

2. Ломакин И. С. Деформирование и разрушение несущих элементов камерной системы разработки в условиях слоисто-неоднородного строения породного массива: дис. ... к.т.н.: 25.00.20 / Ломакин Иван Сергеевич. – Пермь, 2015. – 197 с.
3. Baryakh A.A., Samodelkina N.A. To the calculation of pillar stability under condition of chamber mining // Journal of Mining Science. – 2007. – V. 43, № 1. – P. 8-16.
4. Zienkiewicz O.S., Taylor R.L., Fox D.D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – 7th edition. – Oxford: Butterworth-Heinemann, Waltham, 2014. – 672 p. – DOI: 10.1016/C2009-0-26332-X.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.

УДК 552.53

DOI:10.7242/echo.2022.4.8

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ СИЛЬВИНИТА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

И.А. Пантелеев¹, А.С. Соколов², А.А. Барях²
¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь
²Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: С использованием микротомографа SkyScan 1272 Bruker проведена съемка образца красного сильвинита размером 20×18×21 мм, включающего две минеральные фазы, соответствующие сильвину и галиту. На основе трехмерных рентгеновских томографических изображений определены объемное содержание каждой фазы и заполненные воздухом нарушения сплошности материала (поры, микротрещины, межзеренные контакты). Для нарушений сплошности вычислены характерные максимальный линейный размер, объем и коэффициент сферичности. Показано, что по объему все выделенные объекты разделяются на пять групп, четыре из которых представляют пороподобные дефекты, а одна – трещиноподобные дефекты.

Ключевые слова: сильвинит, томография, морфологический анализ, поры, трещины.

Введение

В результате многолетних экспериментальных исследований деформационного поведения соляных пород Верхнекамского месторождения при различных видах нагружения показано, что коэффициент вариации механических и прочностных свойств может превышать 30% даже для образцов, изготовленных из одного монолита [1]. Причины такого разброса значений многообразны [2]: вариации объемного содержания различных минералов, вариация среднего размера зерен, наличие разномасштабных несплошностей различной природы, содержание глинистого материала, влажность и т.д.

Петрологическое описание конкретных образцов, характеристика их внутренней структуры, как правило, базируются на описании шлифов и результатах сканирующей (растровой) электронной микроскопии (РЭМ). Шлифы подходят для оценки истории образования и формирования породы, однако возможности детального описания строения с помощью этого метода весьма ограничены ввиду низкого разрешения (не выше толщины шлифа, около 5-40 мкм), присутствия минеральных зерен различной оптической плотности, которые не всегда позволяют с достаточной точностью провести интерпретацию изображения. С другой стороны, при исследовании шлифов есть возможность получения изображений в скрещенных и параллельных николях, что позволяет определять ориентацию кристаллов. РЭМ дает изображения высочайшего разрешения до единиц нм, но они являются двухмерными проекциями трехмерных поверхностей сколов. Основным недостатком вышеперечисленных методов является их двухмерность и

возможное нарушение структуры. При этом для понимания и моделирования различных физико-механических процессов, происходящих в породах, необходимо иметь детальное представление о ее трехмерном строении, распределении по объему различных минеральных фаз, несплошностей различного типа, включая поры и микротрещины.

Альтернативным неразрушающим методом, позволяющим получать трехмерные изображения внутреннего строения материала, является метод рентгеновской микротомографии [3, 4]. При разработке нефтегазовых или рудных месторождений томографическое исследование кернов фактически стало стандартом при оценке содержания полезных ископаемых и пористости горных пород. Данный метод в сочетании с другими методами неразрушающего контроля показал свою эффективность при изучении механизмов деформирования и разрушения ряда кристаллических и осадочных горных пород [5-7].

Данная работа посвящена изучению возможностей использования метода рентгеновской микротомографии для качественного и количественного описания внутренней структуры соляных пород на примере образца красного сильвинита.

Объект и метод исследования

Для демонстрации возможностей метода рентгеновской микротомографии из монолита красного сильвинита был вырезан кубический образец размером 20×18×21 мм. Фотография образца представлена на рис. 1. На рис. 1 молочно-белый, красный, розовый оттенок соответствует сильвину, а голубой, бело-серый и серый, прозрачный – галиту.



