

А. И. Чанышев¹, Л. В. Городилов^{1,2}, Д. В. Степанов¹, Е. Н. Шер¹

Разработка методики определения поверхностных смещений при определении напряженного состояния породного массива

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: gor@misd.ru

Аннотация. В работе представлена методика измерения смещений точек поверхности образцов твердых материалов, которую предполагается использовать для определения напряжений в массиве горных пород, например, методом разгрузки. Для опытов использовали пластины из оргстекла и кубики из песчано-цементной смеси. Нагружение образцов производили при помощи гидравлического пресса, смещения измеряли цифровым штангенциркулем. Представлены схема экспериментов и результаты (смещения точек поверхности) нескольких нагружений. Приводится сравнение расчета смещений поверхности пластины из оргстекла в упругой постановке с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: методика нагружения, смещения, пресс, горный массив, метод разгрузки

A. I. Chanyshev¹, L. V. Gorodilov^{1,2}, D. V. Stepanov¹, E. N. Sher¹

Development of a Methodology for determining Surface Displacements in Determining the Stress State of a Rock Mass

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: pochta@pochta.ru

Abstract. The paper presents a method for measuring the displacement of points on the surface of samples of solid materials, which is supposed to be used to determine stresses in a rock mass during part-time work, for example, by unloading. For the experiments, plexiglass plates and cubes of sand-cement mixture were used. The samples were loaded using a hydraulic press, the displacements were measured with a digital caliper. The scheme of experiments and the results (displacement of surface points) of several loads are presented. The calculation of displacements of the plexiglass plate surface in an elastic formulation is compared with the results of experimental studies.

Keywords: method of loading, displacement, press, mountain range, unloading method

Введение

При решения задач геомеханики требуется знать условия нагружения массива пород, в первую очередь в бесконечно удаленных точках [1][2]. Они находятся различными способами [3][4][5][6][7], наиболее известными из которых являются методы разгрузки [5][8][9]. Суть методов – разгрузка части массива пород, измерение деформаций разгруженного участка пород, применение закона Гука для нахождения напряжений.

При определении напряженно-деформированного состояния массива приходится производить измерения смещений точек его поверхности [5]. В [10] разработана расчётная схема определения напряженного состояния массива по смещений контуров выработок (подземные, открытые). Для экспериментальной проверки предложенного в [10] подхода необходимы измерения смещений поверхности массива в процессе разгрузки. В настоящей работе представлена методика и результаты измерений смещений, наблюдаемых на поверхности массива после проходки кольцевой щели, позволяющей произвести в нем разгрузку.

Методика экспериментов, материалы

На рис. 1 представлена фотография установки по нагружению образцов твердых материалов, моделирующих горные породы, и измерению смещений (нормального и касательного), которая состояла из гидравлического пресса, высокоточных цифровых манометров для измерения давления масла в подающем цилиндре, а также устройства (дрели с коронкой) для выбуривания кольцевой щели в образцах. Для экспериментов использовали образцы из песчано-цементного, оргстекла и сибита. Отметим, что на образцах из сибита не удалось получить удовлетворительных результатов из-за его низкой прочности, поэтому результаты экспериментов на нем не приводятся.

Гидравлический пресс с максимальным паспортным усилием 100 тс включал два режима нагружения: накачивания при помощи ручного насоса и непрерывной подачи жидкости из гидроцилиндра при помощи выдавливания поршнем со штурвалом.

Для испытаний использовали образцы из песчано-цементного состава М150 кубической формы размером 200x200x200 мм³, а также квадратные пластины 180x180 и 150x150 мм² из оргстекла толщиной 24 и 32 мм. Для изготовления образцов из песчано-цементного состава были разработаны и изготовлены специальные формы из пластин металла толщиной 10 мм.

Последовательность действий при испытаниях была следующей:

- а) нанесение реперных отметок на поверхность образца,
- б) установку в пресс и измерение начальных расстояний между реперными метками,
- в) подачу давления в гидроцилиндр и его повышение до уровня, пока соотношение F/S не достигнет величины, равной $\sim 3/4 \sigma_{сж}$, где F – сила со стороны гидроцилиндра, S – площадь нагружаемой грани, $\sigma_{сж}$ – предел прочности материала образца на сжатие,
- г) измерение расстояний между реперными метками,
- д) сверление в центре торцевой поверхности образца кольцевой щели заданного диаметра D ,
- е) измерение расстояний между реперными метками,
- ж) разгрузка гидроцилиндра,
- з) измерение расстояний между реперными метками.

