

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ
КУРГАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к выполнению лабораторных
работ по спецкурсу для студентов направлений
551400 (15.02; 15.05; 15.06); 552900 (12.01;
12.02); 551800 (12.05)
Часть II

Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

Спецкурс "Механические испытания материалов"

Составили: С. Г. Костенко - доц., канд. техн. наук (работа 30),
В. И. Макаров - доц., канд. техн. наук (работа 31),
С. Г. Тютрин - асс., канд. техн. наук (работа 29).

Утверждено на заседании кафедры

Рекомендовано методическим советом института

24 мая 1994 г.

РАБОТА 29

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЕМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

Часть I. Исследование напряжений при помощи датчиков омического сопротивления

Цель работы: Ознакомиться с электрическим методом измерения деформаций и технологией применения датчиков омического сопротивления, выполнить тарировочные испытания.

Для замера малых деформаций используются специальные приборы, называемые тензомерами. Существуют различные типы тензомеров - рычажные, оптические, гидравлические, пневматические и др. Широкое распространение получили электрические тензомеры.

Электрический метод измерения деформаций имеет ряд преимуществ перед остальными методами: высокую точность, высокую чувствительность, т.е. способность улавливать незначительные деформации; возможность использования при динамических испытаниях.

Основной частью электротензомера является проволочный, фольговый или полупроводниковый датчик омического сопротивления - прибор, воспринимающий деформацию (рис. 29.1).

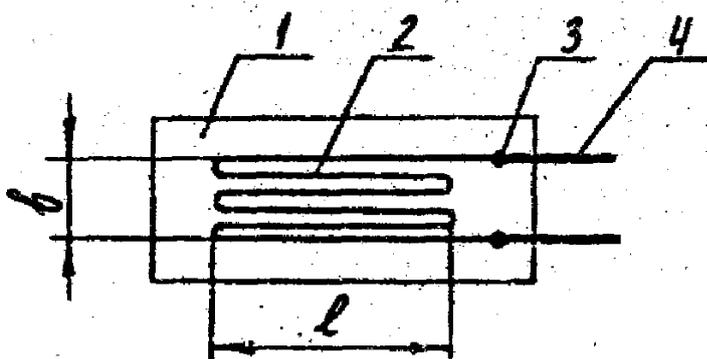


Рис. 29.1 Проволочный датчик омического сопротивления

Проволочный датчик изготавливается из тонкой константановой (сплав меди с никелем), нихромовой (сплав никеля, железа и хрома) и др. проволоки высокого электросопротивления диаметром 0,002... 0,03 мм в виде петель 2, вклеенных между двумя полосками тонкой

бумаги I, служащей изоляцией для датчика (рис. 29.1). К концам проволоки 3 припаиваются два вывода из медной проволоки 4 для соединения датчика с измерительной схемой. Длина петли ℓ называется базой датчика.

Фольговые датчики изготавливаются из фольги путем травления. В полупроводниковых - в качестве чувствительного элемента используют монокристаллический полупроводник из кремния, германия и др. В качестве основы (и изоляции) используются также бакелитовый лак, клей БФ-2 и В-58, цементы Б-56 и ВН-12.

Обычно применяются датчики с базой 5, 10, 20 мм и сопротивлением $R = 50 \dots 500$ Ом. Датчик наклеивается на поверхность испытуемой детали, при этом деформация последней вызывает такую же деформацию датчика. Обычные датчики вполне удовлетворительно работают при деформациях до $1 \dots 1,5$ %. При больших деформациях возможно появление разрывов в клее и нарушение линейной зависимости между изменением деформации датчика и испытуемой детали.

Электрическое сопротивление датчика можно представить в следующем виде:

$$R = m \cdot \rho \cdot \frac{\ell}{F}, \quad (29.1)$$

где ρ - удельное сопротивление материала проволоки;

ℓ - длина витка, база датчика;

m - количество витков;

F - площадь поперечного сечения проволоки.

Метод электротензометрирования основан на том, что датчик, работая как одно целое с поверхностью детали, получает удлинения или укорочения, равные соответствующим деформациям детали в месте его наклейки. При растяжении его длина увеличивается на $\Delta \ell$, а диаметр проволоки уменьшается на Δd , так что новая длина витка $\ell_1 = \ell + \Delta \ell$, а площадь сечения $F_1 = \pi (d - \Delta d)^2 / 4$. Вследствие изменения размеров проволоки её электрическое сопротивление изменится на величину ΔR , т.е. деформация детали вызовет изменение электрического сопротивления датчика, которое будет равно

$$R_1 = R + \Delta R. \quad (29.2)$$

Таким образом, датчик преобразует изменение линейной деформации в изменение электрического сопротивления.

Найдем зависимость между относительной продольной деформацией $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ и относительным изменением электрического сопротивления.

При упругих деформациях

$$\frac{\Delta d}{d} = \epsilon' = \mu \epsilon, \quad (29.3)$$

где ϵ' — относительная поперечная деформация;

μ — коэффициент Пуассона.

Полагая, что удельное сопротивление материала датчика при деформации не меняется, найдем

$$\frac{R_1}{R} = \frac{\rho l_1 F}{F_1 \rho l} = \frac{l_1}{l} \cdot \frac{F}{F_1}, \quad (29.4)$$

или

$$\frac{R + \Delta R}{R} = \frac{l + \Delta l}{l} \frac{\pi d^2 \cdot 4}{4\pi (d - \Delta d)^2} = \frac{l + \Delta l}{l} \frac{d^2}{(d - \Delta d)^2} = (1 + \epsilon) \frac{1}{1 - 2\epsilon' + (\epsilon')^2}. \quad (29.5)$$

Пренебрегая величиной высшего порядка малости, имеем

$$\frac{R + \Delta R}{R} = \frac{1 + \epsilon}{1 - 2\epsilon'}, \quad (29.6)$$

откуда

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1 + \epsilon}{1 - 2\epsilon'} - 1 = \frac{1 + \epsilon - 1 + 2\epsilon'}{1 - 2\epsilon'} = \frac{\epsilon(1 + 2\mu)}{1 - 2\epsilon'}. \quad (29.7)$$

Поскольку $1 \gg 2\epsilon'$, получим

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon(1 + 2\mu) \quad (29.8)$$

или

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon \cdot \gamma, \quad (29.9)$$

где $\gamma = 1 + 2\mu$.

Из полученных формул следует, что относительное изменение электрического сопротивления датчика прямо пропорционально его относительному удлинению.

Величина γ называется тензочувствительностью датчика, она указывается заводом-изготовителем и обычно находится в пределах от 1,5 до 3,5. Для константановой проволоки $\gamma = 2$.

Оценим величину изменения электрического сопротивления датчика с коэффициентом тензочувствительности $\gamma = 2$ и сопротивлением $R = 100$ Ом, наклеенного на стальную деталь с модулем продольной упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, под действием растягивающего напряжения $\sigma = 100$ МПа:

$$\Delta R = R \epsilon \gamma = R \frac{\sigma}{E} \gamma = 100 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^{11}} \cdot 2 = 0,1 \text{ Ом} \quad (29.10)$$

Таким образом, при работе с датчиками необходимо замерять весьма малые изменения электрического сопротивления.

Обеспечение необходимой точности замеров требует применения специальной аппаратуры, называемой тензостанцией. Одна из наиболее чувствительных схем измерения сопротивления проводников, часто используемая в тензостанциях, — мостик Уитсона (рис. 29.2).

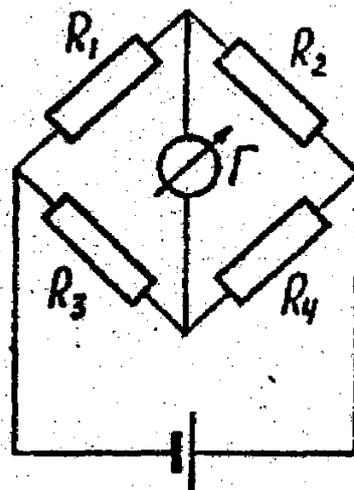


Рис. 29.2 Мостик Уитсона

Мостик состоит из четырех плеч — сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 , соединенных между собой в четырехугольник. В одну из диагоналей схемы включен источник постоянного тока, в другую — гальванометр Г. Величина тока в измерительной диагонали моста находится по формуле:

$$I_r = I \cdot \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_r (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_3 + R_4)(R_1 + R_2)} \quad (29.11)$$

где I — ток в диагонали питания;

R_r — внутреннее сопротивление гальванометра.

В качестве сопротивлений R_1 и R_2 в мост включены датчики (рис. 29.3). Датчик с сопротивлением R_2 наклеен на исследуемую

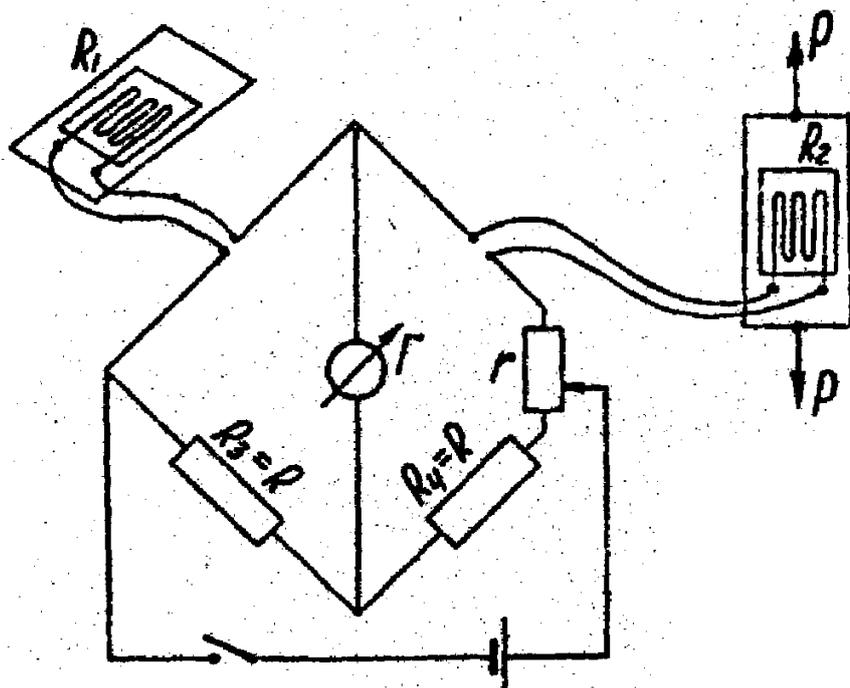


Рис. 29.3 Схема включения датчиков в мостик Уитсона

деталь и деформируется вместе с ней. Он называется рабочим датчиком. Но его сопротивление меняется не только вследствие деформации детали, но и при изменении температуры (вследствие неодинаковых температурных деформаций материалов детали и датчика).

