© В.В. Макаров, Л.С. Ксендзенко, А.А. Опанасюк, В.В. Гнитиенко, 2008

УДК 62-75

В.В. Макаров, Л.С. Ксендзенко, А.А. Опанасюк, В.В. Гнитиенко

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ СИЛЬНО СЖАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Семинар № 4

Исследование закономерностей деформирования образцов горных пород в предразрушающей стадии нагружения [3] при $P>P_0$ (P_0 – критическая нагрузка, за которую может быть принят порог дилатансии) показало, что деформирование образца зачастую носит реверсивный характер, заключающийся в изменении знаков приращения продольных и поперечных деформаций на локальных участках измерения (рис. 1).

Дальнейшие исследования [4], проведенные в лаборатории Цзилиньского университета (КНР) показали, что:

1) аномальный характер деформирования имеет место только на образцах, где отмечаются дилатансионные эффекты;

2) деформирование образцов, как по высоте, так и по периметру носит периодический характер, заключающийся в чередовании участков, где имеют место деформационные аномалии, и участков, где одновременно происходит деформирование обычного характера с существенным (аномальным) превышением характерного для данной породы уровнем (рис. 2).

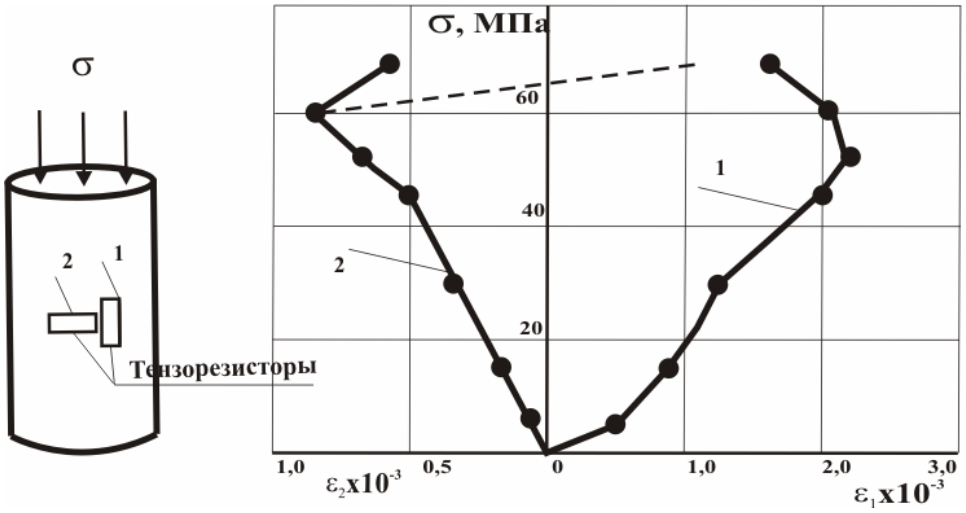
В известной литературе реверсивные деформационные аномалии связываются с упругим восстановлением материала около трещины отрыва (гипотеза упругого восстановления) [5, 6].

Для проверки гипотезы проведена серия экспериментов, анализ которых позволил сделать следующие выводы [7]:

а) установлено, что в горной породе при одноосном сжатии в направлении, перпендикулярном оси образца действуют растягивающие напряжения. Величина их очень незначительна.

б) характер реакции нагруженного образца на образование трещины при таких напряжениях действительно напоминает деформационную аномалию (рис. 1), однако релаксационные процессы быстро нивелируют указанный эффект.

Данные выводы ставят под сомнение правомерность гипотезы упругого восстановления. Однако для ее проверки допустим, что гипотеза верна, горная порода очень хрупка и релаксационные процессы весьма незначительные. Трещина отрыва при одноосном сжатии образца должна распространяться в направлении его оси. В этом случае для того, чтобы обеспечить величину продольной аномалии (рис. 2), поперечная деформационная аномалия должна иметь величину, указанную штриховой линией. То есть «упругое восстановление» должно приводить к сжатию образца в окружном направлении, что физически невозможно.



