

## Эффект контактного плавления в железном метеорите Сихотэ-Алинь, претерпевшем нагружение сферическими ударно-изэнтропическими волнами

Р. Ф. Муфтахетдинова<sup>1†</sup>, В. И. Гроховский<sup>1</sup>, Г. А. Яковлев<sup>1</sup>, Е. А. Козлов<sup>2</sup>,  
А. А. Дегтярев<sup>2</sup>

<sup>†</sup>gizrozka91@bk.ru

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
ул. Мира 19, 620002, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забабахина», ул. Васильева 13, 456770, а/я 245, Снежинск, Россия

Представлены результаты изучения методами растровой электронной и оптической микроскопии особенностей структурных изменений образцов метеорита Сихотэ-Алинь, претерпевших сферическое взрывное нагружение. Подробно проанализированы участки метеорита Сихотэ-Алинь со структурой, связанной с проявлением контактного плавления на межфазной границе камасит ( $\alpha$ -Fe(Ni,Co), Ni<7,5%) — рабдит ((Fe,Ni)<sub>3</sub>P). Предполагается, что такие участки образовались при локальном повышении температуры на фазе сжатия. Ограниченные фосфиды при этом либо полностью переплавляются, либо частично, с образованием каймы вокруг непретерпевшего фосфида. Целью работы было определение фазового и химического состава области контактного плавления (каймы). С помощью микрорентгеноспектрального анализа получено пространственное распределение элементов и определен химический состав области контактного плавления. Установлено, что в области контактного плавления наблюдается пониженное содержание фосфора и никеля в сравнении с неизменной частью фосфида. Состав этой области соответствует составу тройной эвтектики и температура в областях контактного плавления превышала 950 °С. Анализ фазовых и ориентационных карт, полученных методом EBSD, показал, что кайма имеет поликристаллическую структуру, образованную фазой с ОЦК решеткой, т.е. в области контактного плавления образуется пересыщенный твердый раствор фосфора в  $\alpha$ -Fe(Ni,Co).

**Ключевые слова:** метеорит, ударные волны, контактное плавление

## An effect of contact melting in the Sikhote-Alin iron meteorite after isentropic spherical shock waves loading

R. F. Muftakhetdinova<sup>1</sup>, V. I. Grokhovsky<sup>1</sup>, G. A. Yakovlev<sup>1</sup>, E. A. Kozlov<sup>2</sup>, A. A. Degtiarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, 19 Mira St., 620002, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All — Russia Research Institute of Technical Physics», 13 Vasilyev street, P. O. Box 245, 456770, Snezhinsk, Russia

The results of investigation of structural changes in samples of the Sikhote-Alin iron meteorite after spherical explosive loading are presented. Areas of this meteorite connected with contact melting on kamacite ( $\alpha$  — Fe(Ni,Co), Ni<7,5%) and rhabdite ((Fe,Ni)<sub>3</sub>P) interface are studied in detail using scanning electron microscopy and optical microscopy. It's supposed that above mentioned areas were formed during local rise of temperature in compression stage. Faceted phosphides can be completely melted or partially melted with edging formation around untransformed phosphide. The aim of this work was to determine phase and chemical composition of this edging. Space distribution of elements and chemical composition of contact melting area were studied using EDS. Low content of phosphorus and nickel in comparison with unaltered part of phosphide has been found. Content of this area complies with content of three-component eutectic and temperature in areas of contact melting exceeded 950 °C. Phase and orientation maps were obtained using EBSD technique. One can supposed after an analysis of this maps that this edging has polycrystalline structure with bcc lattice, *i.e.* this structure which was formed during contact melting can be considered as supersaturated solid solution of phosphorus in  $\alpha$ -Fe(Ni,Co).

**Keywords:** meteorite, shock waves, contact melting

## 1. Введение

Вещество внеземного происхождения, сформированное в сильно отличающихся от земных условиях, представляет большой интерес для исследователей не только в области космохимии и минералогии, но и в материаловедении. В процессе эволюции это вещество испытывало длительные термические и многократные ударные воздействия. В связи с этим большую роль в исследовании вещества внеземного происхождения играет изучение влияний сильных ударных волн на твердые тела.