Для того, чтобы исключить влияние температурной деформации на результаты опыта, во второе плечо моста включается однотипный датчик с сопротивлением R_1 (обычно $R_1 = R_2$), который наклеен на вспомогательную пластинку из того же материала, что и исследуемая деталь, но не подвергается деформации. Деталь и пластинка вместе с наклеенными на них датчиками находятся в одинаковых температурных условиях, и, в случае изменения температуры, сопротивления R_1 и R_2 изменяются на одинаковую величину. Датчик R_1 называется ком-

пенсационным.

В качестве сопротивлений R_3 и R_4 может быть использована пара стабильных и одинаковых по величине сопротивлений R . Переменное сопротивление Γ применяется как корректирующее в случае отсутствия полного равенства плеч.

Определение деформаций может производиться двумя методами — методом непосредственного отсчета и нулевым.

По методу непосредственного отсчета деформация определяется как величина, пропорциональная показанию гальванометра. Этот метод чаще всего используется при замере и записи динамических процессов. При динамическом тензометрировании гальванометр заменяется регистрирующей аппаратурой — шлейфным или катодным осциллографом с усилителем (ввиду малой мощности снимаемых с датчиков сигналов).

Нулевой метод применяется при статических испытаниях. Перед нагружением мост должен быть уравновешен, или сбалансирован, т. е.

$I_{\Gamma} = 0$. Для этого изменяют переменное сопротивление Γ (перемещая контакт реохорда) до тех пор, пока стрелка гальванометра не покажет на нуль. После приложения нагрузки на деталь с датчиком R_2 вновь тем же порядком уравновешивают мост. Реохорд снабжен проградуированной шкалой, показания которой и позволяют, после тарировочных испытаний, установить величину возникающих в детали деформаций.

При исследовании напряженного состояния элементов сложной конструкции возникает необходимость определить величину и направление главных напряжений. С этой целью применяют многоэлементные тензорезисторы, так называемые розетки (рис. 29.4), которые образованы из трех линейных тензочувствительных элементов на одной общей основе, ориентированных под углом 45° по отношению друг к другу. По трем замеренным деформациям определяются главные деформации и угол положения главных осей.

В зависимости от назначения применяются и другие типы розеток, состоящие из двух и более датчиков омического сопротивления.

Успех тензометрирования во многом определяется тем, насколько правильно подобран клей и соблюдена технология склеивания.

Основными клеями для склеивания металлов между собой и с неметаллическими материалами являются эпоксидные, полиуретановые, модифицированные фенолоформальдегидные, полисилоксановые, акриловые, полиароматические и некоторые другие клеи /3/.

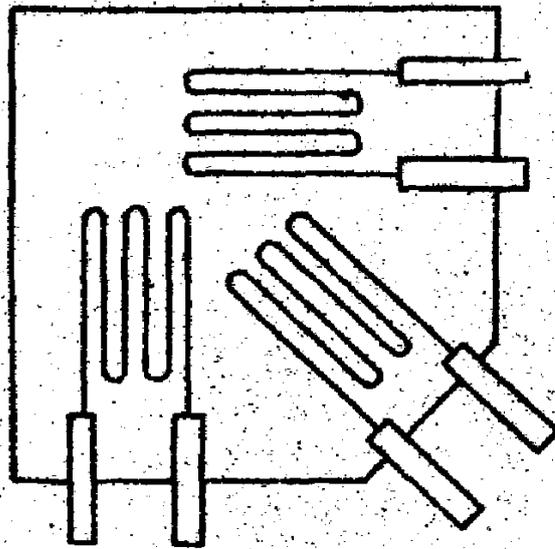


Рис. 29.4 Многоэлементный тензорезистор (розетка)

Практически универсальными для указанных целей (за исключением приклеивания к металлам бумаги и некоторых других материалов) являются эпоксидные и полиуретановые клеи, способные отверждаться как при комнатной, так и при повышенных температурах. Нагревание при отверждении во всех случаях способствует получению более прочного клеевого соединения и ускоряет процесс. Большинство клеев этой группы имеет максимальную рабочую температуру 60–80°C; отдельные клеи термостойки до 150° (ВК-1М) и до 300°C (К-300-61 и др.).

Клеями с высокими прочностными характеристиками соединений, с хорошей стойкостью к атмосферным воздействиям и старению являются модифицированные фенолоформальдегидные композиции (ВК-3, ВК-32-200, ВК-13 и др.). Технологически удобны пленочные варианты этих клеев; термостойкость соединений достигает 150–200°C.

Полисилоксановые клеи имеют очень высокую термостойкость (до 1000°C и выше), но клеевые соединения имеют невысокие эластические характеристики.

Полиароматические клеи отличаются хорошей термостойкостью (до 300°C), требуют при отверждении высоких температур.

Относящиеся к группе акриловых клеев, например, "Циакрин", обладают исключительно высокой скоростью отверждения при комнатной температуре (0,5...27 час). Термостойкость большинства этих клеев 60–80°C.

Большинство синтетических клеев являются горючими и токсичными.

ными, при их применении требуется соблюдать специальные меры техники безопасности.

Рекомендуемые для каждого конкретного клея методы подготовки склеиваемой поверхности указаны в справочниках /3/, однако почти во всех случаях её необходимо тщательно очищать от ржавчины, жировых и масляных пятен и других загрязнений.

В современной технике эксперимента датчики сопротивления используются не только для замера деформаций. Во многих устройствах они вводятся как чувствительные элементы, реагирующие на изменение нагрузок, скоростей, ускорений, давлений, колебаний и т. п. Для этого датчики сопротивления наклеиваются на деформируемый упругий элемент (стержень, вал, балку), и по изменению сопротивления датчика судят о величине внешнего воздействия. Такой способ удобен тем, что позволяет весьма просто осуществить дистанционный замер, без введения дополнительных сложных устройств.

Порядок выполнения работы

1. Измерить размеры поперечного сечения детали.
2. Установить деталь на испытательную машину, замерить (при помощи прибора ВСТ-3) показания датчика при разных уровнях нагрузки.
3. Построить по экспериментальным данным тарировочную зависимость между показанием датчика и напряжением $R \sim \sigma$.
4. Определить тарировочный коэффициент $K = \frac{\Delta G}{\Delta R}$.
5. Составить отчет о работе, в котором указать:
 - наименование и цель работы;
 - схему нагружения и положение тензорезисторов на образце;
 - размеры поперечного сечения детали и параметры тензорезисторов;
 - результаты опыта (тарировочная зависимость, тарировочный коэффициент);
 - выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется тензомером?
2. Какие типы тензомеров существуют?
3. Из чего состоит электрический тензомер?
4. Как устроен проволочный датчик омического сопротивления?
5. Что называется базой датчика?
6. В чем отличие фольговых и полупроводниковых тензодатчиков?

7. Какие существуют ограничения по применению тензодатчиков?
8. Какие существуют методы измерения деформаций при электро-тензометрировании?
9. На чем основан принцип работы датчика омического сопротивления?
10. Что называется тензочувствительностью датчика?
11. Чем определяется величина тензочувствительности датчика?
12. Для чего предназначена тензостанция?
13. Что такое мостик Уитсона?
14. Что называют плечом в мостике Уитсона?
15. Для чего нужен компенсационный датчик?
16. Почему нулевой метод не может быть применен при замерах динамических процессов?
17. В каком случае мостик Уитсона будет уравновешен (сбалансирован)?
18. Что в электротензометрии называют розеткой? Для чего она предназначена?
19. Для чего необходим клей при электротензометрировании? По каким критериям должен производиться выбор клея?
20. В чем заключается подготовка склеиваемой поверхности?
21. На чем основан принцип применения тензодатчиков для измерения нагрузок, ускорений, колебаний и других физических величин?

Часть II. Исследование концентрации напряжений при растяжении полосы с отверстием

Цель работы: изучение характера распределения напряжений в растягиваемой полосе, ослабленной круговым отверстием, и определение величины теоретического коэффициента концентрации напряжений.

В области резких изменений в форме детали (уступы, галтели, отверстия, шпоночные канавки, выточки и т. п.), а также в зоне контакта деталей возникает значительное увеличение напряжений. Этот эффект получил название концентрации напряжений.

При этом зона повышенных напряжений ограничена небольшой областью около очага концентрации напряжений (концентратора), т. е. носит местный характер. Поэтому напряжения у мест концентрации называют местными.

Степень концентрации напряжений характеризуется теоретичес-

ким коэффициентом концентрации напряжений α , величина которого разна

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (29.12)$$

где σ_{\max} - наибольшее местное напряжение;

$\sigma_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение, определяемое по формулам сопротивления материалов.

Величина теоретического коэффициента концентрации напряжений зависит от вида концентрации, способа нагружения детали и в отдельных случаях доходит до $\alpha = 10 \dots 11$ /4/. Такое существенное отклонение величин действующих напряжений от номинальных происходит вследствие того, что в местах концентрации напряжений не выполняется принятая в сопротивлении материалов гипотеза о неискривляемости плоских поперечных сечений.

Так, при растяжении полосы с отверстием (рис. 29.5) вблизи отверстия нарушается закон равномерного распределения напряжений.

