

01;05

## О неоднородности деформации при сжатии сильвинита

© С.А. Баранникова, М.В. Надежкин, Л.Б. Зуев, В.М. Жигалкин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
Институт горного дела СО РАН, Новосибирск  
E-mail: bsa@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 26 января 2010 г.

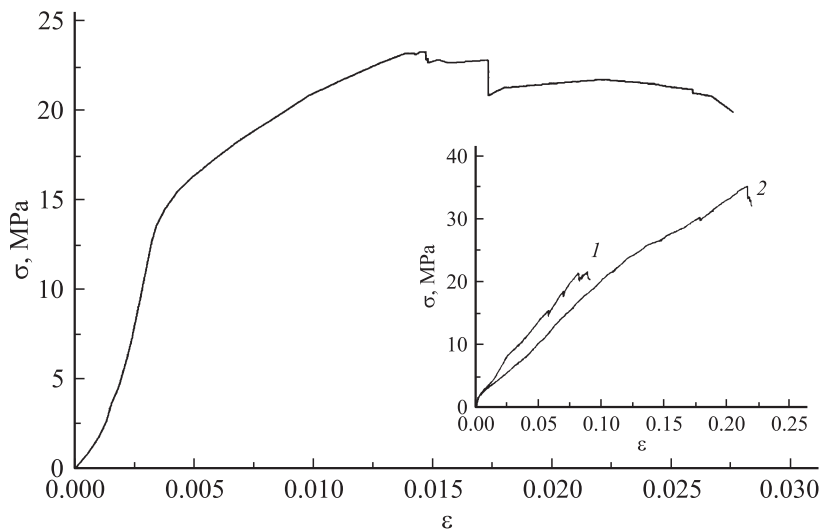
Методом лазерной двухэкспозиционной спекл-фотографии регистрировались пространственно-временные распределения локальных компонент тензора дилатации при активной деформации сжатием квазипластичных материалов — соляных горных пород. Получены картины локализации деформации, рассмотрены особенности макроскопической неоднородности деформации при неупругом поведении материала. Произведено сравнение полученных результатов медленных волновых процессов при деформировании соляных пород и ионных кристаллов.

Массив горных пород, вмещающих конструктивные элементы системы разработки, находится в напряженном состоянии, которое существенно изменяется в процессе ведения горных работ. При этом характер деформирования пород зависит как от величины действующих в массиве напряжений, так и от накопленных неупругих деформаций [1]. Необходимость оценки поведения горных пород при нагружении продиктована широким спектром теоретических и практических задач, возникающих при геомеханическом анализе состояния подработанного массива [2]. К настоящему времени, благодаря применению метода двухэкспозиционной спекл-фотографии при исследовании локальных деформаций в процессе активного нагружения [3], предложена классификация эволюционирующих по мере роста общей деформации картин макроскопической локализации деформации как в пластичных металлах и сплавах [4], так и в квазихрупких керамических материалах [5]. Это обстоятельство обусловило интерес к исследованиям характера неоднородности деформации квазипластичных материалов — соляных горных пород, поскольку закономерности изменения их деформационных и прочностных параметров в зависимости от особенностей строения, формы образцов и скорости приложения нагрузки изучены в [6].

Механические испытания проводились на образцах, изготовленных из пестрого сильвинита (пласт Б), представляющего собой агломерат ГЦК-кристаллов с ионным типом связи (NaCl+KCl). Размеры кристаллитов в исследуемых образцах составляли 1–4 мкм. Образцы размером  $25 \times 12 \times 10$  мм сжимались вдоль длинной оси образца (ось  $x$ ) на универсальной испытательной машине „Instron-1185“ при 300 К. Скорость перемещения подвижного захвата составляла  $1.6 \cdot 10^{-6}$  м/с ( $\sim 7 \cdot 10^{-5}$  с $^{-1}$ ). В дополнение к записи диаграммы деформации с начала нагружения и вплоть до полного разрушения образца методом двух-экспозиционной спекл-фотографии последовательно регистрировались поля векторов перемещений  $\mathbf{r}(x, y)$  точек на рабочей грани исследуемых образцов [3]. В ходе этой процедуры прирост общей деформации  $\Delta \varepsilon_{tot}$  между двумя экспозициями при записи каждой спекл-фотографии составлял  $2 \cdot 10^{-3}$ , что позволяло получить последовательность из 10–15 кадров, содержащих информацию о распределении деформации.