Рис. 1. Фотография образца красного сильвинита

Для изучения внутренней структуры образца красного сильвинита была проведена его томографическая съемка на микротомографе SkyScan 1272 Bruker. Съемка осуществлялась со следующими параметрами: напряжение на рентгеновской трубке 100 кВ, ток 100 мкА, разрешение (размер ребра вокселя) 12 мкм, время экспозиции 3000 мкс, шаг вращения образца 0.3° со съемкой на 360° . Продолжительность съемки образца составила 8 часов 12 минут. Для минимизации влияния граничных эффектов осуществлялась съемка объема материала в средней (по высоте) части образца. При заданном пространственном разрешении высота отснятой области образца составила 8.52 мм. Полученный стек из 750 теневых проекций был реконструирован в набор двумерных поперечных сечений с применением методики компенсации ошибки в определении положения образца, как правило, вызванной дрейфом эмиттера источника рентгеновского излучения, тепловым расширением объекта съемки внутри или случайными механическими вибрациями. Последующая обработка набора двумерных поперечных сечений в ПО STAn включала фильтрацию изображений для улучшения контрастности границ, удалении единичных спеклов и исключении приграничного слоя материала на каждом из сечений. Далее полученные изображения были использованы для количественного анализа внутренней структуры образца.

Полученные результаты

На рис. 2а представлено реконструированное трехмерное изображение образца красного сильвинита. На нем отчетливо выделяются две минеральные фазы, светлая и темная, соответствующие сильвину и галиту. Также видно, что поверхность образца «покрыта» сеткой микротрещин, расположенных преимущественно в одной из минеральных фаз. Для количественной оценки объемного содержания каждой из фаз, а также несплошностей, представленных порами, микротрещинами и межзеренными границами, была реализована сегментация томографических изображений с применением глобального порогового значения [3]. Суть метода заключается в поиске порогового значения для гистограммы градаций серого, позволяющего выделить на изображении области с одинаковым или близким цветом, соответствующие одному и тому же физическому объекту. После сегментации изображения подвергаются дополнительной фильтрации и обработке для повышения однородности выделенных областей. На рис. 2б представлена модель внутреннего строения образца сильвинита, полученная в результате реализации процедуры сегментации.

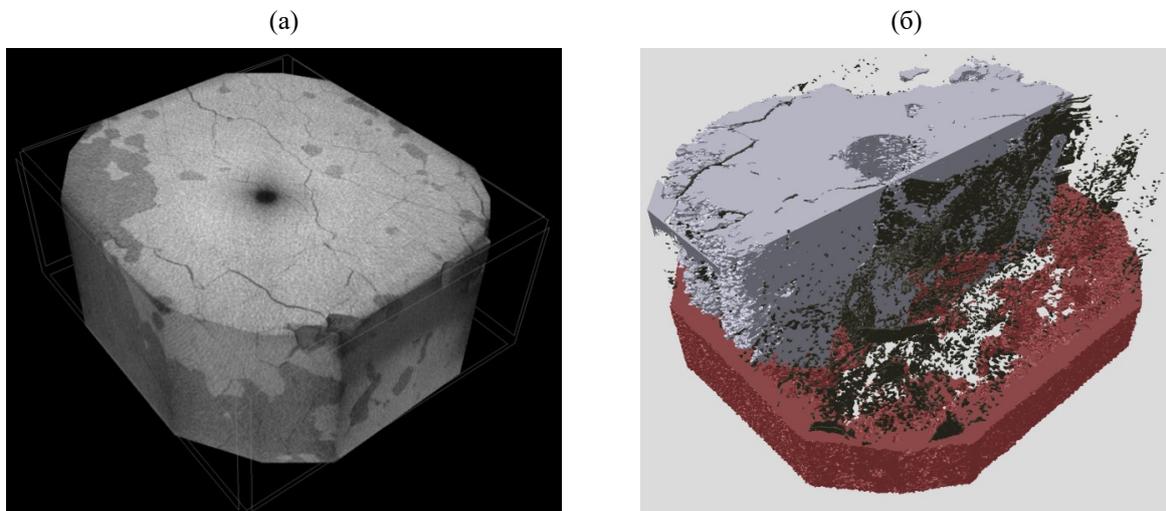


Рис. 2. Реконструированное трехмерное изображение образца сильвинита (а) и 3D-модель сильвинита, полученная в результате сегментации томографических изображений (б)

