

Ануфриев В.Е., к.т.н. (КузНИИшахтострой),
Харитонов В.Г., Позолотин А.С.,
Ремезов А.В., д.т.н. (шахта «Заречная»),
Кулаков Г.И., д.т.н. (ИГД СО РАН)

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА, ОТРАБАТЫВАЕМОГО МЕХАНИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Кратко анализируются особенности измерения напряжений в массиве горных пород, приводится описание высокомодульного фотоупругого датчика и рассматриваются результаты экспериментов по измерению напряжений в зоне опорного давления комплексно-механизированного очистного забоя по пласту Польшаевский-1 на шахте «Заречная», в г. Ленинске-Кузнецком.

ВВЕДЕНИЕ

Напряжения в точке массива в общем случае представляют тензорную величину (в отличие от скаляров и векторов). Тензор напряжений включает девять величин, из которых шесть независимых. В цилиндрической системе координат в объемном случае этот тензор записывается в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{rr} & \tau_{r(\theta)} & \tau_{r\varphi} \\ \tau_{(\theta)r} & \sigma_{(\theta\theta)} & \tau_{(\theta)\varphi} \\ \tau_{\varphi r} & \tau_{\varphi(\theta)} & \sigma_{\varphi\varphi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (1)$$

где y_{ij} — нормальные напряжения, действующие на площадках, нормальных к координатным плоскостям; ϕ_{ij} — касательные напряжения на тех же площадках; y_1, y_2, y_3 — главные напряжения в рассматриваемой точке.

То, что напряжения в массиве горных пород — тензорная величина налагает определенные требования на методы их измерения:

- необходимо, в общем случае, измерять девять величин, каждая из которых определяется своим численным значением, своей ориентацией и своим знаком;

- нормальные напряжения на любых площадках связаны соотношением

$y_1 + y_2 + y_3 = y_{rr} + y_{\theta\theta} + y_{\varphi\varphi} = \text{const}$,
представляющим I инвариант тензора (1);

- касательные напряжения попарно равны между собой

$$\phi_{rr} = \phi_{\theta\theta}, \phi_{rr} = \phi_{\varphi\varphi}, \phi_{\theta\theta} = \phi_{\varphi\varphi}.$$

Приведенные соотношения могут использоваться при упрощении схем экспериментов.

В практике измерений важно, что четыре компонента тензора (1), стоящие в левом верхнем углу, образуют плоский тензор напряжений:

$$\begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{rr} & \tau_{r(\theta)} \\ \tau_{(\theta)r} & \sigma_{(\theta\theta)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Здесь последняя матрица выписана в декартовой системе координат.

Соотношения (2) важны в практике измерений напряжений — имеется прибор, который позволяет одновременно измерять все четыре величины, входящие в тензоры (2). Это кольцевые скважинные фотоупругие датчики.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

В настоящее время отсутствуют приборы, которые обеспечивали бы одновременное одним прибором измерение всех девяти компонент тензора (1). Правда, применительно к крепким скальным породам разработан деформометр, который позволяет одновременно измерить все девять компонент тензора деформаций [1-3]. В этом случае используют известное положение теории упругости: в однородном изотропном упругом породном массиве каждая компонента тензора

напряжений линейно связана с соответствующей компонентой тензора деформаций в той же точке. Обычно для локальных участков массива упомянутая гипотеза однородности изотропности и упругости выполняется. Используя эти положения предварительно измеряют деформации и по ним рассчитывают напряжения. Но переход от измеряемых деформаций к напряжениям требует знания упругих констант массива пород — в простейшем случае модуля упругости и коэффициента Пуассона. Последние, в свою очередь, могут быть определены только экспериментально на образцах, изготовленных из кернов, отобранных при бурении измерительной скважины. Это обстоятельство резко осложняет эксперименты по измерению напряжений и деформаций. К тому же в условиях осадочных пород обычно не удается получить цельные керны, пригодные для определения упругих констант.

В практике геомеханических измерений используют различные методы и приборы для оценки напряжений в массиве. Подробная классификация таких методов приведена в работе [4]. Различают следующие способы измерения напряжений:

1. По характеру связи непосредственно измеряемой в эксперименте величины с напряжениями: а) прямые методы (позволяющие измерять напряжения непосредственно); б) косвенные методы (измеряются деформации и другие величины, связанные с напряжениями).