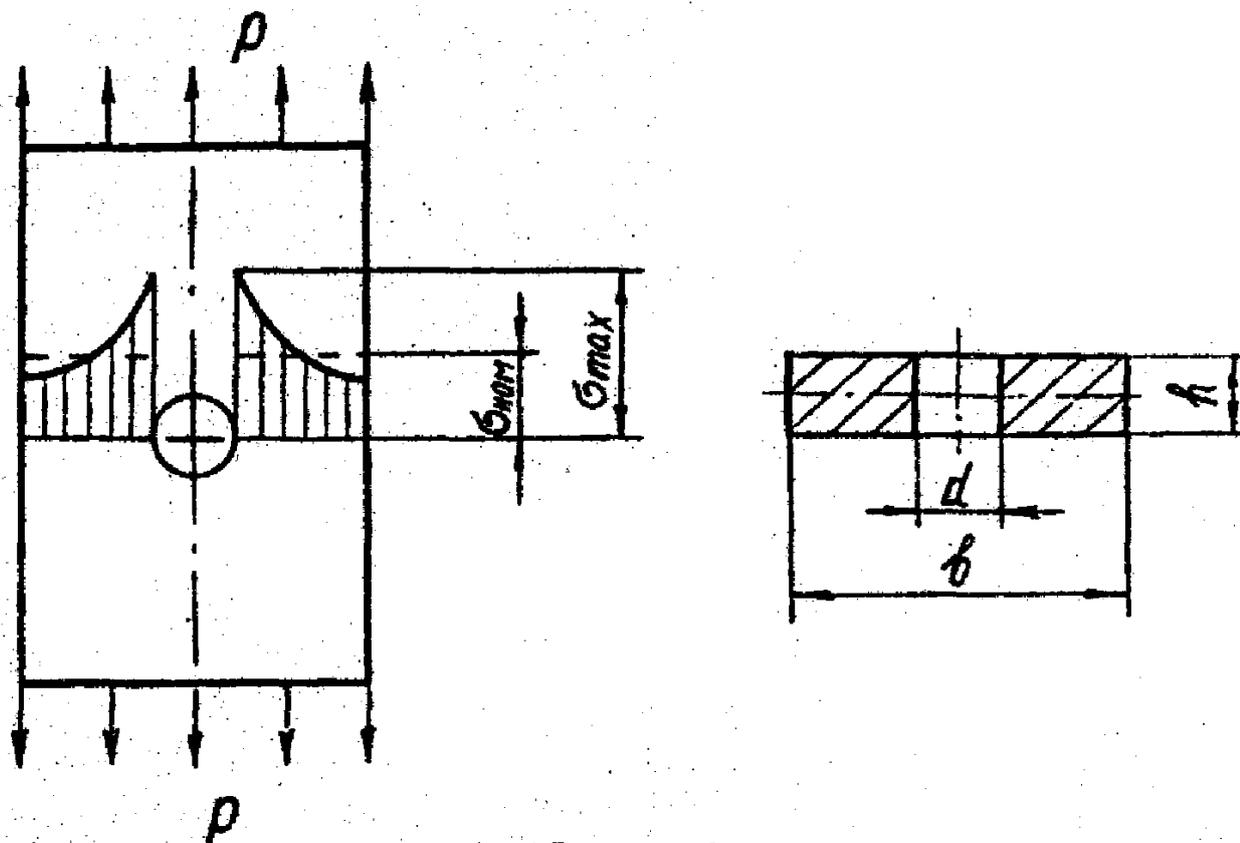


Рис. 29.5

Напряженное состояние становится двухосным, а у края отверстия появляется пик осевого напряжения.

Номинальное напряжение

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{N}{F_{\text{min}}}, \quad (29.13)$$

где N - продольная сила в ослабленном сечении ($N=P$);
 F_{min} - площадь ослабленного поперечного сечения.

Или

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{P}{(b-d)h}, \quad (29.14)$$

где b - ширина полосы;
 h - толщина полосы;
 d - диаметр отверстия.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений для случая растяжения полосы с отверстием определен Р.Е. Петерсоном [4] и представлен в виде графика (рис. 29.6).

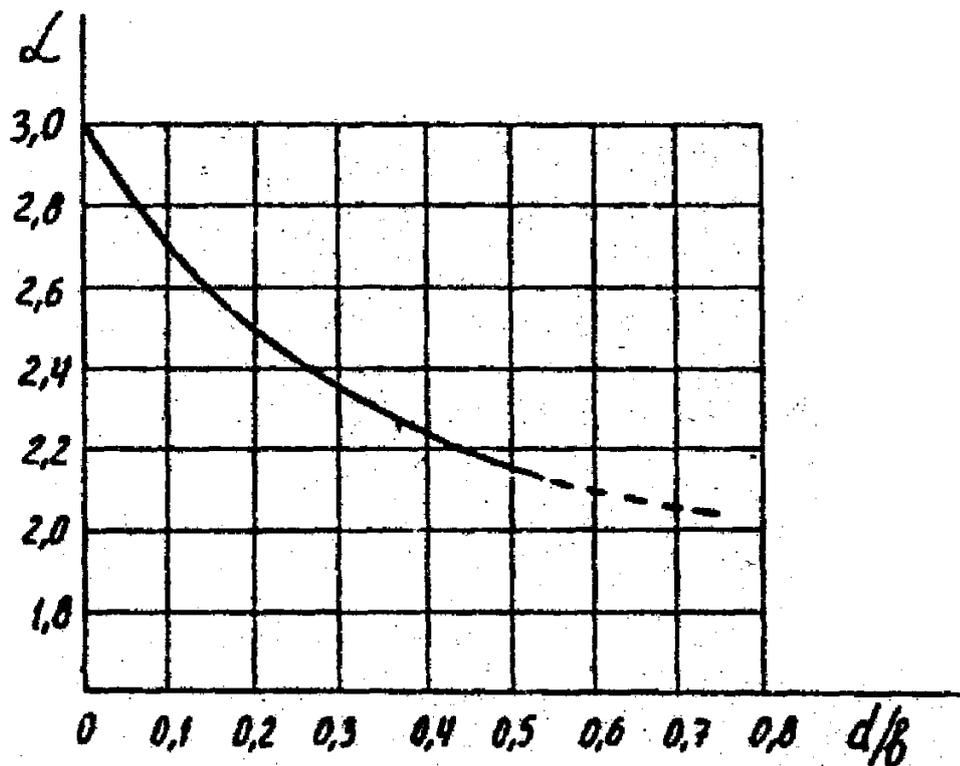


Рис. 29.6

Свойства материала не оказывает влияния на величину теоретического коэффициента концентрации напряжений, а вот влияние концентрации напряжений на прочность различных материалов различно. Так хрупкие материалы более чувствительны к местным напряжениям,

чем пластичные.

Наличие площадки текучести у пластичных материалов оказывает выравнивающее воздействие на распределение напряжений в зоне концентратора вследствие того, что максимальные напряжения, достигнув предела текучести, остаются на протяжении зоны текучести практически неизменными по величине. Происходящие за это время деформации остальных точек поперечного сечения приводят к тому, что напряжения во всем сечении становятся практически одинаковыми по величине, близкими к пределу текучести. Такой характер распределения напряжений сохраняется и после выхода из зоны текучести. В результате условный предел прочности и истинное разрушающее напряжение пластичных материалов почти не зависят от наличия концентратора напряжений.

Экспериментальное определение напряжений в данной работе проводится на универсальной испытательной машине УМ-5. При этом используется стальная полоса шириной 49 мм, толщиной 7,6 мм с отверстием $d = 10$ мм. Измерение напряжений производится с помощью датчиков омического сопротивления (база датчиков 10 мм, номинальное сопротивление $R = 200,1 \pm 0,3$ Ом, тензочувствительность - $\gamma = 2,13$) и прибора ВСТ-3, имеющего 40 каналов измерения.

Схема расположения датчиков представлена на рис. 29.7. Данные датчиков 1...6 характеризуют распределение нормальных напряжений в сечении I-I, ослабленном отверстием. Тензорезисторы 7 и 8 расположены вдали от зон концентрации напряжений и используются для тарировки прибора ВСТ-3.

Компенсационные датчики наклеены на стальных пластинках, расположенных вблизи рабочих датчиков, но не подвергаемых нагружению, и служат для устранения влияния изменения температуры датчиков на их показания (на рис. не показаны).

Измерения проводятся по полумостовой схеме: каждая пара рабочего и компенсационного тензорезисторов составляет лишь половину мостика Уитсона, другая половина дополнена непосредственно в измерительном приборе парой стабильных и одинаковых по величине сопротивлений. При этом для измерения показаний датчиков № 1...8 задействованы соответственно каналы № 31...38 прибора.

Порядок выполнения работы

I. Используя формулу сопротивления материалов $\sigma = N/F$, вычислить нормальные напряжения для ступени нагрузки $\Delta P = 1000$ кг

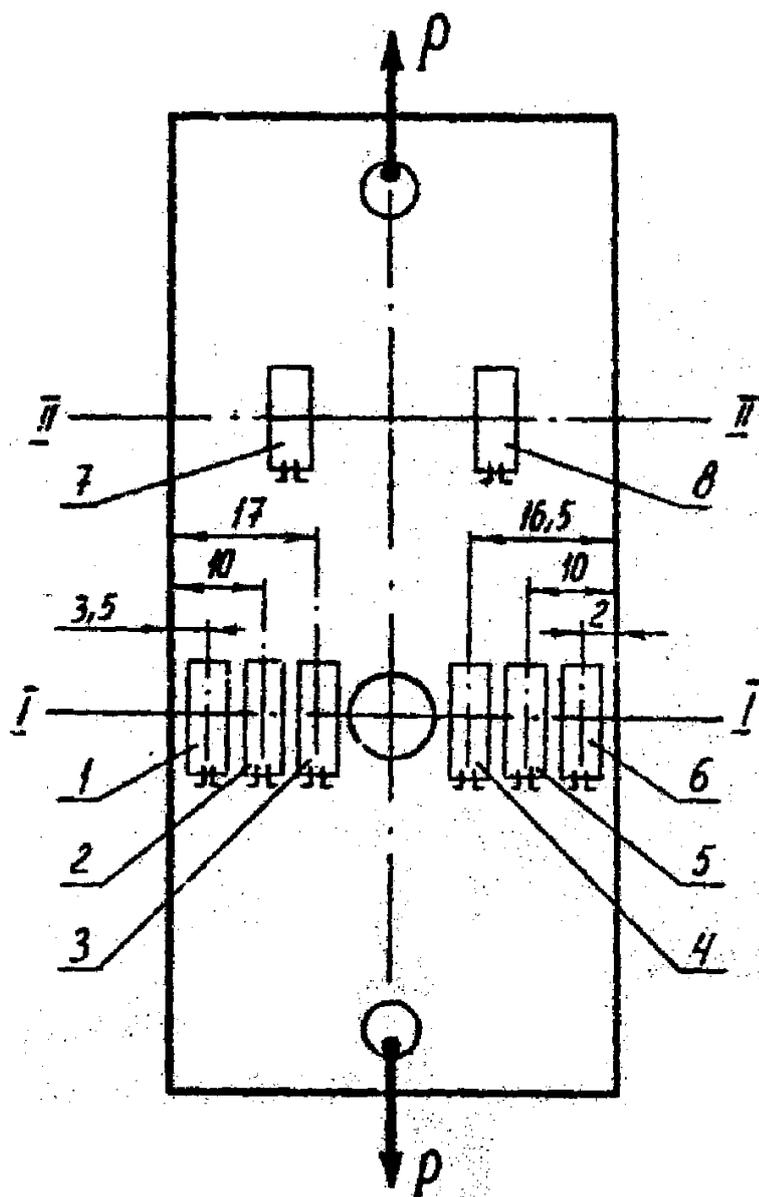


Рис. 29.7

(10^4H) в сечениях I-I и II-II полосы (σ_I и σ_{II}).

