

Е. В. Брусницына*, Р. Ф. Муфтахетдинова

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

*jeka_bru@list.ru

Научный руководитель — проф., канд. техн. наук В. И. Гроховский

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПАЛЛАСИТА СЕЙМЧАН

В середине прошлого века исследование механических свойств железных и железокремнистых метеоритов ограничивалось измерением твердости по Виккерсу. Сегодня доступны более локальные методы исследования. В данной работе с помощью наноиндентирования были определены нанотвердость и модуль упругости камасита, тэнита, плессита, тетратэнита и облачной зоны металлической части палласита.

Ключевые слова: палласит Сеймчан, наноиндентирование, модуль упругости, твердость, Fe–Ni сплавы, тетратэнит, облачная зона.

E. V. Brusnitsyna, R. F. Muftakhedinova

PHASE AND STRUCTURAL COMPONENTS MECHANICAL PROPERTIES OF SEYMCHAN PALLASITE METALLIC PART

In the middle of the last century, the mechanical properties study of iron and iron-stone meteorites was limited to Vickers hardness testing. To date more local methods used to study are available. In this work kamacite, tanite, plessite, tetraetaenite and the cloudy zone hardness and Young's modulus of the pallasite metal part were determined by nanoindentation.

Key words: Seymchan pallasite, nanoindentation, Young's modules, hardness, Fe–Ni alloys, cloudy zone.

Впервые метеорит Сеймчан был найден в 1967 г. и классифицирован как железный метеорит — октаэдрит. Результаты анализа более поздних находок в 2004 г. позволили отнести его к редкому классу — палласитам, в которых, помимо железа, в большом количестве присутствуют силикаты.

В коллекции УрФУ имеются как октаэдритовая, так и палласитовая части метеорита Сеймчан. В данной работе исследовался образец из палласитовой части метеорита. Механические свойства металличе-

ских составляющих были определены с помощью метода наноиндентирования.

Авторы работ, посвященных исследованию микроструктуры железных метеоритов и палласитов, использовали метод микротвердости для дополнения оптической и электронной микроскопии [1, 2, 3]. В измерении твердости по Виккерсу применяются относительно высокие нагрузки, поэтому определение твердости возможно только в крупных металлических частицах, порядка сотен микрометров. В методе наноиндентирования используется нагрузка менее 1 г, что позволяет локально определять такие механические характеристики, как твердость, модуль упругости и соотношение между упругой и пластической деформациями. В метеоритах наноиндентирование применялось лишь в одной работе [4] для определения твердости и модуля упругости мартенсита и тэнита, размер которых составлял порядка 10 мкм.

Образец был подготовлен по стандартной металлографической методике при использовании механической шлифовки и полировки. Травление проводилось 2 %-м раствором азотной кислоты в спирте. Для исследования микроструктуры применялись оптический микроскоп Axiovert 40 MAT и электронный микроскоп FE-SEM ΣIGMA VP с приставкой EDS для определения химического состава. Измерения нанотвердости и модуля упругости были выполнены на приборе Hysitron TI 750 Ubi, в котором в качестве индентора используется трехгранная пирамида Берковича.

Изображение микроструктуры исследуемой металлической части палласита Сеймчан представлено на рис. 1.

Наноиндентирование проводилось в пяти областях: 1) участок (так называемый М-профиль), захватывающий фазовые и структурные составляющие, такие как камасит α -Fe (Ni, Co), тэнит γ -Fe (Ni, Co) и плессит ($\alpha + \gamma$); 2) камасит α -Fe (Ni, Co); 3) плессит ($\alpha + \gamma$); 4) тэнит γ -Fe (Ni, Co) и 5) зональный тэнит — светло-серая каемка на границе камасита и тэнита, в которой при более высоком увеличении наблюдаются полоса тетратэнита (соединение FeNi с упорядоченной структурой $L1_0$) шириной около 2 мкм и облачная зона — частицы тетратэнита в матрице камасита (FeNi + α -Fe (Ni, Co)) (рис. 2).