Известно [1—6], что давление зачастую является более эффективным фактором, стимулирующим полиморфные превращения, чем температура. Действие высокого давления может привести к изменению морфологии структуры и взаимных кристаллографических ориентировок исходных и образующихся фаз. Для создания мощных ударных волн с большой амплитудой давления используют явления кумуляции в экспериментах со сходящимися волнами [2—5]. Структура металлов и сплавов при взрывном нагружении изменяется при практически одновременном действии нескольких факторов: высокого давления, высокоскоростной деформации, растягивающих напряжений при разгрузке и повышения температуры. Изучение полиморфных превращений и особенностей плавления минералов при высоких давлениях также имеет важное значение при рассмотрении проблем формирования и глубинного строения Земли и планет [2,3,5]. Понимание процессов, происходящих под действием давления, позволяет также расширить представления о механизме полиморфных превращений. При возрастании интенсивности и скорости деформации металлов и сплавов осуществляется переход от гомогенной к гетерогенной деформации, связанной с образованием локальной области повышенных  $P$ ,  $T$ ,  $\epsilon$ . В случае обработки материалов сходящимися ударными волнами можно получить все степени воздействия температуры и давления в одном образце. Взаимодействие ударных волн с некогерентными межфазными границами приводит к локальному повышению температуры, которая может достигать значительных величин. При воздействии сходящимися ударными волнами повышение температуры может достигать температур контактного плавления [8].

Контактным плавлением называется образование жидкости в контакте двух и более веществ при температуре меньшей, чем температура плавления наиболее легкоплавкого из них [7,9]. Контактное плавление возможно только в системах эвтектического типа. Влияние температуры на контактное плавление исследовано в [7]. Анализ работ, посвященных исследованиям природы, механизма и кинетики процесса контактного плавления показывает, что имеются две основные точки зрения. Результаты работы [10] сводятся к тому, что процесс контактного плавления инициируется взаимной диффузией, приводящей к образованию в контакте кристаллов пересыщенных твердых растворов, легко переходящих в жидкость, что соответствует более

выгодному энергетическому состоянию системы.

Однако, авторы [11—13] природу и механизм контактного плавления объясняют, исходя из представлений об адсорбционном взаимодействии [11] контактируемых кристаллов или силовых полей в области контакта [12,13]. Такие представления можно назвать «адсорбционно-полевыми».

Поскольку существует два основных направления в объяснении природы и механизма контактного плавления, то, к настоящему времени, единого мнения об этих процессах нет. Тем не менее, они не являются взаимоисключающими. Процессы, описанные в [11—13], являются подготовительной стадией для последующей взаимной диффузии компонентов через плоскость контакта кристаллов [9,10].

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей формирования структуры при контактном плавлении на границе фаз в случае локального повышения температуры и давления при ударно-волновом воздействии.

## 2. Материалы и методы исследования

Материалом для исследования служило вещество железного метеорита Сихотэ-Алинь (IIAB), имеющее средний химический состав Fe-93.29%, Ni-5.94%, Co-0.38%, Cu-0.03%, P-0.48%, S<0.28%. Метеорит относится к классу грубых октаэдритов с преобладанием монокристаллических полос  $\alpha$ -Fe(Ni,Co) шириной более 1,3 мм. Упаковка этих полос образует объемную октаэдрическую макроструктуру, называемую видманштеттовой. Широкие полосы  $\alpha$ -Fe(Ni,Co) содержат множественные выделения стержневидных фосфидов  $(Fe,Ni)_3P$  и редкие выделения пластин  $(Fe,Ni)_4N$ . Между балками  $\alpha$ -Fe(Ni,Co) находятся участки с повышенным содержанием никеля, образующие двухфазные структуры различной морфологии и природы [14—15].

Из фрагментов метеорита Сихотэ-Алинь [15] были изготовлены образцы-шары  $\emptyset$  56,09 и 50,00 мм. Шары были заварены в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст. в чехлы из стали 12X18H10T, после чего подвергнуты сферическому взрывному обжатию с использованием слоев ВВ различной толщины и мощности [2,8]. Гермочехлы использовались для предотвращения взаимодействия продуктов взрыва с метеоритным веществом. Относительно низкоинтенсивный режим нагружения изучаемых образцов был аналогичен описанному в работе [16], а высокоинтенсивный режим - аналогичен описанному в работах [2—4].

Микроскопическое исследование выполняли на шлифах (рис.1). Для проведения исследований использовались инвертированный микроскоп отраженного света Axiovert 40 MAT, растровый электронный микроскоп Carl Zeiss Sigma VP с системой микрорентгеноспектрального анализа INCA Energy и приставкой HKL Nordlyss для регистрации дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD).