а) б)

Рис. 1. Реверсивный характер деформирования образцов гранита в предразрушающей области нагружения при сжатии: а) – схема эксперимента; б) – характер деформаций. Штриховая линия показывает величину деформаций, соответствующую гипотезе «упругого восстановления»

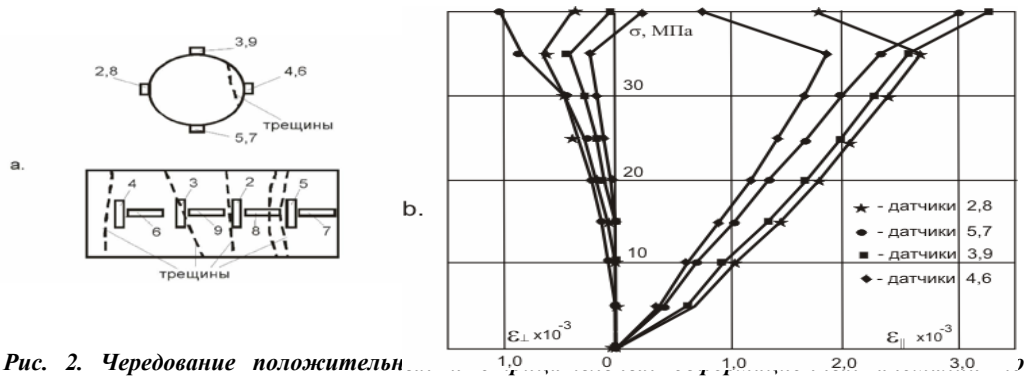
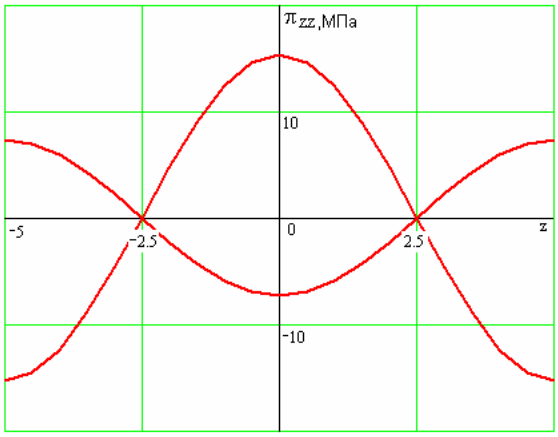


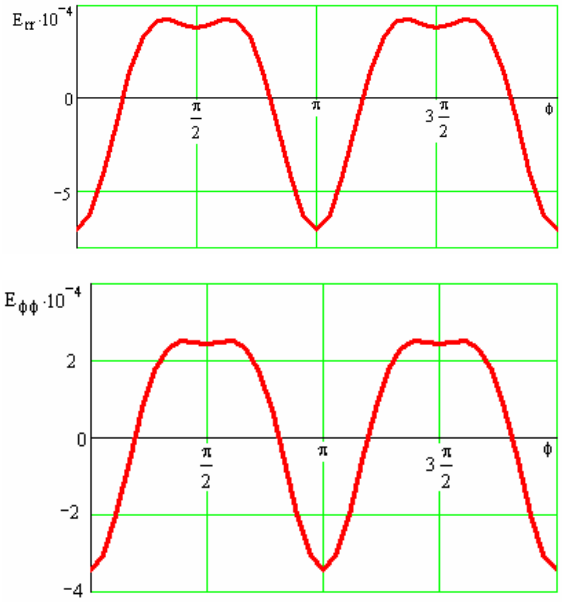
Рис. 2. Чередование положительн периметру образца: а) – схема эксперимента; б) – характер деформаций

Таким образом, гипотеза упругого восстановления деформаций около образующейся в образце горных пород при сжатии трещины, как причина деформационного реверса, должна быть отвергнута.

Теоретические исследования закономерностей деформирования образцов сильно сжатых горных пород проводим с использованием модели среды с самоуравновешенными напряжениями [2]. Образец горной породы в сильно сжатом состоянии моделируется в рамках калибровочного подхода дефектной средой, где перераспределение напряжений опреде-
ляется полем взаимодействующих мезотрещин, возникающих при сжатии на границах минеральных зерен [7].



а)



б)

Рис. 3. Периодический осцилляционный характер деформирования образцов горных пород: а) по высоте образца; б) по периметру образца в центральной части

Распределение деформационных аномалий в сильно сжатом образце определяется по формулам:

$$E_{\varphi\varphi} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0.19\cos\varphi + 0.257\cos 2\varphi + \\ +0.512\cos 4\varphi + 0.56\sin\varphi \end{pmatrix} \times$$

$$\times 10^{-3}\cos\frac{\pi z}{5} - 0.0395\cdot 10^{-3}.$$

$$E_{zz} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} -0.168\cos\varphi - 1.675\cos 2\varphi - \\ -0.595\cos 4\varphi - 0.025\sin\varphi \end{pmatrix} \times$$

$$\times 10^{-3}\cos\frac{\pi z}{5} + 0.152\cdot 10^{-3}.$$

На рис. 3, *а* показано распределение деформаций по высоте образца. Хорошо видно, что эти деформации носят периодический характер при $P>P_0$. Так же периодический характер носит распределение деформаций по периметру образца (рис. 3, *б*).