Цветом на 3D-модели показаны две минеральных фазы, черным – несплошности породы, заполненные воздухом. Выделение на томографических изображениях отдельных структурных составляющих позволило определить их объемное содержание в отснятом объеме сильвинита. Так, объемное содержание «светлой» минеральной фазы (сильвин) составило 62.234%, «темной» (галит) – 37.276%, тогда как несплошности занимают в объеме породы 0.49%.

Для количественного морфологического анализа нарушений сплошности сильвинита была реализована процедура (ПО СТАн) выделения отдельных объектов на 3D-изображении с последующей оценкой следующих их параметров: объем, максимальный линейный размер, коэффициент сферичности. На рис. 3а представлено трехмерное изображение нарушений сплошности образца сильвинита с цветовой градацией их максимального линейного размера. Из гистограммы распределения несплошностей по размеру (рис. 3б) видно, что преобладают объекты характерным размером от 80 мкм до 800 мкм, длина отдельных микротрещины сопоставима с характерным размером отснятого объема материала.

Анализ распределения найденных объектов – нарушений сплошности по их объему показал (рис. 4а), что распределение является мультимодальным с четырьмя локальными максимумами, соответствующими объему в 50, 85, 120 и 135 вокселей (объем одного вокселя $1.73 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$). Таким образом, по объему можно выделить пять характерных групп объектов, четыре из которых связаны с соответствующими максимумами, а пятый представлен крупными объектами объемом более 10^{-3} мм^3 . Для преобладающего количества объектов из четырех групп коэффициенты сферичности больше 0.5 (рис. 4б), что позволяет отнести их к порам или пороподобным дефектам. Для объектов пятой группы коэффициент сферичности стремится к нулю с увеличением объема, что позволяет охарактеризовать их как микротрещины или трещиноподобные дефекты.

