

НАХОДКА МИНЕРАЛА ХАКСОНИТ В МЕТЕОРИТЕ ЧЕЛЯБИНСК

Е.В. Брусницына, Г.А. Яковлев, А.С. Копысов, В.И. Гроховский

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, jeka_bru@list.ru

Прошло уже более двух лет с момента падения метеорита Челябинск, который был классифицирован как обыкновенный хондрит LL5 S4 W0. Определен его минералогический состав [Галимов, 2014; Анфилов, 2014] и проведены разнообразные исследования. Вещество метеорита характеризуется специфической структурой, состоящей из нескольких типов литологий, которые имеют различную степень ударного метаморфизма [Badyukov, 2015]. Авторы работы [Grokhovsky, 2014] выделяют слабо деформированную светлую и ударно-переплавленную темную литологии с двумя различимыми зонами – серую с переплавленными силикатами и черную с переплавленным троилитом. В данной работе исследовался фрагмент метеорита Челябинск со светлой литологией. Впервые в хондрите LL5 был обнаружен минерал хаксонит $(\text{Fe, Ni, Co})_{23}\text{C}_6$.

Минерал хаксонит (Naxonite), $(\text{Fe, Ni})_{23}\text{C}_6$, был открыт британским ученым Эдвардом Скоттом (E.R.D. Scott) в 1971 году в железных метеоритах Toluca и Canyon Diablo [Scott, 1971]. Свое название минерал получил в честь Ховарда Аксона (H.J. Axon), металлурга, исследователя внеземного вещества из Манчестерского Университета. Ранее в метеоритах был известен лишь один карбид железа – когениит, Fe_3C , который в промышленных сплавах принято называть цементитом.

По своим структурным параметрам хаксонит схож с карбидом хрома Cr_{23}C_6 . Минерал имеет кубическую решетку $a = 10,55 \text{ \AA}$, $Z = 4$, аналогичную карбиду

хрома и марганца (Cr_{23}C_6 и Mn_{23}C_6). В метеоритах хаксонит встречается вблизи частиц камасита, тэнита, шрейберзита, когениита, пентландита и магнетита. Химический состав: Fe – 89.5 %, Co – 0.18 %, Ni – 4.91 %, C – 5.4 % [Handbook of Mineralogy].

Данные об обнаружении хаксонита в различных метеоритах представлены в таблице 1.

Анализ литературных источников показал, что преимущественно хаксонит встречается в железных метеоритах. Также этот минерал был найден в углистом (C03.0) и обыкновенном (LL3) хондритах. Кроме того он обнаружен в веществе, доставленном с астероида Итокава [Harries, 2014].

Объектом данного исследования стал фрагмент метеорита Челябинск (LL5) со светлой литологией весом 4,34 грамма. Образец 1x2,5 см был подготовлен для оптической и электронной микроскопии, используя стандартные металлографические методики. Травление проводилось 2%-ным раствором азотной кислоты в спирте. Исследования микроструктуры метеоритного металла проводились на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT и электронном микроскопе FE-SEM ΣIGMA VP с использованием приставок EDS и EBSD. Измерения химического состава проводились в пяти различных точках одного и того же минерала для получения среднего значения.

Исследуемый фрагмент метеорита Челябинск характеризуется большим количеством металлических зерен с зональным тэнитом, что свидетельствует о его медленном охлаждении. В данном фрагменте

