

МИНЕРАЛОГИЯ

А. А. ЯВНЕЛЬ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО МЕТЕОРИТА**

(Представлено академиком В. Г. Фесенковым 10 IV 1948)

Крупный железный метеорит, упавший 12 II 1947 г. на отрогах Сихотэ-Алинского хребта, по исследованиям академика В. Г. Фесенкова (1), при своем полете через атмосферу распался на отдельные части, меньшие из которых (весом от долей грамма до 300 кг) достигли земли в виде обычных индивидуальных метеоритов, а большие массы образовали воронки различных размеров, усеянные осколочными метеоритами, резко отличающимися от индивидуальных по своему



Рис. 1. Общий вид макроструктуры (н. в.). Светлые включения — шрейберзит, темные — троилит

внешнему виду. Кроме того, в ряде случаев наблюдались мелкие осколки, застрявшие в окружающих деревьях, получившие название „обстрелочных“ метеоритов и образовавшиеся при разрыве некоторых крупных метеоритных масс в воздухе вблизи поверхности Земли. В настоящей работе сообщается металлографическое исследование структуры этих трех видов метеоритов.

Изучению подвергались индивидуальные метеориты весом в 16 и 0,14 кг. Первый из них представляет ориентированный метеорит, передняя сторона которого имеет волнистую заглаженную поверхность, а задняя — глубокие пьезоглипты — впадины, являющиеся результатом завихрения воздуха и паров железа при полете метеорита через атмосферу.

Макроструктура в поперечном сечении (рис. 1) показывает однородную картину без видманштеттовых фигур, характерных для октаэдр-

ритов. Поверхность покрыта трещинами, идущими по границам зерен, и изобилует неметаллическими включениями.

Исследование микроструктуры указывает на наличие единственной основной структурной составляющей — железо-никелевого сплава, содержащего до 6% Ni-камасита. Она пересекается тонкими перекрещивающимися неймановыми линиями, идущими в различных направлениях (рис. 2, а), что характерно для метеоритов типа гексаэдритов. Границы зерен при больших увеличениях можно легко видеть по расположенным вдоль них неметаллическим включениям и по изменению ориентировки неймановых линий, так как каждое зерно имеет свою систему неймановых линий (рис. 2, в).

Таким образом, метеорит можно отнести к типу зернистых гексаэдритов, которые встречаются сравнительно редко.

Наряду с макрозернами  $\alpha$ -камасита при больших увеличениях можно видеть скопление примесей по контурам мелких зерен  $\gamma$ -фазы,

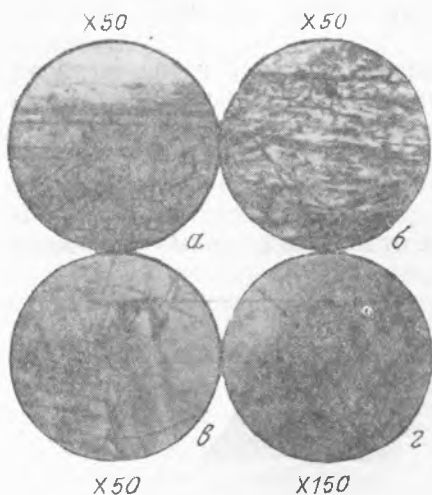


Рис. 2. Микроструктура индивидуальных метеоритов

сохранившихся от ее первоначальной кристаллизации. Неймановы линии проходят через границы этих остатков зерен, не прерываясь и не изменяя своего направления, что видно на правой части рис. 2, в. При большем увеличении отчетливо видны скопления кристаллов фосфидов по границам этих контуров зерен (рис. 2, z).

