

## О ПРИРОДЕ ЗОН СЕЛЕКТИВНОГО ОТРАЖЕНИЯ В ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТАХ

*К. А. Уймина, М. А. Смирнова, В. И. Гроховский*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, ksenia\_uimina@mail.ru*

При визуальном наблюдении травленных шлифов некоторых железных метеоритов наблюдаются области оптического контраста, называемые «Schliren bands» или зоны селективного отражения (ЗСО). Такие зоны в виде параллельных полос обычно встречаются в метеоритах класса атакситов IVB, например, Чинге, Tlacotepec [Buchwald, 1981]. Полосы простираются в пределах границ высокотемпературных ГЦК монокристаллов Fe-Ni. Эти монокристаллы сформировались при кристаллизации металлических расплавов со скоростью 100–10000 °С/млн лет и могли достигать размеров нескольких метров. При этом разнообразные структуры, выявленные при изучении метеоритов, наследуют кристаллографию монокристаллов ГЦК-тэнита ГЦК, из которых они образовались. Ранее выдвигались гипотезы о природе формирования полос селективного отражения как результата ударного воздействия, двойникования, химической и фазовой неоднородностей [Buchwald, 1981].

Примечательно, что зоны селективного отражения также были выявлены в закаленных псевдомонокристаллах сплавов Fe-C, выращенных по методу Бриджмена [Счастливец и др., 1970; Родионов, Счастливец, 1996], что позволяет сделать ряд предположений об общей природе их формирования. Настоящая работа посвящена исследованию микроструктуры, химического и фазового состава метеорита Дронино методами растровой электронной микроскопии с приставками EDS и EBSD, а именно сравнению природы формирования ЗСО в метеоритах Чинге, Дронино и в псевдомонокристаллическом закаленном сплаве Fe-C.

Для изучения продуктов фазовых превращений в области ЗСО использовался растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6490LV, снабженный приставками EBSD и EDS и программным обеспечением INCA Crystal 300 (ЦКП УрФУ). Участков образцов для локального EBSD-анализа маркировались с помощью прибора ПМТ-3 – были нанесены метки в виде отпечатков пирамиды. Затем образцы переполеровывались с финишной обработкой на коллоиде SiO<sub>2</sub> с размером частиц 40 нм.

Ранее методом EBSD было показано, что наличие ЗСО в метеорите Чинге (рис. 1а) обусловлено различными наборами ориентировок ОЦК-камасита [Уймина и др., 2010]. На основе этих данных было предположено, что природа полос селективного отражения в метеорите Чинге обусловлена ориентацией продуктов бездиффузионного превращения мартенситного типа, на что указывало наличие общей оси вращения и различного набора ориентировок в смежных ЗСО.

Для подтверждения этого предположения был выполнен EBSD-анализ образца псевдомонокристалла закаленного сплава Fe-C, по составу соответствующего стали 40X (рис. 1в). При анализе электронно-микроскопического изображения было выявлено, что границы ЗСО слабо выражены и ЗСО отличаются лишь ориентацией продуктов мартенситного превращения. С помощью приставки EDS по обе стороны границы получены данные химического анализа. Отличий в химическом составе между участками не обнаружено.

Локальный фазовый EBSD-анализ области сканирования, проходящей через границу двух ЗСО, выявил наличие трёх фаз: мартенсита, цементита и  $\alpha$ -Fe. Для каждой фазы псевдомонокристалла с помощью пакета INCA Crystal 300, был получен набор ППФ слева и справа от границы ЗСО. Анализ ППФ показал наличие 3 ориентаций