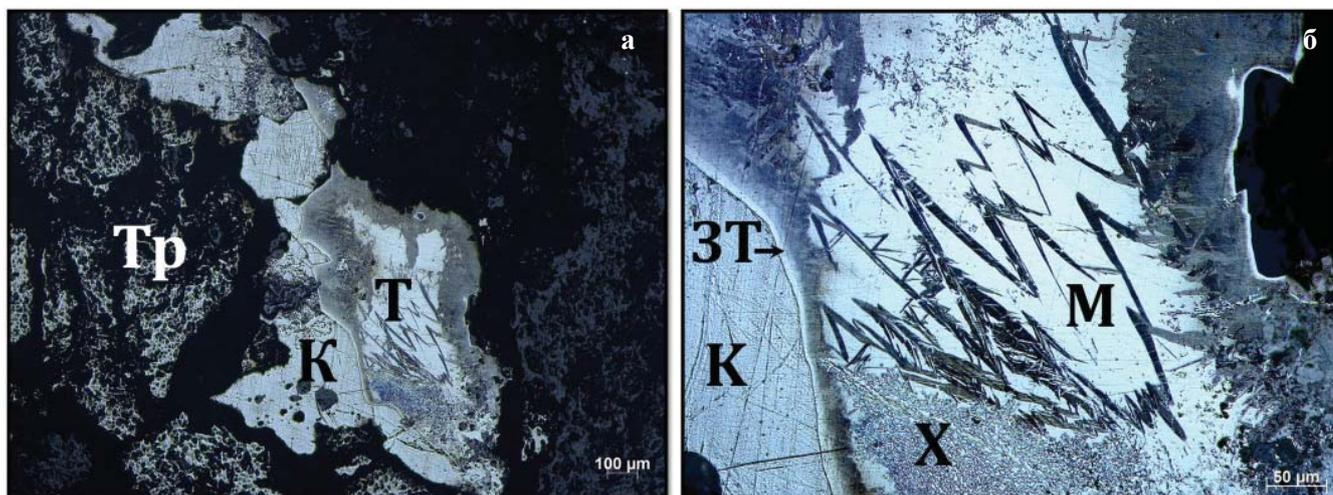


Рис. 1. Травленное металлическое зерно в фрагменте метеорита Челябинск со светлой литологией: а) металл вблизи троилита (Тр), К – камасит, Т – тэнит; б) ЗТ – зональные тэнит; М – мартенсит; Х – хаксонит $(\text{Fe, Ni, Co})_{23}\text{C}_6$

Таблица 1. Хаксонит в различных метеоритах

Название метеорита	Тип	Ссылка
Armanty	Iron, IIIЕ	Yongheng Chen, 1989
Sikhote-Alin	Iron, IIAB	H. J. Axon, 1981
San Cristobal	Iron, IAB-ung	Edward R. D. Scott, 1974
Pitts	Iron, IAB-ung	Buchwald, V. F., 1975
Woodbine	Iron, IAB-ung	Buchwald, V. F., 1975
Four Corners	Iron, IAB-ung	Buchwald, V. F., 1975
Egvekinot	Iron, IAB-sLM	http://rruff.info/haxonite/names/asc/
Edmonton (Kentucky)	Iron, IAB-sLM	http://rruff.geo.arizona.edu/doclib/hom/haxonite.pdf
Carlton	Iron, IAB-sLM	Buchwald, V. F., 1975
Nagy-Vázsony	Iron, IAB-sLL	Szakáll-Gatter-Szendrei, 2005
Bahjoi	Iron, IAB-sLL	Buchwald, V. F., 1975
Deport	Iron, IAB-sLL	Buchwald, V. F., 1975
Goose Lake	Iron, IAB-sLL	Buchwald, V. F., 1975
Toluca	Iron, IAB-sLL	Am Min, 1974
Tazewell	Iron, IAB-sLH	Buchwald, V. F., 1975
Freda	Iron, IAB-sLH	Edward R. D. Scott, 1974
Hassi-Jekna	Iron, IAB-sHL	Buchwald, V. F., 1975
Magnesia	Iron, IAB-sHL	Buchwald, V. F., 1975
Campo del Cielo	Iron, IAB-MG	Buchwald, V. F., 1975
Youndegin	Iron, IAB-MG	Buchwald, V. F., 1975
Odessa	Iron, IAB-MG	Buchwald, V. F., 1975
Canyon Diablo	Iron, IAB-MG	Scott, E.R.D., 1971; Anthony, J.W., 1995
Allan Hills A77307 (ALHA77307)	CO3.0	Brearley, A. J., 1998
Semarkona	LL3.0	Taylor, G. J., 1981

