра *1* и тензометра *3* деформируются, что вызывает разбалансы измерительных мостов. Сигналы разбалансов усиливаются и поступают на вход управляемых реверсивных вентильных электродвигателей *12* и *13*, которые размещены в пульте управления. Через соответствующий редуктор электродвигатель *13* приводит в движение стрелку циферблата *14* силоизмерителя и перо барабана *15* диаграммного аппарата. При этом перо с помощью нити перемещается вдоль образующей барабана, пропорционально действующей на образец силы. Одновременно электродвигатель *13*, получающий сигнал от тензометра *3*, через свой редуктор вращает барабан *15* вокруг его оси, вследствие чего перо прочерчивает по окружности барабана перпендикулярно к его образующей отрезок, пропорциональный продольной деформации образца. Таким образом, на бумаге, натянутой на барабан, получается кривая зависимости силы от деформации образца в соответствующем масштабе.

Для получения повторно-периодических (циклических) нагрузок предусмотрена возможность реверсирования электродвигателя привода *11*. С этой целью установлены параллельно оси барабана диаграммного аппарата бесконтактные конечные выключатели *16* и *17*. Выключатели *16* ограничивают перемещение пера вдоль образующей барабана *15* и посылают команды на реверс двигателя *11*, как только перо дойдет до выключателя. Этими же устройствами заданные пределы циклической нагрузки. Таким же образом выключатели *17* ограничивают вращение барабана вокруг его оси и удерживают заданные пределы циклической деформации. Реверсирование двигателя приводом по желанию можно производить по нагрузкам либо по деформациям в любых пределах грузоподъемности машины.

Электроизмерение нагрузки и деформации образца основано на компенсационном методе. В качестве преобразователей измеряемой деформации в каналах силы и деформации применены постоянные фольговые тензодатчики, образующие полный мост. Переменным эталоном (компенсатором) в обоих каналах служат потенциометры, включенные в одну из симметричных параллельных ветвей компенсационного моста. Измерительные и компенсационные мосты питаются переменным током с напряжением 4—5 *в* на несущей частоте около 1000 *гц*, чтобы устранить влияние возможных помех. С целью

обеспечения постоянства нуля на всех диапазонах измерений и получения при длительных циклических испытаниях их высокой точности применена схема параллельного включения измерительных и компенсационных мостов, а также автоподстройка их балансировки по фазе и амплитуде. Благодаря этому ошибка в измерении как нуля не превосходит $\pm 1\%$ от измеряемой величины, а погрешность записи нагрузки и деформации не превосходит $\pm 2\%$.

Таким образом, машина позволяет выполнять с получением диаграммы деформирования:

1) статические испытания до разрушения металлических или пластмассовых образцов с различной скоростью нагружения;

2) циклические испытания до разрушения при постоянной амплитуде нагрузок или деформаций, но при малом числе циклов в минуту (до 10);

3) испытания на ползучесть или релаксацию при строгом постоянстве либо нагрузки либо деформации.

ГЛАВА XI

МАШИНЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

§ 33. Испытательная 30-тонная машина с нагревателем до 1200°

Машина предназначена для испытаний металлов на растяжение или сжатие при температурах до +1200°. Зажимное устройство и тяги машины изготовлены из жаропрочной стали. Машина позволяет соответственно температуре нагрева образца создавать следующие максимальные нагрузки:

30 *T* при температуре до 700°
18 » » » » 800°
9 » » » » 900°
6 » » » » 1000°
4 » » » » 1100°
2 » » » » 1200°

Машина состоит из следующих основных частей (рис. 172):

I — станина с зажимами;

II — гидравлический силовозбудитель с насосом, мотором и управляющим устройством;

III — маятниковый силоизмеритель с диаграммным аппаратом;

IV — высокотемпературная печь с нагревательными и регулирующими приспособлениями;

V — регулировочный шкаф с распределительными и контрольными приборами.

Станина (рис. 173) представляет собой выполненную из швеллеров раму, образованную стойками с верхней и нижней неподвижными перекладинами. В нижней перекладине рамы укреплен цилиндр, жестко связанный с нижними тягами *1*, которые, как и верхние тяги *4*, свободно проходят в отверстия жестких подвижных траверсов *2* и *3*. Тяги цилиндрическими шайбами можно соединять с нижним траверсом *2*, или с верхним траверсом *3*. Шайбы расположены над и под траверсом и каждая состоит из двух полуцилиндров, соединенных болтами.

Расстояние между зажимами для образцов или опорными плитами, установленными в траверсах *2* и *3*, можно изменять в пределах от 0 до 500 *мм* перемещением шпинделя при помощи мотора,

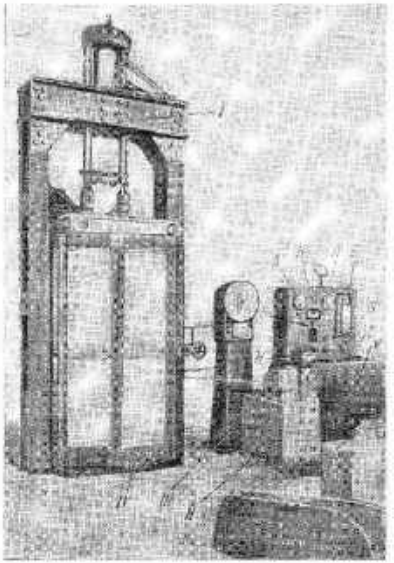


Рис. 172. Общий вид испытательной 30-тонной машины с нагревателем до 1200°. *I* — станина, *II* — гидравлический силовозбудитель, *III* — маятниковый силоизмеритель, *IV* — высокотемпературная печь, *V* — регулировочный шкаф.

расположенного внизу станины. Мотор включается верхней кнопкой выключателя *6* для движения шпинделя вверх, нижней — для движения вниз, средняя предназначена для остановки.

На верхней перекладине рамы расположен рабочий цилиндр *5* с плунжером, несущим подвижный траверс, к которому прикреплены верхние тяги *4*. При нагнетании масла в рабочий цилиндр

плунжер поднимает эти тяги вверх. Если их соединить с верхним траверсом *3*, а нижние тяги *1* с нижним траверсом *2*, то образец, закрепленный в зажимах между траверсами, будет растягиваться. Для испытания на сжатие нужно соединить верхние тяги *4* с нижним траверсом *2*, а нижние тяги *1* — с верхним траверсом *3*.

Силовозбудитель гидравлического действия состоит из насоса *8* с мотором и из стойки *7* регулировочного устройства с рукояткой для грубой регулировки и со штурвалом для точной. Насос *8* подает масло в рабочий цилиндр *5*, что и создает усилие в образце. Для

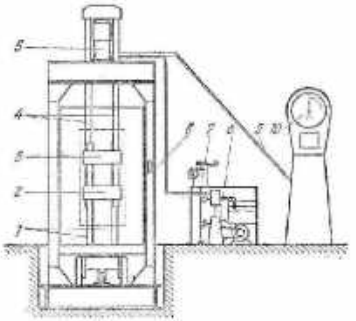


Рис. 173. Станина, силовозбудитель и силоизмеритель зеренной машины с нагревателем: *1* — нижние тяги, *2* и *3* — траверсы, *4* — верхние тяги, *5* — рабочий цилиндр, *6* — выключатель, *7* — стойка управления, *8* — насос, *9* — маслопровод, *10* — шкала силоизмерителя.

