

УДК 531.382+550.34

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТЬ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Л. Б. Зуев^{1, 2}, С. А. Баранникова^{1, 2, 3},
М. В. Надежкин^{1, 4}, В. В. Горбатенко¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4, 634055, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Россия

³Томский государственный архитектурно-строительный университет,
пл. Соляная, 2, 634003, г. Томск, Россия

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
E-mail: lbz@ispms.tsc.ru, пр. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия

Установлены и исследованы общие закономерности развития локализации деформации на стадии предразрушения при сжатии горных пород (сильвинита, мрамора и песчаника). Обоснована применимость спекл-фотографических методов в проблеме деформирования и разрушения горных пород. Определен автоволновой характер развития локализованной пластической деформации при сжатии образцов из горных пород (сильвинита, мрамора и песчаника), деформирующихся за счет действия различных микромеханизмов пластичности. Скорость распространения автоволн, возникающих в образцах при сжатии, составляет $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ м/с (0.3 ÷ 3 км/год) и близка к скорости медленных движений, наблюдавшихся в земной коре после землетрясений или горных ударов. Получена корреляционная зависимость отношений расчетного и экспериментально определенного времени разрушения и координат мест разрушения образцов горных пород.

Деформация, разрушение, горные породы, локализация, автоволны

Необходимость исследований деформационного отклика горных пород на нагружение продиктована широким спектром теоретических и практических задач, возникающих при геомеханическом анализе таких крупномасштабных явлений, как землетрясения и горные удары [1–4]. Для оценки эволюции напряженно-деформированного состояния горных пород недостаточно знаний об их механических свойствах, необходимы сведения о механизмах их деформации. В этом отношении могут оказаться полезными представления о макроскопическом характере развития локализованной деформации металлических материалов, обобщенные в [5]. Анализ особенностей развития пластического течения выявил главные закономерности процессов мак-

Работа выполнена в рамках проекта Ш.23.1.2 Программы фундаментальных исследований СО РАН и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 25 “Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в изучении многомасштабных процессов в природе и технике”.

родеформации твердых тел при нагружении и позволил развить автоволновую модель пластической деформации. Ее проверка на широком круге металлов и сплавов показала, что тип локализации определяется законом пластического течения (деформационной диаграммой материала). При этом каждой стадии деформационного упрочнения деформируемого твердого тела соответствует определенный автоволновой процесс — автоволна переключения, фазовая автоволна, стационарная диссипативная структура, коллапс автоволны [6, 7]. Установлено, что процесс пластического течения металлов и сплавов контролируется закономерной сменой действующих на каждом этапе автоволновых процессов.

В настоящей работе предпринята попытка распространить представления о характере локализации пластического течения в металлах и сплавах, развитые в [5], на горные породы. Актуальность такого рода исследований отмечена в [8, 9], поскольку характер отклика горных сред на действие нагрузки (например, форма диаграммы “напряжение σ – деформация ε ”) оказывается близким к наблюдаемому в металлах [2]. В силу общей природы всех твердых тел, данные исследования могут оказаться весьма перспективными. Подобные подходы, основанные на распространении физических представлений о природе деформации на горные породы, давно и вполне успешно применяются в геофизике [10–12].

Для исследований выбраны материалы, принципиально отличающиеся друг от друга механизмами деформации: мрамор, песчаник и сильвинит (таблица). Экспериментальные исследования деформации проведены при сжатии образцов размером $25 \times 12 \times 10$ мм вдоль длинной оси x на испытательной машине Instron-1185 при разных скоростях движения подвижного захвата. Типичные диаграммы деформации, полученные в таких условиях, показаны на рис. 1. В отличие от “гладких” кривых $\sigma(\varepsilon)$, характерных для большинства металлов и сплавов [13], на кривых деформирования горных пород наблюдаются участки скачкообразного падения напряжения σ , соответствующие локальному растрескиванию образцов [2]. Деформирование завершается хрупким разрушением образца при общей деформации $\varepsilon_{\text{tot}} = 1.7 - 3.5\%$.

