

622.83

К 29

**ИНСТИТУТ
ГОРНОГО
ДЕЛА**
ИМЕНИ
А.А.СКОЧИНСКОГО

Г. А. КАТКОВ,
В. Ф. ТРУМБАЧЕВ

**РУКОВОДСТВО ПО ПРИМЕНЕНИЮ
ДИНАМОМЕТРОВ С ФОТОУПРУГИМИ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЗОК
НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

МОСКВА

1971

2005.

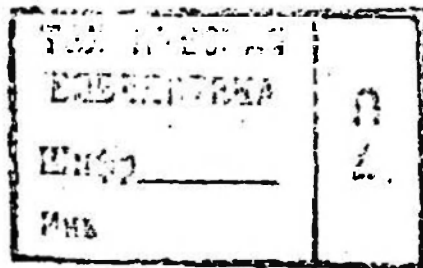
622/23
K29

Министерство угольной промышленности СССР
Академия наук СССР
Институт горного дела им. А.А.Скочинского

Лаборатория горного
давления

Канд. техн. наук Г. А. КАТКОВ,
проф., докт. техн. наук В. Ф. ТРУМБАЧЕВ

РУКОВОДСТВО ПО ПРИМЕНЕНИЮ
ДИНАМОМЕТРОВ С ФОТОУПРУГИМИ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЗОК
НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК



Москва
1971

В руководстве приведено описание конструкции и принципа работы динамометров с фотоупругими чувствительными элементами для измерения нагрузок на крепь подготовительных и очистных горных выработок. Кратко изложена методика расчета основных параметров чувствительных элементов приборов и указана область их применения.

Руководство рассчитано на научных и инженерно-технических работников угольной промышленности, а также аспирантов и студентов, занимающихся изучением проявлений горного давления при подземной разработке полезных ископаемых.

В В Е Д Е Н И Е

В комплексе вопросов, связанных с изучением проявлений горного давления, одно из ведущих мест принадлежит экспериментально-производственным исследованиям по определению нагрузок на крепь капитальных, подготовительных и очистных горных выработок. Результаты измерения нагрузок на крепь горных выработок используются для получения объективной характеристики работы данного типа крепи в зависимости от горногеологических и производственных факторов, установления общих закономерностей проявлений горного давления и выбора наиболее рациональных параметров крепи.

В практике экспериментальных исследований нагрузок на крепь горных выработок наибольшее применение находят непосредственные методы измерения с помощью механических, гидравлических и электрических динамометров. Однако эти приборы сложны по конструкции, обладают недостаточной чувствительностью и малым диапазоном измеряемых величин. Наличие разветвленной сети электрических проводов и громоздкой измерительной регистрирующей аппаратуры резко снижает надежность работы динамометров и ограничивает область их применения, особенно в условиях резких колебаний температуры, наличия влаги, вибрации и т.д. [1, 2].

С целью упрощения конструкции указанных приборов, повышения чувствительности и точности измерения нагрузок, расширения диапазона измеряемых величин в лаборатории горного давления ИГД им. А.А.Скочинского разработана конструкция динамометра с фотоупругими чувствительными элементами для измерения нагрузок на крепь подготовительных и очистных горных выработок. Опытные образцы динамометров прошли испытания в лабораторных и шахтных условиях и показали достаточно высокую надежность в работе и точность при измерении нагрузок [3-5].

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА РАБОТЫ ДИНАМОМЕТРА

Динамометр (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, основания 2, крышки 3. Основание жестко крепится к корпусу с помощью трех винтов 4, расположенных по периметру основания через 120° друг от друга. Крышка динамометра свободно входит в корпус по трем направляющим штифтам 5, также расположенным по периметру через 120° друг от друга. Для крепления крышки на период транспортировки и установки динамометра в корпусе предусмотрен фиксирующий винт 6.

В качестве деформируемой детали в динамометре предусмотрено применение упругого металлического кольца 7, в чувствительного элемента — диска 8 из оптически активного материала с отражателем скоем, расположенного внутри кольца. Для наблюдения за процессом деформирования диска и снятия отсчетов в корпусе динамометра имеется специальное окно 9, изготовленное из прозрачного материала (например, оргстекла), на торцовой части которого может быть наклеена полярная пленка 10. Наблюдательное окно крепится к корпусу четырьмя винтами 11.

