

Старостин В. И., Дергачев А. Л., Коломенский Е. Н. Рудоподводящие каналы на Николаевском полиметаллическом месторождении (Рудный Алтай) // Доклады АН СССР. 1977. Т. 237. № 2. С. 424–427.

Hannington M. D., Bleeker W., Kjarsgaard I. Sulfide mineralogy, geochemistry, and ore genesis of the Kidd Greek deposit. II. The bornite zone // Economic Geology Monograph. 1999. Vol. 10. P. 225–266.

Koski R. A., Shanks W. C., Bohrson W. A., Oscarson R. L. The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escanaba Trough, Gorda ridge: implications for depositional processes // Canadian Mineralogist. 1988. Vol. 26. P. 655–673.

Maslennikov V. V., Ayupova N. R., Herrington R. J., Danyushevskiy L. V., Large R. R. Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals // Ore Geology Reviews. 2012. Vol. 47. P. 5–41.

Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevskiy L. V., Herrington R. J., Ayupova N. R., Zaykov V. V., Lein A. Yu., Tseluyko A. S., Melekestseva I. Yu., Tessalina S. G. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers // Ore Geology Reviews. 2016. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.012.

Solomon M., Tornos F., Gaspar O. S. Explanation for many of the unusual features of the massive sulfide deposits of Iberian pyrite belt // Geology. 2002. Vol. 30. № 1. P. 87–90.

Solomon M., Tornos F., Large R. R., Badham J. N. P., Both R. A., Kin Zaw. Zn-Pb-Cu volcanic-hosted massive sulphide deposits criteria for distinguishing brine pool-type from black smoker-type sulphide deposition // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 25. P. 259–283.

Solomon M., Walshe J. L. The formation of massive sulfide deposits on the sea-floor // Economic Geology. 1979. Vol. 74. P. 797–813.

Ustaomer T., Robertson A. H. F. Late Paleozoic marginal basin and subduction-accretion the palaeotethian Kure Complex, Central Pontides, northern Turkey // Journal of Geological Society London. 1994. Vol. 151. Is. 2. P. 291–305.

Zierenberg R. A., Koski R. A., Morton J. L., Bouse R. M. Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba trough, Southern Gorda Ridge // Economic Geology. 1993. Vol. 88. № 8. P. 2069–2099.

Д. Е. Савельев

*Институт геологии УНЦ РАН, г. Уфа
sav171@mail.ru*

О возможной причине различного реологического поведения оливина и ортопироксена в условиях высокотемпературной пластической деформации мантийных ультрамафитов

Введение. Предметом изучения реологии являются пластические свойства материалов, в частности, кристаллических тел, способных испытывать пластическое течение под нагрузкой. Одним из наиболее интересных типов геологических объектов, обнаруживающих широкое распространение следов высокотемпературных пластических деформаций, являются ультрамафиты складчатых поясов (офиолиты). Сегодня считается общепринятым, что они представляют собой фрагменты верхней мантии геологического прошлого. Выяснение закономерностей реологического поведения минералов ультрамафитов может приблизить к пониманию механизмов

дифференциации вещества верхней мантии и расширить знания о процессах мантийного рудообразования и генерации расплавов.

Объект исследований. Оливин и ортопироксен – главные породообразующие минералы мантийных перидотитов – обладают различной «реологической силой» (*strength*). Указания на это можно найти в ряде работ [Carter, 1976; Hirth, Kohlstedt, 1996; Nicolas et al., 1971; Савельев и др., 2008; Савельев, Федосеев, 2011; и др.]. Для оливина характерны: 1) фрагментация (полигонизация) по всему объему протозерен с формированием развитой субструктуры и 2) относительно легкая активизация вторичных систем скольжения. В некоторых случаях разориентация блоков внутри крупных зерен ведет к образованию псевдопойкилитовых включений типа «оливин-оливин», что известно под названием внутривитрической [Carter, 1976] либо «ротационной» [Poirier, 1985] рекристаллизации.

Для ортопироксена характерны: 1) изгиб неблагоприятно ориентированных зерен с образованием кинк-бандов; 2) интенсивная нуклеация – образование многочисленных центров рекристаллизации в участках наибольшего искажения кристаллической решетки; 3) образование механических двойников либо ламелл новых фаз (клиноэнстатита, диоксида) внутри зерен, подверженных изгибу; и 4) поперечный разрыв зерен (в некоторых случаях) с заполнением места разрыва агрегатом оливина. Рекристаллизация заключается в росте новых зерен с минимумом дефектов, к последним относятся также примесные компоненты. Образование дисперсных фаз хромшпинелидов наблюдается преимущественно на участках, сложенных мелкозернистым агрегатом – необластами ортопироксена.