Результаты анализа кинетики фронтов локализованной пластичности в образцах из горных пород

Горная порода	Сильвинит	Мрамор	Песчаник
Химическая формула	KCl + NaCl	CaCO ₃	SiO ₂
Механизм пластической деформации	Дислокационное скольжение	Двойникование	Зернограничные процессы
Скорость движения фронтов деформации на линейных стадиях, м/с	$\sim 2.8 \cdot 10^{-5}$	$\sim 4.2 \cdot 10^{-5}$	$\sim 3.0 \cdot 10^{-5}$

Коэффициенты уравнений (2) и (3)

$\alpha \cdot 10^3$, с	Определить не удалось	3.08	1.7
$\alpha_0 \cdot 10^6$, м/с		-2.15	-1.9
$\xi^* = \alpha_0 / \alpha$, мм		-0.7	-1.1
$t^* = t_0 + 1/\alpha$, с		415	730

Сравнение экспериментально зарегистрированных и расчетных времен (4) и координат (5) разрушения

$t_{\text{exp}}^* / t_{\text{calc}}^*$	Определить не удалось	380/415	600/730
$x_{\text{exp}}^* / x_{\text{calc}}^*$		7/3	5/4

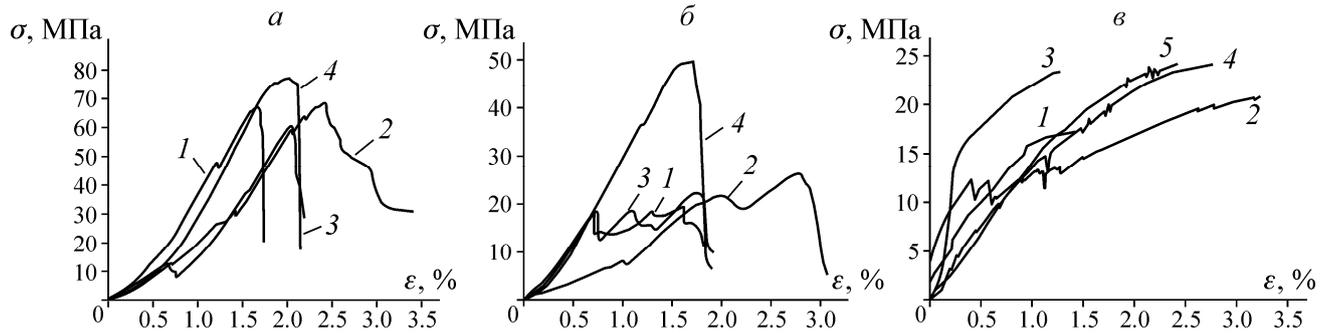


Рис. 1. Кривые сжатия образцов из горных пород: *а* — песчаник при скоростях нагружения, мм/мин: 1 — 0.1; 2 — 0.5; 3 — 1; 4 — 10; *б* — мрамор при различных скоростях движения подвижного захвата, мм/мин: 1 — 0.1; 2 — 0.5; 3 — 1; 4 — 10; *в* — пять разных образцов сильвинита при скорости нагружения 0.1 мм/мин

Одновременно с записью диаграмм сжатия на автоматизированном комплексе ALMEC-tv [14] методом цифровых спекл-изображений последовательно регистрировались картины локализации деформации на одной из граней исследуемых образцов аналогично [15, 16]. Используемый метод позволяет вычислять все компоненты тензора пластической дисторсии $\beta_{ik} = \nabla \mathbf{r}$ (\mathbf{r} — вектор смещения, определяемый по спекл-картинам), однако здесь ограничимся лишь анализом компоненты продольной деформации ε_{xx} . Картины макролокализации пластической деформации в виде распределений локальных деформаций $\varepsilon_{xx}(x)$ вдоль оси деформируемого образца регистрировались методом двухэкспозиционной спекл-фотографии и методом цифровых спекл-изображений [14]. Анализ пространственных картин $\varepsilon_{xx}(x)$ позволяет определить положение зон локализации деформации. Для исследования кинетики процесса эволюции картин макролокализации использовались зависимости положений локальных очагов в образце x от деформации или времени (при активном нагружении образцов $\varepsilon \sim t$).

Главной особенностью поведения зон локализованной деформации явилось их перемещение по образцу на линейных участках зависимости $\sigma(\varepsilon)$ с ростом общей деформации. Пример такого перемещения в сильвините показан на рис. 2*а* для деформаций 0.5 и 0.7% соответственно. Определяя координату очага локализации x по длине образца в ходе деформации, по наклону графика $x-t$ возможно оценить скорость перемещения зон локализации (рис. 2*б*). Скорости движения очагов локализованного течения V_{aw} для всех трех исследованных горных пород представлены в таблице.

