

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1953. – V. 24. – P. 43-45.
2. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 5. – С. 6-18.
3. Costin L.S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock // Journal of Geophysical Research. – 1983. – V. 88, № B11. – P. 9485-9492.
4. Holcomb D.J. General theory of the Kaiser effect // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1993. – V. 30, № 7. – P. 929-935.
5. Pestman B.J., Van Munster J.G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. – 1996. – V. 33, № 6. – P. 585-593.
6. Pestman B.J., Kenter C.J., VanMunster J.G. Estimation of In-situ Stress Magnitudes from Measurements on Cores // Proceedings of the SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. – 1998. – V. 1. – P. 171-177.
7. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: МГГУ, 2004. – 450 с.: ил.
8. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 1993. – V. 26, № 4. – P. 333-351.
9. Seto M., Nag D.K., Vutukuri V.S. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission and deformation rate analysis // Geotechnical and Geological Engineering. – 1999. – V. 17, № 3, 4. – P. 241-266.
10. Villaescusa E., Seto M., Baird G. Stress measurements from oriented core // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39. – № 5. – P. 603-615.
11. Lehtonen A.V., Särkkä P. Evaluation of rock stress estimation by the Kaiser effect // Proceedings of the International Symposium on In-situ rock stress – In-situ rock Stress Measurement, Interpretation and Application. – 2006. – P. 135-142. Код 74074.
12. Momayez M., Hassani F.P. Application of the Kaiser effect to measure in situ stresses in underground mines // 33<sup>rd</sup> US Symposium on Rock Mechanics, USRMS. – 1992. – P. 979-987.
13. Hsieh A., Dight P. The desirable and undesirable effects on stress reconstruction using the deformation rate analysis (ORA) // ISRM 7<sup>th</sup> International Symposium on In-Situ Rock Stress, Tampere, Finland, 10-12 May 2016. – Tampere, 2016. – P. 213-224.
14. Siegfried R., Simmons G. Characterization of oriented cracks with differential strain analysis // Journal of Geophysical Research. – 1978. – V. 83, № B 3. – P. 1269-1278.
15. Yamamoto K. A theory of rock core-based methods for in-situ stress measurement // Earth, Planets and Space. – 2009. – V. 61, № 10. – P. 1143-1161.
16. Асанов В.А., Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в соляном массиве с использованием эффекта Кайзера // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. междунар. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1999. – С. 147-151.
17. Pestman B.J., Holt R.M., Van Munster J.G. Field application of a novel core-based in-situ stress estimation technique // Proceedings of the SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. – 2002. – P. 81-87.
18. Николенко П.В. Аппаратурное и методическое обеспечение контроля сложного напряженного состояния массива с использованием эффектов памяти в упругих композиционных датчиках // Горн. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). – 2019. – № 2. – С. 97-104.
19. Бельтюков Н.Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: автореф. дис. ...к.т.н.; 25.00.20: защищена 11.04.19 / Бельтюков Николай Леонидович. – Пермь, 2019. – 20 с.

УДК 622.834.52

DOI:10.7242/echo.2019.3.8

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАТИВНОЙ СКОРОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

А.В. ЕВСЕЕВ, А.А. УДАРЦЕВ  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация.** Рассмотрен подход к определению нормативной скорости поперечного деформирования междукамерных целиков. Изложены рекомендации по организации инструментального контроля устойчивости на основе измерения горизонтальной конвергенции.

**Ключевые слова:** междукамерный целик, устойчивость, скорость деформирования, поперечная деформация, горизонтальная конвергенция.

Контроль состояния выработанного пространства и изучение процессов деформирования элементов системы разработки играет важную роль при освоении месторождений полезных ископаемых подземным способом. В результате визуального обследования и инструмен-

тальных измерений оценивается состояние целиков и кровли выработок. На основе полученных данных корректируются параметры ведения горных работ и принимается решение о необходимости закладки или других мерах охраны. Наряду с геотехническим контролем, получаемая информация о деформации выработок может использоваться для установления эмпирических зависимостей между процессами в шахте и на земной поверхности и является параметрическим обеспечением для математического моделирования процессов деформирования подработанной толщи. Многолетними шахтными и лабораторными исследованиями установлено, что наиболее физически обоснованными являются деформационные критерии разрушения, дающие возможность достаточно надежно фиксировать стадию предразрушения приконтурного массива. Измерениями деформаций массива в окрестности очистных камер, проводимым по контурным и глубинным реперам, установлено, что наиболее информативным показателем, который с высокой степенью надёжности отражает геомеханическую обстановку на участке, является поперечная деформация целиков [1]. На основании полученных закономерностей разработана система непрерывного дистанционного контроля устойчивости междукамерных целиков. В качестве контролируемого параметра используется относительная поперечная деформация целиков [2].