С целью крепления дополнительных приспособлений при установке динамометра на элемент крепеж торных выработок в его корпусе предусмотрены три отверстия с резьбой М8, расположенных через 120° друг от друга.

Чувствительные элементы динамометра могут быть выполнены в трех основных вариантах.

При измерении нагрузок в небольших пределах (до 5 т) с постоянной чувствительностью динамометра используется одно упругое металлическое кольцо с диском из оптически активного материала (рис. 2, а). Кольцо 1 изготавливается из высокопрочной стали марки 40ХН или 65ХН (с закалкой в масле при $820-840^\circ\text{C}$ и отпуске при 200°C). Фотоупругий диск 2 изготавливается из оптически активно-го материала ЭДБ-М. На одну из поверхностей диска наносится отражающий слой 3 путем наклеивания алюминиевой фольги или напыления адгезивного порошка в вакуумной камере. Для крепления диска и передачи ему деформации, воспринимаемой кольцом, в последнем предусмотрены два винта 4 вдоль вертикального диаметра, т.е. по линии действия нагрузки.

При измерении нагрузок в более широком диапазоне (до 10 т) с переменной чувствительностью динамометра, изготавливается автоматическая в процессе нарастающей нагрузки, в качестве чувствительного

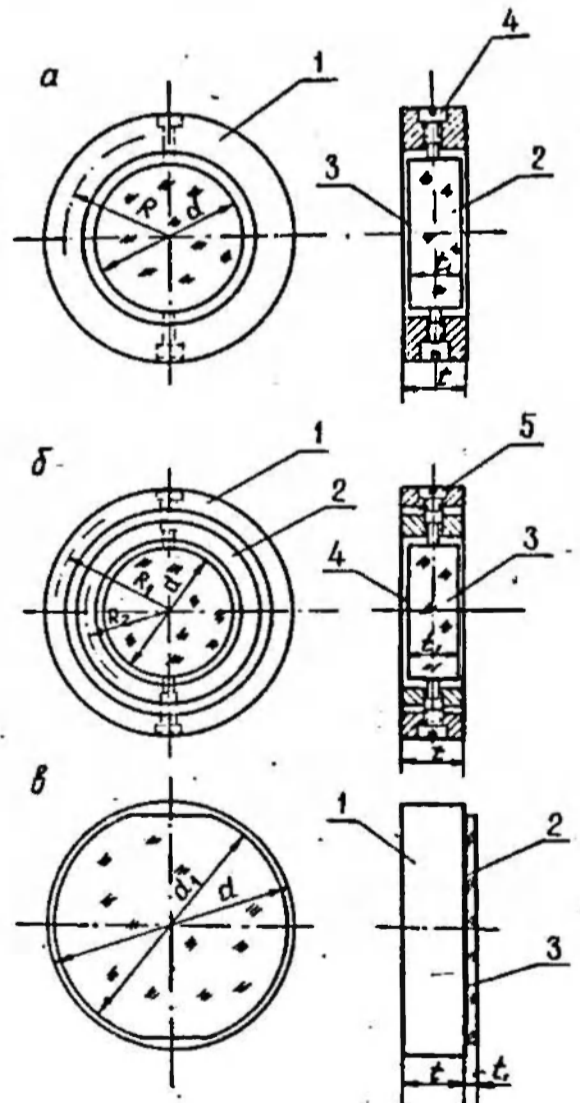


Рис. 2. Чувствительные элементы динамометра:

а — с одним металлическим кольцом и фотоупругим диском; б — с двумя металлическими дисками и фотоупругим диском; в — с металлическим диском и фотоупругим покрытием

