

УДК 552.08:53

Механические свойства и структурные характеристики пластически деформированных перидотитов

С.Н. Кульков^{1,4}, В.Д. Суворов², Л.Н. Похиленко³, Ю.П. Стефанов¹,
С.П. Буякова^{1,4}, А.С. Кульков⁴, А.И. Чернышов⁴

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

Проведены экспериментальные исследования перидотитов с различным средним размером зерна. Показано, что в крупнокристаллическом перидотите происходит множественное «объемное» разрушение по всем составляющим крупным фрагментам. В мелкокристаллическом образце разрушение локализовано в центре и развивается в направлении близком к оси сжатия, лишь в верхней и нижней частях зона локализованной деформации раздваивается и несколько отклоняется по направлениям близким к максимальным касательным напряжениям. Отношение поперечной и осевой деформаций для крупнокристаллического и мелкокристаллического образцов к началу разрушения составило 1.36 и 0.76 соответственно. Показано, что размеры структурных элементов в материале прямо определяют масштабный уровень формирования трещин, а следовательно, и уровень разрушения породы.

Ключевые слова: перидотиты, механические свойства, петрография

Mechanical properties and structural characteristics of plastically deformed peridotites

S.N. Kulkov^{1,4}, V.D. Suvorov², L.N. Pokhilenko³, Yu.P. Stefanov¹,
S.P. Buyakova^{1,4}, A.S. Kulkov⁴, and A.I. Chernyshov⁴

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

³ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

The paper reports on experimental study of peridotites with different average grain sizes. It is shown that coarse-crystalline peridotite undergoes multiple bulk fracture along all large fragments, whereas fracture of fine-crystalline peridotite is localized in the centre and develops in a direction close to the compression axis with the only slight deflection to directions of maximum tangential stresses in the upper and lower parts in which the zone of localized deformation is bifurcated. It is found that by the onset of fracture, the lateral to axial strain ratio for the coarse- and fine-crystalline specimens is 1.36 and 0.76, respectively.

Keywords: peridotites, mechanical properties, petrography

1. Введение

Резко возросший в последние годы интерес исследователей всего мира к ультрамафитам обусловлен, в первую очередь, признанием их глубинной природы. Это затрагивает ряд фундаментальных проблем петрологии верхней мантии, магмообразования и эволюции земной коры в сочетании с прикладными задачами по прогнозной оценке широкого спектра полезных ископаемых. Кроме того, формирование данных пород представляет

собой длительный эволюционный процесс, включающий в себя рубежи неоднократного воздействия многих факторов на разных гипсометрических уровнях, и предполагает закономерные изменения как их вещественного состава, так и структурной организации на разных масштабах.

В мировой науке прослеживается отчетливо выраженная тенденция к интегрированной интерпретации геологических, геофизических, петрологических и гео-

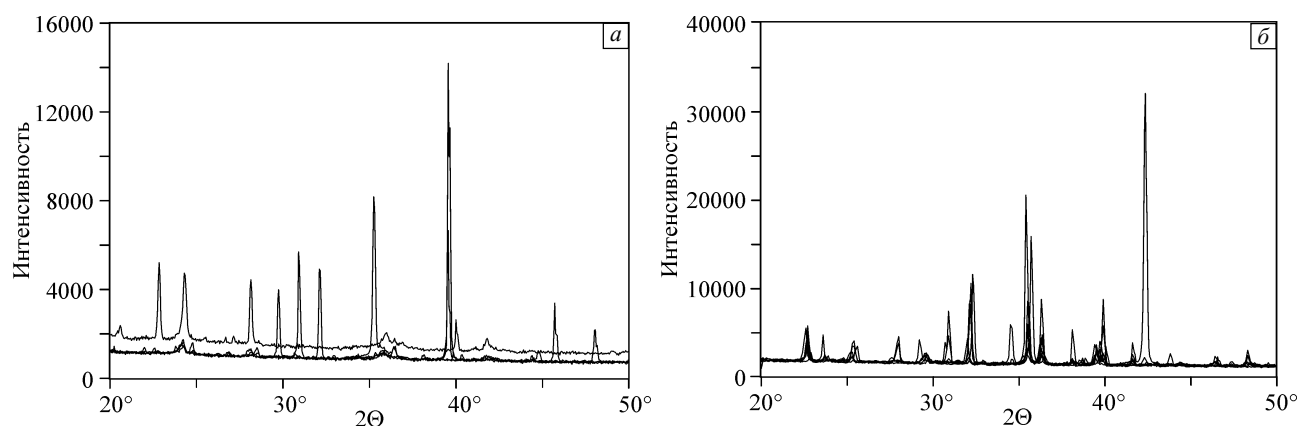


Рис. 1. Рентгенограммы, полученные с разных сторон крупнокристаллического (а) и мелкокристаллического образцов (б)