Одним из важных вопросов при проведении инструментального контроля устойчивости междукамерных целиков на основе деформационных критериев является определение нормативной скорости относительного поперечного деформирования. Прямое определение критических величин, соответствующих переходу целиков в стадию прогрессирующей ползучести, в натуральных условиях невозможно по причине отсутствия экспериментальных участков с требуемыми для эксперимента условиями. Предварительные оценки, выполненные методами математического моделирования, показали, что при увеличении скорости поперечного деформирования целиков до 50 мм/м в год происходит резкое снижение несущей способности целиков и их переход в стадию прогрессирующей ползучести [3]. При проведении непрерывных измерений критерием перехода целиков в стадию интенсивного разрушения может служить также ускорение – увеличение скорости деформирования целиков в 2 раза и более за год.

Из-за невозможности оценки нормативных скоростей деформирования междукамерных целиков в натуральных условиях, выполнены лабораторные исследования по определению этой величины косвенным методом. На первом этапе проведены реологические испытания образцов сильвинита и определена скорость их ползучести в зависимости от прилагаемой нагрузки. На втором этапе в ходе испытаний образцов большого размера и по результатам инструментального контроля целиков в шахте определено соотношение между продольной и поперечной деформациями. На основании полученных соотношения выполнен переход и определена скорость поперечного деформирования образцов в зависимости от степени нагружения.

Для определения скорости продольного деформирования соляных образцов под действием постоянной нагрузки проведены длительные испытания на ползучесть в режиме ступенчатого нагружения (рис. 1). Перед проведением испытаний на ползучесть для установления базовых уровней нагружения определялся условно-мгновенный предел прочности. Испытание осуществлялось на образцах кубической формы с размерами 50x50x50 мм. Степень нагружения составляла от 0,3 до 0,7 от предела прочности на одноосное сжатие. Для получения скорости установившейся ползучести время выдержки образцов на каждой ступени составляло от 7 до 15 суток.

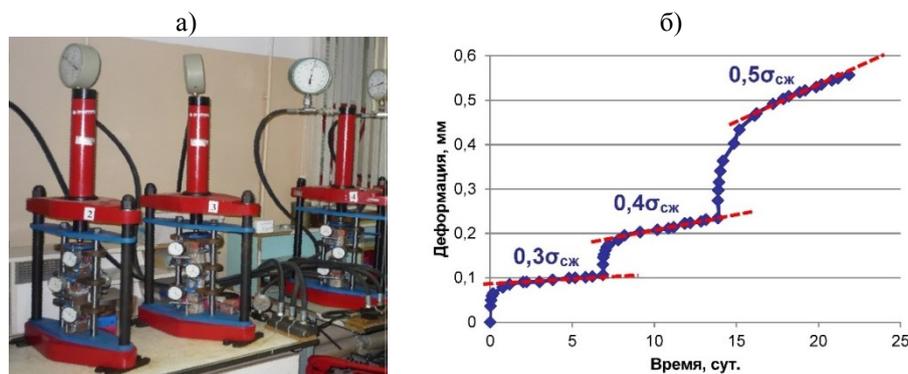


Рис. 1. Реологические установки (а) и схема определения скорости установившейся ползучести (б)

Для получения распределения поперечных деформаций по сечению образца проведено испытание на одноосное сжатие образцов кубической формы большого размера (300х300х300 мм). В процессе нагружения строилось поле деформаций на поверхности и измерялась поперечная деформация в среднем сечении на различном удалении от контура. Для изучения поперечного расслоения внутри образца на различном удалении от контура закреплялись глубинные марки. Контроль деформаций образца и перемещения глубинных марок в процессе испытаний осуществлялся с помощью бесконтактной трехмерной оптической системы Vic-3D фирмы «Correlated Solutions». С помощью данного инструмента имитируется использование экстензометра на поверхности образца между двумя точками [4]. Применение данной системы обусловлено высокой эффективностью и точностью измерения, основывающегося на методе корреляции цифровых изображений. Метод позволяет восстанавливать поле векторов перемещений на поверхности исследуемых образцов или элементов конструкций путем сопоставления опорного изображения (фотографии объекта в исходном состоянии) с изображениями, снятыми в процессе нагружения. (рис. 2). Испытание проводилось на гидравлическом прессе ToniNorm с максимальной нагрузкой 5000 кН.

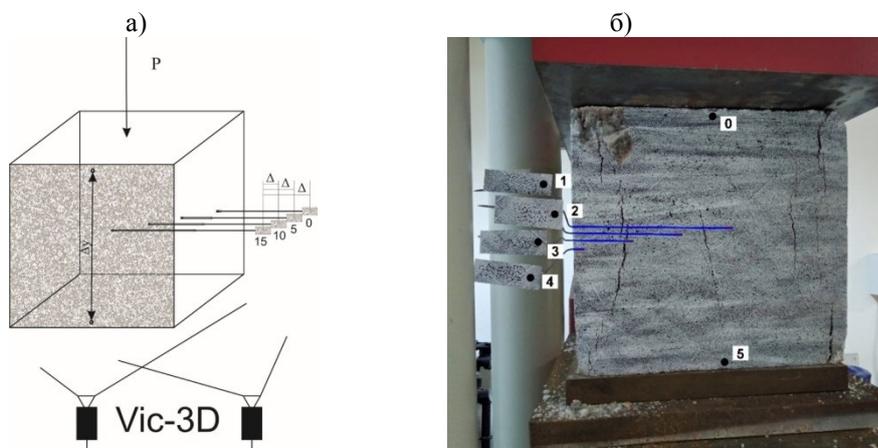


Рис.2. Схема определения перемещения глубинных марок (а) и фотография образца в процессе эксперимента (б)