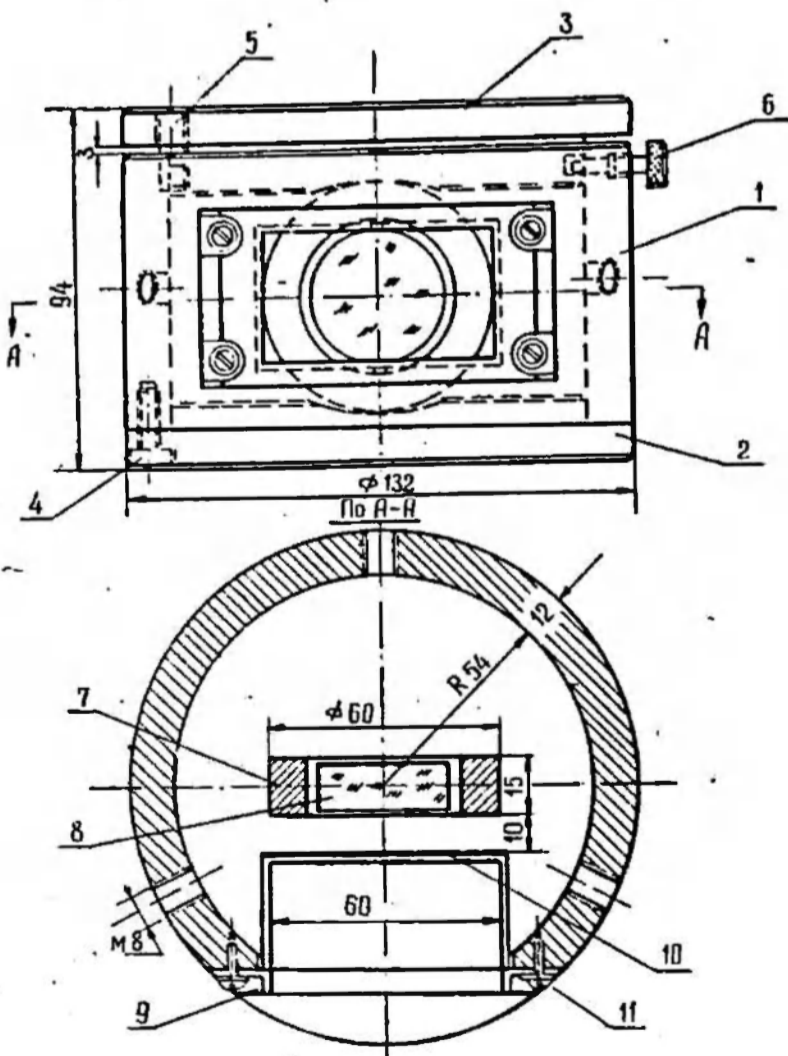


Рис. 1. Динамометр с фотоупругим чувствительным элементом

элемента используется набор концентрически расположенных металлических колец с фотоупругим диском в центре них (рис. 2,б). В этом случае внешнее кольцо I соединяется с внутренним кольцом 2 через вертикального диаметра (по линии приложения нагрузки) и фотоупругим диском 3, имеющим также отражающий слой 4, с помощью специального элемента 5, который жестко крепится только с внешним кольцом и передает деформацию его непосредственно на диск (до наступления предела измеряемых нагрузок).

В процессе возрастания нагрузок винты приходят в соприкосновение с кольцом 2 и вызывают его в работу.

Для измерения нагрузок, действующих на индивидуальные крепления узлов, а также суммарных нагрузок, воспринимаемых рамными креплениями подготовительных выработок, в динамометре могут быть применены более прочные чувствительные элементы в виде сплошного металлического диска I (рис. 2,в) с наклеенным на него фотоупругим покрытием 2, имеющим отражательный слой 3. Диск изготавливается также из высокопрочной стали с закалкой, а покрытие — из оптически активного материала ЭД6-М толщиной 2-3 мм. В этом случае чувствительность динамометра снижается, но значительно увеличивается диапазон измерения нагрузок (до 50-60 т).

Принцип работы динамометра с использованием любого из трех типов чувствительных элементов заключается в следующем. Динамометр устанавливается между элементами крепления таким образом, чтобы нагрузка передавалась непосредственно на его крышку. Благодаря возможности свободного перемещения крышки под действием нагрузки последняя полностью передается на деформируемый элемент (кольцо или диск), вызывая его деформацию. Деформация кольца в свою очередь воспринимается чувствительным элементом — диском из оптически активного материала, в котором возникает картина интерференционных полос, наблюдаемая в поляризованном свете. При увеличении нагрузки происходит рост количества полос от центра диска к его периферии. Порядок полос в центре диска находится в прямой зависимости от величины прикладываемой нагрузки, поэтому простой подсчет количества полос позволяет непосредственно определить нагрузку, действующую на динамометр.