удалось обнаружить уникальную металлическую частицу размером 350 на 1000 мкм (рис. 1а), содержащую камасит, тэнит и редкий минерал хаксонит (рис. 1б). В этой частице также наблюдаются такие структурные составляющие, как зональный тэнит и мартенсит. Включение минерала хаксонит размером

несколько мкм располагается в тэнитном зерне вблизи границы тэнит/камасит. При больших увеличениях (рис. 2) в этом минерале наблюдаются светлые высоконикелевые частицы в темной матрице. Данные EDS выявили различное содержание никеля Ni и железа Fe в этих областях. В темной матрице содержится

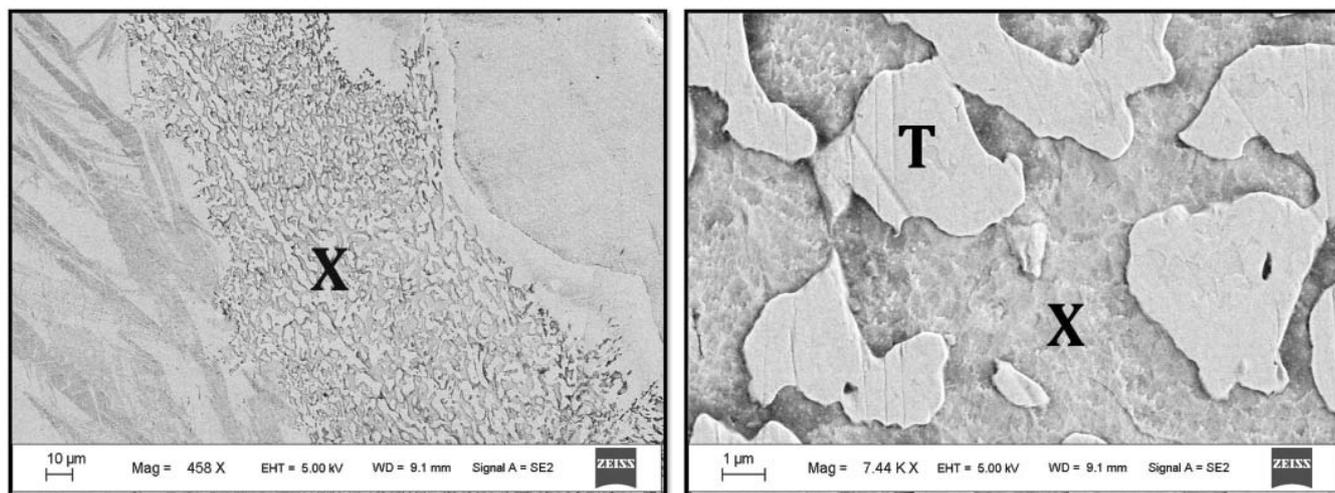


Рис. 2. Электронная микрофотография минерала хаксонит при разных увеличениях: X – хаксонит; T – тэнит

