

# МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ МЕТЕОРИТОВ

*Е. С. Козловских, В. И. Гроховский*

*Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого  
президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, ekozlovskih@mail.ru*

Метеориты являются одним из наиболее осязаемых свидетельств бомбардировки Земли малыми телами и наиболее доступными для лабораторных исследований веществом внеземного происхождения. Несомненно, что характер разрушения метеороидов в атмосфере Земли и при ударе о земную поверхность прежде всего определяется его прочностными свойствами. Однако данные о механических характеристиках минералов каменных и железных метеоритов весьма ограничены. В то же время в последние годы вследствие развития компьютерных и инженерных технологий получили развитие новые методы для определения свойств микрообъектов. Например, традиционные способы определения твердости трансформировались в тонкий многофункциональный исследовательский инструмент, называемый «кинетическое индентирование».

Исторически первый и основной режим работы инструментированных приборов кинетического индентирования реализуется путем внедрения геометрически аттестованного индентора под действием заданного профиля нормальной силы  $P(t)$  и одновременной регистрации глубины погружения его в материал  $h(t)$ . Иногда бывает полезным представление результатов и в таких координатах, но чаще данные перестраивают в виде зависимости  $P = f(h)$ , которая является аналогом диаграммы  $\sigma = f(\epsilon)$  (напряжение — относительная деформация) в традиционных макроиспытаниях. При помощи кинетического индентирования можно получить такие микромеханические характеристики минерала, как: микротвердость, соотношение долей упругой и пластической деформаций, модуль упругости, вязкость разрушения и др.

Методы локального механического тестирования материалов зачастую подразделяют на макро-, микро-, нано- и даже пикоиндентирование чисто формально, ориентируясь на характерные размеры отпечатка, которые попадают в тот или иной диапазон. Однако можно провести классификацию этих методов, более обоснованную физически. С ростом силы  $P$  меняется не только характерный размер локально сформированной области, но и соотношение между упругой и пластической деформацией. При макроиндентировании упругой деформацией в первом приближении можно пренебречь, в нано-области, наоборот, вся деформация является чисто упругой. При микроиндентировании необходим одновременный учет и упругой, и пластической деформации, поскольку их вклад в общую деформацию становится сопоставимым. Типичный вид экспериментальных кривых, записываемых в процессе испытания, представлен на рисунке 1.

Размеры минеральных составляющих метеоритов во многих случаях весьма малы, поэтому использование метода кинетического индентирования для изучения и диагностики минералов метеоритов представляется достаточно перспективным. В настоящей работе приведены результаты, получен-

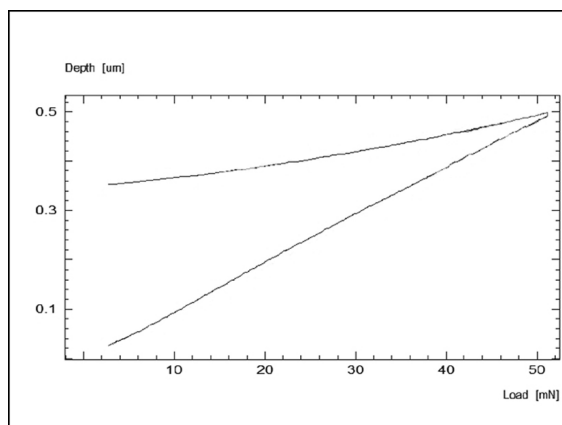


Рис. 1. Типичная экспериментальная кривая в координатах «глубина погружения индентора — нагрузка» при

микроиндентирования рабдита в метеорите Сихотэ-Алинь.

ные на инструментированном микротвердомере Fisher SCOPE 2000 хум с различных минералов и субмикроструктур шести метеоритов (табл. 1). Испытания проводились при нагрузке 50 мН, что относится к области микроиндентирования, индентор – алмазная пирамида. Результаты проведенных испытаний для всех изученных фаз приведены на рисунке 2 в виде тренда «nplast –HV».

Таблица 1

**Исследуемые минеральные составляющие метеоритов**

Метеорит	Исследуемые минералы
Грубый октаэдрит Сихотэ-Алинь IVB-OgH	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Рабдит (Fe, Ni, Co) <sub>3</sub> P
Атаксит Чинге IVB-D	Матрица ( $\alpha$ + $\gamma$ + $\alpha_2$ ) Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Добреелит Cr <sub>2</sub> FeS <sub>4</sub> Тэнит $\gamma$ -Fe(Ni, Co)
Атаксит Дронино с 7,5% Ni	Матрица ( $\alpha$ + $\alpha_2$ ) Переходная окисленная зона Троилит FeS
Октаэдрит Lombard II AB	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Шрейберзит (Fe, Ni, Co) <sub>3</sub> P
Хондрит Wellman H4	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Троилит FeS Гётит FeOOH Силикатная матрица
Октаэдрит Canyon Diablo IA-Og	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Облачный тэнит $\gamma$ -Fe(Ni, Co)