динамических моделей земной коры и мантии с привлечением физических методов исследования. Полученные в последние годы результаты принципиального характера являются следствием именно системного анализа имеющихся данных. К ним относятся реологические характеристики земных недр (литосфера, астеносфера, расслоение земной коры и др.), поскольку вследствие исключительно малой скорости геологических процессов многие из них не могут быть непосредственно наблюдаемыми. И только комплексное исследование и последующая интерпретация данных позволяют найти логичные объяснения природы регистрируемых аномалий геофизических и петрологических параметров и выполнять геодинамические реконструкции процессов формирования и эволюции геологических объектов.

С такой точки зрения уровень построения интегрированной модели мантии при исключительно высокой геофизической и петрологической изученности нельзя признать удовлетворительным, наблюдается отчетливое отставание от зарубежных исследований. До сих пор эти данные не интерпретировались в комплексе. Исключительное значение в этом случае уделяется экспериментам с образцами горных пород и численному моделированию.

Поэтому экспериментальное изучение структуры мантийных пород разных парагенезисов (разных глубин), их механических свойств и деформационного поведения при активном нагружении является актуальной задачей, чему и посвящена настоящая работа.

2. Материал и методика исследований

Проведены экспериментальные исследования перидотитов с различным средним размером зерна. Образцы представляли собой кубики со стороной ~ 10 мм. Для испытаний на одноосное сжатие образцы шлифовались до плоскопараллельности не менее 0.1° . Затем на испытательной машине Instron-1185 образцы нагружались со скоростью деформации $3.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Петрографические исследования проводили на поляризационном микроскопе Axioskop-40 фирмы Zeiss, рентгеноструктурные — на дифрактометре с фильтрованным медным излучением. Были отобраны наиболее представительные образцы перидотитов с разными размерами структурных элементов. Рентгенограммы получены в интервале углов $15^\circ \dots 115^\circ$ с шагом 0.05° и временем экспозиции, достаточной для достижения 0.5% точности (рис. 1). Полученные рентгенограммы аппроксимировались с помощью специальной компьютерной программы профилями лоренцовского типа по минимальному среднеквадратичному отклонению профилей от экспериментальных точек. Для полученных данных методом Холла–Вильмсона строились зависимости, по которым определены средние размеры кристаллитов и микродеформация решеток.

3. Обсуждение результатов

Исследуемые образцы заметно различались размером зерен. Для крупнокристаллического образца размеры зерен составляли порядка 1 мм, а для мелкокри-

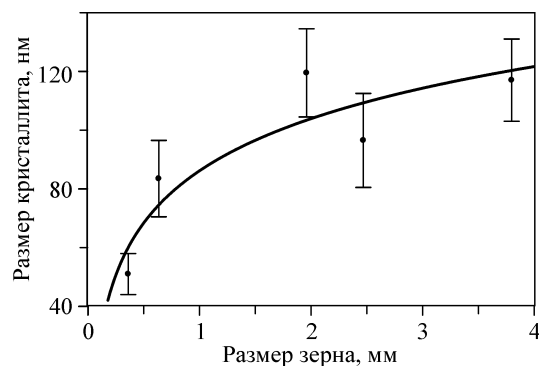


Рис. 2. Зависимость среднего размера кристаллитов, определенного по рентгеноструктурным данным, от размера зерен в дунитах различной природы