Анализ распределений локальных деформаций для средней линии образца песчаника показал, что при общей деформации образца $\varepsilon_{tot} \approx 0.5\%$ на картинах распределения $\varepsilon_{xx}(x)$ выделяются максимумы локализации деформации, расположенные с пространственным периодом ~ 4 мм. Для средней линии образца мрамора при общей деформации $\varepsilon_{tot} \approx 0.1\%$ на картинах распределения выделяются максимумы локализации деформации с пространственным периодом 5 мм (рис. 2*в*). Это означает, что пластическая деформация горных пород протекает макроскопически локализованно, т. е. в любой момент времени сосредоточена в нескольких зонах макроскопического масштаба, в то время как другие объемы при этом же приросте деформации практически не деформируются.

Экспериментальные наблюдения закономерностей напряженно-деформированных состояний горных массивов руд и вмещающих пород вокруг подземных выработок в условиях больших глубин электрометрическим методом позволили также установить существование опреде-

ленных последовательностей зон повышенной нарушенности горного массива (зон дезинтеграции) [3]. Участки зон дезинтеграции массива характеризуются более высокими показателями сопротивления по отношению к ненарушенным участкам с пространственным периодом 3 м на глубину массива до 11 м (рис. 2з).

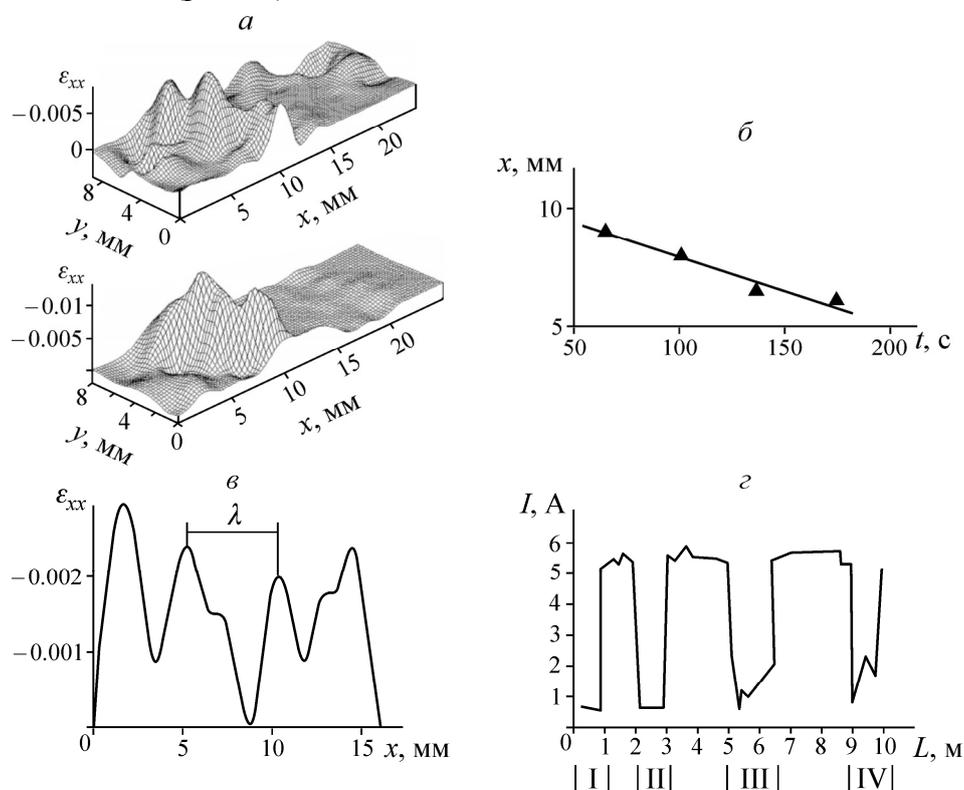


Рис. 2. Локализация деформации: а — распределение компоненты $\varepsilon_{xx}(x, y)$ в виде волновых картин в сильвините при общей деформации $\varepsilon_{tot} = 0.5\%$ (вверху) и $\varepsilon_{tot} = 0.7\%$ (внизу); б — положение максимумов x локальных деформаций ε_{xx} для средней линии образца в зависимости от времени деформирования сильвинита; в — периодичность зон локализации деформации горных пород в виде распределений локальных деформаций $\varepsilon_{xx}(x)$ для средней линии в лабораторном образце мрамора при общей деформации $\varepsilon_{tot} = 0.2\%$; г — периодичность зон дезинтеграции массива в виде графика токового каротажа впереди очистного забоя рудника “Октябрьский”. I – IV — зоны дезинтеграции массива [3]

