

СТРУКТУРА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ СВЕТЛОЙ ЛИТОЛОГИИ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК

Брусницына Е.В.¹, Муфтахетдинова Р.Ф.¹, Яковлев Г.А.^{1,2}, Гроховский В.И.¹

¹Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия, jeka_bru@list.ru

²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Метеорит Челябинск LL5 S4 W0 – обыкновенный хондрит, вещество, которого состоит из нескольких визуально различимых структурных зон – литологий: светлой, темной и ударно-расплавной [Badyukov et al., 2015; Galimov et al., 2013; Grokhovsky et al., 2014]. Такие зоны наблюдаются как в мелких индивидуальных фрагментах, так и сосуществуют в массивных образцах из озера Чебаркуль. Наличие подобных зон свидетельствует о том, что в космической истории родительского тела происходили ударные события, возможно ставшие причиной частичного или полного переплава исходной структуры. Фрагменты со светлой литологией подверглись незначительным деформациям и нагреву и в большей степени соответствуют первоначальному веществу родительского тела.

В данной работе исследовались восемь фрагментов из светлой литологии метеорита Челябинск. После распила поверхность образцов готовилась по стандартной металлографической методике. В качестве травителя использовался 2 %-ный раствор азотной кислоты в спирте. Микроструктура металлических частиц исследовалась с помощью оптического инвертированного микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT и электронного микроскопа FE-SEM ΣIGMA VP с приставкой EDS.

Минеральный состав металлических частиц светлой литологии метеорита Челябинск характерен для обыкновенных хондритов и представлен камаситом α -Fe(Ni, Co) и тэнитом γ -Fe(Ni, Co). Однако частицы со структурой зонального тэнита, так называемым «М-профилем», практически отсутствуют. По структурному составу исследуемые образцы были разделены на три группы (А, В и С): 1) А1 – фрагмент с неизменной структурой металлических частиц; 2) В1 и В2 – фрагменты со структурой металлических частиц похожей на зональную; 3) С1, С2, С3, С4 и С5 – фрагменты, в которых не обнаружены металлические частицы со структурой зонального тэнита, присутствуют мартенситоподобные структуры.

Структура металла фрагмента А1 характерна для обыкновенных хондритов и не демонстрирует каких-либо структурных изменений. В данном образце присутствуют зональные высоконикелевые частицы с областями тетратэнита (γ') и облачной

зоной ($\gamma' + \alpha$). В этом же фрагменте ранее была обнаружена уникальная металлическая частица, содержащая минерал хаксонит и имеющая в центральной части структуру игольчатого мартенсита, которая формируется в земных железоникелевых сплавах и содержит углерод [Grokhovsky et al., 2015; Brusnitsyna et al., 2018].

Во фрагментах второй группы присутствуют металлические частицы, которые при исследовании в оптическом микроскопе имеют схожее строение с зональным тэнитом. После травления наблюдаются темный центр и светлая каемка. При изучении данных частиц при более высоком разрешении с использованием электронного микроскопа в центральной части выявляется мелкозернистая структура плессита ($\alpha + \gamma$) с размером зерна несколько сотен нанометров. Структура облачной зоны и тетратэнит в таких частицах отсутствуют. Содержание Ni по краям варьирует от 45 до 50 вес. %, в центральной части – от 30 до 40 вес. %. Линейное картирование показывает небольшой градиент по Ni, М-профиль отсутствует. В частицах камасита фрагмента В1 были обнаружены линии Неймана, которые указывают на ударно-индуцированную деформацию камасита. Также встречаются частицы камасита, в которых наблюдается рост новых зерен α -фазы с вытянутой столбчатой структурой.

Металлографические исследования фрагментов третьей группы не выявили наличие металлических высоконикелевых частиц с зональным строением. Все фрагменты этой группы содержат различные по морфологии мартенситоподобные структуры, которые можно разделить на два типа: 1) игольчатые, расположенные по краю зерна вокруг плессита и 2) игольчатые в центральной части зерна и зарождающиеся на включениях троилита (FeS). Структуры 1-го типа обнаружены во фрагментах С2 и С3, 2-го типа – в С1, С4 и С5. Также для всех фрагментов этой группы характерны частицы рекристаллизованного металла со структурой поликристаллического камасита. Кроме того, во фрагменте С5 имеется несколько металлических частиц с двойниками роста в γ -фазе. Содержание Ni в таких однородных частицах тэнита составляет 35–39 мас. %. Двойники роста обычно

выглядят как широкие полосы, ограниченные параллельными линиями, связанными с когерентными плоскостями {111}. Иногда эти микромасштабные двойники не связаны с границами зерен. Подобные двойники наблюдаются во многих ГЦК-сплавах, а также в аустенитных сталях после длительного отжига [Шредер и Роуз, 1972].

Ранее эксперименты по тепловому воздействию на метеорит Сеймчан показали, что облачная зона в тэните исчезает при нагреве до температуры 700 °C [Brusnitsyna et al., 2020]. При этой же температуре наблюдалась рекристаллизация в камасите. Вероятно, и гомогенизация тэнита с образованием двойников может происходить при температурах выше 700 °C. Сопоставляя данные, полученные при нагреве образцов из метеорита Сеймчан и исследованной структуры металлических частиц метеорита Челябинск, можно сделать вывод о том, что некоторая часть вещества светлой литологии хондрита была нагрета до температуры 700 °C, при этом часть метеорита не претерпела изменений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030». Е.В. Брусницына благодарит за поддержку Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEUZ-2023-0014.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шредер А., Роуз А. Металлография железа. Том II. «Структура сталей» (с атласом микрофотографий). Перев. с англ. М.: Металлургия, 1972. 478 с.
2. Badyukov D.D., Raitala J., Kostama P., Ignatiev A.V. Chelyabinsk Meteorite: Shock Metamorphism, Black Veins and Impact Melt Dikes, and the Hugoniot // Petrology. 2015. V. 23. P. 103–115.
3. Brusnitsyna E.V., Badekha K.A., Grokhovsky V.I., Muftakhedinova R.F. Martensite morphology in different types of meteorites // Meteoritics & Planetary Science. 2018. V. 53. P. 6290.
4. Brusnitsyna E.V., Muftakhedinova R.F., Yakovlev G.A., Tyutrina T.V., Grokhovsky V.I. Annealing of the Seymchan meteorite at the temperature of 700 °C // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313.
5. Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alexeev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevast'yanov V.S. Analytical Results for the Material of the Chelyabinsk Meteorite // Geochemiya. 2013. V. 51. P. 522–539.
6. Grokhovsky V.I., Brusnitsyna E.V., Yakovlev G.A. Haxinite in Chelyabinsk LL5 meteorite // Meteoritics & Planetary Science. 2015. V. 50. P. 5272.
7. Grokhovsky V.I., Kohout T., Gritsevich M., Koneva E.V. Physical properties, structure and fracturing of the Chelyabinsk LL5 meteorite body // Meteoritics & Planetary Science. 2014. V. 49. P. 5364.