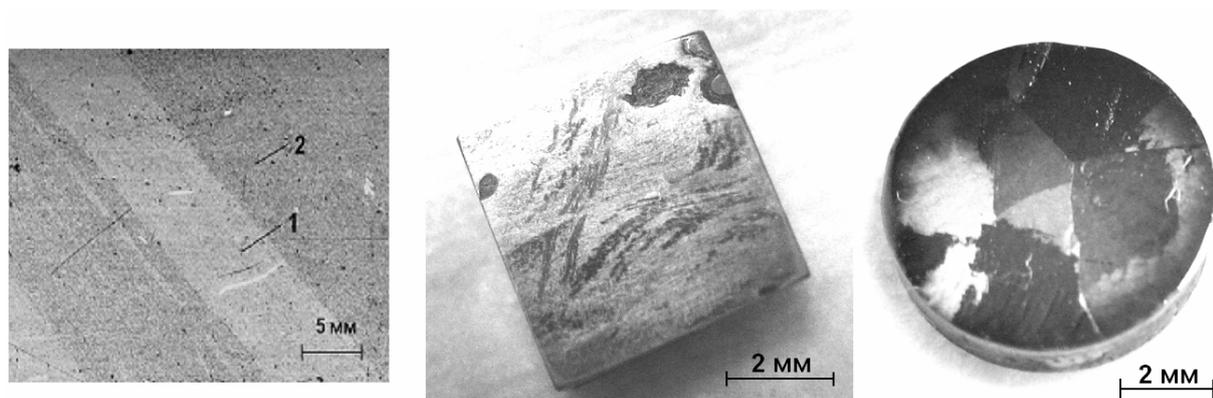


Рис. 1. Зоны селективного отражения в метеоритах Чинге (а), Дронино (б) и в закаленном псевдомонокристалле сплава Fe-C.

мартенсита в каждой ЗСО, причём одна из них являлась преимущественной. Ориентации мартенсита были сгруппированы в пары, близкие по расположению полюсов. Все 3 полученные пары ориентировок отличались внутри себя на угол менее  $10^\circ$ . Анализ ППФ в программе CaRIne Crystallography 3.1, также как в предыдущем эксперименте показал, что плотноупакованное направление  $[111]$  четырёх из шести кристаллов мартенсита и  $[010]$  для двух кристаллов мартенсита могут соответствовать общему плотноупакованному направлению  $\langle 110 \rangle$  исходной аустенитной ГЦК-фазы. Все выявленные ориентации мартенситных кристаллов отвечают одному типу ориентационных соотношений – соотношению Курдюмова-Закса. Была выявлена общая ось вращения для набора ориентаций мартенситных кристаллов  $[111]$  и  $[010]$ . Исходя из этого, можно сделать вывод, что образование ЗСО в псевдомонокристаллической стали 40X связано с различной ориентировкой пакетов мартенсита после неполного мартенситного превращения. Это подтверждает предположение о бездиффузионном характере формирования ЗСО в метеорите Чинге.

Травленные шлифы железного метеорита Дронино также демонстрируют ЗСО с неровными границами (рис. 1б). Аномальный атаксит Дронино состоит из металлической основы Fe-Ni-Co (90 объем. %) в виде микроскопического взаимного прорастания двух минералов - бедного никелем камасита и богатого никелем тэнита, а также троилита FeS (10 об. %). Металлическая основа содержит 9.3 вес. % Ni и 0.47 вес. % Co, остальное Fe [Grokhovsky et al., 2005]. Включения троилита имеют толщину 1–5 мм и по длине достигают 2–3 см, при этом они ориентированы в одном направлении.

Методом EBSD были получены карты распределения фаз в метеорите Дронино, которые показали, что все распознанные дисперсные фазы металлической основы метеорита Дронино имеют ГЦК решетку, матрица же соответствует ОЦК-фазе Fe(Ni,Co).

Методом EDS был исследован химический состав локальных областей метеорита Дронино. В результате сканирования областей ЗСО были получены данные по среднему весовому содержанию Ni. Обедненные Ni участки содержат 8.9 вес. % Ni, в них присутствуют крупные выделения тэнита. Обогащенные Ni участки заполнены мелкими выделениями тэнита и содержат 10.2 вес. % Ni. Выделения тэнита содержат 25.8 вес. % Ni, в то время как содержание Ni в матрице камасита составляет 7.9 вес. %.