Многочисленные эксперименты по изучению процессов деформации и разрушения пластичных и хрупких материалов показали, что все среды на различных масштабах проявляют общие характерные черты и закономерности в их развитии. Вопрос о влиянии размеров деформируемой системы на параметры локализации пластической деформации (масштабный эффект) важен для понимания природы явления локализации деформации. В частности, возникает вопрос о возможности переноса результатов, полученных в лабораторных условиях на образцах с характерным размером ~ 25 мм, на гораздо более крупные неоднородности горных пород.

Ответ свяжем с ранее установленной в [5] зависимостью длины волны локализованной пластичности λ от размера образца L , которая имеет вид $\lambda \sim \ln L$. Простая оценка показывает, что если при длине образца $L = 25$ мм пространственный период составляет $\lambda \approx 5$ мм, то при характерном размере блока горной породы $L \approx 10$ м имеем $\lambda \approx 3$ м (при экспериментальном

значении длины волны 3 м [3]). Деформационным волнам, возникающим на расстояниях $L \approx 150$ км от эпицентра землетрясения [3, 4], должен соответствовать пространственный период $\lambda \approx 5$ км (при экспериментально наблюдаемом значении длины волны ~ 10 км [17]). Следовательно, есть основания утверждать, что закономерности автоволнового процесса деформации горных пород на разных масштабах сохраняются.

Таким образом, экспериментально установлен автоволновой характер процесса локализации деформации при сжатии образцов горных пород мрамора, песчаника и сильвинита. В этом отношении горные породы не отличаются от ранее исследованных металлов и сплавов.

Рассмотрим следующее рассуждение. Известно, что в геосредах наблюдаются специфические деформационные процессы, называемые “медленными движениями” [17–21]. Прямые экспериментальные доказательства существования этих волн пока немногочисленны, и даже данные о скоростях их распространения существенно разнятся. Физическая основа концепции деформационных волн Земли состоит в фундаментальном свойстве геосреды — слоистости и блочности ее структуры [3, 21–23]. Поскольку скорости экспериментальных наблюдений “медленных движений” ($\sim 1 - 10$ км/год) близки к скоростям волн локализованной деформации ($\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ м/с), происходящим в песчанике и мраморе, можно утверждать, что впервые в лабораторных условиях при одноосном сжатии наблюдалось распространение автоволн локализованной деформации в образцах из горных пород со скоростями, близкими к наблюдаемым в горных пластах после землетрясений и горных ударов, так называемым “медленным движениям”.

Гипотеза о возможности применения автоволновой модели локализованного пластического течения на стадии предразрушения к деформационным процессам в горных породах обусловила интерес к исследованиям характера макронеоднородности деформации квазипластичных горных пород. Анализ картин локализации деформации показал, что зависимости положений очагов локализованной деформации от времени $x(t)$ для горных пород (рис. 3) прямолинейны и при экстраполяции сходятся в точке с координатами x^* и t^* , образуя пучок прямых. Для образования пучков прямых $x(t)$, изображенных на рис. 4, необходимо, чтобы скорости движения очагов линейно зависели от координат места их зарождения ξ , т. е. выполнялось соотношение

$$V_{aw}(\xi) = \alpha\xi + \alpha_0, \quad (1)$$

установленное в [5, 24]. Здесь ξ — координата, отсчитанная от неподвижного очага локализации; α , α_0 — эмпирические константы. Зависимости $V_{aw}(\xi)$ для исследованных материалов показаны на рис. 4. В таблице также приведены коэффициенты α , α_0 , вычисленные по формулам

$$t^* = t_0 + 1/\alpha, \quad (2)$$

$$x^* = x_0 + \alpha_0/\alpha, \quad (3)$$

где t_0 — момент начала стадии предразрушения; x_0 — положение неподвижного очага в лабораторной системе координат в начале стадии предразрушения; t^* — время достижения, x^* — местоположение полюса разрушения (рис. 3а, б). Это иллюстрируется на примере мрамора, где $t^* \approx 415$ с, $x^* \approx 2.99$ мм (рис. 3а). Следует отметить, что в действительности образец разрушился через 380 с после начала деформирования при растрескивании образца на расстоянии 6 мм от неподвижного захвата (рис. 5б). Для песчаника расчетное значение $t^* \approx 415$ с (рис. 3б), однако образец разрушился через 600 с после начала сжатия при растрескивании образца на расстоянии 5 мм от неподвижного захвата (рис. 5з).