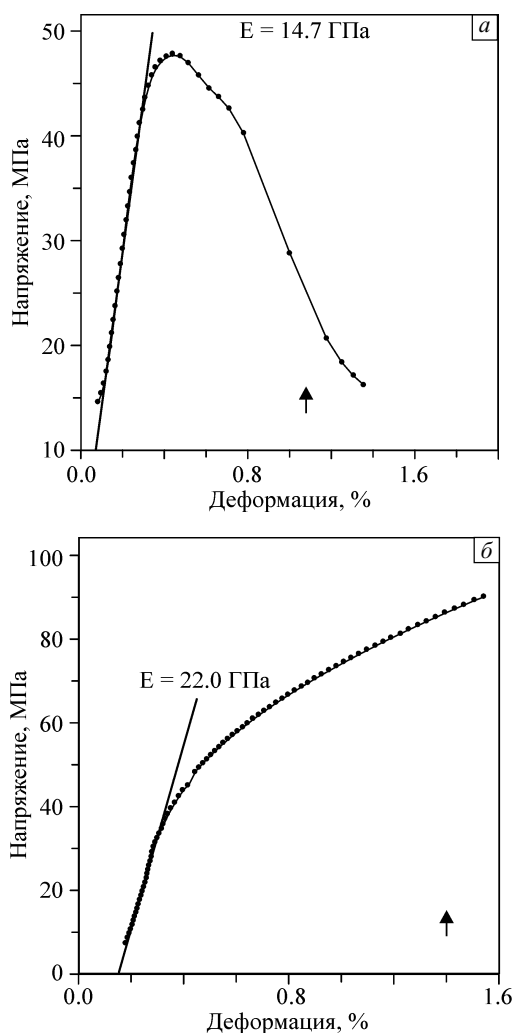


Рис. 3. Диаграммы нагружения крупнокристаллического (а) и мелкокристаллического (б) образцов; скорость нагружения — 0.2 мм/мин

таллического — 0.2 мм с включениями крупных кристаллов.

Рентгеновские данные показали сильную текстурированность как для крупно-, так и для мелкокристаллических образцов, об этом можно судить по существенно изменяющейся интенсивности линий для разных сторон куба при сохранении углового положения линий. Расшифровка рентгенограмм показала, что это смесь оливина, пироксена, шпинели, возможно присутствует гранат. Определение уровня микродеформации кристаллической решетки показало, что она достаточно мала и составляет $(0.5...2.0) \cdot 10^{-4}$. По-видимому, это является свидетельством того, что в процессе их образования порода подвергалась интенсивному отжигу при температурах выше вязкохрупкого перехода. Тем не менее зависимость среднего размера кристаллитов (рис. 2), определенного по рентгеноструктурным данным, от

размера зерен в образцах показала, что существует хорошая корреляция между этими величинами [1]. Таким образом, микро- и мезоуровни связаны через размеры структурных элементов, составляющих породу.

В процессе испытаний крупнокристаллического образца в условиях одноосного сжатия (рис. 3) предел упругости 40 МПа зафиксирован при деформации порядка 0.2 %. Модуль упругости был равен 14.7 ГПа. После достижения предела прочности на сжатие 48 МПа, при осевой деформации 0.45 % наблюдался спад напряжений, соответствующий интенсивному разрушению образца. Несмотря на хрупкое разрушение, кубическая форма исследуемого образца обеспечивает постепенное снятие напряжений с ростом деформации более 1 %.

Мелкокристаллический образец имеет другой тип диаграммы нагружения. Упругая деформация также составляла ~0.2 % при напряжении порядка 35 МПа, но за ней начинается область деформационного упроч-

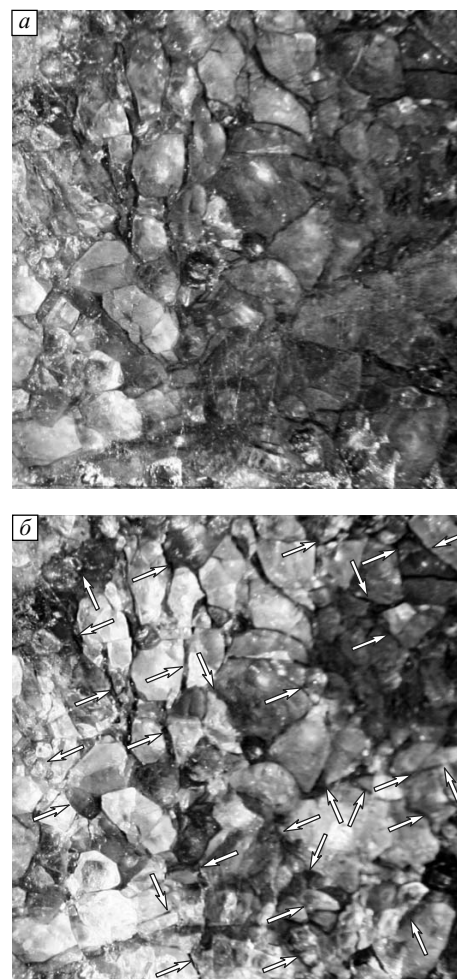


Рис. 4. Поверхность крупнокристаллического образца при деформации 0 (а) и 1.4 % (б). Стрелками указаны области трещин с заметным раскрытием или смещением поверхностей