Известно [7], что щелочно-галоидные кристаллы (ЩГК) пластичны и деформация этих кристаллов до разрушения может достигать  $\sim 1$ . Вид зависимости деформации от напряжения  $\sigma(\varepsilon)$  для ЩГК близок к аналогичным зависимостям для пластичных ГЦК-металлов. Примеры кривых сжатия  $\sigma(\varepsilon)$  исследуемых образцов с одновременной записью картин локализации деформации представлены на рис. 1, где на вставке в качестве сравнения приведены кривые течения образцов сильвинита и кристаллов NaCl, KCl [8], доведенных до разрушения. На этих кривых наблюдаются „пилообразные“ участки с резким падением напряжений, соответствующие растрескиванию образцов. Деформирование образцов сильвинита завершается хрупким разрушением при общей деформации  $\varepsilon \approx 0.02$ – $0.04$ , что согласуется с данными [6]. На экспериментальной деформационной кривой  $\sigma(\varepsilon)$  квазипластичного сильвинита после упругого и переходного участков удастся выделить линейную стадию с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения  $\theta \approx 1000$  МПа протяженностью общей деформации  $\varepsilon_{tot} = 0.002$ – $0.0095$  и стадию параболического деформационного упрочнения протяженностью общей деформации  $\varepsilon_{tot} = 0.0096$ – $0.013$  до предела прочности (рис. 1). Процесс деформирования завершается хрупким разрушением при общей деформации  $\varepsilon \approx 0.03$ .

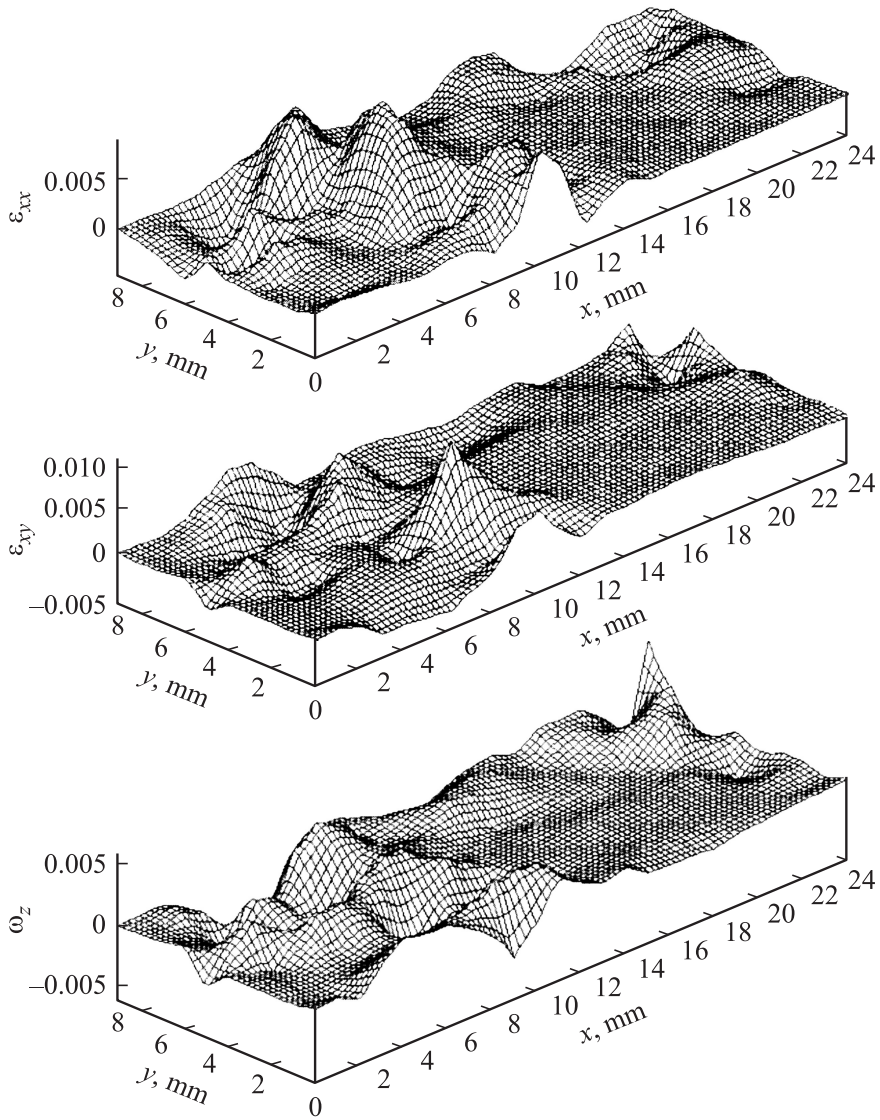
Анализ картин локализации деформации в виде распределений компонент  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  и  $\omega_z$ , тензора пластической дисторсии в этом случае показал, что с самого начала сжатия деформация распределена