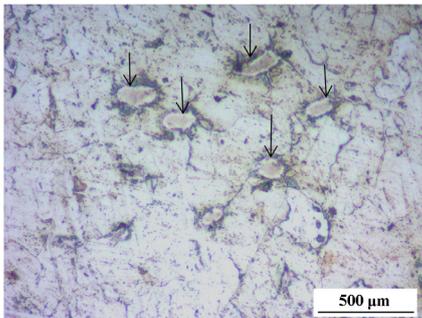
**Рис. 1.** Меридиональные сечения образцов после нагружения.  
**Fig. 1.** Meridional cross sections of samples after loading.

### 3. Результаты и их обсуждение

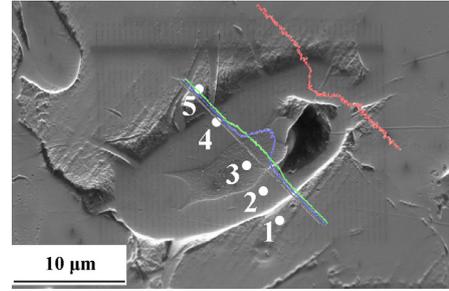
Ударно-изэнтропическое нагружение образцов сферическими сходящимися волнами привело к образованию полостей различного объема в центральных областях изучаемых образцов и хрупких трещин на всей поверхности меридиональных сечений шаров (рис.1). Формирование такой макроструктуры обусловлено присутствием в образцах до их динамического нагружения микротрещин и несплошностей, и в какой-то мере — исходной фазовой неоднородностью.

На поверхности образцов обнаружены участки со следами локализации пластической деформации и локальными разрушениями. При исследовании микроструктуры претерпевших динамическое нагружение образцов метеорита Сихотэ-Алинь был отмечен вязкий характер деформаций. Об этом свидетельствует характер прохождения сдвигов через тонкие пластины роалдита  $(\text{Fe,Ni})_4\text{N}$ . Следы хрупкого разрушения хорошо проявляются на включениях стержневидных рабдитов  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ , которые в недеформированном состоянии в шлифе представляют правильный прямоугольник или ромб [17]. На некоторых участках ограниченные фосфиды переплавлялись полностью, либо частично, с образованием каймы вокруг непретерпевшего фосфида. Такая структура может сформироваться при контактном плавлении двух фаз во время локального повышения температуры [18].

На рис.2 представлена одна из областей метеорита Сихотэ-Алинь со структурой, связанной с проявлением контактного плавления на межфазной границе  $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni,Co})\text{-}(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ . При нагреве выделения рабдита  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ ,



**Рис. 2.** Участки контактного плавления в виде каймы вокруг выделений рабдита.  
**Fig. 2.** Areas of contact melting in the form of edging around rhabdite precipitation.



**Рис. 3.** Область проведения локального микрорентгеноспектрального анализа. Анализ проводился в точках 1-5 (табл.1) и вдоль отрезка, пересекающего рабдит и прилегающие области контактного плавления (рис.4).

**Fig. 3.** Area of electron microprobe analyses. Analyses were done in points 1-5 and along segment through rhabdite and adjacent contact melting regions.

**Таблица 1.** Результаты количественного анализа  
**Table 1.** Results of quantitative analyse

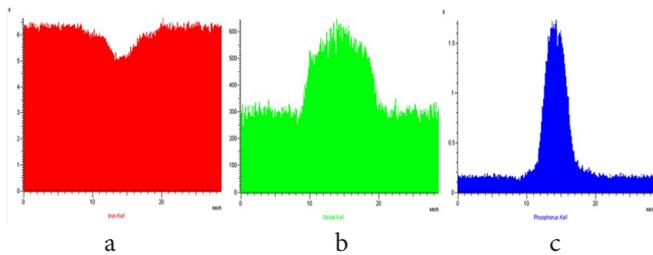
№	Spectrum	Results of analyses	
		P, wt %	Ni, wt %
1	Kamacite $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni,Co})$	-	5.57
2	Area of contact melting	0.52	10.67
3	Rhabdite $(\text{Fe,Ni})_3$	10.62	11.87
4	Area of contact melting	0.45	10.46
5	Kamacite $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni,Co})$	-	5.51

первоначально в сечении имеющие ограниченную форму, приобретают округлый вид. При охлаждении на их границах появляется кайма (обозначена стрелками на рис.2).