того чтобы привести в действие насос *8*, нужно включить его мотор, нажимая на верхнюю кнопку выключателя, укрепленного на стойке *7*. Если против указательной стрелки располагается нулевая метка диска, имеющегося на стойке управления, то в цилиндре *5* насосом поддерживается постоянное давление; передвигая рукоятку стойки управления *7* вместе с диском влево (против часовой стрелки), увеличивают подачу масла, вследствие чего плунжер цилиндра *5* поднимается вверх. Метки на диске справа от нуля указывают скорость подъема плунжера в *мм/мин*. При движении рукоятки вправо за нулевую метку сливной клапан открывается и масло вытекает из цилиндра *5* в сливной бак. То же операции, только в медленном темпе, производятся при помощи штурвала стойки управления *7*. Мотор насоса выключают, нажимая на нижнюю кнопку выключателя, расположенного на стойке.

Маятниковый силоизмеритель позволяет измерять усилие в образце по трем шкалам *10* с разной ценой делений в зависимости от величины груза, подвешиваемого к маятнику, а именно:

при грузе *A*	по шкале 0— 5 000 *кГ*	с ценой деления	10 *кГ*
» » *A+B*	» » 0—15 000 »	» »	25 »
» » *A−B*	*C* » » 0—30 000 »	» »	100 »

Горизонтальный масштаб диаграммы соответственно этим трем комбинациям нагрузок равен 33,3, 100 или 200 *кГ* на 1 *мм*.

Принцип действия силоизмерителя состоит в том, что давление в цилиндре *5*, пропорциональное усилию образца, передается по трубке *9* на поршень цилиндра силоизмерителя. Поршень при помощи тяги отклоняет штангу маятника; горизонтальная проекция перемещения груза маятника пропорциональна давлению в цилиндре *5*. Другой конец штанги толкает зубчатую рейку, которая вращает зубчатое колесо с указательной стрелкой шкалы *10* и двигает по горизонтали перо диаграммного аппарата. Перо прочерчивает на диаграммной ленте отрезки, пропорциональные величине силы. По вертикали перо фиксирует на ленте деформацию образца в масштабе 1 : 1 или 1 : 2. Это происходит вследствие перемещения ленты валиком, связанным шестеренки, трубовых валом и рейкой с движением плунжера рабочего цилиндра *5*, обусловленным деформацией образца.

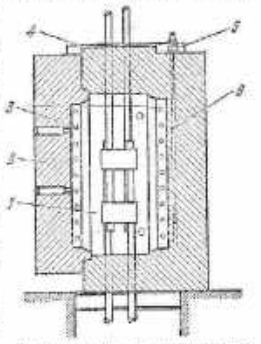


Рис. 174. Разрез высокотемпературной печи: *1* — испытательная камера, *2* — дверь, *3* — нагревательные спирали, *4* — канал, *5* — вентилятор, *6* — щели.

Высокотемпературная печь *IV* (см. рис. 172) расположена между стойками станины на горизонтальных балках, уложенных на уровне пола независимо от рамы станины. Печь представляет собой температурный шкаф с толстой термической изоляцией из керамики. Внутри печи (рис. 174) находится испытательная камера *1* с размерами в плане 510 × 510 *мм* и высотой 1400 *мм*. В полу и потолке камеры керамика имеет отверстия, через которые пропущены нижние и верхние тяги от цилиндра и от рабочего цилиндра станины. К концам тяг в камере прикреплены траверсы с зажимными приспособлениями. Внутри верхних тяг имеются продольные сверления; эти сверления заканчиваются над печью в виде входных и выходных отверстий, к которым присоединены гибкие шланги. Включая

их в водопроводную сеть, создают в сверлениях циркуляцию воды, охлаждающей верхние тяги.

Печь закрывается массивной дверью *2* с термоизоляцией из керамики и двумя небольшими наблюдательными окошечками с кварцевыми стеклами. Нагрев печи производится спиральными стержнями *3* диаметром 14 *мм* и длиной 250 *мм*, изготовленными из углеродистого кремния. В углублениях на внутренней стороне двери и на задней стенке испытательной камеры равномерно по высоте печи размещено по девять нагревательных стержней *5*. Выводы от концов дверных нагревательных стержней при закрывании двери *2* присоединяются снизу под запорной ручкой. Там же предусмотрен автоматический выключатель, прерывающий ток во всей нагревательной сети при открывании двери. Общий вывод из всех нагревательных стержней идет к главному переключателю, расположенному на щите регулировочного шкафа.

Для измерения температуры в процессе испытания служат два термометра (термопара), находящиеся внутри камеры и вставленных в отверстия на левой боковой стенке, расположенные на разной высоте. Проводка от термометров выведена к терморегулятору в регулировочном шкафу.

Одинаковая температура по всей камере достигается принудительной циркуляцией воздуха, осуществляемой вентилятором *6*. Нагретый воздух, просачивающийся из печи, собирается под капотом *4* и через щели *6*, устроенные в задней стенке печи, вдувается вентилятором в нижнюю часть камеры. Здесь нагретый воздух перемешивается и частично просачивается через потолок снова под капот. Интенсивность циркуляции воздуха регулируется специальной заслонкой.

В регулировочном шкафу помещается необходимое для эксплуатации печи электрооборудование, оно предназначено для того, чтобы обеспечить: 1) автоматическую регулировку температуры и ее контроль; 2) непрерывную запись температуры; 3) постоянный контроль тока и напряжения; 4) корректировку расхода энергии, связанную со старением нагревательных стержней.

Для производства испытаний образец закрепляют в зажимах машины, закрывают дверь печи, чем нагревательная система включается в цепь, и включают главный переключатель *C* (см. рис. 172). При этом включаются амперметр *A* и вольтметр *D*, о чем сигнализируют расположенные под ними цветные лампочки. При помощи специального ключа передвигают красную стрелку по шкале *B* терморегулятора на заданную температуру, и в соответствии с установленной температурой и временем нагрева включают ступенчатый переключатель, поворачивая штурвал *G*. Затем включают мотор вентилятора при помощи выключателя *F*, открывают вентиль водопровода для циркуляции охлаждающей воды в сверлениях верхних

тяг и приводят в действие диаграммный аппарат *E* для записи температуры по времени.

Когда печь нагреется до 100°, регулирование температуры выключателем *H* переводят на автоматическое.

Для того чтобы образец как бы приспособился к заданной температуре, его выдерживают в течение 1—2 часов без нагрузки, и только после этого производят испытание. С этой целью приводят в действие насос *8* (рис. 173), регулируют рукояткой или штурвалом стойки *7* подачу масла в рабочий цилиндр *5* и наблюдают возрастание нагрузки по шкале *10* в соответствии с установленным пределом измерения.

Открывать дверь печи разрешается при температуре не выше 90°F. Поэтому по окончании испытания необходимо выдержать некоторое время, чтобы температура снизилась.

