

УДК 552.321.6+553.46

Д.Е. Савельев<sup>1</sup>, Д.К. Макатов<sup>2</sup>, С.Н. Сергеев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа

<sup>2</sup>Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан;

<sup>3</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХРОМИТИТОВ И УЛЬТРАМАФИТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗ-ЖЕМЧУЖИНА (КЕМПИРСАЙСКИЙ МАССИВ, КАЗАХСТАН)

Описаны особенности макро- и микроструктурного строения хромитов и ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина. Показано, что формирование мантийного разреза массива происходило в результате высоко-температурного пластического течения. Макротекстура и микроструктурные особенности хромитов также были сформированы в условиях пластического течения вмещающих дунитов с рассеянным рудным материалом. В результате течения двухфазного потока происходила сегрегация хромита с формированием линзовидно-полосчатых скоплений, причем в центральных частях линз создавались условия для соприкосновения (impingement) изначально рассеянных рудных зерен и на их контактах происходило нивелирование изначальной разориентировки, то есть образовалось новое зерно с однородной кристаллографической ориентацией. В качестве одного из вероятных механизмов образования массивных хромитов предполагается «спекание под давлением».

*Ключевые слова:* ультрамафиты, хромититы, оливин, хромитинелид, дифракция обратно-рассеянных электронов.

**DOI: 10.17072/chirvinsky.2023.230**

**Введение.** Кемпирсайский массив является одним из крупнейших на Урале и вмещает уникальные месторождения хромовых руд – наиболее крупные из известных в комплексах офиолитового типа. Месторождения офиолитов часто относят к так называемым «подиформным залежам» (podiform chromitite) из-за того, что они характеризуются нерегулярной морфологией и зачастую по форме подобны стручкам и всегда обрамлены дунитовой оболочкой (dunite envelope). Эти особенности резко противопоставляют их выдержанным по простиранию слоям-рифам в платформенных расслоенных интрузиях.

Специфическая морфология залежей, резкая морфоструктурная изменчивость, неизменная приуроченность к дунитам и отсутствие четких признаков магматического образования способствовали возникновению различных моделей происхождения месторождений

данного типа. В современной литературе наиболее часто их интерпретацию чаще всего связывают с реакцией расплав+рестит [4 и др.], реже – с флюидно-метасоматическим замещением [2, 5 и др.] либо твёрдо-фазной дифференциацией [1].

Для выяснения условий образования хромититов месторождения Алмаз-Жемчужина в юго-восточной части Кемпирсайского массива нами было предпринято изучение вещественных, макро- и микроструктурных особенностей хромититов и вмещающих их ультрамафитов.

**Результаты.** В полевом сезоне 2022 г. нами были изучены образцы хромититов различных структурных типов из отвалов и скважин месторождения Алмаз-Жемчужина, а также наиболее свежих образцов вмещающих дунитов и лерцолитов, отобранных из керна глубоких горизонтов данного объекта (глубина от 420 до 1100 м).

При изучении шлифов и аншлифов методами оптической и электронной петрографии установлено, что главными минералами руд являются высокохромистые шпинелиды ( $Cr/Cr+Al=0.8-0.83$ ), а также серпентин и хлорит, замещающие первичный оливин. Хромшпинелиды содержат минеральные включения, которые распределены весьма неравномерно. Наиболее распространенные минералы включений – оливин (серпентин) и амфибол, реже встречаются флогопит, пироксены и сульфиды основных металлов (Fe, Ni, Cu, Co), а также минералы платиновой группы.

Оливин из включений в хромите обладает максимально магниезальным составом ( $Fo_{97-98}$ ) и аномально высокими концентрациями никеля (до 1.8 мас.% NiO). Закрытие обменных реакций между оливином и хромитом происходило в интервале температур 700–850 °С и fugitivity кислорода  $-1.04 \dots +2.8 \Delta FMQ$ , что скорее всего соответствует условиям верхней мантии преддугового бассейна.

Из нескольких образцов были изготовлены препараты, ориентированные относительно макроскопических элементов текстуры – полосчатости, минеральной уплощенности и линейности. Микроструктурное изучение препаратов было проведено методами дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОЭ/EBSD) на микроскопе Tescan MIRA в Институте проблем сверхпластичности металлов РАН (Уфа). Поверхность препаратов для EBSD-анализа была подготовлена двухступенчатой полировкой сначала механическим методом с использованием алмазных паст, а затем финишной механо-химической полировкой с использованием суспензии на основе коллоидного оксида кремния (для снятия наклепа).

EBSD-сканирование препаратов проводилось с шагом от 10 до 20 мкм с детализацией в некоторых случаях до 2 мкм. В образцах

серпентинизированных ультрамафитов были получены преимущественно текстурные диаграммы, а в хромититах удалось получить достаточно качественные карты в кодировке обратных полюсных фигур (ОПФ).