2. По физической природе явлений, процессов, воздействующих на измерительный элемент: а) механические (по деформациям, смещениям); б) геофизические (по скорости и ускорению смещений и деформаций, по электрической проводимости пород, по электрическим и магнитным полям в массиве и их изменению, по магнитострикционному, пьезоэлектрическому и другим эффектам, связанным с изменением напряженного состояния пород и др.).

3. Термодинамические (основанные на термодинамической связи объема, давления и температуры).

4. Физико-химические (основаны на связи химических процессов с деформированием и давлением; на зависимости проникающей радиации от плотности вещества и др.).

Методы измерений напряжений разделяются: по механическому воздействию на массив при проведении измерений (разрушающие, неразрушающие); по расположению измерительного устройства (скважинные, поверхностные); по числу измеряемых компонент тензора напряжений (одновременное измерение шести независимых компонент; измерение трех компонент, действующих в одной плоскости; измерение одной компоненты; измерение части характеристик одной компоненты напряжений — например только величины, только ориентации); по объему измеряемых характеристик НДС — измерение полных напряжений, измерение дополнительных напряжений, измерение начальных напряжений, измерение приращений напряжений; по способу снятия сигнала с первичного преобразователя — механические, электрические, оптические, гидравлические, акустические и др. В работе [4] выделено 48 вариантов инструментальных методов измерения напряжений и деформаций.

В геомеханике долгие годы остается дискуссионным вопрос о возможности вообще создать датчик напряжений. В то же время ряд специалистов-геомехаников считают, что в качестве датчика напряжений можно использовать жесткое (высокомодульное) включение. Однако вопрос о величине его относительной жесткости, при которой включение можно рассматривать в качестве датчика напряжений, также остается дискуссионным [5-8]. Обычно за параметр жесткости включения принимают отношение модуля упругости E_v , материала включения к модулю упругости породы E_n :

$$K = E_v / E_n.$$

В работах [6, 9] обосновывается, что коэффициент жесткости датчика напряжений следует принимать

$$K = E_d / E_n > 4, \quad (3)$$

где E_d — модуль упругости материала датчика.

В работе [9] показано на примере фотоупругих датчиков, что вопрос о коэффициенте жесткости в конечном счете сводится к вопросу о точности измерения напряжений с помощью жесткого включения.

КОЛЬЦЕВОЙ ФОТОУПРУГИЙ ДАТЧИК

В описываемых далее экспериментах по измерению напряжений в угольном массиве пласта Полысаевский-I на шахте «Заречная» использованы кольцевые скважинные фотоупругие датчики типа ФДО-2 из силикатного стекла марки К8.

Конструктивно датчики выполнены в виде стеклянного цилиндра с осевым отверстием. Задняя торцевая поверхность датчика снабжена зеркальным слоем, который защищен от повреждений резиновым диском толщиной 3 мм. Лицевая поверхность датчика защищена от механических повреждений и затеков клея при установке датчика в скважине металлическим кольцом. Внешний диаметр стеклянного элемента 40 мм, диаметр осевого отверстия 7 мм. Зеркальный слой обеспечивает возможность наблюдения оптической картины в датчике в отраженном свете. Конструкция датчика приведена на рис. 1.

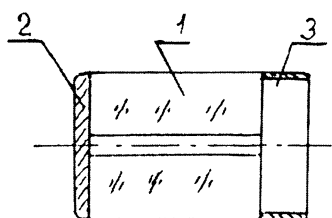


Рис. 1. Конструкция фотоупругого датчика ФДО-2: 1 - оптический элемент - цилиндр из стекла марки Л8; 2 - резиновый диск; 3 - металлическое кольцо

Принцип работы датчика — использование известного в оптике эффекта

фотоупругости. Датчик устанавливается в скважине, пробуренной в горной породе или угле на участке измерения. Зазор между стенками скважины и датчиком заполняется самотвердеющим клеем (в описываемых экспериментах в качестве клея использовался водный раствор цемента марки 400). После затвердевания клея датчик деформируется совместно с окружающей скважину с датчиком породой. В процессе деформирования датчика в нем возникают механические напряжения.