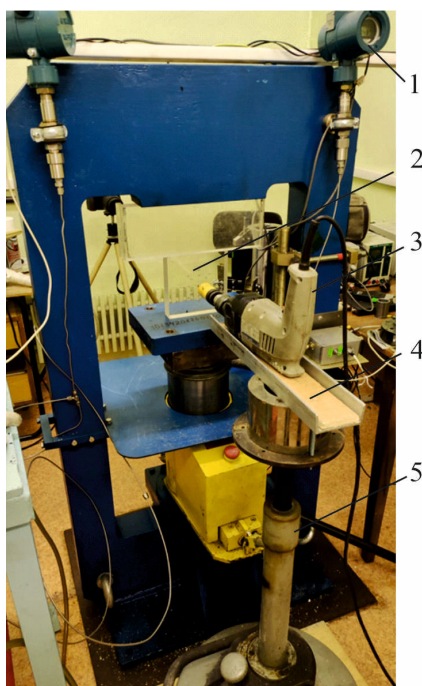


Рис. 1. Фотография гидравлического пресса с измерительной системой, образцом, дрелью с короной для сверления кольцевых щелей в образцах: 1 - манометр, 2 - образец - пластина из оргстекла, 3 - дрель, 4 - направляющий швеллер, 5 - стол с регулируемой высотой

Кольцевую щель в образцах-кубиках из песчано-цементного состава проходили на глубину $h=2D$, в пластинах из оргстекла – насквозь.

Измерение первоначально пытались производить оптическим способом, для этого на поверхности передних граней образцов наносили разметку, состоявшую из проходящих через центр прямых под углами 0, 45, 90 и 135 градусов к горизонтальной оси и также проведенных из центра окружностей диаметрами (рис. 2). Точки пересечения прямых с окружностями принимали как реперные отметки. Однако при имевшейся фоторегистрирующей аппаратуре (разрешение 0.16 мм на пиксел) этот способ не позволил зафиксировать происходящие в процессе нагружения образцов (вплоть до их разрушения) смещения.

Поэтому был применен способ измерения смещений реперных отметок при помощи цифрового штангенциркуля ГМС-150 с паспортной точностью измерений 0.02 мм. Для этого в реперных отметках сверлили отверстия диаметром 2.4 мм и глубиной 10-15 мм, в которые запрессованы металлические стержни диаметром 2.45 мм и длиной 15-20 мм (рис. 3). Измеряли диаметры d_3 , d_4 окружностей по внешним образующим металлических стержней.

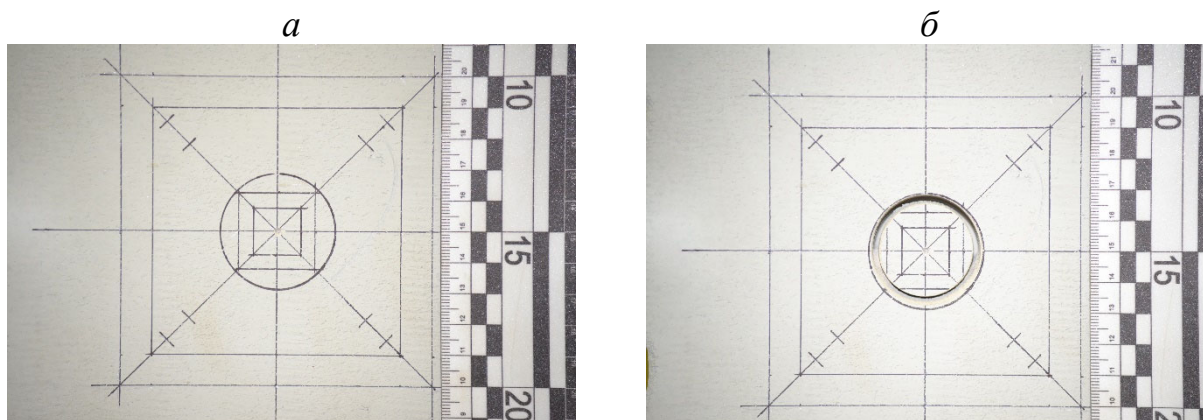


Рис. 2. Фотографии фронтальных поверхностей образцов из песчано-цементного состава с нанесенными реперными отметками до нагружения (*а*) и после нагружения и сверления кольцевой щели (*б*)