Сравнивая значения продольных и поперечных деформаций, полученных экспериментальным путем с соответствующими теоретическими значениями, находим, что относительные погрешности δ_φ и δ_z соответственно равны: $\delta_\varphi \approx 43$ % , $\delta_z \approx 16$ %. Резуль-таты теоретических и экспери-ментальных исследований объ-емных деформаций показаны на рис. 4. Хорошо видно полное качественное и удовлетвори-тельное количественное совпа-дение теоретических и экспериментальных результатов.

В результате проведенных исследований:

1) был установлен механизм формирования периодической мезотрещинной структуры образцов горных пород в предразрушающей области нагружения, заключающийся в том, что в условиях сильного неравнокомпонентного сжатия и обусловленного этим мезосдвиговым разрушением на неоднородностях среды, напряжения в образце приобретают осцилляционный периодический характер,

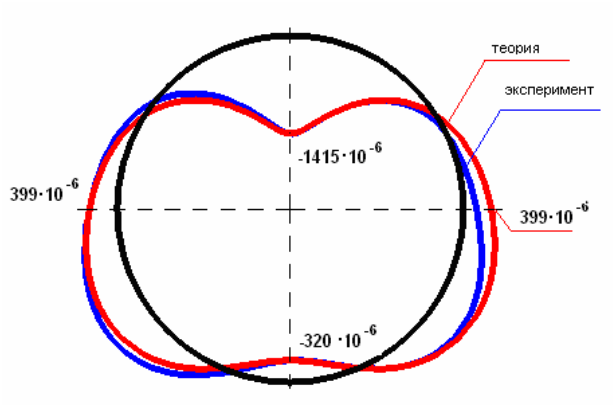


Рис. 4. **Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований**

что имеет следствием развитие на локальных участках действия максимальных нормальных осевых и тангенциальных напряжений очагов концентрации взаимодействующих мезодефектов, а в окрестности очагов – образование относительно разгруженных участков, где деформации приобретают реверсивный характер;

2) разработан метод прогнозирования разрушения образца горных пород, основанный на деформационных предвестниках разрушения, отличающийся тем, что долгосрочный предвестник совпадает с порогом дилатансии породы при сжатии, среднесрочный предвестник соответствует формированию в образце периодической мезотрещинной структуры, а краткосрочный предвестник соответствует моменту перераспределения деформационных аномалий образца, что обусловлено началом развития в нем макроразрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Опанасюк А.А.* Периодический осцилляционный характер деформирования образцов сильно сжатых горных пород.// Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. Сб. науч. трудов. – Донецк: «Норд-Пресс», Вып. № 12, 2006. С. 79 – 80.

2. *Гузев М.А., Макаров В.В., Ушаков А.А.* Моделирование упругого поведения сжатых горных образцов в предразрушающей области.// ФТПРПИ. №6, 2006. С. 3-13.

3. *Макаров В.В., Гузев М.А., Опанасюк А.А.* Исследование деформационных предвестников разрушения образцов горных пород и их математическое моделирование// «Проблемы освоения георесурсов Российского Дальнего Востока и стран АТР», Труды второй междун. научной конференции, Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006, С.58-61.

4. *Research* of deformational Rocks Failure Precursors// V.Makarov, A. Opanasjuk, D.Cheburov and Ma Ry/ First Int. Symp. On Trends & Forecast Soc. Dev. Asia-Pacific Region, Nov.25-26,2003, Vladivostok, Russia.- Pacific Science Review, Special Issue: FESTU-KNU,2003, pp.85-86.

5. *Osamu Idehara, Tokashi Satoh, Osamu Nishizawa, Kinichiro Kusunose.* Hypocenters distribution and focal mechanisms of AE events under triaxial compression. Experimental apparatus and hypocenter distribution// Journal Seismology. Soc. Japan, 1986, v.39, №2, pp. 289-300.

6. *Тажибаев К.Т.* Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. – Фрунзе, Илим, 1989. – 180 с.

7. *Макаров В.В., Николайчук Н.А., Воронцова Н.А.* Деформирование и разрушение горных пород в предельном и запредельном состояниях. Владивосток: Изд-во ДВГТУ,2003. – 142 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Опанасюк А.А., Гнитиенко В.В. – ДВГТУ.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *С.А. Гончаров.*