Из теории фотоупругости известно, что в прозрачном напряженном теле при освещении его пучком поляризованного света вследствие явления интерференции лучей света формируется оптическая картина, состоящая из цветных полос (при использовании белого луча света) — изохром. Последние представляют изолинии равных максимальных касательных напряжений в материале датчика. Следовательно, узор оптической картины в датчике зависит от величины напряжений в нем и их распределения по стеклянному элементу. Осевое отверстие выполняет роль концентратора напряжений. Вследствие чего картина изохром имеет сложный узор и всегда две взаимно перпендикулярные оси симметрии. В теории фотоупругих датчиков показано, что ориентация этих осей совпадает с направлениями квазиглавных напряжений в породе, действующих в плоскости нормальной к оси датчика и скважины [6, 8]. Число изохром оптической картины (точнее порядок изохромы в фиксированной точке узора) пропорционально наибольшему квазиглавному напряжению в породе y_1^k в плоскости, нормальной к оси датчика. Меньшее квазиглавное напряжение в породе в той же плоскости обозначим через y_2^k .

Отношение

$$L = y_2^k / y_1^k, \quad (4)$$

характеризующее вид напряженного состояния в породе, определяет узор оптической картины [6].

Для наблюдения последней в фотоупругих датчиках используются специальные приборы — полярископы, которые предназначены для

формирования пучка поляризованного света, направленного в датчик, и наблюдения вышедшего луча.

В экспериментах использовался полярископ типа ПШ-2 конструкции ИГД СО РАН. Принципиальная оптическая схема наблюдения фотоупругого датчика типа ФДО-2 приведена на рис. 2.

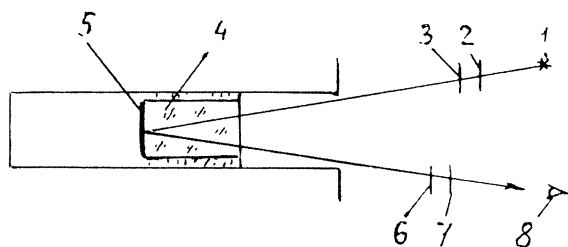


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема наблюдения датчика типа ФДО-2:

1 - источник света; 2 - поляризатор; 3, 6 - четвертьволновые пластинки; 4 - датчик; 5 - зеркальный слой; 7 - анализатор; 8 - глаз наблюдателя

Вид оптической картины в датчике при разных значениях параметра λ приведен на рис. 3.

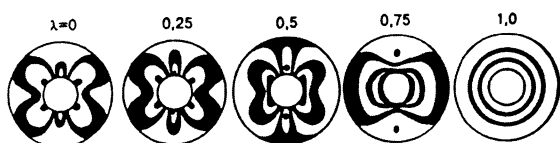


Рис. 3. Общий вид оптической картины в кольцевом фотоупругом датчике при значениях $\lambda \geq 0$

Здесь черным цветом обозначены красные изохромы, белым зеленые изохромы.

Итак, по фотоупругому датчику при измерениях снимается три отсчета:

- порядок изохромы n в фиксированной точке оптической картины;
- ориентация осей симметрии оптической картины.

Для этого измеряется угол β между положительным направлением координатной оси x и направлением оси симметрии, соответствующей напряжению y_1^k . На рис. 3

эта ось ориентирована вертикально, а ось симметрии, соответствующая y_2^k , ориентирована горизонтально;

- величина параметра λ оценивается путем сравнения узора наблюдаемой в датчике оптической картины с узорами на рис. 3 или со специальным набором картин изолиний Φ_{\max} в датчике при различных λ .

Величина напряжения y_1^k вычисляется по формуле [6].

$$y_1^k = k_1 \cdot \lambda \cdot n, \quad (5)$$

где n — порядок полосы в точке отсчета, полос;

λ — тарировочная цена полосы датчика, МПа/полосу,

k — поправочные коэффициенты.

Тарировочная цена полосы датчика определяется экспериментально путем нагружения датчиков в эталонных условиях [6]. Рекомендуется тарирование осуществлять при одноосной нагрузке. Коэффициенты k учитывают отличие условий тарирования датчиков от реальных условий работы датчика в массиве, включая влияние слоя клея, модуля упругости породы и др. Графики для определения коэффициентов k приведены в работе [6].

