СФЕРИЧЕСКОЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПАЛЛАСИТОВОЙ И ОКТАЭДРИТОВОЙ ЧАСТЕЙ МЕТЕОРИТА СЕЙМЧАН

Муфтахетдинова Р.Ф., Гроховский В.И.

Физико-технологический институт, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, gizrozka91@bk.ru

Ударные процессы занимают особое место в эволюции внеземного вещества. Большую роль в понимании процессов, возникающих при взаимодействии ударных волн с веществом, играют модельные эксперименты [Муфтахетдинова и др., 2019]. Использование сферически сходящихся волн позволяет в единичном эксперименте получить широкий диапазон давлений (от 10 до 300 ГПа) и температур (от температуры окружающей среды до нескольких тысяч градусов), распределенных в разных зонах одного образца. Такая методика экспериментального ударного преобразования использовалась ранее для вещества обыкновенных хондритов Саратов L4 [Козлов и др., 1997; Bezaeva et al., 2010], Челябинск LL5 [Petrova et al., 2019] и Царев L5 [Muftakhetdinova et al., 2017], а также для железных метеоритов Сихоте-Алинь и Чинге [Grokhovsky et al., 1999; Muftakhetdinova et al., 2018].

В данной работе приведены результаты изучения структурных особенностей палласитовой и октаэдритовой частей метеорита Сеймчан после модельных экспериментальных воздействий сферически сходящимися ударными волнами. Особенностью метеорита Сеймчан является то, что среди фрагментов встречаются как чисто октаэдритовые части (среднеструктурный октаэдрит группы IIE-Om), так и палласитовые (PMG), а также их сростки дециметровых размеров. Эксперименты по нагружению вещества метеоритов проводились в ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина» (г. Снежинск) по методике, описанной в работе [Kozlov, Zhukov, 1994]. Для проведения экспериментов по обжатию из фрагментов метеорита (палласитовой и октаэдритовой частей) Сеймчан были изготовлены шары диаметром 42±0.01 мм (рис. 1). Средняя плотность вещества палласитовой части метеорита Сеймчан составляет 5.10±0.01 г/см³, октаэдритовой – 7.89±0.01 г/см³.



Рис. 1. Сферические образцы из: а) октаэдритовой части, б) палласитовой части метеорита Сеймчан для экспериментов по ударно-волновому нагружению



Рис. 2. Оптическое изображение структуры металла палласитовой части метеорита Сеймчан (К – камасит, Т – тэнит, Pl – плессит, CZ – облачный тэнит)

Микроскопические исследования выполнялись с помощью оптического металлографического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) выполнена с помощью JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 и EBSD-приставкой NordlysNano Oxford Instruments и двулучевого электронно-ионного микроскопа ZEISS CrossBeam AURIGA с приставкой EDS.

Металлическая часть метеорита представлена камаситом (α-FeNi, объемноцентрированная кубическая решетка), тэнитом (ү-FeNi, гранецентрированная кубическая решетка) и плесситом (смесью камасита и тэнита). В виде примесей встречаются троилит (FeS), шрейберзит и рабдит (Ni,Fe)₃P. В палласитовой части преобладают зёрна оливина ((Mg,Fe)₂[SiO₄]) и включения хромита (FeCr₂O₄). В металле как октаэдритовой, так и палласитовой частей метеорита Сеймчан наблюдается плесситная структура с зоной облачного тэнита (CZ) (рис. 2), состоящего из высоконикелевых округлых островов тетратэнита FeNi в сотовой оболочке камасита. Такого рода структура формируется в результате спинодального распада первичного тэнита. В ряде образцов метеорита Сеймчан наблюдаются системы параллельных полос – линий Неймана, возникающих в результате ударно-механической деформации при

столкновении в космосе родительского тела метеорита с другими телами при температуре ниже 600°С [Гонцова и др., 2018].

В результате ударно-волнового нагружения образцов из палласитовой и октаэдритовой частей метеорита Сеймчан реализован градиент ударного воздействия и получен широкий спектр структур, демонстрирующих различную степень ударного метаморфизма. Внешний вид полированного диаметрального сечения шаров вещества после экспериментального воздействия показан на рис. 3.

После ударных воздействий во внешней части октаэдритового образца сохраняется исходная видманштеттова структура, но при приближении к центру параллельные балки камасита искажаются вследствие пластической деформации, что наиболее ярко выражено вблизи центра шара. Кроме того, в центральной части образца на межфазных границах камасит/тэнит наблюдаются разрывы, т.к. при прохождении фронта ударной волны межфазные границы являются локальным стимулятором роста давления, температуры и напряжения. Из-за локального повышения температуры на границе с образовавшимися пустотами наблюдаются дендритные и ячеистые структуры. Быстрое охлаждение в кристаллизационном интервале температур дало дендритную



Рис. 3. Диаметральное сечение шара из ударно-преобразованного вещества a) палласитовой части и б) октаэдритовой части метеорита Сеймчан

ликвацию, которая проявляется при сильном травлении. Образование жидкости говорит о том, что достигаемые температуры были выше 1500°С, согласно диаграмме состояния Fe-Ni. По известным в литературе формулам была рассчитана скорость охлаждения в кристаллизационном интервале для октаэдритовой части Сеймчан, которая составила 70000°С/с. Для сравнения при аналогичных экспериментальных воздействиях в грубом октаэдрите Сихотэ-Алинь в центральной части шара скорость охлаждения составляла 71000°С/с, для метеорита Царев составила 610°С/с, а для метеорита Челябинск составила 85°С/с.