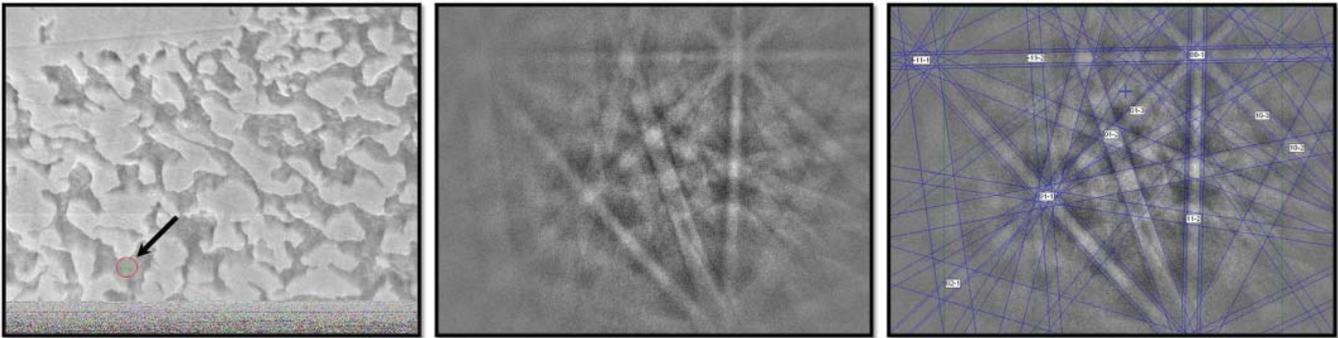


Рис. 3. Идентификация минерала хаксонит с помощью приставки EBSD: а) анализируемый участок; б) линии Кикучи участка (а); в) сравнение с карбидом хрома Fe_{23}C_6

87 вес. % Fe и 5 вес. % Ni, в светлых частицах – 43 вес. % Fe и 53 вес. % Ni.

На рис. 3 представлены результаты исследования с помощью метода дифракции обратно отраженных электронов (EBSD). Дифракционные картины Кикучи показали, что светлые высоконикелевые частицы имеют решетку тэнита, а темная матрица – решетку карбида хрома Cr_{23}C_6 , близкую по своим параметрам к решетке хаксонита [Scott, 1971].

Как отмечается в работе [Scott, 2012], графит и карбиды в метеоритах выделяются после завершения кристаллизации при распаде твердых растворов. Максимальная растворимость углерода в камасите в 10 раз меньше, чем в тэните и растворимость углерода в обеих фазах снижается с уменьшением температуры. Карбиды формируются при низких температурах после камасита и шрейберзита, по-видимому, одними из последних фаз. Более предпочтительным для зарождения является когениит, однако, иногда в железных метеоритах встречаются оба карбида (когениит и хаксонит). В работе [Fang, 2010], посвященной моделированию карбида Fe_{23}C_6 , на основе модели параметров решетки хаксонита и тэнита предполагается, что хаксонит может зародиться в тэните. Структура на рис. 2б, состоящая из зерен тэнита в матрице хаксонита, подтверждает гипотезу Фанга о зарождении хаксонита в тэните.

Есть мнение, что в некоторых железных метеоритах графит может формироваться в результате распада карбидов из-за ударного нагрева [Scott, 2012]. В исследуемом образце фрагмента метеорита Челябинск графит обнаружен не был.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-35-21164 мол_a_вед.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анфилогов В. Н., Белогуб Е. В., Блинов И. А. и др. Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск. Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции. Челябинск, 2014. 694 с.
2. Галимов Э. М., Колотов В. П., Назаров М. А. и др. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск. Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции. Челябинск, 2014. 694 с.
3. 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.
4. Fang C.M., van Huis M.A., Sluiter M.H.F., Zandbergen H.W. Stability, structure and electronic properties of $\gamma\text{-Fe}_{23}\text{C}_6$ from first-principles theory // *Acta Materialia*. 2010. V. 58. P. 2968–2977.
5. Grokhovsky V. I., Kohout T., Gritsevich M., Koneva E. V. Physical properties, structure and fracturing of the Chelyabinsk LL5 meteorite body // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2014. V. 49. P. 5364.
6. Handbook of Mineralogy. Mineral Data Publishing, version 1, 2001–2005. <http://rruff.info/doclib/hom/haxonite.pdf>, 6.10.2015.
7. Harries D. and Langenhorst F. Haxonite from 25143 Itokawa and its implications for metamorphic parent body fluids // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2014. V. 49. P. 5136.
8. Scott E. R. D. New carbide, $(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$, found in Iron Meteorites // *Nature Physical science*. 1971. V. 229. P. 6–62.
9. Scott E. R. D., Goldstein J. I. Occurrence of carbides and graphite in Iron Meteorites and origin of C-rich Irons // 43rd Lunar & Planetary Science Conference. 2012. P. 671.