Текстуры, полученные для оливина и ортопироксена из вмещающих ультрамафитов, характеризуются довольно сильной предпочтительной кристаллографической ориентировкой обоих минералов. Выявлены следующие типы текстур оливина: 1) с максимумом оси  $[100]$  вблизи плоскости минеральной уплощенности и рядом с выходом линейности, при этом ось  $[001]$  образует максимум на плоскости уплощенности перпендикулярно линейности, а максимум оси  $[010]$  расположен перпендикулярно плоскости уплощенности (обр.646, 786, рис.1); 2)

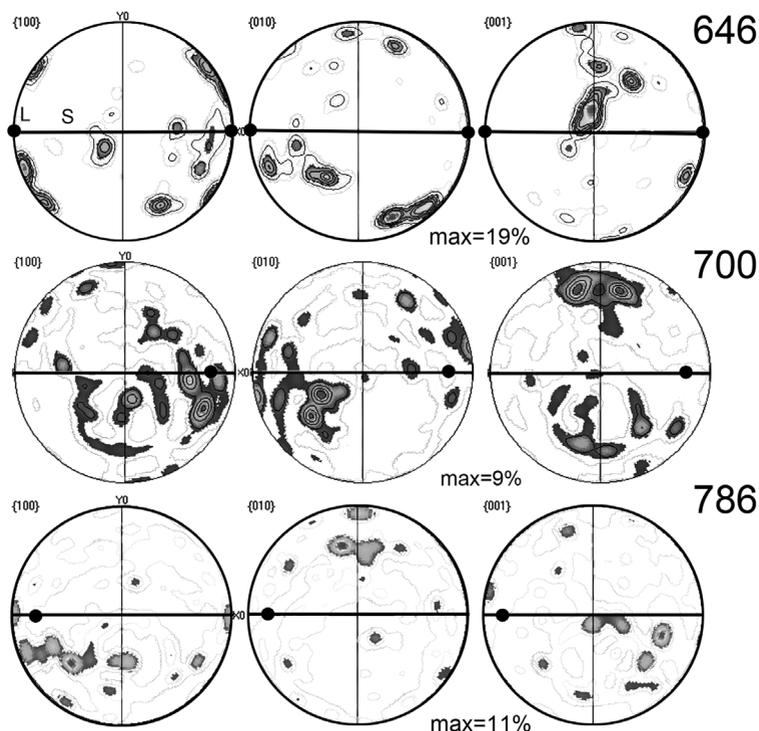


Рис. 1. Прямые полюсные фигуры для оливина из вмещающих ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина  
Верхняя полусфера равноплощадной проекции, максимумы: обр. 646 – 4,4%; обр. 700 – S – проекция плоскости минеральной уплощенности и полосчатости, L – выходы линейности

максимум оси [100] также расположен вблизи плоскости уплощенности и выхода линейности, но две другие оси «меняются местами: максимум [010] расположен на плоскости уплощенности, а максимум [001] перпендикулярен ей (обр. 700, рис.1).

Хромититы демонстрируют линзовидно-полосчатую макротекстуру и разнотекстурную структуру, при этом на участках редковкрапленного строения размер зерен минимален (0,1–1 мм), а на участках массивного строения видимый размер индивидов составляет 1–3 мм. На картах в кодировке ОПФ отмечается формирование внутри агрегата массивных хромититов крупных участков почти однородной ориентировки с максимальными углами разориентировки 2–5° и постепенное увеличение разориентировки агрегата с приближением к их границам (рис.2). В то же время, хромитовые зерна, отделенные друг от друга силикатным материалом, характеризуются более мелкими размерами по сравнению с описанными участками, в сближенных мелких зернах отмечается более значительная разориентировка (большеугловые границы).

**Обсуждение результатов и выводы.** Полученные нами петрографические, минералогические и микроструктурные данные в целом согласуются с общими закономерностями строения ультрамафитовых комплексов и залежей хромититов [2, 4], хотя в частностях расходятся с некоторыми известными положениями. В изученном хромитоносном

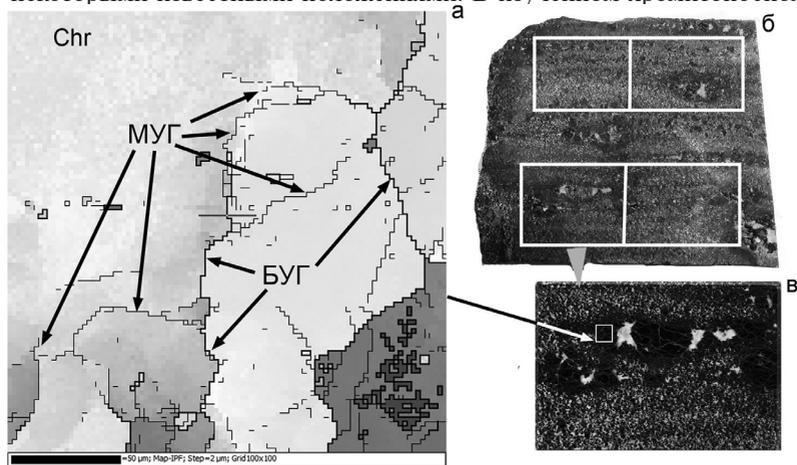


Рис. 2. Микроструктурные особенности хромитовых агрегатов линзовидно-полосчатых руд из отвала месторождения Алмаз-Жемчужина  
а – микроструктурная карта в кодировке обратных полюсных фигур (видны разные типы границ: большеугловые – БУГ (>15°) и малоугловые – МУГ (<15°); б – общий вид образца, в – фрагмент образца и положение исследованного участка

разрезе довольно широким распространением пользуются лерцолиты с глиноземистым шпинелидом. Дуниты содержат высокохромистый акцессорный шпинелид, а оливин из включений весьма обогащен никелем. Все это говорит о высокой степени деплетирования околорудных ультрамафитов, хотя в целом разрез представлен относительно слабо истощенными породами верхней мантии.