2. По известным размерам испытуемой полосы, используя график (рис. 29.6), определить расчетный теоретический коэффициент концентрации напряжений α .

3. Нагрузить полосу предварительной нагрузкой $P = 400 \text{ кг}$ ($4 \cdot 10^3 \text{H}$).

4. Используя прибор ВСТ-3, произвести замер показаний тензодатчиков в следующей последовательности:

- установить канал измерения (31...38);
- по показанию встроенного гальванометра при помощи магазина сопротивлений и реохорда произвести грубую настройку прибора (при этом стрелка гальванометра должна показывать на нуль);

- кратковременно нажимая кнопку "Измерение", при помощи реохорда и зеркального гальванометра произвести точный замер электросопротивления датчика;

- записать показания всех восьми датчиков $R_1 \dots R_8$.

5. Нагружая полосу равными ступенями нагрузки $\Delta P = 1000$ кг, произвести замер показаний тензодатчиков. Число ступеней взять $1 \dots 3$.

6. Определить среднее приращение показаний тензорезисторов, соответствующее ступени нагружения, - $\Delta R_{1cp} \dots \Delta R_{8cp}$.

7. По показаниям датчиков 7 и 8 установить связь между величинами их электросопротивления и действующими напряжениями:

$$K = \frac{G_{II}}{\frac{\Delta R_{7cp} + \Delta R_{8cp}}{2}} \quad (29.15)$$

8. Определить напряжения в местах наклейки тензорезисторов $i = 1 \dots 6$ по формуле

$$G_i = K \cdot \Delta R_{icp} \quad (29.16)$$

9. По экспериментальным данным построить эпюру нормальных напряжений в сечении I-I и определить теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha^{(0)}$.

10. Оценить расхождение данных теории и эксперимента:

$$\delta = \frac{\alpha - \alpha^{(0)}}{\alpha} \cdot 100\% \quad (29.17)$$

Контрольные вопросы

1. Что называют концентрацией напряжений?
2. Что является причиной концентрации напряжений?
3. Что называют концентратором напряжений?
4. Что такое местные напряжения?
5. Укажите зоны концентрации напряжений на испытываемой детали.
6. Что такое теоретический коэффициент концентрации напряжений? От чего зависит его величина?
7. Почему формулы сопротивления материалов в местах концентрации напряжений "не работают"?

8. В чем заключается гипотеза плоских сечений?

9. Одинаково ли влияние теоретического коэффициента концентрации напряжений на прочность различных материалов? Почему?

10. Как опытным путем определяют напряжения в данной работе?

11. Для чего используются в работе компенсационные датчики?

12. Для чего нужны в работе датчики 7 и 8, расположенные вне зоны концентрации напряжений?

13. Влияют ли геометрические размеры датчика омического сопротивления (его база и ширина) на точность измерения напряжений в местах концентрации?

Отчет о работе

1. Наименование и цель работы.

2. Схема нагружения и расположение датчиков на образце.

3. Геометрические размеры полосы.

4. Расчетные значения теоретического коэффициента концентрации напряжений и нормальных напряжений, соответствующих ступени нагружения, в сечениях I-I и II-II.

5. Данные эксперимента (табл. 29.1)

Таблица 29.1

№	Р:	ΔР:	Показания датчиков, Ом															
			R_1	ΔR_1	R_2	ΔR_2	R_3	ΔR_3	R_4	ΔR_4	R_5	ΔR_5	R_6	ΔR_6	R_7	ΔR_7	R_8	ΔR_8
1																		
2																		
Среднее значение приращен.			$\Delta R_{1cp} =$	$\Delta R_{2cp} =$	$\Delta R_{3cp} =$	$\Delta R_{4cp} =$	$\Delta R_{5cp} =$	$\Delta R_{6cp} =$	$\Delta R_{7cp} =$	$\Delta R_{8cp} =$								

6. Результаты опыта (тарировочный коэффициент К и напряжения на датчиках 1...6, эпюры нормальных напряжений в сечениях I-I и II-II, величина теоретического коэффициента концентрации напряжений).

7. Выводы по работе (оценка погрешности полученных результатов, анализ причин её возникновения, рекомендации и т.п.).

Список литературы

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. - М.: Наука, 1986. -

2. Лабораторные работы по курсу сопротивления материалов. - Красноярск: КИИ, 1974. - 168 с.

3. Испытательная техника: Справочник в 2-х кн./Под ред. В.З. Клева. - М.: Машиностроение, 1982. - Кн. 2. - 560 с.

4. Справочник по клеям. - Л.: Химия, 1980. - 304 с.

5. Савин Г.Н., Тульчий В.И. Справочник по концентрации напряжений. - Киев: Вида школа, 1976. - 412 с.

РАБОТА 30 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы - исследовать процесс растяжения металлического образца до его разрыва и определить механические характеристики прочности, пластичности и статической вязкости.

Основные положения

Для испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84) применяют пропорциональные цилиндрические или плоские образцы (рис. 30.1) диамет-

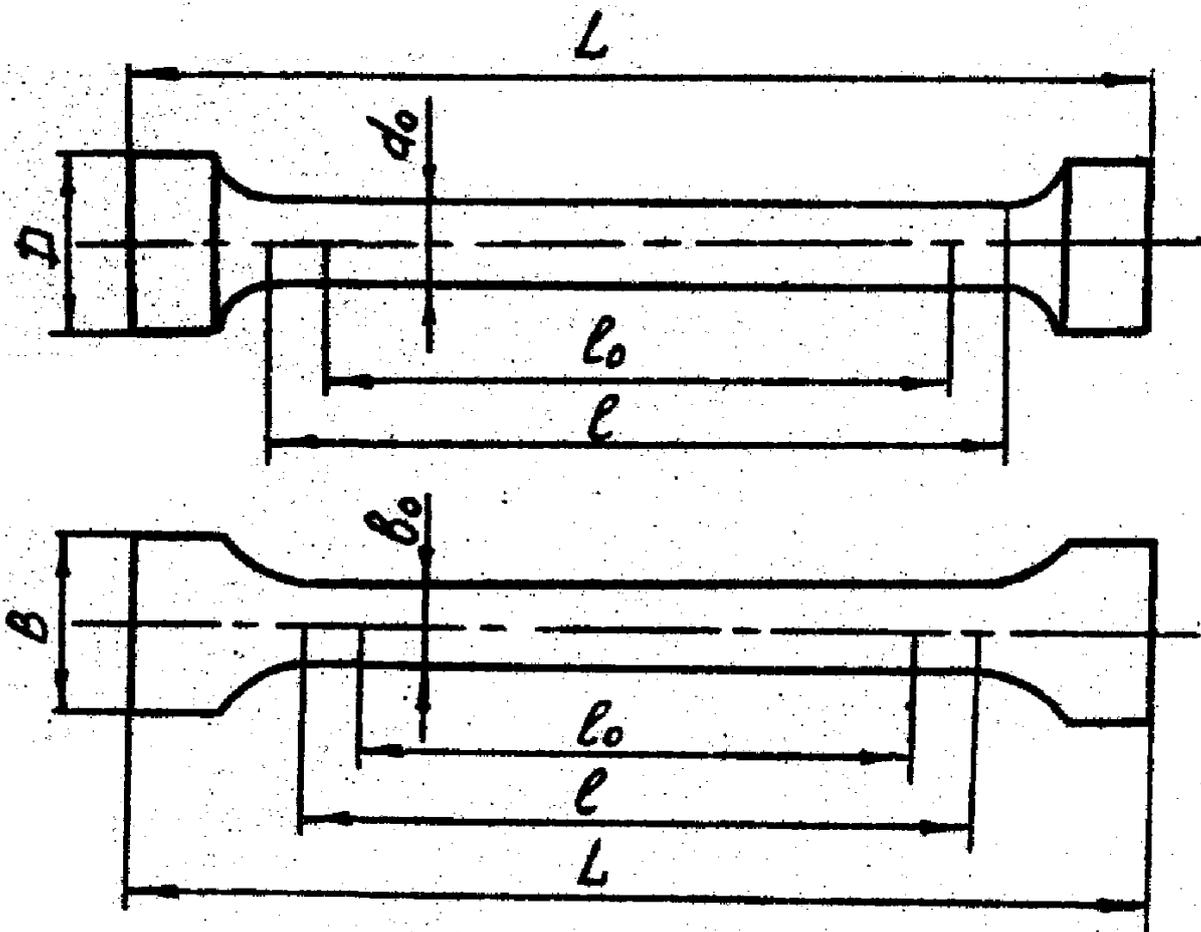


Рис. 30.1

тром или толщиной в рабочей части 3,0 мм и более с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ или $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$, где F_0 - площадь поперечного сечения образца до испытания. Применение коротких образцов предпочтительнее. Рабочая длина должна составлять:

$$l = l_0 + (0,5 \div 2) \cdot d_0 \quad - \text{ для цилиндрических образцов;}$$

$$l = l_0 + (1,5 \div 2,5) \cdot \sqrt{F_0} \quad - \text{ для плоских образцов.}$$

Форма и размеры головок и переходных частей цилиндрических и плоских образцов определяются способом крепления образцов в захватах испытательной машины.