В случае применения чувствительного элемента, состоящего из двух или трех металлических колец и фотоупругого диска, возможно автоматическое регулирование чувствительности динамометра в заранее заданных диапазонах измеряемых величин нагрузок. Это достигается следующим образом.

При действии нагрузки в определенном диапазоне происходит деформация только внешнего кольца, которая фиксируется фотоупругим диском. Внутреннее кольцо в этот период не участвует в работе и жесткость чувствительного элемента характеризуется жесткостью только внешнего кольца. При достижении заранее заданного предела нагрузок и соответствующей ему деформации внешнего кольца вступает в работу внутреннее кольцо, на которое упираются буртиками соединительные винты. С этого момента жесткость чувствительного элемента увеличивается и характеризуется суммой жесткостей внешнего и внутреннего колец. В результате увеличения жесткости системы изменяется чувствительность динамометра, т.е. зависимость между величиной нагрузки и порядком полосы в центре фотоупругого диска.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМОМЕТРА

При выборе параметров чувствительных элементов динамометра необходимо в первую очередь определить соотношение между прикладываемой (измеряемой) нагрузкой и нагрузкой, воспринимаемой непосредственно чувствительным элементом (фотоупругим диском или покрытием). Это соотношение во многом характеризуется жесткостью деформируемого элемента (упругого металлического кольца или диска) динамометра [6].

При применении чувствительного элемента, состоящего из металлического кольца и фотоупругого диска, решение задачи сводится к нахождению перемещений упругого металлического кольца вдоль вертикального диаметра при отсутствии и наличии подкрепления [7].

В первом случае (рис. 3,а) перемещение точек контура кольца вдоль вертикального диаметра определяется на основании решений дифференциального уравнения упругой кривой для тонкого кольца (когда его ширина $b \ll \frac{R}{5}$):

$$\frac{d^2\left(\frac{u}{2}\right)}{d\theta^2} + \frac{u}{2} = -\frac{MR^2}{EJ},$$

где u — полное перемещение кольца (изменение диаметра) по вертикали;

θ — угол между рассматриваемой точкой и горизонтальной осью x (в данном случае $\theta = \frac{\pi}{2}$);

M — изгибающий момент в рассматриваемом сечении;
 R — радиус кольца;
 E — модуль упругости материала кольца;
 J — момент инерции сечения кольца.

В результате решения этого уравнения получена формула для определения полного перемещения (сближения) точек контура кольца вдоль вертикального диаметра:

$$\mu = \frac{2PR^3}{EJ} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) = 0,148 \frac{PR^3}{EJ}, \quad (I)$$

где P — нагрузка, действующая на кольцо.

Во втором случае (рис. 3, б) перемещения определяются на основании решения задачи теории упругости о диске, нагруженном двумя сосредоточенными силами P_1 , вдоль вертикального диаметра.

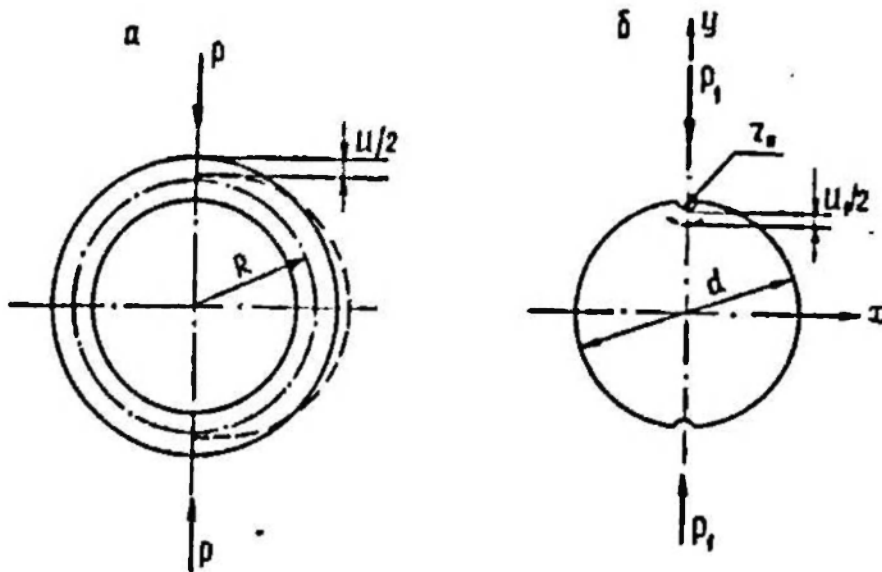


Рис. 3. Схема и расчету параметров чувствительного элемента

Напряжения вдоль оси y можно определить из формул [8]:

$$\sigma_x = \frac{2P_1}{\pi t_1 d};$$

$$\sigma_y = -\frac{2P_1}{\pi t_1} \left[\frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right],$$

где t_1 — толщина диска;
 d — диаметр диска.