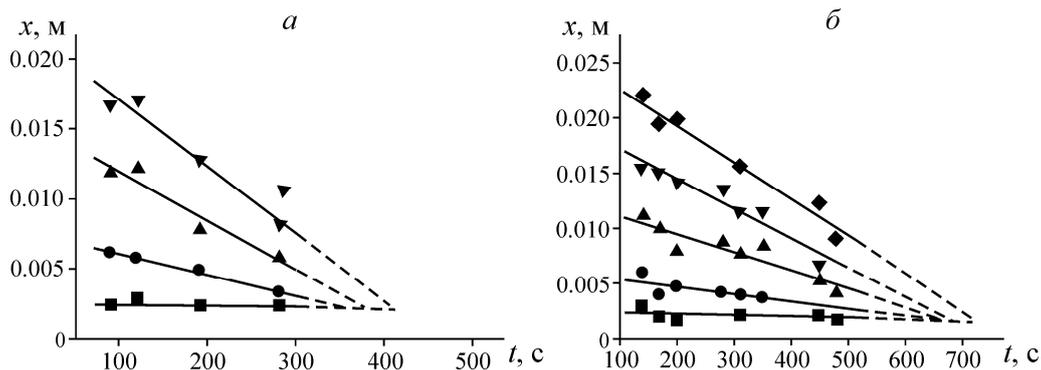


Рис. 3. Поведение очагов локализации на стадии предразрушения горных пород при сжатии: *a* — мрамор; *б* — песчаник