Наименьшее главное напряжение y_2^k определяется по формуле (4).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ НА ШАХТЕ «ЗАРЕЧНАЯ»

Эксперименты по измерению напряжений в зоне опорного давления выполнены на пласте Польшаевский-I шахты «Заречная» в панели, отрабатываемой лавой 905.

Выемочное поле расположено вдоль отработанной панели 904. Лава отрабатывается по падению пласта на глубине 168-275 м. Угол падения пласта $3^\circ-9^\circ$. Мощность пласта изменяется в пределах 2,4 — 2,68 м.

На пласте имеется «ложная» кровля мощностью 0,2-0,4 м, представленная сильно трещиноватыми ослабленными аргиллитами и алевролитами с коэффициентом крепости $f=2-3$ с включениями линз и прослоек угля.

Вследствие этого наблюдается отслаивание ее с образованием куполов высотой 0,3-0,4 м, иногда до 0,6 м.

Непосредственная кровля — алевролит средней крепости ($f=3-5$), второй класс устойчивости, мощность изменяется от 5 до 10 м. Допустимая площадь обнажения при отработке лавы 10-15 м в течение часа.

Основная кровля пласта — переслаивание слаботрешиноватых алевролитов и песчаников ($f=5-8$), мощность 20-30 м. Шаг первичной посадки основной кровли 35-45 м. Вторичные шаги обрушения 5-7 м.

Почва пласта — алевролит средней крепости ($f=3-4$), при размокании склонен к пучению.

Замерная станция из 5 фотоупругих датчиков была оборудована на вентиляционном штреке 905. Схема горных работ с указанием мест размещения датчиков приведена на рис. 4. Датчики устанавливались в скважинах диаметром 42-45 мм на глубину 0,8-1,2 м от борта выработки. Исследовалась стандартная методика установки датчиков, приведенная в работе [6].

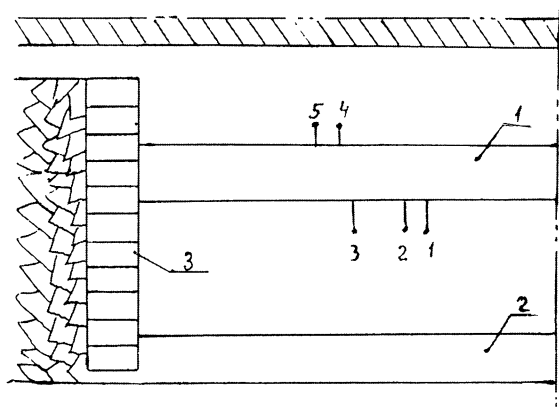


Рис. 4. Схема горных работ и замерной станции: 1 - вентиляционный штрек 905; 2 - вентиляционный штрек 905^{бн}; 3 - механизированный комплекс; 1, 2, 3, 4, 5 - фотоупругие датчики, установленные в скважинах

На экспериментальном участке кровля пласта закреплена в период проходки штрека

905 сталеполимерными анкерами (по 4 анкера в ряду). Металлические подхваты под решетчатую затяжку установлены через 0,8 м. Борта штрека частично перетянуты решетчатой затяжкой, которая удерживалась с помощью сталеполимерных анкеров.

Замерная станция была оборудована на расстоянии 220-225 м от забоя лавы. Первые показания появились на датчике № 1, когда расстояние до лавы составило 130 м. Величина прироста квазиглавногo напряжения y_1^k к этому периоду достигла 3,5 МПа. Ориентация этого напряжения под углом 45° с наклоном в сторону очистного забоя. В последующие периоды показания датчика № 1 увеличивались, а направление этого напряжения постепенно приближалось к горизонтальному. С расстояния до лавы 90-95 м показания датчика снизились до нуля.

По-видимому, прирост показаний датчика № 1 связан с местной локальной концентрацией напряжений, деформированием локального блока массива, в зоне влияния которого находился датчик. Необходимо иметь в виду, что вентиляционный штрек 905 находился в зоне опорного давления выработанного пространства лавы 904.