Кроме структурных свидетельств большей «податливости» оливина по сравнению с ортопироксеном, которая запечатлена в образцах мантийных ультрамафитов, имеются и экспериментальные подтверждения. В частности, исследование флюидных включений в минералах из ксенолитов в базальтах и кимберлитах показывает устойчивое уменьшение внутреннего давления во включениях в порядке хромшпинелид \geq ортопироксен \approx клинопироксен \gg оливин, что указывает на неодинаковую величину разгерметизации включений на пути к поверхности [Frezotti et al., 1992; Schwab, Freisleben, 1988; Yamamoto et al., 2002; и др.]. Предполагается, что уменьшение флюидного давления должно наблюдаться в наиболее «податливом» минерале, а увеличение – в наиболее «жестком». Описаны исследования относительной «силы» мантийных минералов по ширине отражений рентгеновской дифракции как функции давления, температуры и времени [Yamamoto et al., 2008]. Полученные результаты подтвердили выводы, сделанные ранее по измерению давления во флюидных включениях, и позволили заключить, что оливин является наиболее «слабым» из рассмотренных мантийных минералов офиолитовых перидотитов.

Обсуждение. Для установления возможной причины различий в реологическом поведении близких по химическому составу, но различающихся по структуре минералов мантийных пород, обратимся к обширному теоретическому и экспериментальному багажу, накопленному в материаловедении. В условиях высокотемпературной пластической деформации поведение металлов и сплавов с различной структурой отличается. Это связано с различием в значениях такого важного параметра, как «энергия дефекта упаковки» (ЭДУ), который характеризует величину энергетического барьера для формирования в структуре кристалла дефектов упаковки [Новиков, 1986; Горелик, 1978; и др.].

В случае высоких значений данного параметра (Н-тип) энергетически более выгодной является релаксация напряжений путем образования дополнительных систем скольжения (или поперечного скольжения, *cross slip*) в кристалле, тогда как при низких значениях ЭДУ (L-тип) поперечное скольжение в кристалле не возникает. Указанные особенности поведения кристаллов отражаются как в текстурах деформации, так и в дислокационной картине на микроуровне. В случае развитого поперечного скольжения формируется сложная текстура (алюминий, медь), для материалов с низкой ЭДУ характерны простые текстуры деформации (латунь). Для материалов с низкой ЭДУ типичны фазовые переходы (например, мартенситового типа), расщепление свободных дислокаций на частичные, которые ограничивают дефекты упаковки. При высоких значениях ЭДУ в кристаллах преобладают свободные дислокации, формирующие полосы скольжения. Кроме того, образование твердых растворов замещения снижает энергию дефекта упаковки, причем тем сильнее, чем выше валентность легирующей примеси.

Описанные выше два контрастных типа реологического поведения можно полностью соотнести с рассматриваемыми породообразующими минералами мантийных ультрамафитов. Н-тип поведения характерен для оливина (сложные текстуры деформации, развитое поперечное скольжение, минимальное количество примесей). При этом на границах разориентированных блоков фиксируется сегрегация примесных компонентов в виде собственных минеральных фаз хромшпинелидов [Савельев и др., 2016; Савельев, Блинов, 2015].

Ортопироксен проявляет L-тип реологического поведения. Многочисленные исследования природно- и искусственно деформированных кристаллов энстатита показали, что уже на ранних стадиях деформация по единственной активной системе скольжения (100)[001] ведет к фазовому переходу мартенситового типа, при котором в плоскости (100) образуются ламелли клиноэнстатита, ограниченные частичными дислокациями [Coe, Kirby, 1975; McLaren, Etheridge, 1976; и др.].

В отличие от оливина, представленного в мантийных ультрамафитах почти чистым форстеритом (Fe_{6-12}), для крупных кристаллов энстатита характерно образование твердых растворов замещения (примеси: Al, Ca, Cr, Na). Деформация этих кристаллов часто сопровождается явлением деформационно-индуцированного распада, который ведет к образованию Na- и Cr-содержащего паргасита в плоскости (100) и в кинк-бандах. В наиболее напряженных участках происходит рекристаллизация, которая сопровождается образованием мелких равноосных зерен предельно деплетированного энстатита, мельчайших выделений хромшпинелида и сегрегаций, интерпретируемых как закаленный расплав (Na-Cr-паргасит, оливин Fe_{25-30} , аварунит, пентландит) [Савельев, Сергеев, 2016].