Полученные микроструктурные данные говорят о формировании ультрамафитов в условиях высокотемпературного пластического течения, сопровождавшегося синтетектонической рекристаллизацией. Судя по текстурным диаграммам, в оливине проявились две системы скольжения (010)[100] и (001)[100], которые соответствуют типам текстур А и Е по классификации Юнга [7]. Оба типа текстур диагностированы в экспериментах при стрессе до 300 МПа, при этом тип А реализуется в «сухих» (<200 ppm H/Si), а тип Е во «влажных» условиях (200–1000 ppm H/Si).

Макротекстура и микроструктурные особенности хромититов также были сформированы в условиях пластического течения вмещающих дунитов с рассеянным рудным материалом. В результате течения двухфазного потока происходила сегрегация хромита с формированием линзовидно-полосчатых скоплений, причем в центральных частях линз создавались условия для соприкосновения (impingement) изначально рассеянных рудных зерен и на их контактах происходило нивелирование изначальной разориентировки, то есть образовалось новое зерно с однородной кристаллографической ориентацией. Подобный механизм был предложен для объяснения особенностей микроструктуры в хромититах Индии [3]. Данный механизм также близок к «спеканию под давлением» (high-P sintering), который предлагается для объяснения генезиса крупнозернистых массивных хромититов как в офиолитовых, так и в расслоенных комплексах [6, 8].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00019, <https://rscf.ru/project/22-17-00019/>.*

#### *Библиографический список*

1. Савельев Д.Е., Федосеев В.Б. Твёрдофазное перераспределение минеральных частиц в восходящем мантийном потоке как механизм концентрации хромита в офиолитовых ультрамафитах (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // Георесурсы, 2019. – Т. 21. – № 1. – С. 31–46. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.31-46>
2. Borisova A.Y., Ceuleneer, G., Kamenetsky V.S., Arai S., Béjina F., Abily B., Bindeman I.N., Polvé, M., De Parseval P., Aigouy T., Pokrovski G.S. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions // Journal of Petrology, 2012. – V. 53. P. 2411–2440.
3. Ghosh B., Misra S., Morishita T. Plastic deformation and post-deformation annealing in chromite: Mechanisms and implications // American Mineralogist. – 2017. – V.102. – P.216–226.

4. Gonzalez-Jimenez J.M., Griffin W.L., Proenza A., Gervilla F., O'Reilly S.Y., Akbulut M., Pearson N.J., Arai S. Chromitites in ophiolites: how, where, when, why? Part II. The crystallisation of chromitites // *Lithos*, 2014. – V. 189. – P. 148–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.008>
5. Johan Z., Martin R.F., Ettler V. Fluids are bound to be involved in the formation of ophiolitic chromite deposits // *European Journal of Mineralogy*, 2017. – V. 29. – P. 543–555.
6. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan. Dissertation. Cardiff University. 2012. 473 p.
7. Jung H. Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones: a review // *Geosciences Journal*. – 2017. – V.21(6). – P. 985–1011. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1>
8. White J.C., White S.H. (1981) The structure of grain boundaries in tectonites // *Tectonophysics*. – V.78. – P. 613–628.

MICROSTRUCTURAL FEATURES OF CHROMITITE AND  
ULTRAMAFIC ROCKS OF ALMAZ-ZHEMCHUZHINA DEPOSIT  
(KEMPIRSAY MASSIF, KAZAKHSTAN)

**D.E. Saveliev, D.K. Makatov, S.N. Sergeev**

*SAVL71@mail.ru*

The features of the macro- and microstructure of chromitites and ultramafic rocks of the Almaz-Zhemchuzhina deposit are described. It is shown that the formation of the mantle section of the massif occurred as a result of high-temperature plastic flow. The macrotexture and microstructural features of chromitites were also formed under the conditions of plastic flow of host dunites with scattered ore material. As a result of the two-phase flow, chromite was segregated with the formation of lenticular-banded accumulations, and in the central parts of the lenses, conditions were created for contact (impingement) of initially dispersed ore grains, and the initial misorientation leveled out at their contacts, i.e., a new grain with a uniform crystallographic orientation was formed. As one of the probable mechanisms for the formation of massive chromitites, high-P sintering is assumed.

*Keywords: ultramafic rocks, chromitite, olivine, chromian spinel, EBSD.*