§ 34. Машина силой до 30 *T* для испытаний при температурах от —60° до +100°

Машина предназначена для испытаний металлов на растяжение или сжатие при температурах от —60° до +100°. Она состоит из следующих основных частей (рис. 175):

I — станина с зажимами;

II — гидравлический силовозбудитель;

III — маятниковый силоизмеритель;

IV — температурный шкаф с испытательной камерой и вмонтированными в ней охлаждающими и нагревательными устройствами;

V — холодильный агрегат с регулирующими и контрольными приборами.

Общая компоновка и устройство станины, силовозбудителя и силоизмерителя такие же, как и у машины, рассмотренной в § 33 (см. рис. 173), поэтому здесь приводятся только устройства, связанные с нагревом и охлаждением образца.

Температурный шкаф имеет массивные стенки, изготовленные из термоизоляционного материала; шкаф заключен в металлический кожух. На рис. 176 показан разрез шкафа по плоскости симметрии. В передней части шкафа находится испытательная камера *8*, а в задней расположены змеевики *5* испарителя холодильного агрегата. Между змеевиками и испытательной камерой вмонтированы нагревательные спирали *4*. Позади змеевиков на разных уровнях имеются два вентилятора *6*, приводимых в действие мотором *7*. Вентиляторы перемещают воздух внутри шкафа, чтобы во всех частях испытательной камеры температура была одинаковой. Для удобства монтажа внутренних устройств шкафа задняя его стенка сделана съемной. Дверь *2* шкафа имеет смотровое остекление с воздушными прослойками, что позволяет наблюдать

за образцом в процессе испытания без ухудшения качества термоизоляции шкафа.

Внутри испытательной камеры через отверстия в полу и в потолке пропущены тяги станины, к которым прикреплены зажимные устройства *1*.

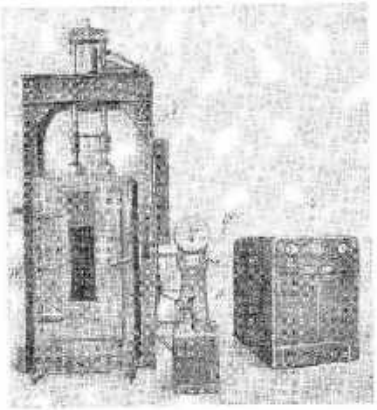


Рис. 176. Машина высок. на 70 *T* для испытаний при температурах от −60° до +100°. *I* — станина с зажимами, *II* — гидравлический силикондуктор, *III* — ультрамалый силикондуктор, *IV* — температурный шкаф, *V* — холодильный агрегат.

Холодильный агрегат машины (рис. 177) состоит из двух компрессоров: низкого давления *1* и высокого давления *4*, приводимых в действие электромоторами *3*. Компрессор *1* низкого давления всасывает через перегреватель *7* охлаждающий газ (фреон) из испарителя, расположенного в температурном шкафу, и нагнетает его через охлажденный водой конденсатор *2* в компрессор *4* высокого давления. В компрессоре *4* происходит сгущение охлаждающего газа на более высокое давление. Отсюда сгущенный газ проходит через второй охлажденный водой конденсатор *5*, затем через промежуточный охладитель *6* и поступает к регулирующему вентилю *8* высокого давления с поплавком. От вентиля *8* газ вновь поступает в испаритель внутри температурного шкафа. Здесь он испаряется,

отнимает тепло от окружающего воздуха и этим снижает температуру в шкафу. Поступление газа в испаритель и, следовательно, интенсивность его испарения регулируются вентилем *8*. Открытие

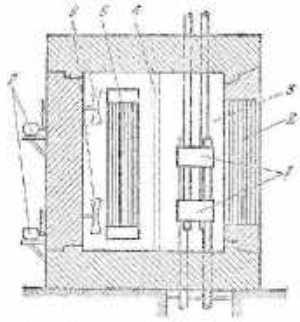


Рис. 176. Вторая температурного шкафа машины для испытаний при температурах от −60° до +100°. *1* — зажимные устройства, *2* — дверь, *3* — испытательная камера, *4* — нагревательные спирали, *5* — внешняя испарители, *6* — вентиляторы, *7* — моторы.

вентиля производится специальным терморегулятором, связанным с термометром *9* и силикондуктивным устройством. Регулировка

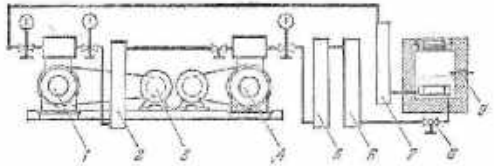


Рис. 177. Схема холодильного агрегата машины для испытания при температурах от −60° до +100°. *1* — компрессор низкого давления, *2* — конденсатор, *3* — электромоторы, *4* — компрессор высокого давления, *5* — конденсатор, *6* — охладитель, *7* — перегреватель, *8* — вентиль, *9* — термометр.

вентиля *8* — автоматическая, причем, когда температура в испытательной камере достигает величины, установленной на терморегуляторе, дальнейшее ее изменение прекращается и температура сохраняется постоянной в течение всего испытания.

ГЛАВА XII

НАСТОЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

§ 35. Установки для испытаний на изгиб

На рис. 178 показана настольная установка [1]) для испытаний на чистый изгиб. Установка состоит из двух стальных двутавровых балок № 12 длиной 1,5 *м*. Нижняя балка *1* является станиной. К ней приварены две стойки, на которых лежит испытываемая балка *2*. К концам балки прикреплены нагружающие тросы *3*; эти

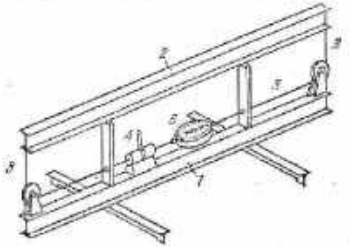


Рис. 178. Настольная установка для испытаний на чистый изгиб балок: *1* — станина; *2* — испытываемая балка; *3* — трос; *4* — стяжная муфта; *5* — динамометр.

тросы огибают блоки, укрепленные на станине, и присоединены к стяжной муфте *4*. Сила натяжения тросов измеряется динамометром *5*. Балка в средней своей части подвергается чистому изгибу; здесь устанавливают тензометры, прогибомеры и инклинометры.

На рис. 179 изображена настольная установка консольного типа (также для испытаний на изгиб). Двутавровая клепаная балка *1*

[1]) Предложена В. Е. Киневым.

неподвижно прикреплена одним концом к массивной балке *2*, которая составляет одно целое с жесткой станиной *3*, лежащей на столе. Длина консоли 80 *см*, высота — 14 *см*, материал — дюраль. При помощи рычага *4* консоль нагружается на своем свободном конце силой, направленной вниз. Нагружение осуществляется вручную: на конец рычага накладываются гири (показаны пунктиром).

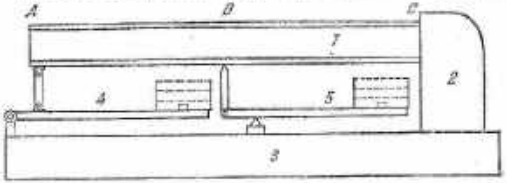


Рис. 179. Настольная установка для испытания балки на изгиб: *1* — испытываемая двутавровая балка; *2* — массивная балка; *3* — станина; *4* и *5* — рычаги для нагружения балки.