Первые отсчеты по датчикам № 2 и № 4 произведены, когда забой лавы приблизился к ним на расстояние 90 м. Показания датчика № 2 к этому моменту достигли $n=2$ полосы ($y_1^k=2$ МПа), датчика № 4 составили $n=1,5$ полосы ($y_1^k=1,5$ МПа). Показания обоих датчиков по мере подвигания забоя лавы постепенно возрастали до момента, когда забой лавы приблизился к датчику № 2 на расстояние 20 м, а по датчику № 4 на расстояние 18 м. Затем показания датчиков резко возросли за 2-3 подвигания забоя, после чего они снизились практически до нуля.

Ориентация напряжения y_1^k по датчику № 2 вначале была горизонтальной (угол $\theta=0^\circ$), затем вектор y_1^k постепенно поворачивался с наклоном в сторону забоя, достигнув к концу наблюдений величины $\theta=50^\circ-60^\circ$. Ориентация вектора y_1^k по датчику № 4 была практически вертикальной и только вблизи забоя лавы, на

расстоянии 18 м, ось оптической картины установилась под углом $\beta=135^\circ$ с падением от лавы в сторону массива. На рис. 5 приведены показания датчиков № 1, 2, 4. Здесь n — отсчет по оптической картине, полос, l — расстояние от забоя лавы. Расчеты выполнены по формулам (4)-(5). Показания датчика № 3 аналогичны показаниям датчика № 2, а датчика № 5 аналогичны показаниям датчика № 4.

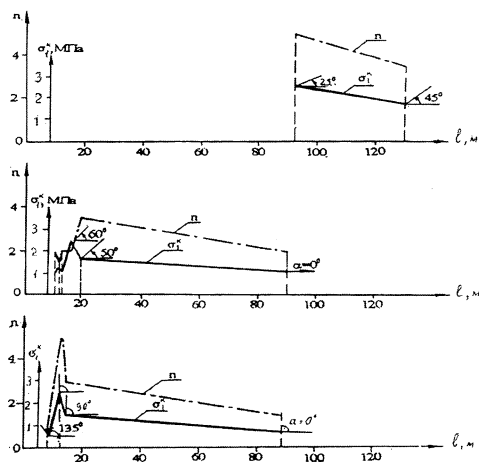


Рис. 5. Графики показаний датчиков 1, 2, 4: а) датчик № 1; б) датчик № 2; в) датчик № 4

ВЫВОДЫ

1. Напряжения в зоне опорного давления лавы по пласту Полысаевский-I достигают 2,5-3 МПа, параметр n изменяется в пределах 0,25-0,5. Ориентация наибольшего квазиглавно напряжения изменялась от горизонтальной до вертикальной.

2. Максимум зоны опорного давления расположен впереди очистного забоя на расстоянии 12-20 м.

3. В точке максимума опорного давления наблюдается смена ориентации квазиглавно напряжения, действующего в вертикальной плоскости, нормальной к линии очистного забоя. Если за максимумом зоны опорного давления векторы наибольшего квазиглавно напряжения наклонены в сторону очистного забоя, то на участке между забоем и зоной

максимума опорного давления эти векторы наклонены от забоя. В точке же максимума опорного давления y_1^k ориентировано вертикально.

4. Коэффициент концентрации напряжений в зоне максимума опорного давления по компоненте y_1^k составляет 1,6.

1. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах. — Новосибирск: Наука, 1975. — 150 с.

2. Руководство по применению метода разгрузки керна с центральной скважиной для определения напряжений в осадочных горных породах. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1969. — 62 с.

3. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Панин В.И., Иванов В.И. Методика экспериментального определения полного тензора напряжений в массиве горных пород / Измерение напряжений в массиве горных пород. 4.1. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1974. — С. 40-45.

4. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И. Кольцевые скважинные датчики для геомеханических измерений. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. — 134 с.

5. Roberts A., Hawkes J., Willams F.T. and Dhir R.K. A laboratory study of the photoelastic stressmeter // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1965, № 1, P. 441-457.

6. Грицко Г.И., Кулаков Г.И. Измерение напряжений в горных породах фотоупругими датчиками. — Новосибирск: Наука, 1978. — 144 с.

7. Сенук Д.П. Измерение напряжений в породах месторождений Севера. — Новосибирск: Наука, 1983. 193 с.

8. Влох Н.П., Сашурин А.Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. — М.: Недра, 1970. — 120 с.