Испытательная машина сообщает образцу принудительное удлинение и регистрирует сопротивление образца, т.е. нагрузку, соответствующую этому удлинению. Результат опыта представляется диаграммой растяжения. На рис. 30.2 показана диаграмма растяжения малоуг-

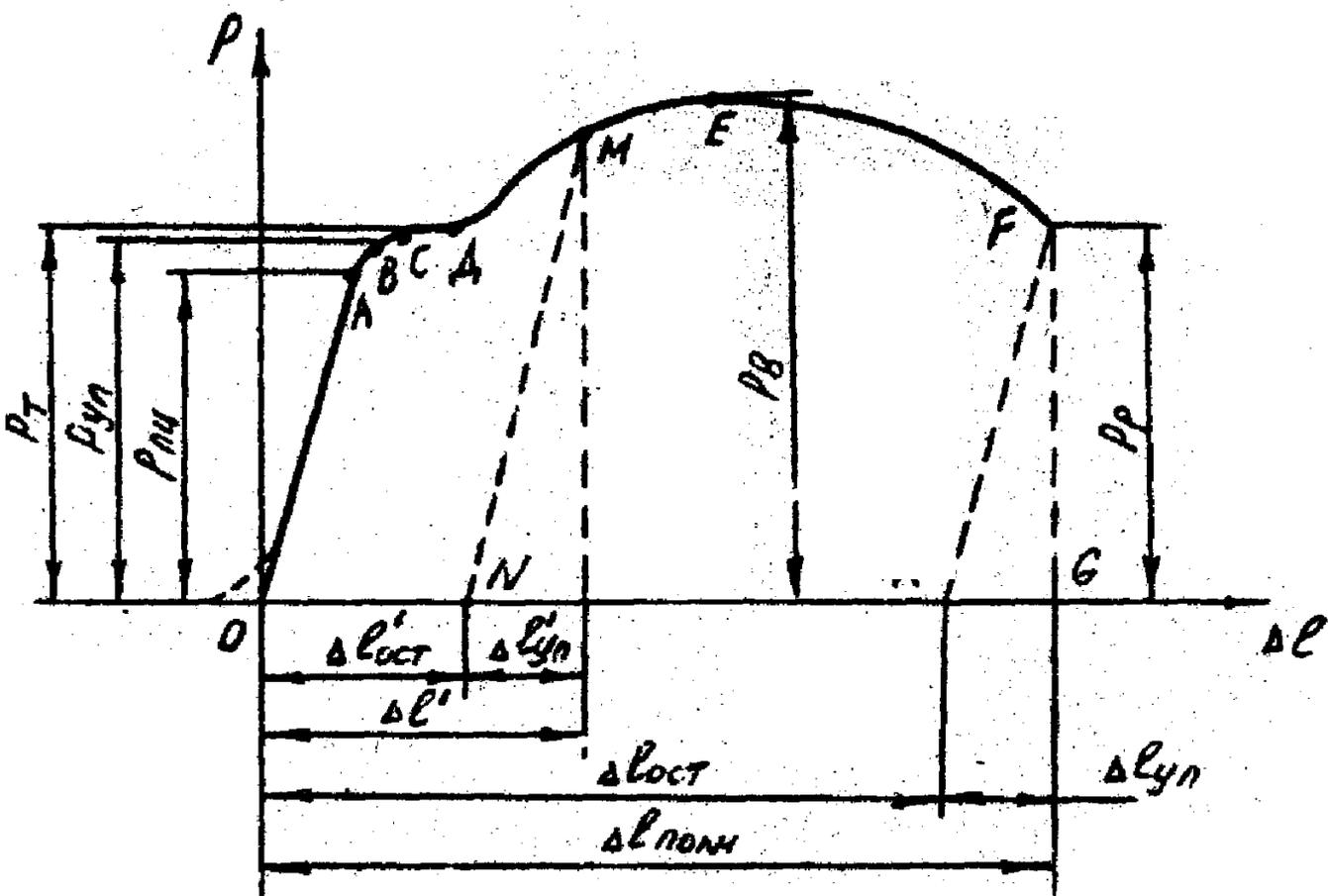


Рис. 30.2

леродистой стали. По оси абсцисс отложено удлинение образца Δl , по оси ординат - нагрузка P . Рассмотрим характерные участки и точки этой диаграммы, а также соответствующие им стадии деформиро-

вания образца.

Небольшой начальный участок диаграммы бывает криволинейным (см. пунктир на рис. 30.2), переходящим затем в прямую линию. Это обусловлено тем, что в начальной стадии растяжения образца происходит обжатие его головок в захватах и выборка зазоров. Чтобы найти начало координат диаграммы, необходимо продолжить прямую линию диаграммы вниз до пересечения её с осью абсцисс (точка O).

От начала нагружения до точки A существует прямо пропорциональная зависимость между удлинением образца и силой. На этой стадии оправедлив закон Гука. Зона OA называется зоной упругости. После точки A кривая растяжения становится криволинейной и плавно поднимается до точки C , где наблюдается переход к горизонтальному участку CD , называемому площадкой текучести. Затем материал вновь приобретает способность увеличивать сопротивление деформации. Участок DE называется зоной упрочнения. После достижения максимальной нагрузки (точка E) на образце образуется "шейка" и дальнейшее растяжение происходит за счет пластической деформации металла в зоне шейки, после чего в точке F наступает разрыв. Кривая EF называется зоной местной текучести.

Таким образом, по диаграмме растяжения могут быть определены следующие основные механические характеристики прочности, пластичности и статической вязкости материала:

1. Предел пропорциональности $\sigma_{пч}$ - наибольшее напряжение, до которого справедлив закон Гука

$$\sigma_{пч} = \frac{P_{пч}}{F_0} \quad (30.1)$$

где $P_{пч}$ - нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности (величина ординаты точки A);

F_0 - начальная площадь поперечного сечения образца до испытания.

2. Предел упругости $\sigma_{уп}$ - наибольшее напряжение, до которого остаточная деформация при разгрузке не обнаруживается

$$\sigma_{уп} = \frac{P_{уп}}{F_0} \quad (30.2)$$

где $P_{уп}$ - нагрузка, соответствующая пределу упругости (величина

ординаты точки В).

Предел упругости является характеристикой, не связанной с законом Гука. Точка В может располагаться как выше, так и ниже точки А. Эти точки, а следовательно и значения напряжений σ_{cy} и σ_{yn} близки друг к другу и обычно различием между ними пренебрегают.

Если при растягивающем усилии, вызывающем напряжения не выше σ_{yn} , прекратить нагружение и разгрузить образец, то процесс разгрузки изобразится линией ОВ, совпадающей с линией нагрузки, и удлинение образца полностью исчезнет. Иначе будет, если к началу разгрузки напряжение в образце превышает предел упругости. Например, произведя разгрузку с точки М (рис. 30.2), процесс разгрузки пойдет по прямой MN , параллельной OA . Удлинение $\Delta l'$ полностью не исчезнет. Полное удлинение образца за пределом упругости определится как

$$\Delta l' = \Delta l'_{ост} + \Delta l'_{yn} \quad (30.3)$$

Если затем вновь нагружать образец, который был растянут силой, вызвавшей в нем напряжение выше предела текучести, то линия повторного нагружения совпадет на диаграмме с линией разгрузки MN . При дальнейшем увеличении силы кривая диаграммы совпадает с кривой MEF .

Таким образом, предварительная вытяжка за предел текучести σ_T изменяет некоторые механические свойства стали - повышается предел пропорциональности и уменьшается остаточное удлинение после разрыва. Изменение свойств материала в результате деформации за пределом текучести называется наклепом.

3. Предел текучести σ_T - наименьшее напряжение, при котором деформация образца происходит при постоянном растягивающем усилии

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \quad (30.4)$$

где P_T - нагрузка, соответствующая пределу текучести (величина ординаты точки С).

При пластической деформации повышается температура образца, у стали изменяются электропроводность и магнитные свойства, на полированной поверхности образцов, особенно плоских, заметно потус-

кнение, являющееся результатом появления густой сетки линий, носящих название линий Чернова (линий Лидерса). Они наклонены к оси образца приблизительно под углом 45° . В результате сдвигов по наклонным плоскостям образец получает остаточные деформации.

Для металлов, не имеющих площадки текучести, предел текучести определяют условно как напряжение, при котором остаточная деформация составляет величину, установленную ГОСТом. По ГОСТ 1497-73 величина остаточной деформации составляет 0,2 % от измеряемой длины образца. В этом случае условный предел текучести определяется как

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \quad (30.5)$$

где $P_{0.2}$ - нагрузка, соответствующая остаточному удлинению 0,2 % от расчетной длины образца l_0 .