Рычагом *5* балку можно нагрузить силой, направленной вверх. Если силы будут одинаковы, то участок *BC* балки будет испытывать чистый изгиб. Изменяя количество гирь на рычагах, можно задавать разнообразные нагрузки на балку. При необходимости увеличить длину рычага *5*, его можно повернуть в другую сторону; опора рычага может перемещаться по пазу вдоль станины *3*.

§ 36. Установка для испытания на сложное сопротивление

Рассматриваемая установка [1]) предназначена для испытания труб в условиях сложного нагружения и позволяет создавать в стенках испытываемой трубы плоское напряженное состояние при любом соотношении между напряжениями. Установка (рис. 180) состоит из массивной чугунной отливки *1*, на вертикальной стенке которой при помощи фланца жестко закреплена дюралюминиевая труба *2*. К свободному концу трубы в плоскости торцевого сечения прикреплена в горизонтальном положении стальная планка *3*. Для грузов на концах планки подвешены тарелки *4*; трогая левой тарелки перекинут через неподвижный блок *5*, укрепленный возле планки на специальной стойке. При нагружении тарелок на левый конец планки будет действовать сила, направленная вверх, а на правый — вниз. Таким образом, если на обе тарелки положить одинаковые грузы, то к трубе возникнут только крутящие моменты; при разных грузах

[1]) Предложена и осуществлена П. А. Фоминым.

возникнут также и изгибающие моменты. Варьируя величины грузов и их плечи, легко получить любые соотношения между изгибающим и крутящим моментами, а следовательно, и между напряжениями в сечениях трубы.

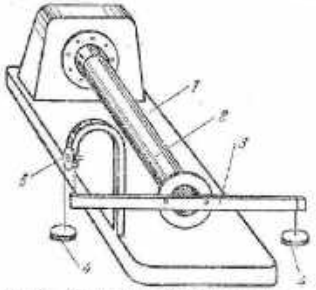


Рис. 180. Установка для испытания на сложное нагружение: 1 — чугунная станина, 2 — шарнирно-шаровая труба, 3 — планка, 4 — тросики для грузов, 5 — концевой блок.

Малые габариты установки позволяют разместить ее на обыкновенном столе. Массивность станины 1 и ее устойчивость дают возможность осуществить жесткое закрепление испытываемой трубы.

Для измерения деформаций трубы применяют электротензометры сопротивления. С этой целью на наружной поверхности трубы приклеивается розетка (см. рис. 61 на стр. 100) из трех проволочных датчиков сопротивления с базой в 20 *мм*: два из них, D_x и D_y, взаимно-перпендикулярны, третий, D_α, — под углом 45° к первым двум.

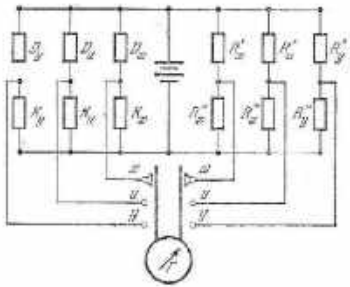


Рис. 181. Схема измерительного мостика розетки датчиков.

Каждый из датчиков включен в мостик с самостоятельными компенсационными датчиками K_x, K_α и K_y (рис. 181). Последние наклеены

на консольные пластинки из дюралюмина. При помощи микрометрического винта задаются различные прогибы пластинки, а вместе с этим и удлинения волокон ее наружной поверхности, чем вызывается изменение сопротивления компенсационного датчика и достигается балансировка мостика. Но приращения удлинений волокон трубы можно определить и при разбалансированном мостике.

Включение каждого датчика в электросеть производится специальным переключателем. Измерительный мостик питается током напряжением 5,1 *в* от аккумуляторной батареи.

Изменение сопротивления датчика, пропорциональное измеряемой деформации, определяют переносным зеркальным гальванометром.

При нарушении балансировки мостика ток проходит через катушку 1 гальванометра (рис. 182, *а*), подвешенную на упругой нити 2 в электромагнитном поле, и вызывает поворот катушки около вертикальной оси. К катушке прикреплено зеркальце 3, в котором отражается шкала 4 гальванометра (рис. 182, *б*), наблюдаемая через зрительную трубу 5. Одна из отметок шкалы совмещается с вертикальной чертой на объективе трубы. При отклонении катушки и зеркальца на угол α пропорционально деформации материала в точке, где наклеен датчик, черта перемещается на отметку, отстоящую на n делений от первоначальной отметки. Цена деления шкалы зависит от силы тока, сопротивлений проводов и гальванометра и от расстояния между зеркальцем и шкалой. Цена деления шкалы может быть установлена опытным путем для каждого гальванометра отдельно. Переносные гальванометры, применяемые в данной установке, имеют шкалу с ценой деления 0 в пределах от $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ до $0{,}4 \cdot 10^{-6}$.

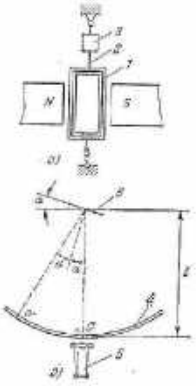


Рис. 182. Схема переносного зеркального гальванометра: *а* — катушка в зеркальце; *б* — шкала и зрительная труба: 1 — катушка, 2 — упругая нить, 3 — зеркальце, 4 — шкала, 5 — зрительная труба.

Для нормальной работы электроизмерительного устройства необходимо, чтобы электромагнитное поле и напряжение в электросети были устойчивы. В процессе испытания измерительный мостик должен находиться под током, для чего нужно все время держать включенным любой из трех датчиков, переключая их по мере надобности.

§ 37. Установка для испытаний на продольный изгиб

1. Установка для испытания шарнирно опертых стержней. На рис. 183,*а* изображена установка для испытания на продольный изгиб шарнирно опертых образцов значительной длины (до 2 *м*), сжимаемых силой до 50 *кГ*. Образец *1* верхним своим концом упирается в неподвижную опору *A*, а его нижний конец поддерживается цилиндром *2*, опирающимся на пружину *3*. Цилиндр свободно

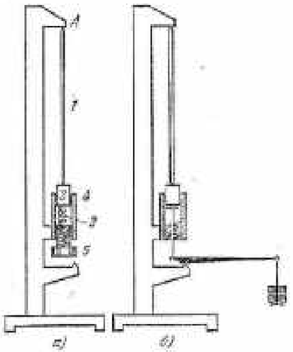


Рис. 183. Схема установки для испытания длинных образцов на продольный изгиб: *а* — с помощью винта *5*; *б* — непосредственным нагружением.

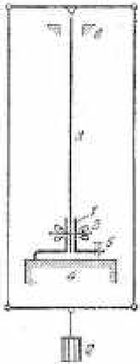


Рис. 184. Схема испытания на продольный изгиб длинного стержня, защемленного одним концом: *1* — обжимы, *2* — барашки стяжных болтов, *3* — образец, *4* — неподвижное основание, *5* — регулировочный винт, *6* — стопоры, ограничивающие выпучивание образца после потери устойчивости.