По результатам испытаний определена скорость установившейся ползучести образцов в зависимости от степени нагружения. Экспериментально установлено, что переход на последующую степень нагружения (увеличение нагрузки на образец на 0,1 от среднего предела прочности на сжатие) сопровождается увеличением скорости установившейся ползучести в 3 раза. Испытания образцов большого размера показали, что их деформирование идет равномерно по сечению, при больших деформациях соотношение поперечных деформаций к продольным составляет около 1,3. Обобщение всего объема экспериментальных данных позволило определить зависимость поперечной деформации образцов от степени нагружения.

Полученные в ходе лабораторных исследований данные удовлетворительно согласуются с результатами математического моделирования. Увеличение степени нагружения выше 0,4 (допустимая степень нагружения согласно «Указаний...» [6]) сопровождается увеличением скорости поперечного деформирования до 50-100 мм/м в год. Результаты шахтных измерений свидетельствуют о том, что для оценки устойчивости целиков на начальном этапе их деформирования можно использовать как измерения по глубинным реперам, так и по контурным. В случае развития локальных зон разрушения в краевой части выработки и достижения критической скорости поперечного деформирования целиков (50-100 мм/м в год), для уточнения их состояния рекомендуется проведение дополнительных измерений с использованием глубинных реперов. Проведение регулярного инструментального контроля состояния целиков увеличивает информативность обследования выработанного пространства. Данные о деформировании междукамерных целиках дополняют результаты измерения оседаний земной поверхности, а в случае отсутствия на земной поверхности профильных линий, служит основным количественным показателем устойчивости междукамерных целиков.

На основании проведенных исследований разработана методика инструментального контроля состояния отработанных камер. Рекомендовано визуальное обследование выработанного пространства совмещать с измерением горизонтальной конвергенции. Для измерений могут

применяться лазерные рулетки, обеспечивающие точность 2 мм. Пункты контроля должны располагаться в средней по длине части камеры. Для получения достоверных результатов при проведении инструментального контроля измерения горизонтальной конвергенции должны проводиться в наибольшей по ширине части камеры на высоте 1,5 – 1,7 м от почвы выработки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-45-590681 p\_a).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.
2. Evseev A., Baryakh A., Butirin P. Instrumental Monitoring of Interchamber Pillar-Stability / A. Evseev, A. Baryakh, P. Butirin // ISRM European Rock Mechanics Symposium Eurock. – 2017. – V. 191. – P. 962-966. WOS – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.267.
3. Baryakh A., Lobanov S., Lomakin I., Tsayukov A. Mathematical modeling of limit states for load bearing elements in room-and-pillar mining of saliferous rocks // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: International European Rock Mechanics Symposium. EUROCK 2018 / Taylor & Francis Group. – St.-Peterbourg, 2018. – V. 1. – P. 767-773.
4. Ударцев А.А. Использование оптической системы Vic-3D для изучения полей деформаций при испытании образцов горных пород / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – с. 128-132. DOI:10.7242/gdsp/2018.16.33.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2019.3.9

### АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД С ДЕФЕКТОМ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

А.А. УДАРЦЕВ

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Рассмотрен подход определения начала трещинообразования и эволюции трещин на образцах горных пород Верхнекамского месторождения калийных солей с помощью использования бесконтактной трехмерной оптической системы VIC-3D.

**Ключевые слова:** диаграммы деформирования, поле деформаций на образцах горных пород, корреляция цифровых изображений, инициирование трещин.

Деформационные процессы, протекающие в грузонесущих элементах камерной системы разработки Верхнекамского месторождения калийных солей, требуют проведения дополнительных лабораторных исследований по изучению трещинообразования на образцах соляных пород. Основные методы изучения начала зарождения трещин при лабораторных испытаниях кристаллических пород с низкой пористостью, основывались главным образом на измерениях боковых или объемных деформаций [1, 2]. В настоящее время, проведение подобных исследований дополняются методами корреляции цифровых изображений, позволяющих проводить локализацию полей деформаций образцов горных пород при различных режимах и схемах нагружения.

Анализ экспериментально полученных зависимостей напряжений от осевых, боковых и объемных деформаций при одноосном сжатии (рис. 1), полученных с применением датчиков, установленных непосредственно на образец, позволил выделить основные точки, характеризующие:

- закрытие имеющихся в образце пор и трещин (появление упругих продольных деформаций);

- зарождение новых трещин (появление неупругих продольных деформаций);

- начало дилатансии (изменение знака производной функции объемной деформации);

- рост и объединение трещин в магистральные (максимальная сжимающая нагрузка).

Применение метода корреляции цифровых изображений при испытаниях позволяет получать информацию по всей исследуемой поверхности образца, что значительно увеличивает точность измерений при изучении картины трещинообразования в горных породах.