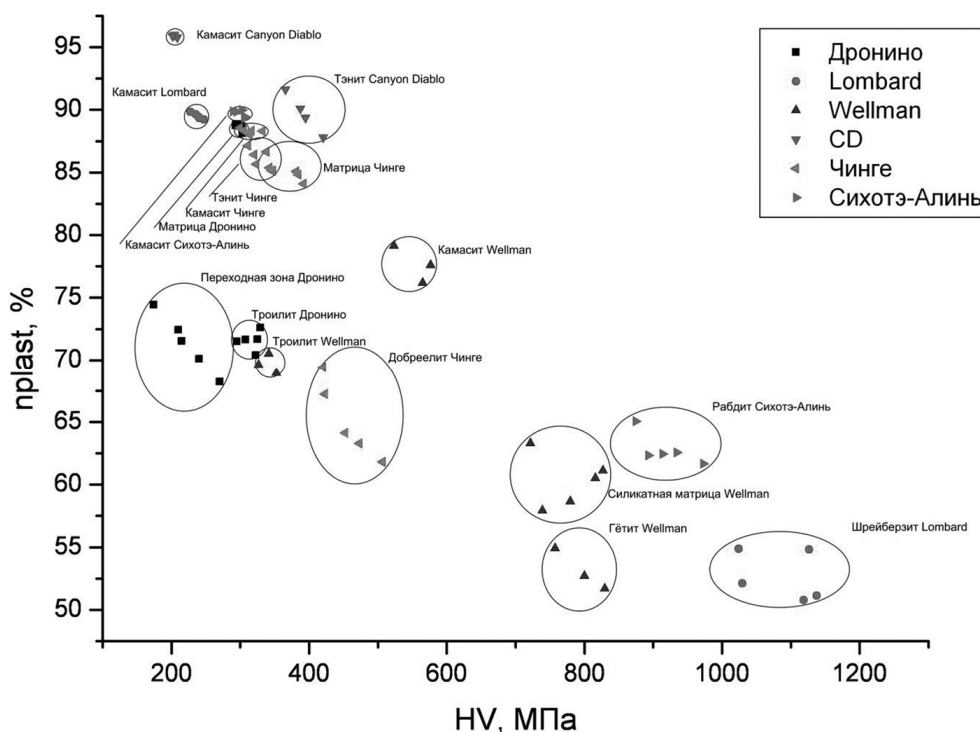


Рис. 2. Распределение экспериментальных значений микромеханических характеристик для исследуемых минералов метеоритов в координатах «nplast-HV».

С ростом твердости фаз от 174 МПа до 1138 МПа доля их пластической деформации при индентировании уменьшается от 96 % до 50.8 %. Самым хрупким (доля пластической деформации 50.8 %?54.9 %) и твердым из исследуемых фаз можно назвать шрейберзит в образце метеорита Lombard. Также низкими значениями долей пластической деформации обладают гётит и силикатная матрица в образце метеорита Wellman, но твердость у данных фаз в среднем на 300 МПа меньше чем у шрейберзита метеорита Lombard. Все эти фазы имеют близкие значения модуля упругости (110?199) ГПа. Рабдит метеорита Сихотэ-Алинь оказался чуть менее твердым и чуть более пластичным.

Самым мягкий и самый пластичный, но обладающий наибольшими значениями показателя сопротивления материала сжатию при упругой деформации из исследуемых фаз является камасит метеорита Canyon Diablo (доля пластической деформации 95.8 %?96 %). Вместе с тем, высокое значение модуля вдавливания для этого метеорита не находит объяснения в общепринятых представлениях. Чуть менее пластичными и чуть менее твердыми по отношению к камаситу в образце метеорита Canyon Diablo, являются камасит образца метеорита Lombard, камасит метеорита Сихотэ-Алинь, матрица метеорита Дронино, камасит, тэнит и матрица в образце метеорита Чинге, тэнит в метеорите Canyon Diablo.

Большой разброс экспериментальных значений наблюдается для силикатной матрицы в образце метеорита Wellman. Это может объясняться значительными вариациями в фазовом и химическом составах силикатов.

Одними из самых мягких фаз ( $HV = (174?352)$  МПа), и при этом обладающими близкими значениями модуля упругости являются троилит в метеорите Wellman, троилит и переходная зона в метеорите Дронино. Доля пластической деформации в данных образцах лежит в диапазоне 61.7 %?74.4 %. Немного более твердым и хрупким оказался добреелит метеорита Чинге. Наименьшими значениями модуля упругости обладают камасит в метеорите Сихотэ-Алинь и тэнит в метеорите Чинге.

Близкими значениями модуля упругости (184?210) ГПа обладают камасит в образце метеорита Lombard, матрица в метеорите Дронино, камасит и матрица в метеорите Чинге и камасит в метеорите Wellman, но при этом они обладают значениями долей пластической деформации, лежащими в довольно широком диапазоне (76 %?90 %).

Представленные данные носят на первый взгляд тривиальный характер, т.е. доля пластической деформации наиболее высокая у минералов с низкими значениями HV, но впервые эти соотношения получили численные значения. Наблюдаемые отличия в микромеханических характеристиках одинаковых минералов в разных метеоритах объясняется различным химическим составом фаз и различной термической и ударной предысторией вещества метеоритов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-96047-р\_урал\_а.*