В образце из палласитовой части метеорита Сеймчан после обжатия сходящимися ударными волнами кристаллы оливина потеряли прозрачность из-за множественных трещин. В центральной части наблюдаются как визуальное потемнение силикатных фаз, связанных с полным и частичным переплавом исходного вещества, так и исходно светлые зерна оливина, которые не успели оплавиться. Изменение отражательных свойств некоторых силикатных зерен можно объяснить заполнением усадочных пустот металл-сульфидным расплавом. Также на расстоянии примерно 1 см от центра, в оливиновой составляющей образца, образовалось несферическое черное кольцо. Образование подобных сферических колец темного цвета ранее уже наблюдались в двух нагруженных ударными волнами обыкновенных хондритах Челябинск LL5 и Царев L. В данном случае, несферическую форму черного кольца можно объяснить отличием амплитуды ударной волны в участках исходной структурной неоднородности образца. Это привело к искажению симметрии схождения волн и снижению эффекта кумуляции в палласитовом шаре по сравнению с макро-однородным веществом метеоритов Челябинск и Царев. Установлено, что потемнение исходной светлой оливиновой матрицы связано с образованием мелкодисперсных каверн в результате усадочных процессов при кристаллизации расплава исходного вещества. В отличие от переплава в центральной части, здесь не наблюдается наличие металл-сульфидных ассоциаций, заполняющих пустоты. Металлическая часть в этом эксперименте не демонстрирует существенные следы пластической деформации или следы полного плавления. Из чего можно сделать вывод, что температура не превышала 1500°С внутри черного кольца.

Таким образом, проведен сравнительный анализ структуры металлических и железосодержащих минералов в исходных и ударно-деформированных образцах. Показано, что в единичном эксперименте вследствие увеличения ударного давления и температуры от внешней части к центру нагруженных шаров наблюдается структурное преобразование вещества от сильной пластической деформации металла в твердом состоянии до расплавления с последующей кристаллизацией в центре сохраняемого образца. Приведена оценка скорости охлаждения в кристаллизационном интервале переплавленной области ударенного образца из октаэдритной части метеорита Сеймчан.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00598, а также при поддержке проекта № 0836-2020-0059 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

- Гонцова С.С., Максимова Е.М., Петрова Е.В., Наухацкий И.А. Структурные и минералогические особенности железосодержащих фаз в метеоритах разных типов // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2018. Т. 114 (1). С. 81–84.
- Козлов Е.А., Жугин Ю.Н., Литвинов Б.В., Коваленко Г.В., Назаров М.А., Бадюков Д.Д. Особенности физико-химических превращений хондрита «Саратов» в сферических ударных волнах // Доклады РАН. 1997. Т. 353 (2). С. 183–186.
- Муфтахетдинова Р.Ф., Гроховский В.И., Петрова Е.В., Яковлев Г.А. Структурные превращения в веществе обыкновенных хондритов после нагружения сферически-сходящимися ударными

волнами // Аннотации докладов XII всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (19-24 августа 2019 года, г. Уфа). 2019. С. 506–508.

- Bezaeva N.S. et al. Experimental shock metamorphism of the L4 ordinary chondrite Saratov induced by spherical shock waves up to 400 GPa // Meteoritics and Planetary Science. 2010. V. 45. P. 1–14.
- Grokhovsky V.I., Kozlov E.A., Kuzina M.S., Teplov V.A. Shock experiment in spherical waves with iron meteorites // Meteoritics & Planetary Science. 1999. V. 34. P. A48.
- Kozlov E.A., Zhukov A.V. Phase Transitions in Spherical Stress Waves. In: High Pressure Science and Technology, 1993. S.C. Schmidt, J.W. Shaner, G.A. Samara, M. Ross (eds), American Institute of Physics, New York, 1994. P. 977–980.
- Muftakhetdinova R.F., Grokhovsky V.I., Yakovlev G.A. Analysis of structural changes and phase transformations in Sikhote-Alin IIAB iron meteorite under various origin shock deformation // Letters on Materials. 2018. V. 8(1). P. 54–58.
- Muftakhetdinova R.F., Petrova E.V., Yakovlev G.A., Grokhovsky V.I. The structural changes in ordinary chondrite Tsarev L5 after shock wave loading // Meteoritics and Planetary Science. 2017. V. 52(SI). A247.
- Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kohout T., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A. Shock-Wave Experiment with the Chelyabinsk LL5 Meteorite: Experimental Parameters and the Texture of the Shock-Affected Material // Geochemistry International. 2019. V. 57(8). P. 923–930.