Степень развития каймы вокруг фосфидов, по-видимому, характеризует распределение тепловых полей в сечении шаров на момент завершения волновых процессов. Однако, неизвестно какая фаза находится в этой кайме. С помощью микрорентгеноспектрального анализа определен химический состав области плавления и окружающих областей (табл.1), построена полуколичественная зависимость интенсивности линии элементов в спектре вдоль выбранного отрезка (рис.3.4a,b,c) и получено пространственное распределение элементов в анализируемой области (рис.5a,b).

Установлено, что в области контактного плавления наблюдается пониженное (в 21,2 раза) содержание фосфора и небольшое (в 1,2 раза) уменьшение никеля в сравнении с центральной частью  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ . Состав этой области соответствует составу тройной эвтектики в системе Fe-Ni-P, следовательно, температура в областях контактного плавления превышала 950 °C. При локальном нагреве на межфазной границе контакта образуется жидкость эвтектического состава. Это происходит очень быстро, т.к. не требуется перемещения атомов на большие расстояния.

Для идентификации фазы, образующейся при быстром охлаждении зоны контактного расплава, проведена съемка методом EBSD с участка 25×25 мкм<sup>2</sup>, содержащего структуру контактного плавления (рис.5c). Полученные



**Рис. 4.** Интенсивность линий Fe K $\alpha$ , Ni K $\alpha$ , P K $\alpha$  вдоль отрезка, выбранного для анализа. а) Fe; б) Ni; в) P.

**Fig. 4.** Intensities of Fe K $\alpha$ , Ni K $\alpha$ , P K $\alpha$  lines along segment chosen for analysis a) Fe; б) Ni; в) P.

карты фазового состава и ориентационные карты указывают на то, что вокруг непретергнутого рабдита (в центре) образуется фаза, имеющая решетку ОЦК и определяемая методом EBSD как  $\alpha$ -железо (рис.5с).

#### 4. Заключение

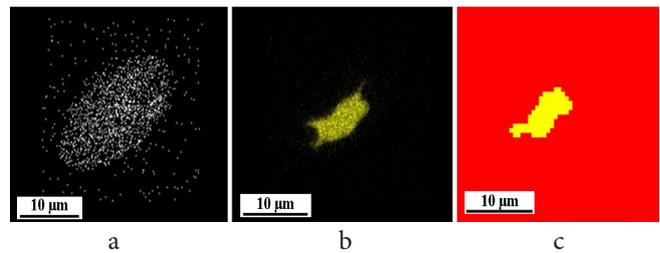
Таким образом, изучен эффект контактного плавления на межфазной границе  $\alpha$ -Fe(Ni,Co), Ni<7,5%-(Fe,Ni)<sub>3</sub>P. Проведена съемка методом дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) структуры областей контактного плавления. Получены карты фазового состава и ориентационные карты распознанных точек съемки. Установлено, что структура зоны контактного плавления представляет собой поликристаллическую структуру, образованную фазой с ОЦК решеткой, т.е. в области контактного плавления образуется пересыщенный твердый раствор фосфора в  $\alpha$ -Fe(Ni,Co) камасите.

*Благодарность.* Работа выполнена при поддержке гранта молодым ученым компании ООО «ОПТЭК» и при поддержке конкурса молодых ученых УрФУ (Екатеринбург).

*Acknowledgements.* This work was supported by a grant for young scientists of the company "OPTEC" and with the support of the contest of young scientists UrFU (Ekaterinburg).

#### Литература/References

1. E. I. Zababakhin, I.E. Zababakhin. Phenomena of unlimited cumulation. M. Nauka. (1988) 172 p. (in Russian) [Забабихин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М. Наука, (1988) 172 с.]
2. E. A. Kozlov. Proceedings of Int.Conf. V Zababakhin Scientific Talks. Snezhinsk. (1999) V. 2. p. 413—424.
3. E. A. Kozlov, A. V. Petrovtsev. Int. J. Modeling, Simulation, and Scientific Computing. **6** (1), 1550001 (2015)
4. E. A. Kozlov, L. V. Sazonova. Petrology. **20** (4), 334—350 (2012). (in Russian) [Е.А. Козлов, Л.В. Сазонова. Петрология. **20** (4), 334—350 (2012).]
5. E. A. Kozlov, A. V. Dobromyslov, N. I. Taluts, K. Volz. The Phys.Met.&Metallog. **113** (10), 1007—1015 (2012).
6. I. V. Khomskaya. Metal Science and Heat Treatment.