С помощью программы SIAMS Photolab был проведен количественный анализ структуры ЗСО метеорита Дронино. Анализ показал, что в светлой области (рис. 1б) объемное содержание тэнита составляет 16.8 % и средняя площадь включений  $12.1 \text{ мкм}^2$ , а в темной области ЗСО объемное содержание тэнита 25.3 % и среднюю площадь включений  $7.8 \text{ мкм}^2$ . В обогащенной Ni темной области включения расположены ближе на 30 %, чем в обедненной Ni светлой ЗСО. Поэтому оптический

контраст, обеспечиваемый долей и размерами тэнита, соответствует различному химическому составу ЗСО.

Полученные по результатам EBSD-сканирования прямые полюсные фигуры были сопоставлены с теоретической моделью кристаллов тэнита и камасита в программе CaRIne Crystallography 3.1. Было выявлено пять ориентировок кристаллической решётки: две для камасита и три для тэнита. При этом кристаллы ОЦК и ГЦК фаз имели по одной преимущественной ориентировке. ППФ, соответствующие остальным ориентировкам, обладали значительно меньшей интенсивностью.

Было установлено, что для преимущественных ориентаций ОЦК- и ГЦК-фаз выполняется ориентационное соотношение Курдюмова-Закса, что находится в пределах ошибки определения полюса:

$$(01\bar{1})_{\text{ОЦК1}} \parallel (\bar{1}11)_{\text{ГЦК1}} \text{ с точностью } 6.2^\circ, [11\bar{1}]_{\text{ОЦК1}} \parallel [110]_{\text{ГЦК1}} \text{ с точностью } 4.8^\circ.$$

По сумме полученных результатов и проведённых исследований структурного, фазового и химического состава метеорита Дронино предполагается следующая модель формирования структуры металла. Из первоначальной структуры тонкого октаэдрита, содержащей участки плессита (смесь камасита и тэнита) в ходе ударного нагрева и последующего охлаждения реализовалось превращение сдвиговым бездиффузионным путём. При этом после охлаждения образовалась новая ОЦТ-фаза, которая впоследствии распалась на тэнит и камасит, с сохранением части высокотемпературного тэнита. В ходе нагрева гомогенизация тэнита полностью не прошла, и сохранился градиент по Ni – участки с высоким содержанием Ni и с низким содержанием Ni наследовали морфологию октаэдрита.

Выявленные закономерности подтверждают, что оптический контраст ЗСО в метеорите Дронино обусловлен исходной химической неоднородностью металла и разным соотношением и размерами тэнита и камасита в превращённых участках.

Сопоставляя результаты проделанных исследований можно сделать вывод, что визуально наблюдаемые эффекты Schliren bands имеют различную природу формирования. Для метеорита Дронино появление ЗСО обусловлено различием химического состава металла, разным соотношением и размерами ГЦК- и ОЦК-фаз, а данные, полученные при изучении псевдомонокристаллов стали 40X подтвердили, что ЗСО в метеорите Чинге связаны с протеканием бездиффузионного превращения мартенситного типа.

*Работа выполнена при поддержке ФЦП «Кадры» НК-605П\_19 № П1154.*

## Литература

- Buchwald V. F.* On the Oriented Sheen in Ataxites // *Meteoritics*. 1981. Vol. 16. P. 298.
- Grokhovsky V. I., Oshtrakh M. I., Milder O. B., Semionkin V. A., Kadushnikov R. M., Glazkova S. A.* Structural Studies of Iron Meteorite Dronino // *Lunar & Planet. Sci.* XXXIV. № 1980. 2005.
- Родионов Д. П., Счастливцев В. М.* Стальные монокристаллы // Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 273 с. С. 10–260.
- Счастливцев В. М., Родионов Д. П., Садовский В. Д., Смирнов Л. В.* Некоторые структурные особенности закалённых монокристаллов конструкционной стали, выращенных из расплава // *ФММ*. 1970. Т. 30. Вып. 6. С. 1238–1244.
- Уймина К. А., Ларионов М. Ю., Карабаналов М. С., Гроховский В. И.* Определение ориентационных соотношений минералов в метеорите Чинге методом ДОЭ // *Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования»*. Екатеринбург – Миасс: УрО РАН, 2010. С. 349–351.