Исходя из закона Гука для плоско-напряженного состояния

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_1} (\sigma_y - \mu_1 \sigma_x) = \frac{1}{E_1} \left[\left(\frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right) - \mu_1 \frac{2P_1}{\pi t_1 d} \right],$$

при $\frac{dU_1}{dy} = \varepsilon_y$ имеем

$$\begin{aligned} U_1 &= 2 \int_0^{r-r_0} \varepsilon_y dy = - \frac{4P_1}{E_1 \pi t_1} \int_0^{r-r_0} \left[\left(\frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right) + \frac{\mu_1}{d} \right] dy = \\ &= - \frac{4P_1}{E_1 \pi t_1} \left[\ln \frac{2r-r_0}{r_0} - \frac{r-r_0}{2r} (1-\mu_1) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где P_1 - нагрузка, воспринимаемая диском;

E_1 - модуль упругости материала диска;

μ_1 - коэффициент Пуассона материала диска;

r - радиус диска;

r_0 - радиус выточки в диске в точке приложения нагрузки.

Приравняв перемещения $U = U_1$, из формул (1) и (2) можно определить соотношение между нагрузками P и \bar{P} :

$$\frac{P}{P_1} = \frac{K_0 E J \left[\ln \frac{2r-r_0}{r_0} - \frac{r-r_0}{2r} (1-\mu_1) \right]}{E_1 t_1 R^3}, \quad (3)$$

где K_0 - коэффициент, зависящий от отношения ширины кольца к его диаметру. Для тонких колец ($b \leq \frac{1}{5} R$) $K_0 = 8,6$; для толстых ($b \geq \frac{1}{5} R$) $K_0 = 11,6$.

Для определения зависимости между нагрузкой, действующей на динамометр, и порядком полосы в центре диска (чувствительного элемента) воспользуемся формулой

$$n_c = \frac{1,27 P_1}{d \sigma_0^{1,0}}, \quad (4)$$

где n_c - порядок полосы в центре диска;

$\sigma_0^{1,0}$ - цена полосы материала диска, кг/см.

На основании формул (3) и (4) определим зависимость между нагрузкой P и порядком полосы в центре диска n_c :

$$P = \frac{K_0 E J d \sigma_0^{1,0} \left[\ln \frac{2r-r_0}{r_0} - \frac{r-r_0}{2r} (1-\mu_1) \right]}{1,27 E_1 t_1 R^3} n_c. \quad (5)$$

Введем следующие обозначения:

$$K_1 = \frac{EJ}{R^3}; \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{d\sigma_0^{1,0} \left[\ln \frac{2r-r_0}{r_0} - \frac{r-r_0}{2r} (1-\mu_1) \right]}{1,27 E_1 t_1}. \quad (7)$$

Окончательно получим

$$P = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot R_c,$$

где K_1 — коэффициент, характеризующий упругие и геометрические параметры деформируемого элемента динамометра (кольца);

K_2 — коэффициент, характеризующий упругие, геометрические и оптические параметры чувствительного элемента динамометра (диска).

Определение параметров динамометра производится на основании зависимостей (6) и (7) с учетом требуемой чувствительности динамометра и диапазона измеряемых величин нагрузок.

Определение параметров чувствительного элемента, состоящего из двух и более концентрических колец, производится аналогичным образом с тем лишь отличием, что в случае работы двух или более колец необходимо учитывать их суммарную жесткость. Поэтому для начального периода, когда под нагрузкой находится лишь внешнее кольцо, полное перемещение точек контура кольца вдоль его вертикального диаметра определяется по формуле (1). В случае включения в работу внутреннего кольца суммарное перемещение, передаваемое на чувствительный элемент, может быть определено из формулы

$$u = 0,148 \frac{P \cdot R_1^3 \cdot R_2^3}{E (R_1^3 J_2 + R_2^3 J_1)}, \quad (8)$$

где R_1 — радиус внешнего кольца;

R_2 — радиус внутреннего кольца;

J_1 — момент инерции сечения внешнего кольца;

J_2 — момент инерции сечения внутреннего кольца.