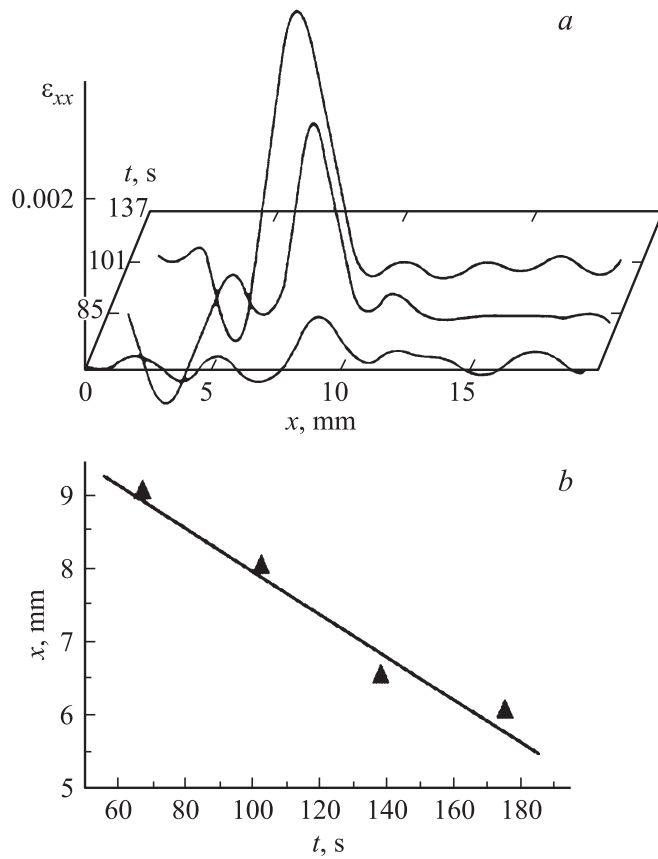
**Рис. 1.** Кривая сжатия образцов сильвинита; на вставке — кривые течения ионных кристаллов NaCl (1) и KCl(2) [8].

неоднородно, т.е. локализована в одной зоне, распределенной по всей ширине образца (рис. 2). Особенностью поведения этой зоны локализованной деформации компоненты  $\epsilon_{xx}$  явилось ее перемещение по образцу на стадии линейного деформационного упрочнения с ростом общей деформации от 0.002 до 0.0095 (рис. 3, *a*). Поскольку при сжатии с постоянной скоростью  $\epsilon \sim t$ , то, определяя положение очага локализации  $X$  по длине образца в ходе деформации (рис. 3, *b*), по наклону графика  $X-t$  можно оценить скорость перемещения соответствующей зоны локализации, которая составляет  $\sim 2.8 \cdot 10^{-5}$  m/s. Исследование характера локализации пластической деформации образцов сильвинита на стадии параболического деформационного упрочнения оказалось невозможным из-за растрескивания образцов.

Согласно полученным данным, при сжатии соляных горных пород пластическое течение локализовано в отдельных активных зонах образца, которые на линейной стадии движутся вдоль оси образца со скоростью  $2.8 \cdot 10^{-5}$  m/s. Эту особенность впервые удалось наблюдать в сильвините в настоящей работе, а также в ЦГК в [8], где на линейной



**Рис. 2.** Очаги макролокализации деформации в виде распределений компонент  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  и  $\omega_z$ , тензора пластической дисторсии для сильвинита на линейной стадии в интервале общей деформации 0.005–0.0052.



**Рис. 3.** Движение зоны локализованной деформации (а) и положение максимумов  $X$  локальных деформаций  $\epsilon_{xx}$  для средней линии образца в зависимости от времени деформирования  $t$  (b) в пределах общей деформации от 0.002 до 0.0095.

стадии II в кристаллах NaCl две зоны локализации деформации движутся со скоростью  $\sim 7.7 \cdot 10^{-5}$  м/с, а в кристаллах KCl —  $4.5 \cdot 10^{-5}$  м/с. Указанные значения скоростей близки к ранее зафиксированным на стадиях линейного деформационного упрочнения ряда металлических моно- и поликристаллов [9], для которых механизмом пластической деформации, как и для ЦГК, является дислокационное скольжение.