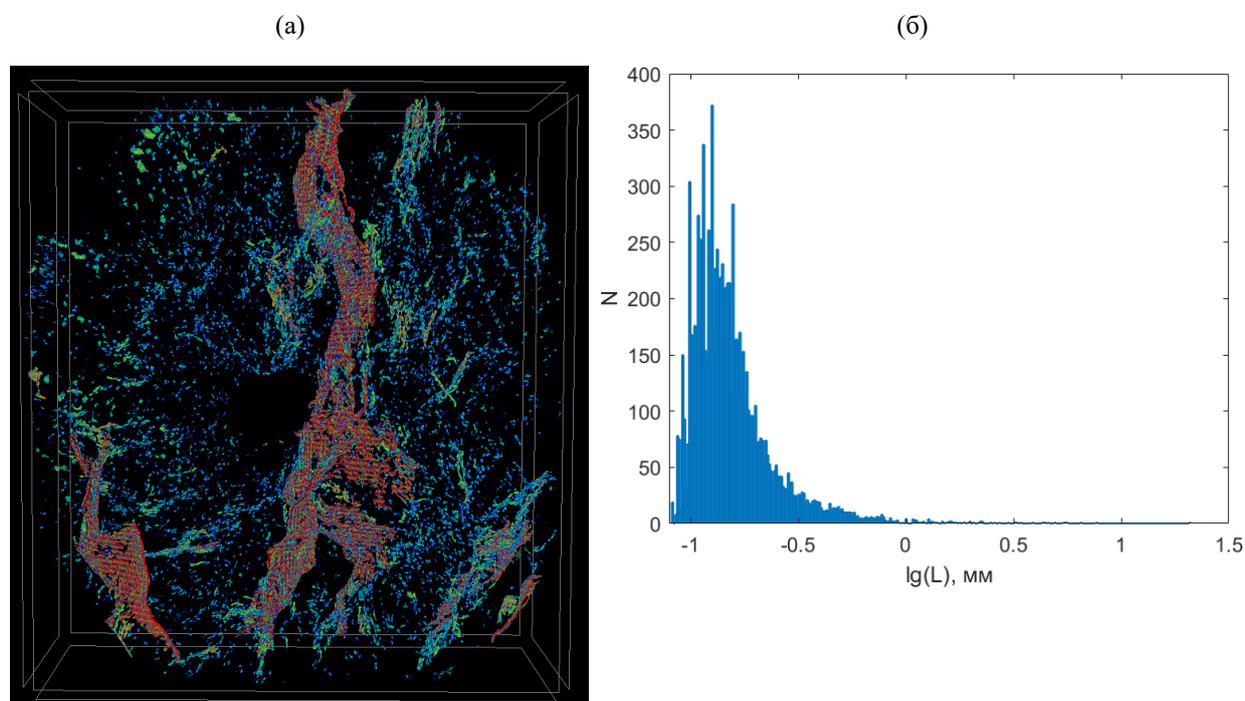


Рис. 3. Трехмерное изображение несплошностей образца (цветовая палитра показывает градацию выделенных объектов по максимальному линейному размеру) (а) и гистограмма распределения несплошностей по максимальному линейному размеру (б)

Заключение

В результате проведенного исследования на примере образца красного сильвинита показано, что метод рентгеновской микротомографии является эффективным инструментом для изучения внутренней структуры соляных пород. На основе полученных поперечных сечений центральной части образца построено его трехмерное изображение. С использованием метода глобального порогового значения проведена сегментация томографических изображений, выделены две минеральные фазы и нарушения сплошности материала, заполненные воздухом, определено относительное объемное содержание каждой из фаз.

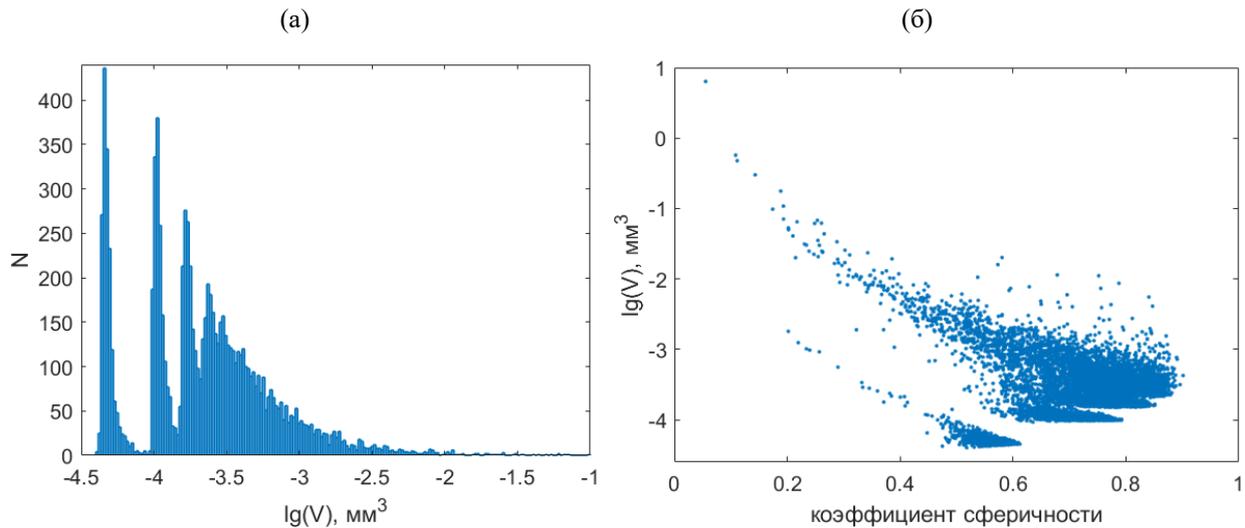


Рис. 4. Гистограмма распределения несплошностей по объему (а) и сопоставление коэффициента сферичности и объема каждого из найденных объектов (б)