Для определения величины нагрузки $P_{0.2}$ на диаграмме растяжения (рис. 30.3) по оси абсцисс откладывают величину $\Delta l_{0.2}$ в масштабе удлинений (отрезок OL) и из точки L проводят прямую

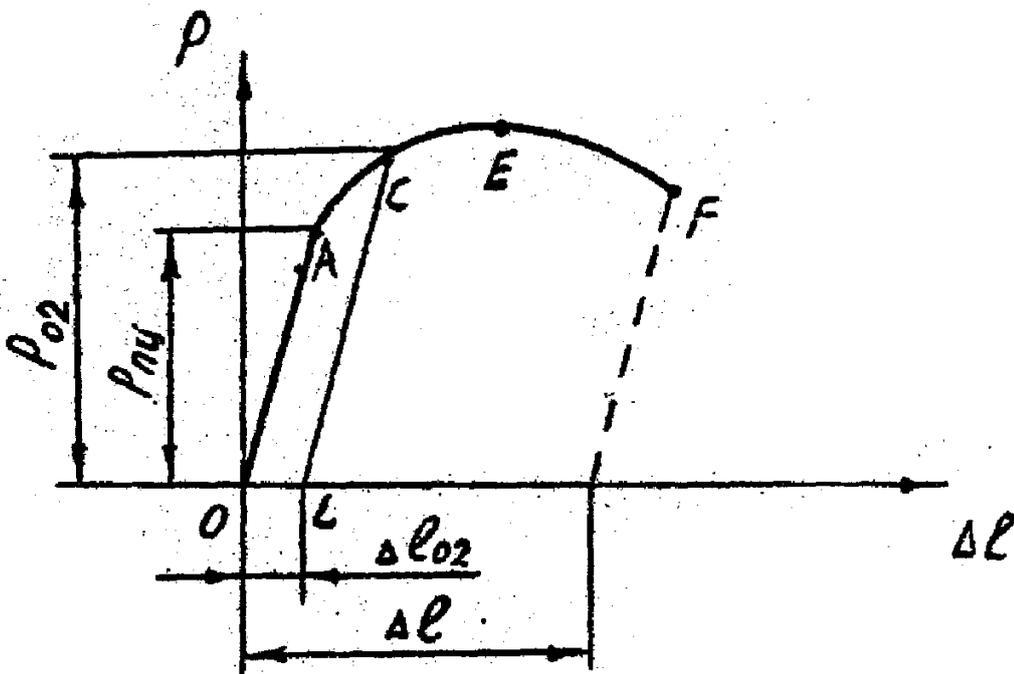


Рис. 30.3

параллельную прямолинейному участку диаграммы OA . Точка пересечения её с диаграммой определяет ординату нагрузки $P_{0.2}$.

4. Предел прочности материала или временное сопротивление

разрыву σ_B - напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, предшествующей разрыву образца

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}, \quad (30.6)$$

где P_B - максимальная нагрузка, предшествующая разрыву образца (величина ординаты точки E).

До точки E удлинения распределялись равномерно по всей длине l_0 образца, площади поперечных сечений расчетной части образца изменялись незначительно и также равномерно по длине. Поэтому для вычисления $\sigma_{мн}$, $\sigma_{уп}$, σ_T и σ_B в расчетные формулы вводилось первоначальное значение площади. После достижения максимальной нагрузки деформация происходит, в основном, на небольшой длине образца. Это ведет к образованию местного сужения в виде шейки.

5. Истинное сопротивление разрыву - напряжение в момент разрыва образца

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_k} \quad (30.7)$$

где P_p - нагрузка при разрыве образца (величина ординаты точки F);

F_k - площадь поперечного сечения шейки образца в месте разрыва.

6. Относительное удлинение после разрыва δ

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (30.8)$$

где l_k - длина расчетной части образца после разрыва.

В зависимости от величины этого удлинения материалы делят на пластичные ($\delta > 5\%$) и хрупкие ($\delta < 5\%$). Для Ст. 2 $\delta \approx 30\%$.

В результате проведенных испытаний кроме диаграммы растяжения можно построить эпюру удлинений.

Для этого до испытания образец размечают на равные доли по 1 см. После испытания удлинения долей измеряют. Наибольшие удлинения имеют участки, расположенные вблизи шейки. Откладывая замеренные удлинения долей в определенном масштабе, можно получить эпюру распределения удлинений вдоль образца (рис. 30.4).

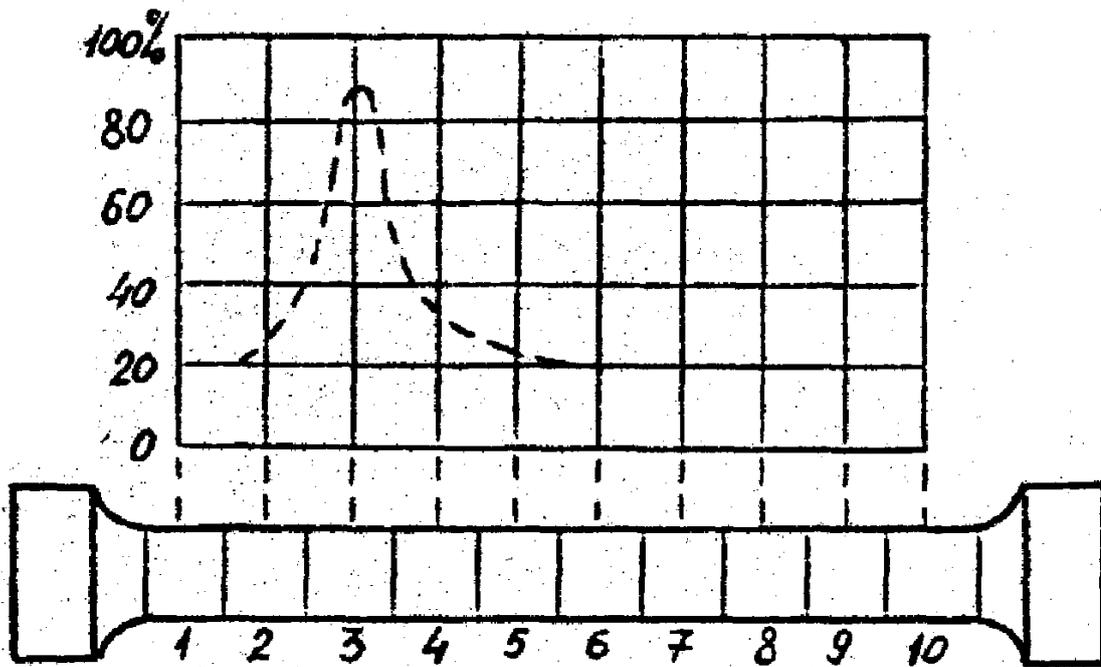


Рис.30.4

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.30.5 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

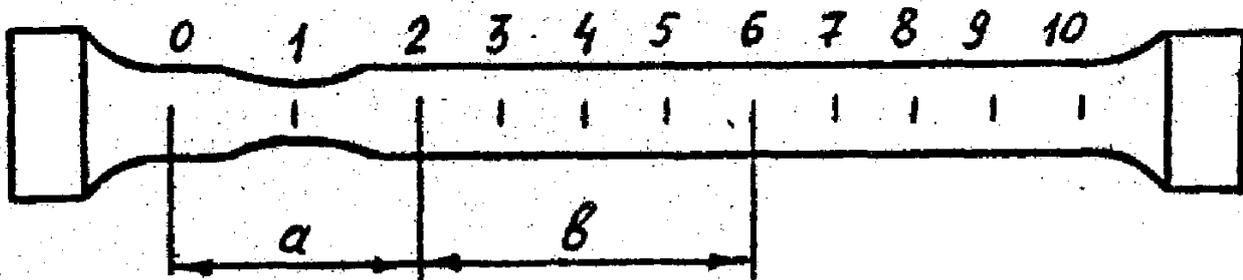


Рис.30.5

рассматриваемом примере $n = 2$. Соответствующую длину обозначим через a . Пусть образец содержит всего m долей (обычно $m = 10$). За расчетную длину образца после испытания принимают $l_k = a + 2b$, где b - длина участка, примыкающего к участку a , содержащего $\frac{m-n}{2}$ долей.

В случае $m = 10$, показанном на рис. 30.5, имеем:

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

Относительное удлинение образца определяется опытным путем по формуле (30.8).

7. Относительное сужение образца после разрыва ψ

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \cdot 100\% \quad (30.9)$$

Чем больше относительное сужение, тем пластичнее материал.

Например, для мягкой углеродистой стали марки Ст 2 $\psi = 55-65\%$.

8. Работа деформации. Величина площади диаграммы растяжения $OACDEFKO$ характеризует работу, затраченную на разрыв образца. Работа определяется по количеству клеток диаграммы или по формуле

$$A = \psi \cdot P_{\max} \cdot \Delta l_{\text{ост}} \quad (\text{кгс} \cdot \text{м}) \quad (30.10)$$

где ψ - коэффициент полноты диаграммы, равный для сталей 0,8... 0,9.

9. Удельная работа деформации, т.е. работа, затраченная на деформирование единицы объема

$$a = \frac{A}{V} \quad (\text{кгс} \cdot \text{м}/\text{м}^3) \quad (30.11)$$

где $V = F_0 l_0$ - начальный объем расчетной части образца.

Удельная работа деформации характеризует способность материала сопротивляться ударному действию нагрузки: чем больше удельная работа деформации до разрыва, тем лучше материал сопротивляется ударным нагрузкам.

Испытание образца на растяжение проводится на разрывной машине модели УМ-5 (рис. 30.6). Машина относится к типу разрывных испытательных машин с механическим нагружением образца и рычажно-маятниковым силоизмерителем. Основными узлами машины являются:

- станина с колоннами;
- нагружающее устройство с коробкой скоростей;
- верхний и нижний захват;
- приспособление для испытания;
- силоизмеритель;
- электроаппаратура.