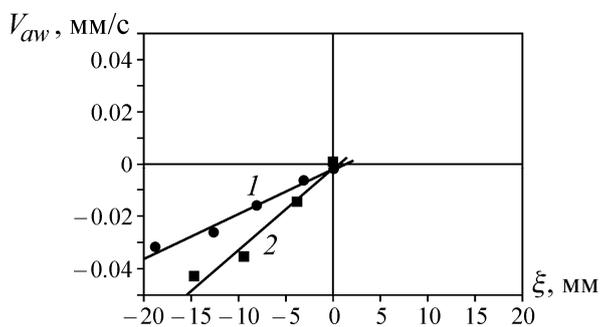


Рис. 4. Зависимость $V_{ав}(\xi)$ в горных породах: 1 — песчаник; 2 — мрамор

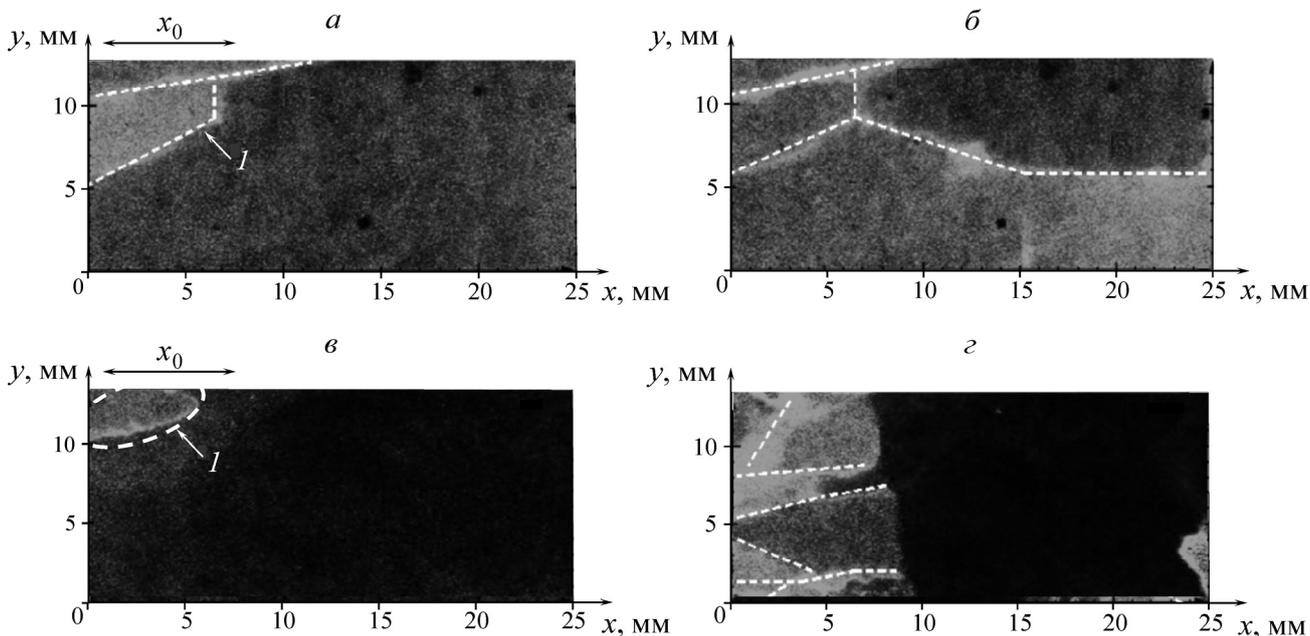


Рис. 5. Эволюция зон локализации деформации: *a* — образец мрамора в начале стадии деформирования при $\varepsilon_{tot} = 1.27\%$; *б* — конец стадии предразрушения при $\varepsilon_{tot} = 1.80\%$; *в* — образец песчаника в начале деформирования при $\varepsilon_{tot} = 1.17\%$; *г* — конец стадии предразрушения при $\varepsilon_{tot} = 3.45\%$ (x_0 — положение неподвижного очага 1 в лабораторной системе координат в начале стадии предразрушения)

Таким образом, расчетные и экспериментально определенные моменты времени и координаты мест разрушения примерно совпадают, что отражено на зависимостях рис. 6.

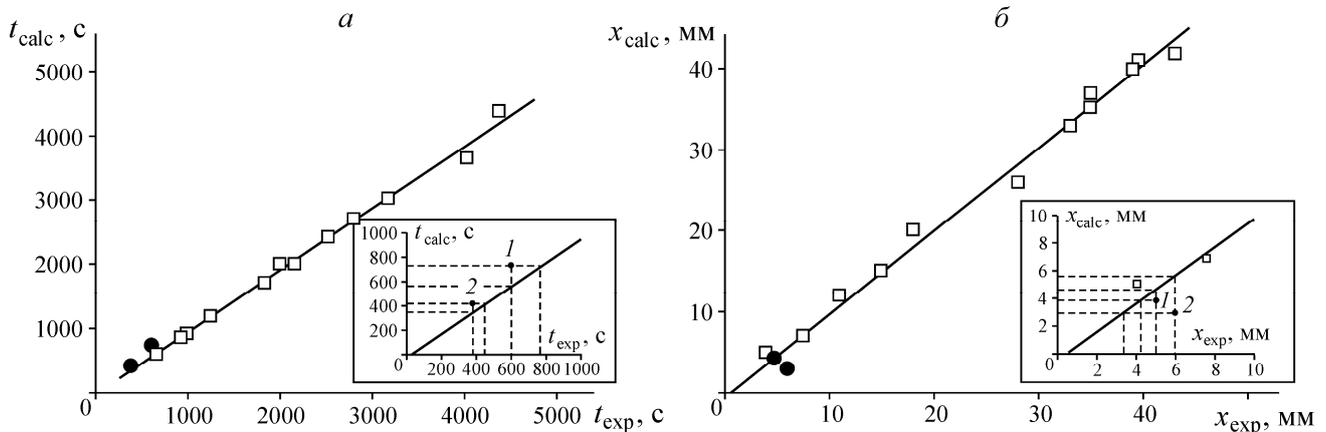


Рис. 6. Корреляция между расчетными и действительными временами разрушения (а) и между расчетными и действительными координатами места разрушения (б): □ — образцы пластичных металлов [5]; ● — образцы горных пород мрамора и песчаника. На вставке начальный участок корреляционной зависимости между расчетным и действительным временем разрушения и координатой места разрушения для горных пород песчаника (1) и мрамора (2)

Связь расчетных и экспериментально определенных времен разрушения (рис. 6а) и координат мест разрушения образцов (рис. 6б) металлов и горных пород описывается уравнениями

$$t_{\text{calc}} = t_0 + bt_{\text{exp}}, \quad (4)$$

$$x_{\text{calc}} = x_0 + ax_{\text{exp}}, \quad (5)$$

где $t_0 = -18$ с, $b = 0.96$; $x_0 = -0.5$ мм, $a = 1.02$.

