

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕННОЙ СОЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ПАЛЕОНАПРЯЖЕНИЙ

В.Н. Токсаров

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассматривается возможность использования микроструктурных особенностей каменной соли и других пород для оценки максимальной величины палеонапряжений. Показано, что в режиме установившейся ползучести каменной соли существует связь между разностью главных напряжений и следующими микроструктурными параметрами: размер рекристаллизованного зерна, размер субзерна и плотность свободных дислокаций. Размер рекристаллизованного зерна является наиболее надежным индикатором величины девиаторного напряжения, а плотность свободных дислокаций, вероятно, наименее надежным. В статье приведены основные формулы и описаны методики оценки дифференциальных напряжений в породном массиве на основе лабораторных исследований.

Ключевые слова: каменная соль, размер субзерна, плотность свободных дислокаций, рекристаллизованное зерно, дифференциальные напряжения, пластовая соль, соляной купол, палеонапряжения, микроструктуры.

1. Введение

С точки зрения геомеханики результаты исследования микроструктурных особенностей различных пород важны для обоснования оценки максимальных значений палеонапряжений, являющихся основной причиной деформирования пород во времени.

Возможно ли распознать прошлую активность конкретного механизма деформации и исходя из этого определить реологические условия во время деформации? Исследователи дают на этот вопрос в основном утвердительный ответ, мотивируя тем, что механизмы деформации создают относительно характерные микроструктуры, которые можно наблюдать в лабораторных условиях на шлифах [1]. При этом необходимо учитывать, что «память» породы может быть неполной; может сохраниться только самый поздний механизм деформации. В работе [1] отмечается, что «как только будет установлен действующий механизм деформации на основе микроструктур, можно приступить к прогнозированию условий температуры, напряжения и скорости деформации во время деформации, что является основной причиной изучения микроструктур».

Исследователями установлено, что в режиме установившейся ползучести каменной соли (и др. пород) существует связь между уровнем дифференциальных напряжений и следующими микроструктурными параметрами: размером рекристаллизованного зерна, размером субзерна и плотностью свободных дислокаций.

2. Взаимосвязь между дифференциальным напряжением и размером рекристаллизованного зерна

Рекристаллизацией называется процесс удаления внутренней энергии деформации, которая остается в зернах после восстановления; она образует границы зерен под большим углом, которые отделяют относительно свободные от деформации зерна друг от друга. В горных породах перекристаллизованная микроструктура характеризуется зернами без волнообразного угасания и с относительно прямыми границами зерен, которые сходятся под углами около 120° .

Рекристаллизация в поле анизотропных напряжений (т.е. дифференциальных напряжений) называется динамической рекристаллизацией. Динамическая рекристаллизация приводит к уменьшению размера зерен, что хорошо известно по лабораторным исследованиям.

Рекристаллизация, происходящая в условиях изотропных напряжений или когда снимается дифференциальное напряжение, называется статической рекристаллизацией, в противном случае известной как отжиг. С точки зрения микроструктуры единственное, что отличает статическую рекристаллизацию от динамической, это относительно больший размер перекристаллизованного зерна. Статическая перекристаллизация снижает энергию внутренней деформации за счет образования относительно крупных зерен без деформации, которые растут, уменьшая общую свободную энергию породы.

Исследования динамической рекристаллизации осложняются двумя различными механизмами, которые приводят к разной деформации микроструктуры: (1) ротационная рекристаллизация (иногда называемая рекристаллизацией *in situ*), при которой постепенное увеличение разориентации субграниц после начальной полигонизации дислокационных структур в конечном итоге приводит к появлению новых границ зерен под большим углом; (2) миграционная рекристаллизация (или рекристаллизация путем миграции границ, вызванной напряжением), при которой миграция разрушения существующих границ зерен проходит через деформированную микроструктуру, заменяя полигонизированный материал новыми областями, свободными от деформаций.