движется в стакане *4*. Винт *5*, ввинчивающийся в стакан снизу, сжимает пружину, которая передает усилие на образец. Пружина тарирована, и по ее деформации судят о величине продольной силы, действующей на образец.

Для более мощных образцов, соответствующих нагрузке от 50 до 500 *кГ*, вместо пружины применяется рычажное устройство, показанное на рис. 183,*б*.

2. Установка для испытания защемленного стержня. Установка для испытания на продольный изгиб образца, защемленного одним концом, показана на рис. 184. Обжимы *1*, стягиваемые барашками *2*, плотно зажимают нижний конец образца *3*. Образец вместе с обжимами устанавливают на неподвижный столик *4*. Подъемный винт *5* предназначен для установки образца строго вертикально.

Верхний свободный конец образца загружается посредством коромысла и тяг, как показано на рис. 184, грузом *Q*, действующим по оси образца. Загружение производится непосредственно гирями.

По достижении критической нагрузки стержень начинает клониться в какую-либо сторону. Для того чтобы избежать пластической деформации стержня, устанавливают стопоры *6*, на которые опирается стержень после потери устойчивости.

Испытание проводится на образце большой гибкости. В случае жесткого образца трудно осуществить защемление нижнего конца образца.

§ 38. Установка для испытания пластинки на изгиб

На рис. 185 показан в разрезе гидравлический пресс простейшей конструкции, предназначенный для испытания на изгиб круглой пластинки с защемленными краями равномерно распределенной нагрузкой. Рабочий цилиндр *1* перекрывается испытываемой пластинкой *2*, края которой прижимаются крышкой *3*, навинчиваемой сверху на шейку цилиндра. Внутрь цилиндра через отверстие *4* в его дне нагнетают ручным насосом масло. Замеры прогибов пластинки производят через отверстие в крышке *3*. Индикаторы (см. § 2), прикрепленные к крышке, упираются своими штифтами в пластинку сверху и при выпучивании пластинки показывают ее прогиб.

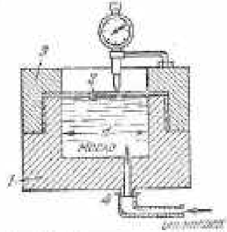


Рис. 185. Схема гидравлической установки для испытания круглых пластинок на изгиб: *1* — рабочий цилиндр, *2* — испытываемая пластинка, *3* — прижимная крышка, *4* — маслопровод.

Нагнетание масла в цилиндр производят постепенно. Увеличивая давление в цилиндре одинаковыми ступенями, берут отсчеты по индикаторам одновременно. Разгрузив пластинку, следует проверить начальные отсчеты.

Искомые прогибы определяются следующими выражениями:

$$w_1 = \Delta n_{1cp} c_1, \quad w_2 = \Delta n_{2cp} c_2, \ \ldots,$$

где c_1, c_2, ... — цены делений индикаторов (обычно одинаковые и равные 0,01 *мм*); Δn_{1cp}, Δn_{2cp}, ... — средние значения приращений отсчетов по индикаторам.

Испытание производят на круглой стальной или дюралевой пластинке диаметром $d = 50 - 100$ *мм*, защемленной по всему контуру, толщиной от 1 до 3 *мм*.

Теоретически малый прогиб круглой пластинки постоянной толщины с защемленными краями, нагруженной равномерно распределенной сплошной нагрузкой интенсивности p, выражается формулой

$$w = \frac{p}{64D}(a^2 - r^2)^2, \qquad (94)$$

где r — расстояние от центра пластинки до данной точки, в которой определяется прогиб; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость пластинки, причем

E — модуль упругости материала,

h — толщина пластинки,

μ — коэффициент Пуассона материала.

Максимальный прогиб наблюдается в центре пластинки, т. е. при $r = 0$ и, как видно из формулы (94), выражается так:

$$w_{max} = \frac{pa^4}{64D}. \qquad (95)$$

Формулы (94) и (95) справедливы при $w \leq 0{,}2h$.

ГЛАВА XIII

ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ РАБОТ

§ 38. Стенд для испытания консольных моделей

В настоящей главе дается описание нескольких факультативных работ (и установок к ним), содержание которых выходит за пределы обычного курса сопротивления материалов.

На практике нередко бывает необходимо экспериментально исследовать деформацию и напряжение конструкции, теоретический расчет которой затруднителен или невозможен. На рис. 186 показана схема передвижного силового стенда для испытания моделей изгибающим моментом до 10 *Тм* и крутящим моментом до 5 *Тм*, изготовленного из стальных двутавровых прокатных балок № 18.

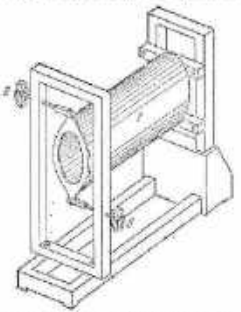


Рис. 186. Стенд для испытания на кручение и изгиб консольных моделей. Продольный момент, изгибающий — 10 *Тм*, крутящий — 5 *Тм*. 1 — модель, 2 и 3 — винты для нагружения модели

Нагружение модели осуществляется посредством рамы, прикрепляемой к основанию стенда болтами. Рама может быть установлена в любом месте основания в зависимости от длины модели. На раме укреплены винты, затягиванием которых создают те или иные нагрузки на модель; винты могут быть расположены в любом месте рамы.

На стенде осуществляется не только консольная схема прикрепления модели; введением дополнительной опоры легко может быть выполнена балочная установка.

Измерение нагрузки обычно производят пружинными динамометрами, которые располагают между нагрузочными винтами и

точками приложения нагрузок к модели. Напряжения в модели измеряют электрическими или рычажными тензометрами. Прогибы при статической нагрузке измеряют индикаторами, укрепленными на особых стойках, стоящих на полу. При больших прогибах вместо индикаторов применяют подвесные рейки, наблюдения по которым ведутся в трубу кимографа. Ввиду неполной жесткости заделки модели следует измерять также смещения точек ее крепления.

На стенде можно исследовать такие трудноразрешимые теоретически задачи, как кручение и изгиб цилиндрической или конической оболочки с вырезами. На нем же можно производить испытания оболочек на сдвиг и изгиб.

§ 40. Установка для исследования пространственного изгиба криволинейного бруса

Теоретическое исследование пространственного изгиба криволинейного бруса представляет собой сложную задачу. Эксперимент помогает решить эту задачу. На рис. 187 показана установка для экспериментального исследования деформаций и напряжений тонкостенного криволинейного плоского бруса при нагружении его силой, перпендикулярной к его плоскости.

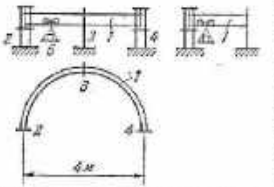


Рис. 187. Установка для исследования работы тонкостенного криволинейного бруса: *1* — криволинейный брус, *2*, *3* и *4* — опоры, *5* — подвижный груз.