Полученные в работе экспериментальные данные о локализации деформации при сжатии образцов горных пород углубляют представления о процессе самоорганизации носителей деформации на макроскопическом масштабном уровне [5]. Картины локализации деформации свидетельствуют о фрагментации деформируемого объема горных пород при сжатии, причем границы фрагментов оказываются подвижными. Выявленные закономерности по развитию деформации можно использовать для прогнозирования оценки времени до разрушения (ресурса), определения положения очага разрушения в ходе механических испытаний.

ВЫВОДЫ

Установлена общность характера развития локализованной пластической деформации в металлах и горных породах (сильвинит, мрамор, песчаник).

Выявлены основные количественные закономерности автоволнового характера развития локализованной пластичности в образцах из горных пород.

Показано, что скорость “медленных движений” в горных породах близка к скорости распространения автоволн локализованной пластичности в образцах из горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стейси Ф. Физика Земли. — М.: Мир, 1972.
2. Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. И. др. Земля. Введение в общую геологию. — М.: Мир, 1974.

3. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др.** Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
4. **Гольдин С. В.** Сейсмические волны в анизотропных средах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
5. **Зуев Л. Б., Данилов В. И., Баранникова С. А.** Физика макролокализации пластического течения. — Новосибирск: Наука, 2008.
6. **Zuev L. B., Danilov V. I., Barannikova S. A., Gorbatenko V. V.** Autowave model of localized plastic flow of solids, *Phys. Wave Phenom*, 2009, Vol. 17, No. 1.
7. **Zuev L. B.** Autowave mechanics of plastic flow in solids, *Phys. Wave Phenom*, 2012, Vol. 20, No. 3.
8. **Гамбурцев А. Г.** Современная геодинамика и катастрофы // *Вестн. РАН*. — 1995. — Т. 65. — № 7.
9. **Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Спивак А. А.** Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // *Докл. РАН*. — 1992. — Т. 323. — № 2.
10. **Введенская А. В.** Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. — М.: Наука, 1969.
11. **Соболев Г. А., Демин В. М.** Механоэлектрические явления в Земле. — М.: Наука, 1980.
12. **Веттегрень В. И., Куксенко В. С., Щербаков И. А.** Динамика микротрещин и временные зависимости деформации поверхности гетерогенного тела (гранит) при ударе // *ФТТ*. — 2012. — Т. 54. — № 7.
13. **Pelleg J.** *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013.
14. **Zuev L. B., Gorbatenko V. V., Pavlichev K. V.** Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses, *Measur. Sci. Technol*, 2010, Vol. 21, No. 5.
15. **Баранникова С. А., Надежкин М. В., Зуев Л. Б., Жигалкин В. М.** О неоднородности деформации при сжатии силвинита // *Письма в ЖТФ*. — 2010. — Т. 36. — № 11.
16. **Зуев Л. Б., Баранникова С. А., Жигалкин В. М., Надежкин М. В.** Наблюдение “медленных движений” в горных породах в лабораторных условиях // *ПМТФ*. — 2012. — Т. 53. — № 3.
17. **Гольдин С. В.** Дилатансия, переупаковка и землетрясения // *Физика Земли*. — 2004. — № 10.
18. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс // *ФТПРПИ*. — 1996. — № 3.
19. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф.** О нелинейных деформационно-волновых процессах в вибрационных геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // *ФТПРПИ*. — 2010. — № 2.
20. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа // *Докл. РАН*. — 1993. — Т. 333. — № 4.
21. **Викулин А. В.** Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2010. — Т. 1. — № 2.
22. **Опарин В. Н., Танайно А. С., Юшкин В. Ф.** О дискретных свойствах объектов геосреды и их каноническом представлении // *ФТПРПИ*. — 2007. — № 3.
23. **Чанышев А. И.** К проблеме разрушения деформируемых сред. Ч. I, II // *ФТПРПИ*. — 2001. — № 3, 4.
24. **Данилов В. И., Зуев Л. Б.** Макролокализация пластической деформации и стадийность пластического течения в поликристаллических металлах и сплавах // *Успехи физики металлов*. — 2009. — Т. 9. — № 4.

Поступила в редакцию 10/VI 2013