Ранее для всех исследованных металлических материалов было установлено, что скорость движения деформационных очагов  $V_{aw}$  на стадии линейного деформационного упрочнения, когда  $\sigma \sim \varepsilon$ , т.е.,  $\theta = \text{const}$ , обратно пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения  $\theta = G^{-1} d\sigma/d\varepsilon$  на этой стадии ( $G$  — модуль сдвига), т.е.  $V_{aw}(\theta) = V_0 + \Xi/\theta$  [9]. Установлено, что данные настоящей работы о скоростях очагов пластического течения в сильвините, а также KCl, NaCl [8] удовлетворяют зависимости  $V_{aw}(\theta)$  с коэффициентом корреляции  $\sim 0.9$ . Полученные результаты, прежде всего, подтверждают единую природу волновых процессов на линейных стадиях деформационного упрочнения ионных кристаллов. Они также подчеркивают сходство картин локализации в ионных кристаллах с картинками, соответствующими этим стадиям в моно- и поликристаллах металлов и сплавов [9]. Поскольку сравнение данных при сжатии KCl и NaCl в [8], полученных методами лазерной спекл-фотографии и фотоупругости, показало, что зоны локализации пластической деформации представляют собой совокупность сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что динамика процессов пластической деформации в горной породе, состоящей из кристаллов с ионной связью, не отличается принципиально от динамики таких процессов в металлических материалах. Так, движение одиночной зоны локализованной деформации на стадии линейного упрочнения в сильвините аналогично движению уединенных очагов локализованной деформации ранее зафиксированным на стадиях легкого скольжения (площадке текучести) ряда металлических монокристаллов. Полученный результат подтверждает справедливость утверждений авторов [9] об обнаружении нового типа волн, распространяющихся с малой скоростью и связанных с процессами самоорганизации в деформируемых средах [10].

Обнаружение медленных волновых процессов пластически деформируемых соляных горных пород и ионных кристаллов [8] должно учитываться при интерпретации геологических явлений: формировании сбросов, разломов, складок и т.п. Еще в [11] было показано, что такие процессы не всегда сопровождаются образованием трещин, а разрушение земной коры следует рассматривать как уменьшение уровня энергии в некоторой локальной области. Тогда поверхность прерывности может быть представлена и как трещина с полным нарушением сцепления между стенками, и как пластическая полоса скольжения,

когда сцепление между стенками существует, но упругая энергия в полосе не накапливается. В последнем случае для геологических сдвигов вполне применимы физические представления и математический аппарат теории пластического течения кристаллических твердых тел. Это и продемонстрировано в [11], где для описания очага землетрясения были успешно использованы дислокационные представления. Но если формирование отдельных геологических сбросов адекватно микромеханизму пластической деформации кристаллов, то процесс развития таких явлений на обширной территории, по-видимому, тоже должен подчиняться закономерностям самоорганизации и приводит к возникновению регулярных картин, объединяющих участки высокой сейсмической активности. К настоящему времени факт существования деформационных волн в зонах разломов не вызывает сомнений [12], поскольку скорости экспериментальных наблюдений медленных движений земной коры после землетрясений [13] весьма близки к скоростям волн локализованной пластической деформации, наблюдавшимся в наших экспериментах. Учитывая, что волновые параметры (длина волны и скорость ее распространения) слабо зависят от сорта деформируемого вещества, такое сопоставление может оказаться оправданным.

Работа выполнена по проекту № 21 Программы фундаментальных исследований № 11 президиума РАН.

## Список литературы

- [1] *Карташов Ю.М., Матвеев Г.В., Михеев Г.А., Фадеев А.Б.* Прочность и деформируемость горных пород. М: Недра, 1979. 269 с.
- [2] *Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г.* Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. 343 с.
- [3] *Zuev L.B., Grobatenko V.V., Polyakov S.N.* // Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2002. V. 4900. Part 2. P. 1197–1208.
- [4] *Zuev L.B.* // Annalen der Physik. 2007. V. 16. N 4. P. 286–310.
- [5] *Баранникова С.А., Бужкова С.П., Зув Л.Б., Кульков С.Н.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 11. С. 57–64.
- [6] *Жигалкин В.М., Усольцева О.М., Семенов В.Н.* и др. // ФТПРПИ. 2005. Т. 6. С. 14–25.
- [7] *Смирнов Б.И.* Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. М.: Наука, 1981. 236 с.

- [8] Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. // ФГТ. 2009. Т. 51. В. 16. С. 1081–1086.
- [9] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
- [10] Олемской А.И., Кацнельсон А.А. Синергетика конденсированной среды. М.: УРСС, 2003. 335 с.
- [11] Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М: Наука, 1969. 136 с.
- [12] Быков В.Г. // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176–1190.
- [13] Гольдин С.В. // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37–54.