В результате решения уравнений (2) и (8) можно вывести окончательную формулу для определения нагрузок по показаниям чувствительного элемента динамометра:

$$P = \frac{K_0 E (R_1^3 J_2 + R_2^3 J_1) d\sigma_0^{1,0} \left[\ln \frac{2r-r_0}{r_0} - \frac{r-r_0}{2r} (1-\mu_1) \right]}{1,27 E_1 t_1 R_1^3 \cdot R_2^3} \cdot R_c. \quad (9)$$

В случае применения в качестве чувствительного элемента сплошного металлического диска с фотоупругим покрытием определение параметров его производится на основании решения задачи о диске, нагруженном двумя сосредоточенными силами вдоль вертикального диаметра. Напряжения в центре диска могут быть найдены из следующих выражений:

$$\sigma_1 = \frac{2\rho}{\pi t d}; \quad \sigma_2 = -\frac{\rho}{\pi t d}.$$

Исходя из условия равенства деформаций нагружаемого металлического диска и фотоупругого покрытия, т.е. $\epsilon_1 - \epsilon_2 = (\epsilon_1 - \epsilon_2)_n$, имеем

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_n = \frac{E_1 (1 + \mu)}{E (1 + \mu_1)} (\sigma_1 - \sigma_2).$$

Примем, что

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_n = \frac{\rho \sigma_0^{1,0}}{2 t_1}; \quad \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{8\rho}{\pi t d}.$$

В итоге найдем соотношение между порядком полосы в центре фотоупругого покрытия и нагрузкой, воспринимаемой динамометром:

$$\rho = \frac{\pi E t d \sigma_0^{1,0} (1 + \mu_1)}{16 E_1 t_1 (1 + \mu)} \cdot n_c, \quad (10)$$

где E, μ — упругие постоянные металлического диска;
 E_1, μ_1 — упругие постоянные фотоупругого покрытия;
 t — толщина диска;
 t_1 — толщина фотоупругого покрытия.

Таким образом, исходя из требуемых чувствительности прибора и диапазона измеряемых величин нагрузок можно предварительно выбрать один из трех типов чувствительных элементов и по формулам (5), (9) или (10) определить его соответствующие параметры.

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЗОК И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМОМЕТРА

До проведения экспериментальных исследований в производственных условиях необходимо провести тарировку динамометров в лабораторных условиях. Это делается с целью выяснения действительной характеристики работы прибора, выявления дефектов, допущен-

ных при его изготовлении и проверки правильности расчета основных параметров динамометра. Тарировка динамометров производится на гидравлическом или механическом прессах, оборудованных регистраторами нагрузок.

Нагрузка на динамометр прикладывается ступенями через плату с центрирующей сферой или стальной шарик. Интервалы нагрузок выбираются произвольно в зависимости от чувствительности динамометра и диапазона измеряемых величин. Для каждой ступени нагрузки подсчетом определяется порядок полосы в центре чувствительного элемента или относительная разность хода поляризованных лучей с помощью одностороннего полярископа. Результаты измерений заносятся вначале в таблицу, а затем по ним строится тарировочный график "нагрузка-порядок полосы" (рис. 4).

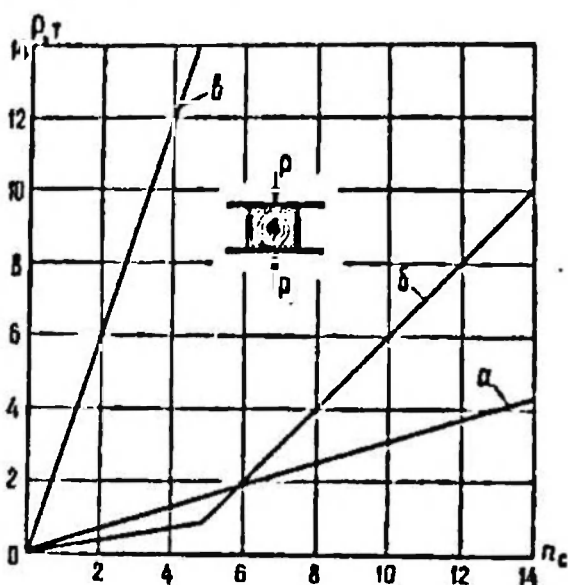


Рис. 4. Тарировочный график динамометра с различными чувствительными элементами:

а — с одним металлическим кольцом; б — с двумя металлическими кольцами; в — с металлическим диском

Динамометры с фотоупругими чувствительными элементами могут быть использованы при измерении нагрузок на крепь очистных и подготовительных выработок.

В очистных выработках, закрепленных индивидуальной крепью, динамометры устанавливаются между стойкой и верхняком I (рис. 5, а) или непосредственно под стойкой 2. Во втором случае под динамометр необходимо положить металлическую прокладку, площадь которой должна соответствовать площади опорной части стойки. Крепление динамометра к стойке или верхняку производится с помощью специальных захватов, изготавливаемых с учетом типа исследуемой крепи и закрепляемых в корпусе прибора.

В подготовительных выработках динамометры могут быть установлены под ножки рамы для определения суммарных нагрузок или по периметру крепи для определения характера распределения давления со стороны боковых пород. В этом случае используются типовые измерительные станции, которые оборудуются обычно механическими динамометрами (рис. 5, б).

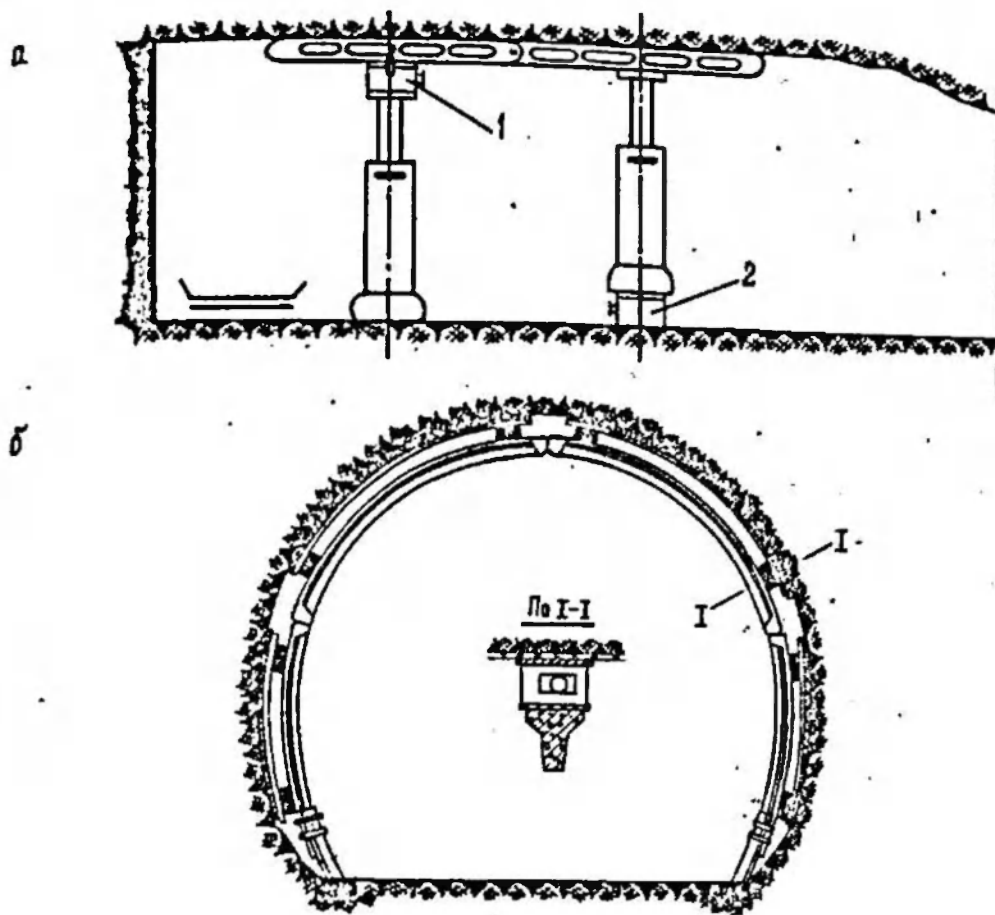


Рис. 5. Схемы установки динамометров при измерении нагрузок на крепь:

а - очистных; б - подготовительных выработок

При установке динамометров с фотоупругими чувствительными элементами необходимо обеспечивать возможность свободного подхода к приборам с целью взятия отсчетов. В тех случаях, когда непосредственное наблюдение на картинной полосе, возникающей в чувствительном элементе в процессе роста нагрузок, затруднено, можно применить небольшой перископ с осветителем.

Динамометры с фотоупругими чувствительными элементами рекомендуется применять при измерении нагрузок на индивидуальные крепи очистных выработок (гидравлические стойки, стойки трения и др.). При этом чувствительность прибора может быть обеспечена в пределах 0,2-2,0 т, а диапазон измерения нагрузок до 40-50 т.

Динамометры могут эффективно использоваться и при измерении нагрузок на крепи подготовительных выработок (металлические, деревянные и железобетонные). Чувствительность динамометров в этом случае может быть обеспечена в пределах 0,1-1,0 т, а диапазон измерения нагрузок до 10-20 т. Техническая характеристика динамометров приведена в таблице.

Характеристика	Чувствительный элемент динамометра		
	металлическое кольцо и фотоупругий диск	два металлических кольца и фотоупругий диск	металлический диск и фотоупругое покрытие
Предел измерения, т	3,0	5,0	20,0
Чувствительность, т	0,1	0,1	1,0
Цена деления полос, т/полосу	0,2	0,2/0,4	2,0
Погрешность измерения, %	5	5	10
Параметры динамометра:			
диаметр, мм	132	132	132
высота, мм	94	94	94
вес, кг	3,2	3,3	3,5
Параметры деформируемого элемента, мм:			
диаметр	60	60/40	60
ширина	7	7/4	7
толщина	15	15	15
Параметры чувствительного элемента, мм:			
диаметр	32	32	58
толщина	12	12	2

К основным преимуществам динамометра с фотоупругими чувствительными элементами следует отнести следующие: простоту конструкции и процесса снятия отсчета, отсутствие проводочной связи с регистрирующим прибором, устойчивость чувствительного элемента к воздействиям внешней среды, возможность регулирования чувствительности и диапазона измеряемых величин в достаточно широких пределах без изменения конструктивной схемы динамометра, высокая надежность и точность измерения нагрузок.

Таким образом, предложенная конструкция динамометра ввиду ее простоты и малой стоимости может быть рекомендована для широкого применения при измерениях нагрузок на крепи очистных и подготовительных горных выработок в различных горногеологических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катков Г. А. Измерение нагрузок на крепь горных выработок. М., "Недра", 1969.
 2. Трумбачев В. Ф., Катков Г. А. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий. М., "Наука", 1966.
 3. Катков Г. А., Трумбачев В. Ф. Приборы с фотоупругими чувствительными элементами для измерения напряжений в массиве горных пород и подземных конструкциях. - Сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, 1970.
 4. Приборы для исследования проявлений горного давления. - В сб. "Труды ВНИМИ", № 66. Д., ВНИМИ, 1966.
 5. Roberts A., Hawkes J. *The application of photoelastic devices for measuring strata pressures and support loads.* "Mine and Quarry Eng.", 1963, v. 29, № 9.
 6. Общие методические положения комплексного исследования проблем горной геомеханики. - Сб. "Труды ВНИМИ", № 81. Д., ВНИМИ, 1970.
 7. Тимошенко С. П. Теория упругости. М., ОНТИ, 1937.
 8. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Изд-во АН СССР, 1949.
-

Гелладия Александрович Китков, Владимир Федорович Трунбачев

**РУКОВОДСТВО ПО ПРИМЕНЕНИЮ ДИНАМОМЕТРОВ С ФОТОУПРУГЕЙ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЗОК
НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Редактор В. Н. Ямин

Г-05338

Тираж 600

Заказ № 5651

Ротапечатьный цех Института горного дела им. А. А. Скочинского
1,25 уч.-изд.л.

Подписано к печати 15/III 1971 г.