Для характеристики нарушений сплошности сильвинита реализована процедура выделения отдельных объектов с вычислением количественных характеристик: определены характерные максимальный линейный размер и объем объектов, а также коэффициент сферичности. Показано, что по объему все выделенные объекты разделяются на пять групп, четыре из которых представляют несплошности типа пор или пороподобных дефектов, а одна – микротрещины или трещиноподобные дефекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.
2. Каблинов О.С., Чайковский И.И. О влиянии формы выделения глинистого материала на прочность каменной соли // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 3-6. – DOI: 10.7242/echo.2021.2.1
3. Герке К.М., Корост Д.В., Карсанина М.В., Корост С.Р., Васильев Р.В., Лаврухин Е.В., Гафурова Д.Р. Изучение и анализ современных подходов к построению цифровых моделей ядра и методов моделирования многофазной фильтрации в масштабах порового пространства // Георесурсы. – 2021. Т. 23, № 2. – С. 197-213. – DOI: 10.18599/grs.2021.2.20.
4. Gerke K.M., Skvortsova E.V., Korost D.V. Tomographic method of studying soil pore space: Current perspectives and results for some Russian soils // Eurasian Soil Scitnce. – 2012. – V. 45, № 7. – P. 700-709. – DOI:10.1134/S1064229312070034.
5. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р., Фролов Д.И. Структура деформируемого гетерогенного материала по данным акустической эмиссии и рентгеновской микротомографии // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, № 7. – С. 1353-1357. – DOI: 10.21883/FTT.2018.07.46122.017.

6. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Корост Д.В., Дамаскинский К.А. Структурно-энергетические закономерности накопления повреждений при деформировании гетерогенного материала // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, № 1. – С. 103-109. – DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50406.189.
7. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Кадомцев А.Г., Наймарк О.Б. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатии // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59, № 5. – С. 920-930. – DOI:10.21883/FTT.2017.05.44381.364.
8. Корост Д.В., Арискин А.А., Пшеницын И.В., Хомяк А.Н. Рентгеновская компьютерная томография как метод реконструкции 3D-характеристик рассеянных сульфидов и шпинелида в плагиодунитах Йоко-Довыренского интрузива // Петрология. – 2019. – Т. 27, № 4. – С. 401-419. – DOI: 10.31857/S0869-5903274401-419.
9. Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскурт В.О., Иванов М.К. Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов // Геология нефти и газа. – 2010. – № 2. – С. 36-42.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2022.4.9

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬВИНИТА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

А.А. Ударцев, И.Л. Паньков
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Проведены лабораторные испытания при одноосном сжатии сильвинита в режиме ползучести и условно-мгновенного нагружения. Эксперименты на ползучесть осуществлялись при нагрузках составляющих 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7 и 0,8 от предела прочности на одноосное сжатие. Получены полные диаграммы деформирования и кривые ползучести, а также зависимости изменения поперечных деформаций. Установлены отличительные особенности изменения поперечных деформаций при ползучести и условно-мгновенном нагружении.

Ключевые слова: условно-мгновенное сжатие, одноосная ползучесть, продольная и поперечная деформация.

Одной из важных задач для обеспечения безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) является контроль устойчивости элементов камерной системы разработки. В большинстве случаев это решается путём геодезических измерений по сети профильных линий на поверхности и визуального обследования выработанного пространства в шахте. Вместе с тем в ряде случаев требуется получение количественной оценки интенсивности протекающих процессов путём проведения инструментальных измерений деформаций в выработках. Контролирование процессов деформирования подземных горных выработок на рудниках ПАО «Уралкалий» осуществляется с использованием наблюдательных станций, представляющих собой систему контурных и глубинных реперов, закладываемых в кровлю и стенки выработок [1]. Многолетними шахтными измерениями деформаций массива в окрестности очистных камер, проводимыми по контурным и глубинным реперам, установлено, что наиболее информативным показателем, который с высокой степенью надёжности отражает геомеханическую обстановку на участке, является поперечная деформация целиков [2]. С целью более детального изучения процессов деформирования и механизма разрушения междукамерных целиков в поперечном направлении, а так же установления связи между продольной и поперечной деформацией, был проведен комплекс лабораторных испытаний на одноосное сжатие в режиме ползучести и условно-мгновенного нагружения сильвинитовых образцов.