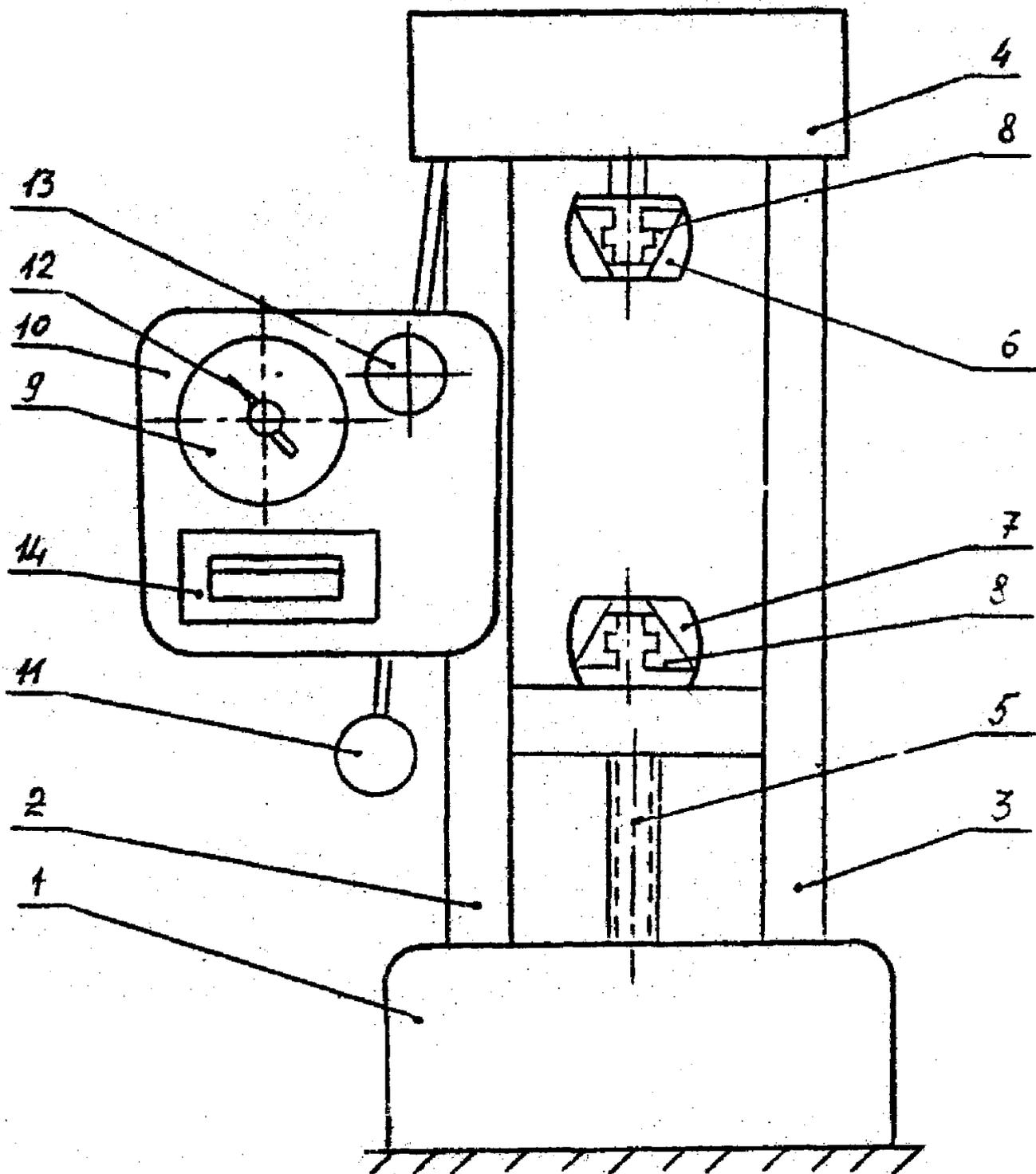


Рис. 30.6

Станина представляет собой жесткую раму, образованную основанием 1, колоннами 2 и 3 и верхней траверсой 4. Во внутренней полости основания размещены грузовой винт 5 и червячная передача нагружающего устройства машины. В верхнюю траверсу 4 монтируется рычажная система маятникового силоизмерителя, которая соединена с верхним захватом 6. Нижний захват 7 подобен верхнему и имеет возможность перемещаться по направляющим колонн 2 и 3 от

грузового винта 5 нагружающего устройства. Для закрепления цилиндрических образцов предусмотрен набор сменных приспособлений 8, обеспечивающих самоустановку образца при проведении испытаний. Для измерения действующей на образец нагрузки служит маятниковый силоизмеритель 9. Шкала нагрузок 9 и её механизм смонтированы в корпусе 10, который крепится к левой колонне машины. Действующая на образец растягивающая сила передается на рычаги, смонтированные в траверсу 4. Вызванный нагрузкой момент передается на маятник 11. При отклонении маятник перемещает зубчатую рейку, приводящую во вращение шестерню, насаженную на ось рабочей стрелки 12 круговой шкалы нагрузок.

В корпусе силоизмерителя смонтирован механизм замера деформаций образца. Лимб шкалы деформаций 13 совершает полный оборот при перемещении нижнего захвата на 50 мм.

Машина снабжена диаграммным аппаратом 14, записывающим масштабную кривую в координатах "нагрузка" и "деформация". Запись нагрузки на диаграммной бумаге барабана производится в горизонтальном направлении. Масштаб диаграммной записи по нагрузкам будет следующий:

шкала А	1 мм - 5 кг
шкала Б	1 мм - 10 кг
шкала В	1 мм - 25 кг

Запись деформаций происходит в вертикальном направлении. Деформация образца увеличивается передаточным механизмом в 10 раз, т.е. масштаб диаграммной записи по деформации 10:1.

Порядок выполнения работы

1. Замерить диаметр образца d_0 .
2. На рабочей части образца штангенциркулем отложить расчетную длину $l_0 = 10d_0$ и отметить две метки.
3. Разметить образец на равные доли по 1 см.
4. Установить образец в захваты машины и произвести испытание. При испытании зафиксировать наибольшее значение нагрузки P_{max} , которую выдержит образец.
5. Отметить на диаграмме точки А, С, Е, F и замерить их ординаты.
6. Замерить конечную длину l_k расчетной части разрушенного образца и диаметр шейки d_k в месте разрыва.
7. Замерить удлинения долей образца.

8. Вычислить механические характеристики прочности, пластичности и статической вязкости материала испытуемого образца.

9. Построить диаграмму растяжения и эпюру распределения удлинений вдоль образца.

Контрольные вопросы

1. Как строится диаграмма растяжения?
2. Какие характерные участки имеет диаграмма растяжения?
3. При какой нагрузке возникает на образце шейка?
4. Что называется наклепом?
5. Как определить условный предел текучести?
6. Как найти работу растягивающей силы по диаграмме растяжения?
7. Как строится эпюра распределения удлинений вдоль образца?
8. Из каких основных узлов состоит разрывная машина?
9. При какой нагрузке на поверхности образца появляются линии Чернова (Людерса)?
10. Какие величины относятся к характеристикам прочности, пластичности и статической вязкости материала?

Отчет о работе

1. Наименование и цель работы

2. Эскиз образца до и после испытания

3. Размеры образца

Таблица 30.1

До испытания	После испытания
Диаметр $d_0 =$ (мм)	Диаметр шейки $d_k =$ (мм)
Расчетная длина образца $l_0 =$ (мм)	Расчетная длина образца $l_k =$ (мм)
Площадь поперечного сечения образца $F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} =$ (мм ²)	Площадь поперечного сечения шейки образца в месте разрыва $F = \frac{\pi d_k^2}{4} =$ (мм ²)
Начальный объем расчетной части образца $V_0 = F_0 \cdot l_0 =$ (мм ³)	

4. Значения нагрузок в кгс

Таблица 30.2

Нагрузка $\rho_{м}$	Нагрузка $\rho_{т}$	Нагрузка $\rho_{в}$	Нагрузка $\rho_{р}$
		(ρ_{max})	

5. Результаты опыта

Таблица 30.3

Характеристики прочности материала (кгс/мм ²)	Характеристики пластичности материала (ε)	Характеристики статической вязкости материала
Предел пропорциональности $\delta_{пч} =$	Относительное удлинение образца после разрыва $\delta =$	Работа деформации $A =$ (кгс·м)
Предел текучести $\delta_{т} =$	Относительное сужение образца после разрыва	Удельная работа деформации
Предел прочности $\delta_{в} =$	$\psi =$	$a =$ (кгс·м) м ³
Истинное напряжение при разрыве $\delta_{р} =$		

Таблица 30.4

№ долей по порядку	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удлинение доли после разрыва образца (см)										

6. Построение диаграммы растяжений

7. Построение эпюры распределения удлинений вдоль образца

8. Выводы по работе

Список литературы

1. Афанасьев А.М. и Марьин В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. - М.: Физматгиз, 1960. - 262 с.
2. ГОСТ 1497-84 (СТ СЭВ 471-77), ГОСТ 9651-84 (СТ СЭВ 1194-78), ГОСТ 11150-84, ГОСТ 11701-84. - Металлы. Методы испытаний на растяжение. - М., 1985. - 63 с.

РАБОТА № 31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы - определить опытным путем величину остаточных напряжений в сварной конструкции.

Основные положения

Прочность и долговечность некоторых конструкций во многом зависит от величины и распределения остаточных напряжений в них. Для определения остаточных напряжений в поверхностном слое предназначен метод канавки. Рассмотрим сущность метода канавки. В окрестности точки O (рис. 31.1) до нанесения канавки действует