Появление рекристаллизованных зерен обусловлено образованием и движением дислокаций, которые, в свою очередь, зависят от величины дифференциального напряжения. Следовательно, можно ожидать, что существует взаимосвязь между размером перекристаллизованных зерен и величиной дифференциального напряжения. Действительно, эксперименты показали, что характерный диапазон размеров зерен имеет место при определенных условиях напряжения и механизме рекристаллизации. Это означает, что потенциально возможно оценить уровень палеонапряжения по результатам изучения микроструктур, то есть размер перекристаллизованного зерна можно использовать в качестве палеопьезометра [1-6]. Как отмечается в [1] «это потенциально это очень мощный инструмент для понимания деформации, поскольку палеонапряжение, как известно, является сложным параметром для оценки». Хотя в процессе дискуссий точное соотношение не установлено, но общепризнано, что размер перекристаллизованного зерна обратно пропорционален величине дифференциального напряжения

$$\sigma_d = A \cdot d^{-i}, \quad (1)$$

где σ_d – дифференциальное напряжение ($\sigma_1 - \sigma_3$), A и i – эмпирически полученные параметры для минерала, d – размер зерен в микрометрах (мкм).

Необходимо учитывать, что палеопьезометрия сопряжена со значительной неопределенностью. В целом небольшой размер перекристаллизовавшихся зерен в деформированной породе отражает высокую скорость деформации, большую величину дифференциального напряжения или сочетание того и другого. Эксперименты с горными породами показывают, что соответствующая функция напряжений при перекристаллизации имеет вид $f(\sigma) = \sigma^n$, поэтому ее также называют ползучестью с усилением [1, 2]. Значение n – показатель напряжения, который изменяется, но обычно находится в диапазоне от 2 до 5 для обычных мономинеральных пород.

3. Взаимосвязь между дифференциальным напряжением и размером субзерна на примере каменной соли

Расчеты дифференциальных напряжений и скоростей деформаций в большинстве материалов, деформирующихся в результате процессов дислокационной ползучести, показали, что размер установившегося субзерна обратно пропорционален дифференциальным напряжениям и не зависит от других переменных [6]

$$D = k\sigma_d^{-m}, \quad (2)$$

где D – средний размер субзерна, μm ; σ – величина дифференциального напряжения, МПа; k и m – материальные константы.

По другим данным при расчете средних размеров субзерен, полученных в процессе динамического восстановления, в формулу добавляется модуль упругости [7]

$$D = k(\sigma_d/E)^{-m}, \quad (3)$$

E – модуль упругости, ГПа.

Исследованиями установлено, что размер субзерен монотонно уменьшается с увеличением разницы напряжений, независимо от температуры и деформации ($> 1\%$).

Для определения среднего размера субзерен шлифы галита анализируются с использованием микроскопии в проходящем и отраженном свете. Перед экспериментом соляные пластины протравливаются в течение 30–50 секунд в различных растворах (5-мольный раствор NaCl, ледяная уксусная кислота и т.д.).

Обзор микроструктурных исследований природных солей показал, что диапазон величины дифференциальных напряжений в массиве составляет $0,5 \div 5,5$ МПа [8]. Предварительно установлено, что величина девиаторных напряжений в соляном массиве может зависеть от степени деформированности соли и наличия в ней примеси.

4. Взаимосвязь между дифференциальным напряжением и плотностью свободных дислокаций на примере каменной соли

В экспериментах по стационарному деформированию кристаллических материалов плотность свободных дислокаций достигает значения, которое напрямую связано с величиной приложенного дифференциального напряжения. Таким образом, исследователями было сделано предположение, что плотность дислокаций может служить показателем уровня дифференциального напряжения, присутствующего при разрушении горных пород в геологических условиях [2, 9, 10].

Использование плотности дислокаций в качестве палеопьезометра для естественно деформированных пород имеет некоторые ограничения [2], которые связаны с довольно высокой скоростью, с которой плотность дислокаций изменяется в ответ на изменение уровня напряжения. В результате плотность дислокаций, измеренная в естественно деформированной породе, будет свидетельствовать в первую очередь о последнем событии деформации, испытанном породой, или о статическом отжиге после деформации.

Используемые теоретические модели позволяют сделать вывод о том, что плотность свободных дислокаций сильно зависит от напряжения и слабо зависит от температуры через модуль сдвига и вектор Бюргерса. Взаимосвязь дифференциальных напряжений с плотностью дислокаций описывается соотношением [9]:

$$\sigma_d = \alpha \mu b \rho^{1/2}, \quad (4)$$

где σ_d – дифференциальное напряжение, μ – средний модуль сдвига, b – активный вектор Бюргерса, ρ – плотность дислокаций и постоянная материала. Величина α изменяется в диапазоне от 0,8 до 5,2 для различных металлов, сплавов, ионных солей и силикатов. Для хлорида натрия ее значение лежит в диапазоне от 0,8 до 1,4 для синтетических монокристаллов высокой чистоты. В работе [11] для анализа данных по различным материалам использовалась более общая взаимосвязь:

$$\sigma_d \alpha \rho^l \quad (5).$$

При этом установлено, что показатель плотности l варьируется в диапазоне от 0,45 до 3,0. Для каменной соли этот показатель изменяется в интервале от 0,2 до 0,8 [9].