Стальная двутавровая балка № 18, изогнутая по полуокружности, расположена горизонтально на трех опорах. Конструкция опор позволяет осуществить защемление и свободное опирание балки. По нижней полке балки передвигается на роликах тележка, несущая платформу для грузов. Тележка может быть установлена в любом месте балки и затем нагружена; она может также передвигаться и с грузом. Таким образом, могут быть экспериментально определены не только напряжения и перемещения в любом сечении балки, но и их линии влияния. Напряжения измеряют тензометрами; для записи линий влияния удобны электротензометры. Прогибы измеряют индикаторами или рейками, углы поворота — инклинометрами, углы закручивания — также инклинометрами, штрихи которых перпендикулярно к оси балки. Для измерения больших значений угла закручивания удобнее применять индикаторы, устанавливаемые горизонтально по два в сечении — один вверху, другой внизу — перпендикулярно к оси балки (рис. 188).

При достаточно большой нагрузке, не превышающей, однако, предела пропорциональности, деформация балки может быть вполне достаточной для наблюдения невооруженным глазом. Прогибы

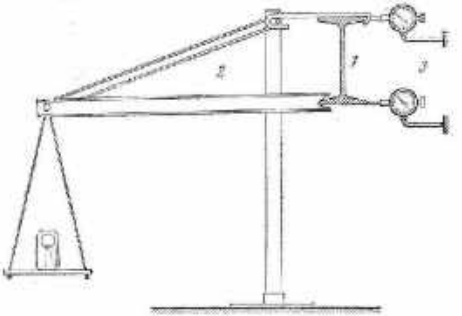


Рис. 188. Схема установки бруса на кручение: *1* — испытываемый брус, *2* — приспособление для создания крутящего момента (вид со стороны рис. 187), *3* — индикаторы для измерения угла поворота сечения балки при кручении.

тонкостенной балки открытого профиля достигают порядка нескольких сантиметров, а углы закручивания — десяти — двадцати градусов.

§ 41. Иллюстрация теоремы о взаимности работ

Описанная выше установка с успехом используется и для проверки теоремы о взаимности работ.

1. Общие сведения. Теорема о взаимности работ гласит: работа внешних сил одного упругого состояния на перемещениях другого состояния равна работе сил второго состояния на перемещениях первого.

Если нагрузки в обоих состояниях равны единице или численно одинаковы, то придем к положению о взаимности перемещений: перемещение δ_{12} некоторой точки *1* упругого тела, вызванное силой, приложенной в точке *2*, равно перемещению δ_{21} точки *2*, вызванному силой, приложенной в точке *1*.

Перемещение и сила здесь подразумеваются в обобщенном смысле. Нагрузкой может быть и пара сил, тогда соответствующее перемещение есть угол поворота. Наконец, нагрузкой может быть группа сил и моментов. Групповым силам соответствуют также групповые перемещения.

2. Случай двух сил. Опыты следует начать с самого простого. В двух произвольных точках оси балки подвесить платформы для грузов. Загрузить произвольной нагрузкой P_1 одну платформу и измерить перемещение Δ_{21} другой платформы по вертикали. Затем загрузить эту вторую платформу также грузом произвольной величины P_2 и измерить перемещение Δ_{12} первой платформы.

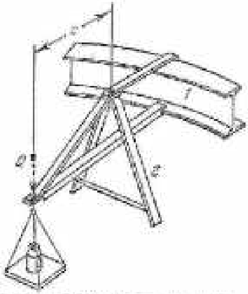


Рис. 189. Приспособление для загружения балки закручивающей парой сил (схема рис. 188): 1 — испытуемый брус; 2 — шарнирная опора.

По теореме взаимности работ должно быть:

$$P_1\Delta_{12} = P_2\Delta_{21}.$$

Если силы P_1 и P_2 одинаковы, то

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

т. е. перемещения платформ одинаковы, независимо от того, где они подвешены.

3. Случай двух пар. Вместо сил можно приложить пары. На рис. 188 и 189 показана конструкция, позволяющая осуществить пару сил. Груз Q, помещенный на платформу, создает относительно опоры момент $L = Qc$. Этот момент передается на балку в виде пары горизонтальных сил.

Приложив момент L_1 в некотором сечении 1 балки, измерим соответствующий угол Δ_{21} поворота сечения 2 в его плоскости. Угол Δ_{21}, который будем называть углом кручения, можно измерить, например, при помощи двух индикаторов, как показано на рис. 188. Затем, приложив момент L_2, в сечении 2, измерим угол Δ_{12} кручения в сечении 1.

Согласно теореме о взаимности работ должно быть

$$L_1\Delta_{12} = L_2\Delta_{21}.$$

4. Случай силы и пары. Приложим в сечении 1 груз P_1 и измерим угол Δ_{21} кручения в сечении 2. Затем приложим пару L_2 в сечении 2; соответствующий прогиб в сечении 1 в принятых обозначениях есть Δ_{12}. По теореме о взаимности работ должно быть:

$$P_1\Delta_{12} = L_2\Delta_{21}.$$

Если подобрать P_1 и L_2 численно равными, например, принять $P_1 = 40\ кГ$, а $L_2 = 40\ кГм$, то получим:

$$\Delta_{12} = \Delta_{21};$$

здесь прогиб Δ_{12} выражается в метрах, а угол Δ_{21} в радианах.

5. Случай нескольких сил. Увеличивая количество сил и пар, можно исследовать разнообразные варианты нагружения. Пусть, например, в первом состоянии к балке приложены сила P_1 и момент L_2 соответственно в сечениях 1 и 2. Вызываемые этой нагрузкой прогибы в некоторых произвольных сечениях 3 и 4 обозначим через Δ_{31} и Δ_{41}.

Во втором состоянии примем нагрузку в виде двух сил P_3 и P_4, приложенных в сечениях 3 и 4. Соответствующий прогиб в сечении 1 обозначим через Δ_{12} и угол поворота сечения 2 в его плоскости — через Δ_{22}. По теореме о взаимности работ справедливо следующее равенство:

$$P_1\Delta_{12} + L_2\Delta_{22} = P_3\Delta_{31} + P_4\Delta_{41}.$$

§ 42. Установка для определения положения центра сдвига

1. Общие сведения. В работе 15 рассмотрено определение положения центра изгиба. Для корытного профиля абсцисса центра изгиба определяется по формуле (см. формулу 27 на стр. 90)

$$d = \frac{b^2h^2t_1}{4I_x},$$

где t_1 — толщина полки.

Центр изгиба иногда называют центром жесткости. Мы будем различать понятия центра изгиба и центра жесткости.

Рассмотрим симметричный корытный профиль; здесь оба центра лежат на оси симметрии профиля: ц е н т р и з г и б а — точка в плоскости сечения, через которую проходит равнодействующая касательных сил, определяемых по элементарной теории изгиба балки; ц е н т р ж е с т к о с т и — точка, через которую проходит равнодействующая внешних сил, не вызывая закручивания балки. В случае весьма длинной балки центр жесткости совпадает с центром изгиба. При уменьшении длины балки центр жесткости смещается и в случае короткой балки совпадает с ц е н т р о м с д в и г а [8]. Центр сдвига корытного профиля находится в точке пересечения оси симметрии профиля с осью стенки.