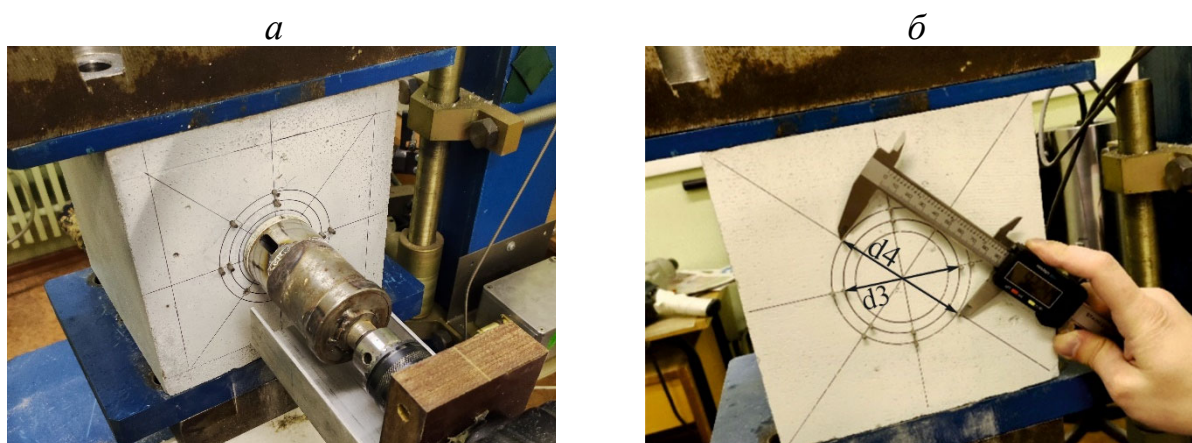


Рис. 3. Фотографии фронтальных поверхностей образцов из песчано-цементного состава с реперными отметками – металлическими стержнями перед сверлением кольцевой щели (*а*) и после нагружения при измерении смещений штангенциркулем (*б*): d_3 , d_4 – диаметры, на которых установлены реперы

Кольцевую щель в образцах проходили коронками диаметрами 35 и 57 мм с алмазным напылением на глубину 60-90 мм, в оргстекле – закаленными коронками такого же диаметра насквозь.

При проходке кольцевых щелей и последующем измерении смещений точек силу F (давление в гидроцилиндре) поддерживали постоянной.

Результаты опытов, их обсуждение

Результаты испытаний с пластиной из оргстекла (180x180x24 мм³) и блоком из песчано-цементного состава (200x200x200 мм³) представлены соответственно в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Расстояния между запрессованными стержнями при испытаниях блока из оргстекла (диаметр коронки 57)

Диаметр - Наклон диаметра к горизонтальной оси в градусах								
	d3-0	d4-0	d3-45	d4-45	d3-90	d4-90	d3-135	d4-135
F=0								
(б) ¹	77.72	92.70	77.44	92.12	77.80	92.68	77.63	92.63
F= 120 кН (Рцилиндра=6 МПа)								
(г)	77.96	92.99	77.22	91.82	77.22	91.95	77.35	92.30
F= 120 кН (Рцилиндра=6 МПа) После образования кольцевой щели								
(е)	78.36	93.31	76.62	91.46	75.95	90.82	76.85	91.90
F=0								
(з)	77.85	92.66	77.44	92.12	77.78	92.64	77.56	92.59

Таблица 2

Расстояния между запрессованными стержнями при испытаниях песчано-цементного блока(диаметр коронки 57 мм)

Диаметр - Наклон диаметра к горизонтальной оси в градусах								
	d3-0	d4-0	d3-45	d4-45	d3-90	d4-90	d3-135	d4-135
F=0								
(б)	77.89	92.97	77.53	92.29	78.45	93.66	77.83	92.79
F= 500 кН (Рцилиндра=25 МПа)								
(г)	77.94	93.02	77.55	92.19	78.36	93.56	77.82	92.19
F= 500 кН (Рцилиндра=4 МПа) После образования кольцевой щели								
(е)	77.98	93.04	77.51	93.12	78.22	93.42	77.84	93.12
F=0								
(з)	77.94	93.00	77.55	93.2	78.40	93.63	77.81	92.78

Анализируя представленные данные можно отметить что в них диапазон смещений при нагружении пластины из оргстекла составляет по горизонтали 0.24-0.61 мм, по вертикали - 0.58-1.86 мм. Для песчано-цементного состава аналогичные величины равны 0.05-0.09 мм и 0.09-0.23 мм. Наблюдаются остаточные смещения, величины которых для оргстекла доходят до 0.13 мм, для песчано-цементного состава – до 0.09 мм. Т.е., измерения смещений таким образом можно производить. Вместе с тем паспортная точность применявшегося измерительного инструмента (0.02 мм) недостаточна для получения достоверных данных, особенно в песчано-цементных блоках.

Как показали испытания, погрешность измерений возникает как в связи с самой процедурой измерения, замеры производились «с рук» (см. рис. 3б), так и с точностью используемого измерительного инструмента. Для качественного улучшения получаемых результатов необходимо разработать оснастку для ис-

¹ Номер в последовательности действий при испытаниях, см. стр. 2-3

пользуемых измерительных инструментов (их механическое позиционирование и фиксацию в определенном положении), кроме того необходимо использование инструмента более высокого класса точности, например, измерительных скоб-микрометров с точностью не ниже 4-5 мкм.