Отсюда можно сделать вывод, что при первоначальной кристаллизации  $\gamma$ -фазы образовались сравнительно мелкие зерна, которые затем не успели раздробиться при превращении гранцентрированной  $\gamma$ -решетки в объемноцентрированную  $\alpha$ -решетку камасита, так как передняя область между этими фазами при содержании Ni менее 6% очень узка. При дальнейшем исключительно медленном охлаждении протекал процесс срастания этих зерен, который у большин-

ства гексаэдритов завершается превращением их в монокристалл. Но процесс этот в данном случае не успел полностью закончиться, так как мы имеем здесь крупнозернистую структуру.

Необходимо указать, что второй исследованный нами метеорит, значительно меньших размеров, не показал зернистой структуры, что, по видимому, объясняется неодинаковыми условиями кристаллизации различных частей такого крупного метеорита, каким является сихотэалинский.

Из неметаллических включений были исследованы наиболее часто встречающиеся в гексаэдритах шрейберзит и троилит. Шрейберзит, представляющий собой железо-никелевый фосфид с некоторым содержанием кобальта, встречается в данном метеорите в виде микроскопических кристаллов различной формы и размеров, тонких прожилок иногда значительной длины, больших включений неправильной формы.

Микроскопические кристаллы шрейберзита, так называемые рабдиты, довольно равномерно разбросаны почти по всем областям исследуемых метеоритов. Они имеют большей частью правильную форму ромбов размерами от нескольких микронов до  $\frac{1}{4}$  мм (рис. 3, а, б, в; 2, б). Иногда встречались рабдиты в виде исключительно тонких игл (около 2  $\mu$  шириной) (рис. 3, г). Длинные прямоугольники и иглы имели

обычно ориентированное направление, не совпадающее с направлением неймановых линий (рис. 2, а, б).

Микроскопические включения шрейберзита и кристаллы рабдита располагались обычно вдоль границ камаситовых зерен и остатков зерен  $\gamma$ -фазы (рис. 2, в, г). Крупные включения шрейберзита имели различную неправильную форму, например в виде иероглифов (рис. 1). Вокруг таких крупных включений, а также на „островах“ камасита, находящихся внутри них, наблюдалась зона, обедненная фосфором в результате его диффузии в большую шрейберзитовую массу из прилегающего камасита.

Микроструктура шрейберзита имеет вид полигональных зерен различной величины. Наличия фосфидной эвтектики не наблюдалось. Троилит — сернистое железо — наблюдался в виде крупных включений округлой формы, часто сопровождаемая шрейберзитовые включения (рис. 1). Некоторые включения троилита были окаймлены узкой (в несколько сотых миллиметра) полосой шрейберзита. Микроструктура троилита имеет мелкозернистый вид

В результате полета этих метеоритов через земную атмосферу их поверхность накалялась до нескольких тысяч градусов, что приводило к испарению с поверхности и образованию корочки ожога с пезоглиптами. Изменение структуры у поверхности, вызванное высокой температурой, проникает на глубину от 0,1 мм у меньшего метеорита до 1 мм у большего. Это изменение выражается в исчезновении неймановых линий, происходящем

при температуре 800—1000° С, и в уменьшении числа рабдитов, сопровождающемся их округлением в результате диффузии. На деформации, которые претерпели индивидуальные метеориты, указывает большое число неймановых линий, представляющих собой сечение плоскостей двойникования при смещении одних частей кристаллов  $\alpha$ -камасита относительно других, а также количество различных направлений, достигающее до 4 (рис. 2, а).

Ширина неймановых линий колеблется в пределах нескольких микрон в зависимости от направления деформирующих сил. Значительное увеличение ширины некоторых линий, идущих в определенных направлениях и имеющих неправильные волнистые края (рис. 2, в), может объясняться наклонным сечением к плоскости двойникования. Ввиду того что в поверхностной зоне эти линии отсутствуют, можно сделать вывод, что они образовались в результате деформаций, предшествующих удару метеорита о землю, либо до достижения ими земной атмосферы, либо, скорее всего, в результате больших тормозящих усилий, оказываемых на них воздухом при полете через атмосферу.