2. Постановка опыта. Положение центра жесткости определяется путем пробных установок груза. В зависимости от мощности испытываемой балки применяют нагружение вручную или на машине. В случае испытания на машине (рис. 190) балку устанавливают на двух опорах и нагружают посредине через вспомогательный стержень, установленный вертикально. Нижний конец стержня упирается в кронштейн на балке, а верхний — в плиту пресса. На балку в поперечном направлении устанавливают клинометр, фиксирующий закручивание балки, если оно происходит.

Переставляя балку или нагружающий стержень, можно найти положение, соответствующее отсутствию закручивания; при этом местоположение стержня укажет положение центра жесткости.

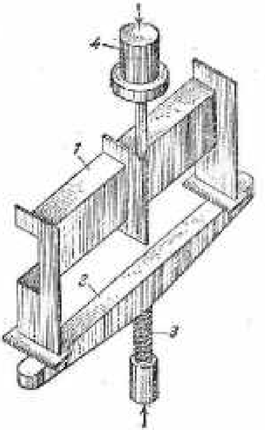


Рис. 190. Опытное определение положения центра жесткости балки при изгибе: 1 — испытываемая тонкостенная балка швеллерного профиля, 2 — опорный траверс, 3 — винт нажима, определяющий траверс, 4 — верхняя упорная головка машины.

Исследуя балки различной длины, можно заметить, что центр жесткости у короткой балки находится ближе к стенке, чем у длинной балки. Отклонение центра жесткости от центра изгиба наблюдается даже при значительной длине балки. При отношении длины балки к высоте, равном 10, отклонение может составлять около 10% полного эксцентриситета *d*. Если же указанное отношение равно 5, то отклонение центра жесткости от центра изгиба составляет около 50%, т. е. центр жесткости находится приблизительно посредине между центром изгиба и центром сдвига. При отношении длины балки к высоте около 2 центр жесткости практически совпадает с центром сдвига, т. е. со стенкой швеллера.

Характер распределения нормальных напряжений по сечению балки устанавливается при помощи тензометров. В случае короткой балки закон распределения напряжений по высоте сечения отклоняется от линейного; наблюдается концентрация напряжений в углах профиля.

§ 43. Вибрационная усталостная установка с электродинамическим вибратором

Установка обеспечивает получение частот перемен нагрузки, в 10—15 раз больших, чем на обычных усталостных установках механического типа, благодаря применению электродинамического вибратора. Схема установки изображена на рис. 191.

Испытываемый образец *1* закрепляется в зажимах *2* на жесткой плите *3*. Плита при помощи упругого элемента *4* крепится к неподвижной заделке. С плитой жестко соединен стакан *5* электродинамического вибратора, имеющего следующее устройство. Внутри

корпуса *6*, являющегося одновременно магнитопроводом, помещается обмотка *7*, питаемая постоянным током, создающая магнитное поле в кольцевом воздушном зазоре, в котором помещен стакан *5* и катушка переменного тока *8*. Ток в катушки подается от звукового генератора *9* через мощный усилитель *10*.

При прохождении тока по катушкам в стакане возбуждается переменный ток той же частоты. Взаимодействие переменного тока в стакане с постоянным магнитным полем в зазоре создает знакопеременную силу с частотой, равной частоте переменного тока.

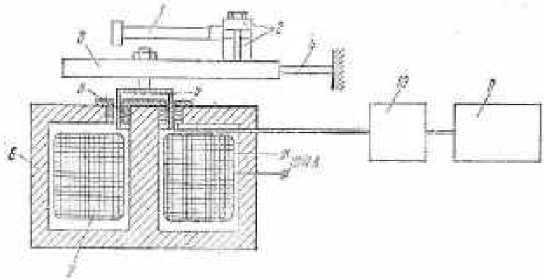


Рис. 191. Схема вибрационной установки: 1 — образец, 2 — зажимы, 3 — жесткая плита, 4 — упругий элемент, 5 — стакан вибратора, 6 — корпус, 7 — обмотка постоянного тока, 8 — катушки переменного тока, 9 — звуковой генератор, 10 — усилитель.

Усилие, которое при этом развивается, зависит от силы тока в катушках и напряженности магнитного поля. Катушки укреплены неподвижно, а стакан имеет возможность упругого смещения вместе с плитой. Поэтому плита вместе с закрепленным на ней образцом приходит в состояние колебаний. При совпадении частоты тока с частотой собственных колебаний образца амплитуда колебаний образца достигает максимума.

На этом режиме резонанса и производится испытание, продолжающееся до поломки образца. В процессе развития усталостной трещины частота собственных колебаний образца изменяется, и частоту тока приходится соответственно изменять. Измерение и контроль напряжений в рабочем сечении образца производится путем измерения амплитуды колебаний свободного конца образца с помощью специальной аппаратуры.

Установка, разработанная в Институте машиноведения АН СССР, показана на рис. 192. На рисунке обозначено: *1* — вибратор, *2* — стакан, *3* — плита, *4* — образец, *5* — зажимы. Испытуемые

образцы могут иметь высоту сечения или диаметр до 40 мм. Наибольшее номинальное напряжение в образце ±25 кГ/мм². Приложением через упругую связь к концу образца постоянной силы можно

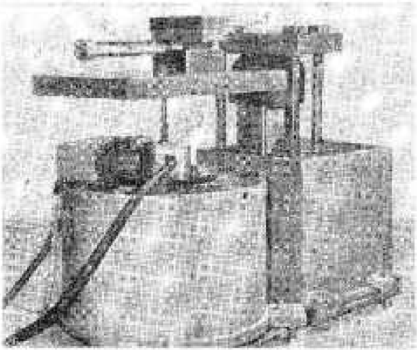


Рис. 192. Вибрационная усталостная установка: 1 — вибратор, 2 — станина, 3 — плита, 4 — образец, 5 — катушки.

создать асимметричный цикл нагружения. Частота колебаний 200—600 гц. Катушки переменного тока питаются от звукового генератора через усилитель типа ТУ-5. Это позволяет проводить испытания в диапазоне частот от 50 до 10000 герц.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Афанасьев, В. А. Марьин, Н. Г. Калинин. Основы строительной механики, Оборонгиз, 1951.
2. А. М. Афанасьев. Расчет замкнутых оболочек на изгиб и кручение, Изд. ВВИА им. Жуковского, 1952.
3. Н. М. Беляев. Лабораторные работы по сопротивлению материалов, Гостехиздат, 1956.
4. В. З. Власов. Тонкостенные упругие стержни, Стройиздат, 1940.
5. А. С. Вольмир. Устойчивость деформируемых систем, «Наука», 1967.
6. С. П. Гончаров, В. Э. Кинцевич, А. Н. Маргулис, Л. Г. Черновский. Измерение напряжений и усилий, Машгиз, 1955.
7. Л. И. Мандельштам и др. Новые исследования нелинейных колебаний, Гос. изд. по вопросам радио, 1936.
8. В. А. Марьин. Приближенный расчет коротких открытых цилиндрических оболочек, Сб. «Расчет пространственных конструкций», вып. I, Машстройиздат, 1950.
9. В. А. Марьин. Руководство к лабораторным работам по сопротивлению материалов, Изд. ВВИА им. Жуковского, 1950.
10. В. В. Новицкий и Е. П. Азарова. Исследование изгиба пластинок методом муара, Сб. «Расчет пространственных конструкций», вып. IX, Стройиздат, 1964.
11. И. А. Одинг. Современные методы испытания металлов, Металлургиздат, 1944.
12. Н. И. Пригоровский, А. К. Прейс, М. С. Акутин и В. С. Грачева. Модели из эпоксидной смолы ЭД-6 в поляризационно-оптическом методе исследования напряжений, Заводская лаборатория, 1967, № 4.
13. Ф. Е. Темников и Р. Р. Харченко. Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1948.
14. В. И. Феодосьев. Сопротивление материалов, «Наука», 1974.
15. Я. Б. Фридман. Механические свойства металлов, Оборонгиз, 1946.
16. Н. А. Шапошников. Механические испытания металлов, Машгиз, 1951.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адаптер пьезоэлектрический 178
— электродинамический 174
Амплитуда цикла 37
Анализатор 131
Аппаратура типа 8-АНЧ-7М для измерения статических и динамических деформаций 104