По-видимому, возможно применение фоторегистрирующей аппаратуры с эффективным разрешением до 100 Мп, которые в настоящее время доступны на рынке, применение более совершенной оптики. Оценка возможностей таких фотокамер показывает, что размер пикселя в них может составлять примерно ~0.01 мм, что при увеличении базы измерений также может быть достаточно для получения достоверных данных по смещениям.

Упругая плоская задача для оргстекла

В работе также был проведен численный расчет плоской упругой задачи нагружения квадратной пластины с размерами, соответствующими размерам пластины (см. таблица 1), использовавшейся в опытах с оргстеклом. Для этого использовали метод граничных элементов. Расчёты проводились по программе TWODD, приведенной в [11]. На нагружаемых гранях полагали нормальные напряжения равными $\sigma_n = F/S$, касательные $\tau_n = 0$; на боковых гранях $\sigma_n = \tau_n = 0$. Расчеты проводили для вариантов нагружения пластины без отверстия и с отверстием, свободным от напряжений. В расчетах принимались следующие упругие свойства оргстекла: модуль Юнга $3 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu=0.3$

В таблице 3 представлены изменения диаметров d3 и d4, приведенных в таблице 1, по сравнению с диаметрами недеформированной пластиной, для эксперимента и расчета.

Таблица 3

Сравнение экспериментальных и расчетных изменений диаметров в пластине из оргстекла 180x180x24 мм³ (диаметр коронки 57)

	d3-0	d4-0	d3-45	d4-45	d3-90	d4-90
F= 120 кН						
(г) эксперимент	0.24	0.29	-0.2	-0.3	-0.58	-0.73
(г) расчет	0.262	0.315	-0.196	-0.224	-0.595	-0.735
F= 120 кН После образования кольцевой щели						
(е) эксперимент	0.51	0.65	-0.75	-0.67	-1.85	-1.86
(е) расчет	1.06	1.14	-0.6	-0.6	-2.18	-2.23

В случае нагружения пластины без отверстия расхождение между расчетными и экспериментальными данными за исключением d4-45 не превышает 10%. В случае с отверстием (кольцевой щелью) в столбцах d3-0, d4-0 расхождение значительно выше. Возможно последнее связано с появляющимися в материале образца пластическими деформациями.

Заключение

Проведенные исследования позволили определить основные этапы проведения измерений смещений на поверхности массива, происходящих при его разгрузке при помощи криволинейных щелей.

Отработана методика, в которой для измерения смещений использован цифровой штангенциркуль, определены ее недостатки. Повышение надежности и точности измерений возможно при совершенствовании процедуры замеров смещений и применении инструмента с более высоким классом точности.

Оценена возможность применения при измерении смещений фоторегистрирующей аппаратуры, которая показала, что современные фотокамеры с разрешением до 100 Мп, которые в настоящее время доступны на рынке, позволяют получить достаточную точность.

Сравнение результатов экспериментов на пластинах из оргстекла с численными расчетами показало хорошее соответствие по изменению диаметров поверхности при нагружении, что свидетельствует о правомерности разработанной методики.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00721)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. 891 р.
2. Баклашов И.В. et al. Геомеханика: Учебник для вузов. Том 2. Геомеханические процессы. Москва: МГГУ, 2004. 249 р.
3. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для вузов. Москва: Недра, 1990. 328 р.
4. Ильницкая Е.И. et al. Свойства горных пород и методы их определения. Москва: Недра, 1969. 392 р.
5. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. Москва: Недра, 1989. 270 р.
6. Шкуратник, В.Л. Николенко П.В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс. Москва: МГГУ, 2012. 112 р.
7. Курленя М.В., Попов С.Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. Новосибирск: Наука, 1983. 97 р.
8. Хаст Н., Нильсон Г. Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин // Проблемы инженерной геологии. Вып. 4. Москва: Мир, 1967. Р. 94–105.
9. Зотеев О.В. Геомеханика: учебное пособие для студентов ВУЗов. Екатеринбург: УГГУ, 2003. 252 р.
10. Чанышев А.И., Вологин Д.А. Определение напряженно-деформированного состояния массива пород и дефектности по данным измерений смещений на ее поверхности. Ч. 1: Построение аналитических решений // ФТПРПИ. 2011. № 4. Р. 3–11.

© А. И. Чанышев, Л. В. Городилов, Д. В. Степанов, Е. Н. Шер, 2023