

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ МЕТЕОРИТА ЦАРЕВ L5 ДО И ПОСЛЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Муфтахетдинова Р.Ф., Петрова Е.В., Брусницына Е.В., Яковлев Г.А., Гроховский В.И.

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

Ударные процессы являются неотъемлемой частью эволюции внеземного вещества в космосе. Изучение структурных изменений и фазовых переходов при деформационных и температурных воздействиях в метеоритах представляет особый интерес, так как вещество внеземного происхождения сохраняет следы космических событий за огромный интервал времени – от момента конденсации первичных пылинок в расширяющейся оболочке сверхновой звезды до падения метеоритных тел [Лаврухина и др., 1984]. Кроме того, существует кометно-астероидная угроза от падения подобных малых тел на поверхность Земли.

Большую роль в понимании процессов, возникающих при взаимодействии ударных волн с веществом, играют модельные эксперименты. 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. При этом можно исследовать результаты ударного структурного преобразования вещества – от сильной пластической деформации металла в твердом состоянии до испарения при разгрузке ударно-сжатого расплава с последующей конденсацией паров в центральной полости сохраняемого образца [Козлов и др., 1997; Муфтахетдинова и др., 2015].

Каменные метеориты составляют большую часть метеоритных коллекций. Наиболее представительным типом (80 % из всех зарегистрированных метеоритов) являются обыкновенные хондриты. Обыкновенные хондриты представляют собой недифференцированное или слабодифференцированное метеоритное вещество, относящееся к ранней стадии эволюции газопылевой туманности Солнечной системы. Данный тип метеоритов является агломератом сферических силикатных объектов — хондр и их осколков, крупных металлических зерен сплава Fe-Ni-Co и мелкодисперсной силикатной матрицы. Существуют ряд хондритов, которые демонстрируют четкие металлографические свидетельства того, что они были повторно нагреты с момента их первоначального охлаждения в родительских телах [Taylor et al., 1971; Smith et al., 1977]. Также в работах [Мигдисова и др., 1982; Lambert et al., 1981] предполагается, что

наблюдаемые рекристаллизация оливина и частичное плавление вещества в метеоритах Царев (L5), Peet (L6), Baratta (L4) являются результатом локального действия сильных ударных волн 80–120 ГПа.

В настоящей работе в продолжение исследования [Muftakhedinova et al., 2017], приведены результаты изучения структуры обыкновенного хондрита Царев L5 до и после модельных экспериментальных воздействий сферически-сходящимися ударными волнами. Это сравнительное исследование позволит сопоставить полученные результаты с изменениями, наблюдаемыми в веществе найденных метеоритов. Естественно, невозможно воссоздать тех сложных систем, существующих в природе, но даже упрощенные модели, применяемые в лабораториях, помогают обосновать гипотезы, увязывающие данные лабораторного изучения метеоритов и закономерности формирования структуры материалов. Эксперименты по ударному нагружению сферически-сходящимися ударными волнами вещества метеорита Царев L5 проводились в ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина» (г. Снежинск) по методике описанной в работах [Козлов и др., 1997; Bezaeva et al., 2010]. Исследование структуры проводилось помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT и электронного микроскопа FE-SEM SIGMA VP с приставками для энерго-дисперсионного анализа (EDS) и дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD). Образцы были подготовлены для оптической и электронной микроскопии по стандартной металлографической методике. Травление проводилось 2%-ным раствором HNO₃ в спирте.

Метеоритный дождь Царев выпал 6 декабря 1922 года на территории современной Волгоградской области. В 1968 году местный житель нашел несколько необычных камней, которые со временем были распознаны как метеориты, и зарегистрированы 1981 году как обыкновенный хондрит L5. Метеорит Царев имеет явно выраженную брекчированную текстуру (рис. 1). На плоскостях распила видны участки светло-серого цвета с хорошо сохранившейся хондритовой структурой и участки более темного цвета, демонстрирующие признаки повторного нагрева [Мигдисова и др., 1982].



Рис. 1. Внешний вид брекчированной текстуры метеорита Царев L5

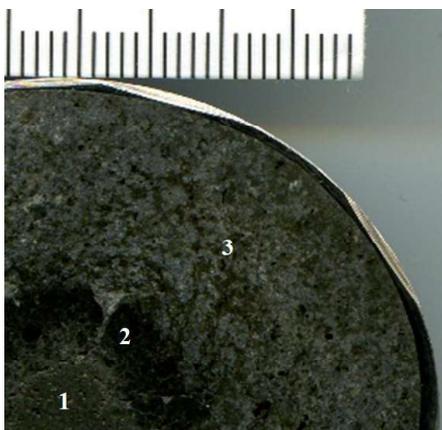


Рис. 2. Фрагмент диаметального сечения шара из ударно-преобразованного вещества обыкновенного хондрита Царев L5. 1-3 зоны – текстурно-различимые области ударно-преобразованного вещества