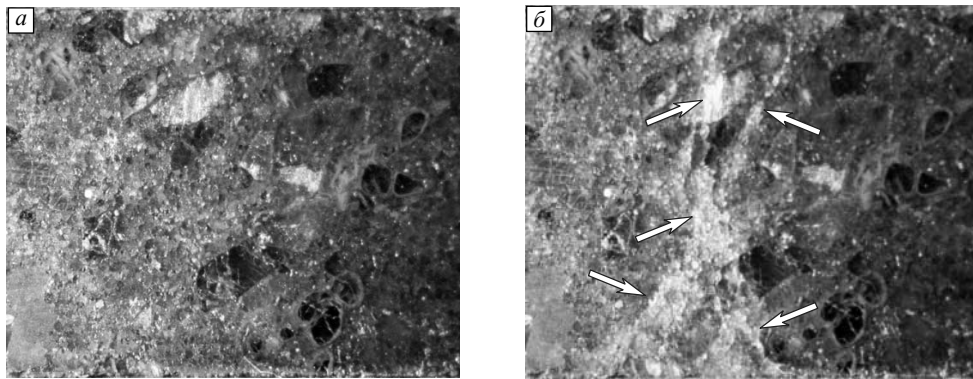


Рис. 5. Поверхность мелкокристаллического образца при деформации 0 (а) и 4 % (б). Стрелками указаны видимые области разрушения

нения. Модуль упругости в мелкокристаллическом образце составил 22 ГПа. До деформации более 1.5 % и осевой нагрузки 90 МПа спада напряжений не наблюдалось. Вязкий характер поведения на диаграмме нагружения в условиях одноосного сжатия в значительной степени связан с кубической формой исследуемого образца. Образование вертикально ориентированной полосы локализации деформации не привело к сбросу напряжений, т.к. зона разрушения не пересекла боковые грани и сохранившие целостность части продолжают нести нагрузку.

Особо следует отметить принципиально различный характер разрушения крупно- и мелкокристаллических образцов (рис. 4, 5). В крупнокристаллическом перидотите происходит множественное разрушение по всем составляющим крупных фрагментов (рис. 4). Для мелкокристаллического образца разрушение локализовано в данном случае в центре и развивается в направлении близком к оси сжатия, лишь в верхней и нижней частях зона локализованной деформации раздваивается и несколько отклоняется по направлениям близким к максимальным касательным напряжениям (рис. 5). Деформации, при которых получены изображения поверхностей деформированных образцов, соответствуют стрелкам на кривых нагружения (рис. 3).

По фотографиям поверхностей деформируемых образцов определены средние коэффициенты поперечной деформации ν [2]. Оценить величину поперечной деформации было затруднительно ввиду ее сильной неоднородности практически с самого начала деформирования образца. Кроме того, упругую деформацию по фотографиям определить не удастся. Таким образом, коэффициент поперечной деформации ν определен по измерениям полной деформации, включающей неупругую часть: $\nu = -\epsilon_1/\epsilon_2$, где ϵ_1 и ϵ_2 — осевая и поперечная деформация образцов соответственно.

По размерам образцов в исходном состоянии и усредненным размерам в начале разрушения получено,

что отношение поперечной и осевой деформаций для крупнокристаллического и мелкокристаллического образцов составило $\nu = 1.36$ и 0.76 соответственно. Очевидно, что столь большие значения поперечной деформации связаны с разрушением образцов и раскрытием трещин разного масштаба. Если пренебречь упругой частью деформации и считать, что с самого начала деформация развивалась как неупругая с раскрытием микротрещин, можно оценить величину дилатансии [3–5] как $\Lambda = \epsilon/\gamma$. Интенсивность сдвиговой деформации определяется выражением

$$\gamma = 2\epsilon_1(1 + \nu)/\sqrt{3},$$

где γ — интенсивность сдвиговой деформации; ϵ_1 — осевая деформация образцов (рис. 3); ν — коэффициент поперечной деформации. Относительное изменение объема будет

$$\epsilon = \Delta V/V = -(\epsilon_1 + 2\epsilon_2) = -\epsilon_1(1 - 2\nu).$$

Отсюда

$$\Lambda = -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu}.$$

Таким образом, получим $\Lambda = 0.630$ и 0.255 для крупнокристаллического и мелкокристаллического образцов соответственно. Данные значения коэффициента дилатансии также выглядят завышенными. Учитывая, что на упругом участке деформирования коэффициент ν , скорее всего, не превышал значений $0.30 \dots 0.35$, то Λ будет еще выше. На рис. 4 и 5 стрелками указаны области видимого разрушения и раскрытия трещин. Хорошо видно, что в крупнокристаллическом образце значительное количество трещин проходит по границам зерен (рис. 4). Поскольку размеры зерен достаточно большие, трудно однозначно выделить преобладающую ориентацию трещин. На фотографии деформированного образца заметны смещения зерен вдоль многих межзеренных границ, а также поворот отдельных фрагментов и зерен. Таким образом, в процессе нагружения происходит значительное раскрытие трещин, за счет чего обеспечи-