Заключение. Проведенный анализ показывает, что одной из вероятных причин различного поведения главных породообразующих минералов верхней мантии – оливина и ортопироксена – является величина энергии дефекта упаковки, которая, в свою очередь, диктуется особенностями кристаллической структуры минералов. Высокая ЭДУ оливина способствует развитию множественного скольжения и, как следствие, большей податливости его агрегатов. Низкая величина ЭДУ ортопироксена вызывает образование дефектов упаковки, ведет к фазовому переходу ортоэнстатит-клиноэнстатит, а в отдельных случаях – деформационно-индуцированному распаду кристаллов, сопровождающемуся выделением легкоплавкой составляющей. Различия в реологическом поведении минералов результируются образованием более мобильных (пластичных) слоев, сложенных мономинеральным оливином (дунитов),

которые можно рассматривать как «ослабленные» зоны верхней мантии, где локализовано пластическое течение.

Исследования проведены в рамках выполнения темы Госконтракта «Модель образования месторождений хрома в офиолитовых комплексах Южного Урала».

Литература

- Горелик С. С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978. 568 с.
- Новиков И. И.* Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
- Савельев Д. Е., Блинов И. А.* Синдеформационные выделения хромшпинелидов в пластически деформированных агрегатах оливина (офиолиты Крака, Южный Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. № 4. С. 44–69.
- Савельев Д. Е., Сергеев С. Н.* Деформационно-индуцированные процессы в генезисе мантийных ультрамафитов: Деформационный распад энстатита // VIII Всерос. петрограф. конф. с междунар. участием «Петрология магматических и метаморфических комплексов». Томск, 2016. С. 297–303.
- Савельев Д. Е., Федосеев В. Б.* Сегрегационный механизм формирования тел хромитов в ультрабазитах складчатых поясов // Руды и металлы. 2011. № 5. С. 35–42.
- Савельев Д. Е., Сначев В. И., Савельева Е. Н., Бажин Е. А.* Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 2008. 320 с.
- Савельев Д. Е., Белозуб Е. В., Блинов И. А., Кожевников Д. А., Котляров В. А.* Петрологические свидетельства синдеформационной сегрегации вещества при образовании дунитов (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // Минералогия. 2016. № 4. С. 56–77.
- Carter N. L.* Steady state flow of rocks // Reviews in Geophysics and Space Physics. 1976. Vol. 14. P. 301–360.
- Coe R. S., Kirby S. H.* The orthoenstatite to clinoenstatite transformation by shearing and reversion by annealing: Mechanism and potential applications // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1975. Vol. 52. P. 29–55.
- Hirth G., Kohlstedt D. L.* Water in the oceanic upper mantle: implications for rheology, melt extration and the evolution of the lithosphere // Earth and Planetary Science Letters. 1996. Vol. 144. P. 93–108.
- Frezzotti M. L., Burke E. A. J., De Vivo B., Stefanini B., Villa I. M.* Mantle fluids in pyroxenite nodules from Salt Lake Crater (Oahu, Hawaii) // European Journal of Mineralogy. 1992. Vol. 4. P. 1137–1153.
- McLaren A. C., Etheridge M. A.* A transmission electron microscope study of naturally deformed orthopyroxene. I. Slip mechanisms // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1976. Vol. 57. P. 163–177.
- Nicolas A., Bouchez J. L., Boudier F., Mercier J. C.* Textures, structures and fabrics due to solid state flow in some European lherzolites // Tectonophysics. 1971. Vol. 12. P. 55–86.
- Poirier J.-P.* Creep of crystals. High-temperature deformation processes in metals, ceramics and minerals. Cambridge University Press, 1985. 287 p.
- Schwab R. G., Freisleben B.* Fluid CO₂ inclusions in olivine and pyroxene and their behaviour under high pressure and temperature conditions // Bulletin of Mineralogy. 1988. Vol. 111. P. 297–306.
- Yamamoto J., Kagi H., Kaneoka I., Lai Y., Prikhod'ko V. S., Arai S.* Fossil pressures of fluid inclusions in mantle xenoliths exhibiting rheology of mantle minerals: implications for the geobarometry of mantle minerals using micro Raman spectroscopy // Earth and Planetary Science Letters. 2002. Vol. 198. P. 511–519.
- Yamamoto J., Ando J., Kagi H., Inoue T., Yamada A., Yamazaki D., Irifune T.* In situ strength measurements on natural upper-mantle minerals // Physics and Chemistry of Minerals. 2008. Vol. 35. P. 249–257.