В большинстве случаев плотность дислокаций измеряется путем травления поверхностей кристаллов для получения углублений в местах возникновения дислокаций (метод травления ямок).

Эксперименты по определению плотности дислокаций в зависимости от напряжения в хлориде натрия привели к следующим выводам [9]:

– плотность дислокаций пропорциональна дифференциальному напряжению приблизительно в степени 1,3; плотность дислокаций не зависит от общей величины деформации и температуры при деформировании образцов в режиме вторичной ползучести;

– уровни примесей в образцах не влияют на общую плотность дислокаций, но влияют на соотношение плотностей краевых и винтовых дислокаций; образцы с высоким содержанием примесей демонстрируют более высокую, чем в среднем, плотность краевых дислокаций и более низкую, чем в среднем, плотность винтовых дислокаций.

5. Выводы

1. По результатам анализа установлено, что для оценки палеонапряжений в каменной соли пригодны все три рассматриваемых микроструктурных параметра: размер рекристаллизованного зерна, размер субзерна и плотность свободных дислокаций. При этом размер рекристаллизованного зерна является наиболее надежным индикатором величины дифференциального напряжения, а плотность свободных дислокаций, вероятно, наименее надежным.

2. Обзор микроструктурных исследований природных солей показал, что диапазон величины дифференциальных напряжений в массиве составляет 0,5÷5,5 МПа. Предварительно установлено, что величина девиаторных напряжений в соляном массиве может зависеть от степени деформированности соли и наличия в ней примеси.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van der Pluijm B.A., Marshak S. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. – 2nd ed. – New York: W.W. Norton, 2004. – 656 p.
2. Twiss R.J. Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer // PAGEOPH. – 1977. – V. 115. № 1-2. – P. 227-244. – DOI: 10.1007/BF01637105.
3. Derby B. Dynamic recrystallization and grain size // Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks. – London: Unwin Hyman, 1990. – P. 354-364.
4. Urai J.L., Means W.D., Lister G.S. Dynamic recrystallization of minerals / American Geophysical Union; ed. Hobbs B.E., Heard H.C. – Washington, 1986. – V/ 36. – P. 161-199. – (Geophysical Monograph Series).
5. Prior D.J., Bestmann M., Halfpenny A., Mariani E. Recrystallization and Grain Growth in Rocks and Minerals // Materials Science Forum. – 2004. – V. 467-470. – P. 545-550.
6. Schlöder Z., Burliga S., Urai J.L. Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the Klodawa salt wall (Central Poland) as revealed by gamma-irradiation // Neues Jahrbuch für Mineralogie-abhandlungen: Journal of mineralogy and geochemistry. – 2007. – № 184 (1). – P. 17-28. – DOI: 10.1127/0077-7757/2007/0079.
7. Carter N.L., Hansen F.D., Senseny P.E. Stress magnitudes in natural rock salt // Journal of geo-physical research. – 1982. – V. 87, № B11. P. 9289-9300. – DOI: 10.1029/JB087iB11p09289.
8. Токсаров В.Н. Микроструктурные особенности и напряженное состояние соляных пород // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 24-27. – DOI: 10.7242/echo.2021.2.6.
9. Beeman M.L., Kohlstedt D.L. Dislocation density: stress relationships in natural and synthetic sodium chloride // Tectonophysics. – 1988. – V. 148, № 1. – P. 147-161. – DOI: 10.1016/0040-1951(88)90167-9.
10. Tullis J.A. High temperature deformation of rocks and minerals // Reviews of Geophysics. – 1979. – V. 17, № 6. – P. 1137-1154. – DOI: 10.1029/RG017i006p01137.
11. Takeuchi S., Argon A.S. Steady-state creep of single-phase crystalline matter at high temperature // Journal Materials Science. – 1976. – V. 11, № 8. – P. 1542-1566. – DOI: 10.1007/BF00540888.