Совершенно иную картину имеет структура осколочных и „обстрелочных“ метеоритов. Эти осколки больших метеоритных масс имеют значительные следы деформаций — изгибы, вмятины и т. д. Один из исследованных метеоритов представлял собой полоску толщиной около 5 мм, шириной от 10 до 20 мм и длиной около 60 мм, свернутую на широком конце в спираль.

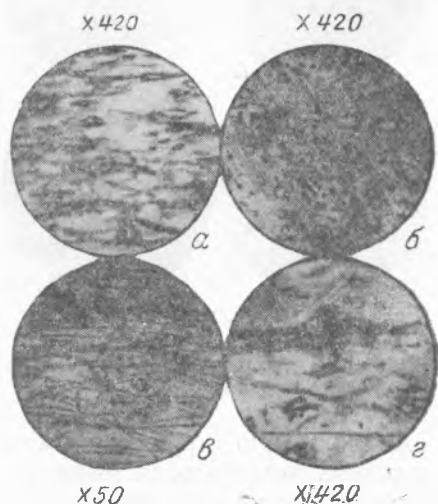


Рис. 3. Различные формы рабдитов ( $\times 600$ )

Макроструктура осколочных метеоритов имеет волокнистый вид, напоминающий структуру прокованного металла. Направление волокон соответствует конфигурации осколков. Микроструктура показывает большое число рабдитов, ориентированных вдоль волокон и образующих цепочки и местные скопления, либо довольно равномерно распределенных, что, очевидно, зависит от исходной структуры метеоритов. В некоторых осколках рабдиты значительно деформированы

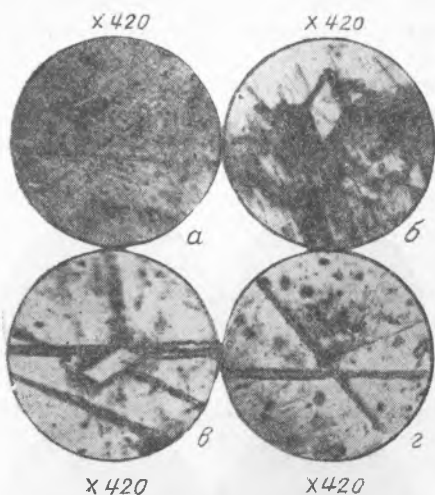


Рис. 4. Микроструктура осколочных и „обстрелочных“ метеоритов

(рис. 4, а), но не показывают изменений, характеризующих их нагревание до температуры начала диффузии  $700^{\circ}\text{C}$ .

При такой исключительно большой степени деформации кристаллическая структура камасита является разрушенной, вследствие чего неймановы линии отсутствуют. Лишь в одном осколке удалось найти участки площадью около  $1\text{ см}^2$ , имеющие неймановы линии, также вытянутые вдоль волокна, и деформированные контуры  $\gamma$ -зерен (рис. 4, в). При большом увеличении можно видеть начало ориентации рабдитов вдоль такой неймановой линии, причем рабдиты еще сохраняют свою правильную форму (рис. 4, г).

Аналогичную структуру имеют также и „обстрелочные“ метеориты, в которых встречаются микроскопические цепочки рабдитов (рис. 4, б) и тонкие прожилки шрейберзита, проходящие через всю их длину. На поверхности некоторых осколков видны цвета побежалости, указывающие на их нагревание до  $400-450^{\circ}$ .

Приведенные данные свидетельствуют о том, что пластическая деформация осколков происходила при температурах, не превышающих  $450^{\circ}$ . Примерные подсчеты величины напряжений, исходя из степени деформации, определяемой по изменению структуры, дают значение порядка  $10\text{ т/см}^2$ .

Институт астрономии и физики  
Академии Наук КазССР

Поступило  
9 IV 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. Г. Фесенков, Астр. журн., 24, 302 (1947). <sup>2</sup> S. H. Perry, Smithsonian Instit. VSNM, Bull. 184, Washington (1944).