вается большая поперечная деформация. Фактически имеет место макроразрушение образца. В такой ситуации наблюдаемый характер деформации нельзя связывать с дилатансией, которая, по сути, является одной из характеристик процесса на мезоуровне, т.к. отражает скорость раскрытия микротрещин при сдвиге элементов структуры [3–5]. Кроме того, отношение размера зерен к размеру исследуемого образца по-видимому не позволяет рассматривать его деформирование в континуальном приближении, предполагая, что в процессе происходят образование и раскрытие лишь микро- и мезотрещин.

В мелкокристаллическом образце (рис. 5) зона неупругой деформации вытягивается в направлении оси сжатия. Однако раскрытия макротрещин не заметно. Полученное значение коэффициента дилатансии в этом случае больше соответствует его физическому определению и может рассматриваться как характеристика процесса неупругой деформации на мезоуровне.

Таким образом, размеры структурных элементов в образцах прямо определяют масштабный уровень формирования трещин, а следовательно, и уровень разрушения породы.

4. Заключение

Рентгеновские исследования кристаллической решетки крупно- и мелкокристаллических образцов перидотитов показали небольшой уровень микродеформации, составляющий $(0.5...2.0) \cdot 10^{-4}$. Это может свидетельствовать о том, что в процессе их образования порода подвергалась интенсивному отжигу при температурах выше вязкохрупкого перехода. Тем не менее по рентгеноструктурным данным получена хорошая корреляция между средним размером кристаллитов и размером зерен в образцах.

При механических испытаниях разрушение образца крупнокристаллического перидотита происходило по всем составляющим крупным фрагментам, в то время как для мелкокристаллического образца разрушение было локализовано в центре и развивалось в направлении близком к оси сжатия. Большие значения коэффициента поперечного расширения, который составил 1.36 для крупнокристаллического и 0.76 для мелкокристаллического образцов, связаны с интенсивным трещинообразованием, что особенно выражено в крупнокристаллическом образце. Поэтому выполненная оценка коэффициента дилатансии в мелкокристаллическом образце выглядит более обоснованной и может рассматриваться в качестве параметра, характеризующего развитие неупругой деформации на масштабе элементов структуры.

Показано, что размеры структурных элементов в материале прямо определяют масштабный уровень формирования трещин, а следовательно, и уровень разрушения породы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ (соглашение № 8661).

Литература

1. Кульков С.Н., Кульков А.С., Чернышов А.И. Петрографический и рентгеноструктурный анализ пластически деформированных дунитов // Физ. мезомех. – 2010. – Спец. вып. – С. 83–88.
2. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001. – 343 с.
3. Reiner M. A mathematical theory of dilatancy // Am. J. Math. – 1945. – V. 67. – P. 350–362.
4. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // ПММ. – 1971. – Т. 35. – № 6. – С. 1017–1029.
5. Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C.D. Dilatancy in fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. – 1966. – V. 71. – P. 3939–3953.

Поступила в редакцию
04.12.2012 г.

Сведения об авторах

Кульков Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., проф., зав. лаб. ИФПМ СО РАН, зав. каф. ТГУ, kulkov@ispms.tsc.ru
Суворов Владимир Дмитриевич, д.г.-м.н., проф., гнс ИНГТ СО РАН, suvorovvd@ipgg.nsc.ru
Похиленко Людмила Николаевна, к.г.-м.н., нс ИГМ СО РАН, lu@igm.nsc.ru
Стефанов Юрий Павлович, д.ф.-м.н., снс ИФПМ СО РАН, stefanov@ispms.tsc.ru
Буякова Светлана Петровна, д.т.н., внс ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, sbuyakova@ispms.tsc.ru
Кульков Алексей Сергеевич, асп. ТГУ, 727@sibmail.com
Чернышов Алексей Иванович, д.г.-м.н., проф., зав. каф. ТГУ, aich@ggf.tsu.ru