После нагружения ударными волнами шара из светло-серого фрагмента сохраненные образцы были распилены по диаметальному сечению. При визуальном осмотре поверхности этого шлифа были обнаружены три отличающиеся зоны в виде колец (рис. 2): 1 – область, представляющая собой темно-серое пористое вещество, испытавшее переплав в результате ударного воздействия, расположенная от центра шара на расстоянии 0–0.22 радиуса образца; 2 – область черного кольца, от 0.22 до 0.42 радиуса шара; 3 – зона внешнего кольца, представляющая собой вещество, внешне схожее с неизменным веществом хондрита Царев, расположена от 0.42 радиуса шара до границы раздела вещество хондрита/металл. Во внешней части образца наблюдаются более тонкие трещины, и визуально вещество этой зоны по цвету и структуре сопоставимо с образцами вещества хондрита Царев L5, не испытавшего ударных воздействий. В центральной зоне 1 ударного расплава, на прозрачных шлифах, обнаружена полная

перекристаллизация вещества. Присутствуют новые кристаллы, образованные в процессе охлаждения после ударного нагружения образцов. В этой же зоне обнаружены частицы взаимопрорастаний металла $\text{Fe}(\text{Ni},\text{Co})$ и троилита FeS . Изменения структуры в области черного кольца (зона 2) соответствуют эффекту частичного изменения исходной хондритной структуры. Температуры, достигаемые в данной зоне в результате действия ударного нагружения, вызывают плавление металла и троилита при сохранении исходной текстуры силикатной части вещества. Микроскопические исследования структуры данной зоны выявили наличие ударных жилок, заполненных непрозрачными минералами $\text{Fe}(\text{Ni},\text{Co})$ и FeS . Оливины и пироксены демонстрируют волнистое погасание, поскольку эффекты интенсивного ударного воздействия были частично удалены (отожжены) в результате существенного нагрева данной зоны расплавленными металлом и троилитом. Вещество внешней части образца (зона 3) метеорита Царев L5 испытало значительную ударную нагрузку (ударная степень до S4 по шкале Stoffler [Stöffler et al., 1991]). При этом исходная структура вещества хондрита Царев, не подвергавшегося ударным экспериментам, соответствовала ударной степени S3.

Таким образом, в результате экспериментального нагружения сферически-сходящимися ударными волнами вещества обыкновенного хондрита Царев L5 показано, что возможно получение широкого диапазона степеней ударного воздействия и соответствующих им особенностей структуры. Получены как исходное вещество во внешней части образца, так и полный переплав вещества в центральной части экспериментально ударенного образца. Более того, показано, что можно сравнивать экспериментально образованные ударные эффекты структуры и текстурные особенности исходного вещества хондрита Царев L5 и его брекчированной части.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00598, а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проекты 5.4825.2017/6.7, 5.3451.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Е.А. и др. Особенности физико-химических превращений хондрита “Саратов” в сферических ударных волнах // Доклады РАН. 1997. 353 (2). С. 183-186.

2. Козлов Е.А. и др. Особенности плавления и испарения аустенитной стали 12Х18Н10Т в сферических волнах напряжений // Физика металлов и металловедение. 1997. 83 (2). С. 116-127.
3. Лаврухина А.К., Мильникова З.К. Ударные эффекты в метеоритах. Наблюдение и эксперимент // Метеоритика. 1984. Вып. 43. С. 67-82.
4. Мигдисова Л.Ф. и др. Особенности состава и структуры метеорита Царев // Метеоритика. 1982. Вып. 41. С. 13-30.
5. Муфтахетдинова Р.Ф. и др. Эффект контактного плавления в железном метеорите Сихотэ-Алинь, претерпевшем нагружение сферическими ударно-изэнтропическими волнами // Письма о Материалах. 2015. 5 (1). С. 110 – 114.
6. 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. 45. P. 1–14.
7. Lambert P., Lewis C., Moore C.B. Comparative shock metamorphism in 12 chondritic. – in: Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf. 12th: Abstracts. Houston, 1981, P. 583-585.
8. Muftakhetdinova R. F. et al. The Structural Changes in Ordinary Chondrite Tsarev L5 after Shock Wave Loading // Meteoritics and Planetary Science. 2017. 52, SI, A247.
9. Smith B.A. and Goldstein J.I. The metallic microstructures and thermal histories of severely reheated chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1977. 41. P. 1061– 1072.
10. Stöffler D. et al. Shock metamorphism of ordinary chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. 55 (12). P. 3845–3867.
11. Taylor G.J. and Heymann D. Postshock Thermal Histories of Reheated Chondrites // Journal of Geophysical Research. 1971. 76 (8). P. 1879-1893.