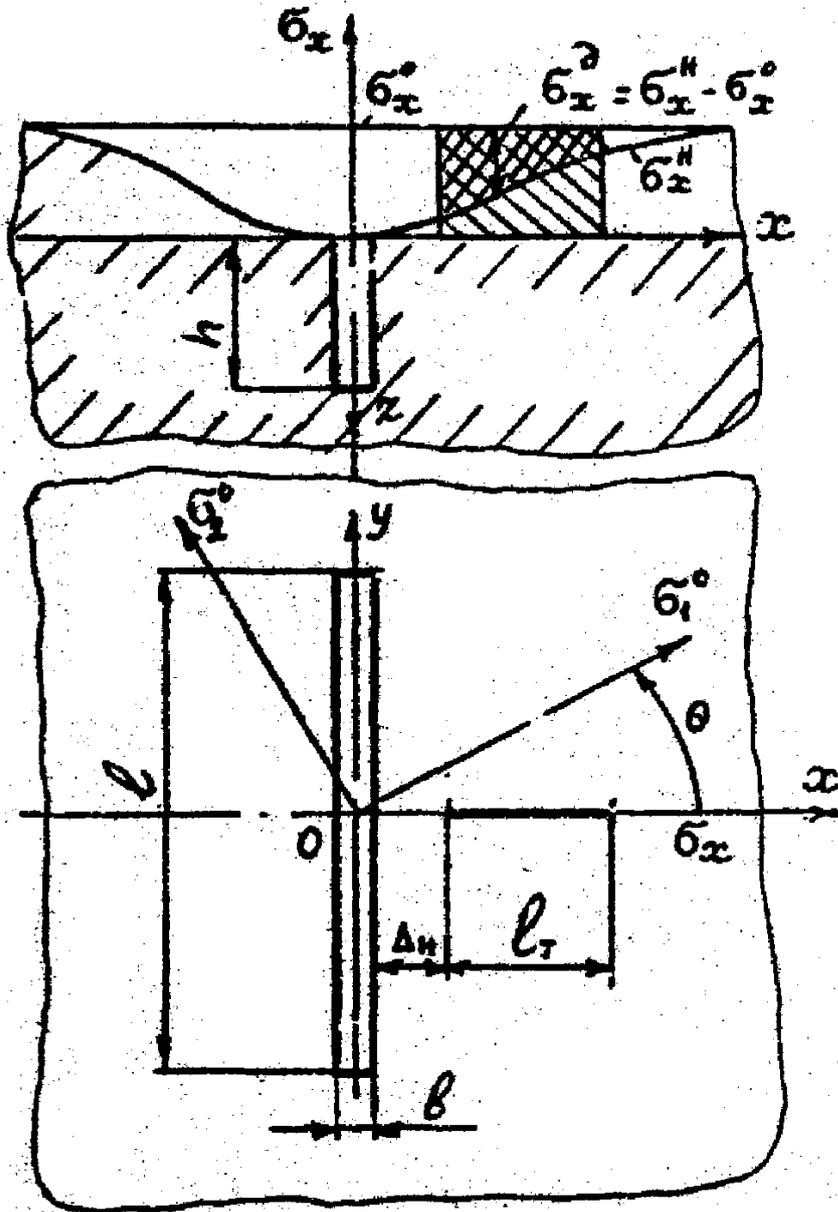


Рис. 31.1 Перераспределение напряжений при нанесении канавок

основное одноосное напряженное состояние, характеризуемое напряжениями

$$\sigma_{x,y}^0 = \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2} \pm \frac{\sigma_1^0 - \sigma_2^0}{2} \cos 2\theta,$$

(31.1)

$$\tau_{xy}^0 = \frac{\sigma_1^0 - \sigma_2^0}{2} \sin 2\theta \quad (31.2)$$

Требуется определить основное напряжение σ_x^0 . Для этого вдоль оси X на расстоянии $\Delta_n + \frac{b}{2}$ закрепляем тензомер (механический или проволочный датчик сопротивления) с базой l_T . Производим по тензомеру начальный замер. Вдоль оси Y нанесем канавку глубиной h , шириной b и длиной l с центром в точке O. Канавка нарушает равновесие основного напряженного состояния и создает условия для нового равновесного состояния. Перераспределение напряжений σ_x соответственно изменению граничных условий схематично представлено на рис. 31.1. Приведены эпюры основных σ_x^0 и новых σ_x^* напряжений.

Тензомер фиксирует относительную деформацию

$$\epsilon_{x, \text{ср}}^{\Delta} = \frac{1}{El_T} \int_{0,5b + \Delta_n}^{0,5b + \Delta_n + l_T} \sigma_x^{\Delta} dx - \frac{\mu}{El_T} \int_{0,5b + \Delta_n}^{0,5b + \Delta_n + l_T} \sigma_y dx. \quad (31.3)$$

Первый интеграл представлен площадью, заштрихованной в двух направлениях.

Остаточные напряжения σ_x^0 определяются по формуле

$$\sigma_x^0 = E \frac{\epsilon_{x, \text{ср}}^{\Delta}}{V}, \quad (31.4)$$

где V - коэффициент чувствительности метода канавки (рис. 31.2).

Коэффициент представлен в зависимости от обобщенного параметра

$$\chi = \lg \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{0,5}{\Delta_n} \right); \quad \rho = \frac{\sqrt{r_n^{k_2} \cdot r_k^{k_2}}}{h + \frac{b}{2}};$$

$$r_n^{k_2} = \Delta_n + \frac{b}{2} + 0,5 \text{ мм}; \quad r_k^{k_2} = \Delta_n + \frac{b}{2} + l_T - 0,5 \text{ мм}$$

У фольговых датчиков за счет сильно развитых поперечных участков решетки концевое эффекта нет, и для них размер 0,5 мм, отме-

ченный знаком $*$, следует опускать.

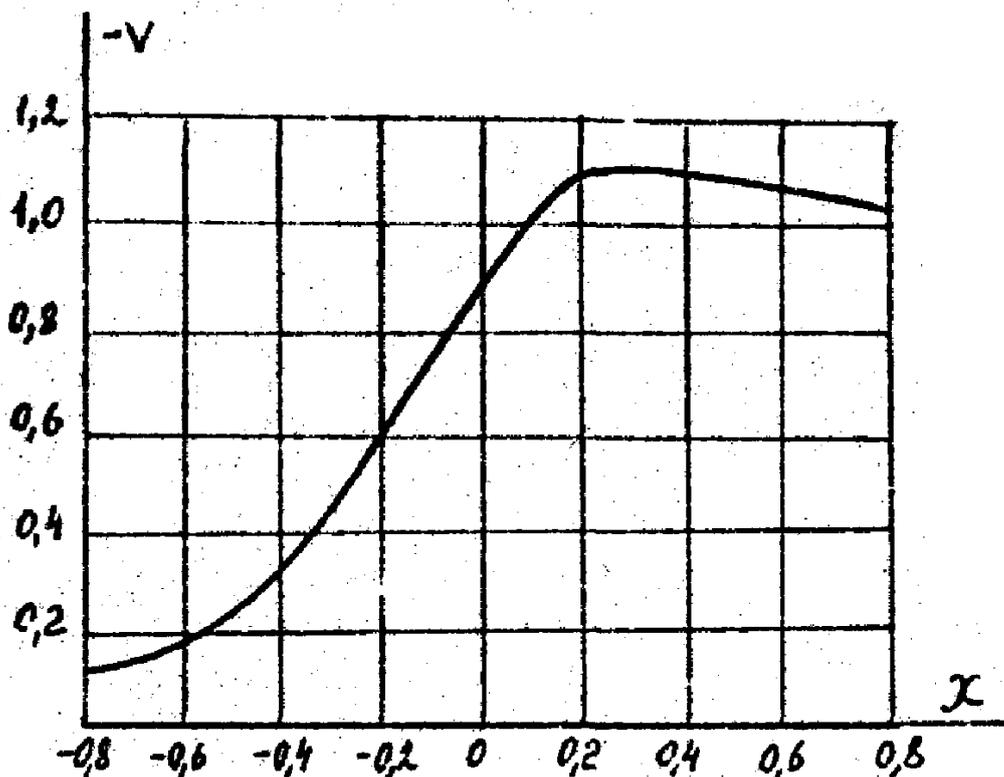


Рис.31.2 Экспериментальные значения коэффициентов чувствительности

Работа выполняется на настольной установке (рис.31.3), пред

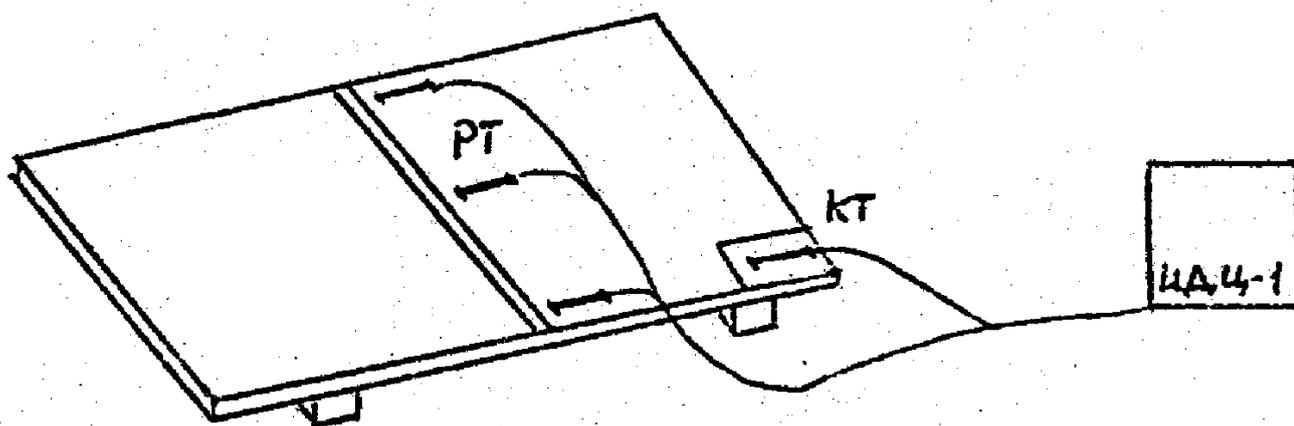


Рис.31.3 Настольная установка

ставляющей собой пластину с приваренными к ней двумя поперечными ребрами жесткости.

Порядок выполнения работы

I. Замерить показания регистрирующего прибора до пропиливания.

2. Пропилить канавку глубиной $h = 1$ мм.

3. Замерить показания регистрирующего прибора после пропиливания.

4. Заполнить таблицу и произвести расчеты.

№ дат: чиков:	Δ_n	b	l_T	$r_n^{кэ}$	$r_k^{кэ}$	h_i	ρ	χ_i	V_i	ϵ_i	σ_x°
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм			год	МПа
1											
2											
3											

Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения остаточных напряжений?
2. Какие существуют методы измерения величины остаточных напряжений?
3. В чем заключается сущность метода отверстий и метода канавки?
4. Какие существуют методы для снижения величины остаточных напряжений?

Отчет о работе

1. Название и цель работы.
2. Схема испытуемого образца с наклеенными на него тензорезисторами.
3. Схема измеряемых параметров при испытании.
4. Таблица с результатами измерений.
5. Выводы по работе.

Литература

Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин.
Под ред. О. Н. Михайлова. - Свердловск: НИИтяжмаш, 1971. - 212 с.

Сергей Григорьевич Костенко
Виктор Ильич Макаров
Сергей Геннадьевич Титрин

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по спецкурсу для студентов направлений 551400 (15.02; 15.05; 15.06); 552900 (12.01; 12.02); 551800 (12.05)

Часть II

Редактор О. А. Пойлова

Подписано к печати 10.06.94

Бумага тип. № I

Формат 60x84I/16

Усл. п. л. 2,0

Уч. изд. л. 2,0

Заказ 68

Тираж 100

Курганский машиностроительный институт, корпус Б, ротацинт
г. Курган, ул. Пролетарская, 62