**Рис. 5.** Пространственное распределение элементов и типов решетки в области контактного плавления: а – карта распределения Ni, б – карта распределения P, в – карта распределения фаз, полученная с помощью EBSD, красный цвет соответствует фазе с ОЦК-решеткой, желтый – фазе с ГЦК-решеткой.

**Fig. 5.** Spatial distribution of chemical elements and types of lattice in contact melting area: а – distribution of Ni, б – distribution of P, в – EBSD phase map, red – phase with bcc lattice, yellow – phase with fcc lattice.

- 9, 47—55 (2008). (in Russian) [И.В. Хомская. Металловедение и термическая обработка металлов. **9**, 47—55 (2008).]
7. A. A. Akhkubekov, T. A. Orkvasov, V. A. Sozaev. Contact melting of metals and metal-based nanostructures. M. FIZMATLIT. (2008) 147 p. (in Russian) [Ахкубеков А.А., Орквасов Т.А., Созаев В.А. Контактное плавление металлов и наноструктур на их основе. М. ФИЗМАТЛИТ (2008) 147с.]
8. E. A. Kozlov, V. A. Teplov, M. S. Kuzina, V. I. Grokhovskiy. Materials of the «Lunar and Planetary Science XXXII». 1075 (2001).
9. S. N. Ahkubekova, A. M. Naida. Modern High Technologies. **6**, 46—48 (2013). (in Russian) [Ахкубекова С.Н., Найда А.А. Современные наукоемкие технологии. **6**, 46—48 (2013).]
10. P. F. Zilberman. Kontaktnoe plavlenie ionnikh kristallov: Dissertacija na soiscanie stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk. Tomsk. (1993) 278 p. (in Russian) [Зильберман П.Ф. Контактное плавление ионных кристаллов: дисс. докт. физ.-мат. наук. Томск. 1993. 278 с.]
11. V. M. Zalkin. Nature of eutectic alloys and contact melting effect. M. Metallurgy. (1987) 152 p. (in Russian) [В.М. Залкин Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. М. Металлургия (1987) 152 с.]
12. O. I. Fomichev, S. P. Yudin. On contact melting of metal. In: Physical chemistry of melts surface. Metsniereba. Tbilisi (1977) 77—81 p. (in Russian) [О.И. Фомичев, С.П. Юдин. О контактном плавлении металлов. Физическая химия поверхности расплавов. Тбилиси. Мецниереба (1977) 77—81с.]
13. I. P. Virodov. On physical essence of contact melting and interface layer formation. In: The Journal of Physical Chemistry (Dep. № 1102—78). Moscow (1978) 10 p. (in Russian) [И.П. Выродов. О физической сущности контактного плавления и формирования межфазного слоя. Журн. физич. химии. (Деп. № 1102—78). М. (1978) 10 с.]
14. V. I. Grokhovskiy, E. V. Zhiganova, S. A. Glazkova.

- Vestnik UGTU-UPI. 5 (35), 263 (2004). (in Russian) [В.И. Гроховский, Е.В. Жиганова, С.А. Глазкова. Вестник УГТУ-УПИ. 5 (35), 54—60 (2004).]
15. V.I. Grokhovsky, E. A. Kozlov, L. E. Kar'kina, V. A. Teplov. The Phys.Met.&Metallog. 91 (3), 72—80 (2001). (in Russian) [В. И. Гроховский, Е. А. Козлов, Л. Е. Карькина, В. А. Теплов. Физика металлов и металловедение. 91 (3), 72—80 (2001).]
16. E. A. Kozlov, A. V. Zhukov. In: High Pressure Science and Technology, ed. by S.C. Schmidt, J.W. Shaner, G. A. Samara, M. Ross. New York, American Institute of Physics, (1994) 977—980 p.
17. M.I. Oshtrakh, M.Yu. Larionov, V.I. Grokhovsky, V. A. Semionkin. Journal of Alloys and Compounds. 509 (5), 1781—1784 (2011).
18. R. F. Gizzatullina, G. A. Yakovlev. Materials of the VI All-Russian scientific conference of youth «Minerals: structure, properties and research techniques». Ekaterinburg (2014) 104—106 p. (in Russian) [Р.Ф. Гиззатуллина, Г.А. Яковлев. Материалы VI Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Екатеринбург (2014) 104—106 с.]