База датчика электротензометра 155
— установочных делений 41
— тензометра 38
[illegible] 155, 156
[illegible] 163
Бринелля метод 40

Вибратор 174
Возбуждение параметрическое 114
Выносливость 39

Гистерезис 12

Датчик электротензометра 155
— — активный 156
— — компенсационный 155
Декремент затухания при ударе 108
[illegible] 106
Деформация остаточная 12
— пластическая 12
— упругая 12, 16
Диаграмма кручения 69
— растяжения 10
— сжатия 23, 26
— усталости 40, 41, 42
Длина образца расчетная 7

Жесткость крутильная 128

Закон [illegible] 131
— Гука 16, 79

Изгиб косой 97
— пластический 276
— продольный 274
— [illegible] 278
Измеритель деформаций электронный 105
[illegible] 120
[illegible] 103
[illegible] 103
Индикатор для [illegible] измерений 13

[illegible] 165
— передвижной 165
— стрелочный 166
— [illegible] 162
Испытания на выносливость длительные 40
— — — ускоренные 42

[illegible] 56
Колебания собственные 113
Копер маятниковый для ударной пробы надрезанных образцов 263
Коэффициент асимметрии цикла 37
— динамичности при ударе 108
— затухания при ударе 109
— концентрации напряжений 85, 111
— полноты диаграммы 12
— поперечной деформации (коэффициент Пуассона) 38
Крест полярископа 133
Кривая Вёлера 40, 41, 42
— ползучести 60
— усталости 40, 41, 42
Кручение стержней 103

Линии сдвигов Чернова — Людерса 10

Машина ГЗИП Р-5 силой до 5 Т 17
— [illegible] 108
— испытательная 30-тонная с нагружением до 1500° 260
— на кручение до 30 кГм 213
— — — до 600 кГм 236
— разрывная ИМ-12А 200
— — силой до 30 Т 198
— — — до 1,5 Т 242
— универсальная силой до 10 Т 215
— — — до 30 Т для длинных образцов 217
— — — до 50 Т 220
— — — до 30 Т с пульсатором на 10 Т двойного действия 253
— — 30-тонная для испытаний при сложном нагружении 249
— — WP26 силой до 5 Т 207
— — WPM силой до 10 Т с [illegible] и нагревательным устройством 255
— — УМЭ силой до 100 Т с пульсатором 257
Метод оптический фотоупругости 130
— [illegible] 132
— полос 135
Микрометр 131
Микротвердость 00, 36, 245
Модели [illegible] 277

Модуль сдвига 68, 73
— упругости 16, 27
— — второго рода 68

Напряжения истинные 11
— при разрыве 7
Напряжения главные при изгибе 88, 89

Образец нормальный 7
Осциллограф 178
— вибраторный 178
— магнитоэлектрический ОТ-24-51 180
— МПО-2 178
— электронный 182
— — типа ЭО-6М 186

Планиметр 181
Ползучесть 60
Полнота диаграммы 13
Поляризатор 131
Полярископ 131
— зеркальный 137
Предел выносливости 39
— ползучести 61
— пропорциональности 10, 22
— прочности 12
— текучести 12
— — условный 23
Пресс Амслера силой до 300 Т 78
— [illegible] 237
— [illegible] 8
Прибор для определения микротвердости 245
— — твердости алмазной пирамидой 241
— — — — по Роквеллу 230
— — — — маятниковый 234
— Шора 225
[illegible] 123
Прочность при переменных напряжениях 36

Работа, затраченная на разрыв образца 11
—, — —, —, удельная 12
Растяжение 7
— [illegible] 63
[illegible] 8
[illegible] 116
Роквелла метод определения твердости 51

Сжатие 20
[illegible] 81
Сопротивление временное 11, 21
[illegible] 31
Сужение в шейке 7
— — — относительное 12

Твердость 45
— по Бринеллю 46, 227
— — Роквеллу 53, 229
Твердость по Шору 55, 225
—, определяемая алмазной пирамидой 47, 241
— — — царапанием 57, 234
Текучесть 10
— [illegible] 45
Тензометр [illegible] 158
— Гуггенбергера 32
— [illegible] 13
— [illegible] 170
— рычажный 169
— электросопротивления 151
[illegible] 277
Термометр 71, 109
— зеркальный 163
— — с [illegible] шкалой 164
— [illegible] 71

Угол закручивания 68
Удлинение относительное 12
— при разрыве 7
Упрочнение 11
Усталость 34
Установка [illegible] 282
— для испытаний на [illegible] 270
— — — — — [illegible] 273
— — — — продольный изгиб 274
— — — — сложное [illegible] 271
— [illegible] КМ-60 для испытаний на кручение 70

Формула Эйлера для критической силы 122
— Ясинского для критического напряжения 123
Фотоупругость 130

Цена деления шкал [illegible] 160
— полосы материала 134
— — [illegible] 135
— — приведенная 134
Центр жесткости 281
— изгиба 87, 281
— кручения 90
— [illegible] 91
— [illegible] 86
Цикл 36
— асимметричный 37
— [illegible] 37
— пульсационный 37
— симметричный 37

Число циклов 40, 43
Число микротвердости 55
Чувствительность [illegible] датчика электротензометра 156

Шора метод определения твердости 55
Штангенциркуль 103

Электротензометр 155
Эпюра удлинений 13
Эффект [illegible] 131

Александр Николаевич Афанасьев
Владимир Александрович Марьин
Лабораторный практикум по сопротивлению материалов

М., 1975, 288 стр. с илл.

Редактор *А. Г. [illegible]*

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректор *Л. Н. [illegible]*

Сдано в набор 8/V 1974 г. Подписано к печати [illegible] 1975 г. Бумага 60×90[illegible], тип. № 3. Физ. печ. л. 18. Усл. печ. л. 18. Уч.-изд. л. 17,01. Тираж 40 000 экз. Т-[illegible]. Цена книги 75 коп. Заказ № [illegible].

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.