Наноиндентирование участка 1, а также областей камасита, плессита и тэнита проводилось с нагрузкой 7 мН. Для участка М-профиля шаг составляет 10 мкм. Значение твердости изменяется от 1,95 до 5,34 ГПа, модуль упругости от 173 до 260 ГПа. Разброс по твердости и модулю упругости на участке М-профиля объясняется наличием дисперсных фаз, составляющих различные структурные зоны. В областях 2–4 было

сделано по 25 измерений, усредненные значения твердости Н, модуля упругости Е и химического состава приведены в табл. 1. Химический состав определялся по трем точкам в каждой исследуемой области.

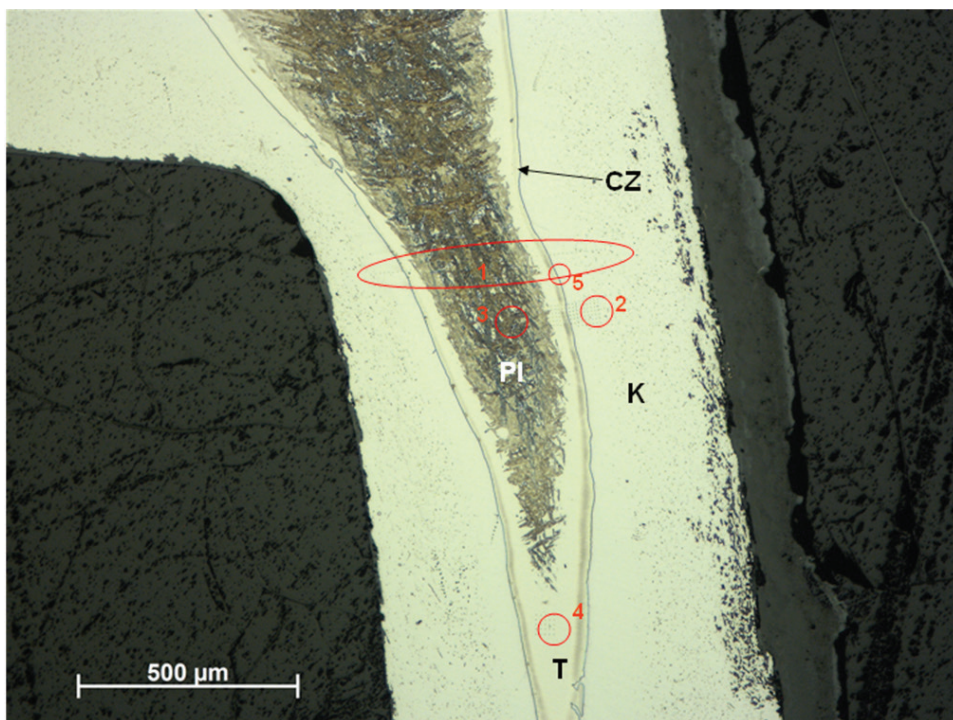


Рис. 1. Микроструктура исследуемой частицы: К — камасит (α -Fe), PI ($\alpha + \gamma$) — плесит, Т — тэнит (γ -Fe), CZ — облачная зона (FeNi + α -Fe), Tt — тетратэнит (FeNi)

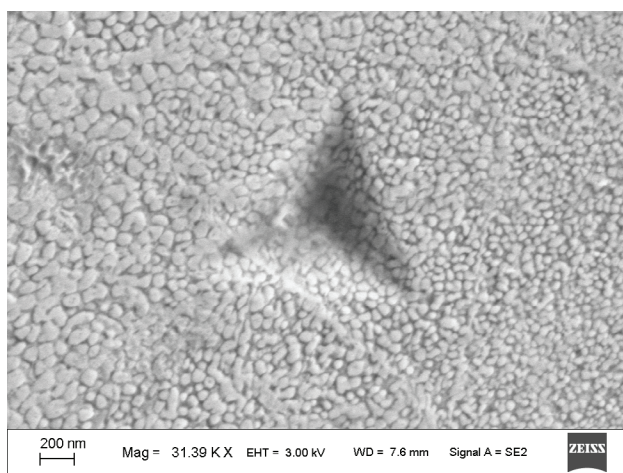


Рис. 2. Отпечаток индентора внутри облачной зоны

Характеристика камасита, тэнита и плессита в палласите Сеймчан

Область измерений	Ni, вес. %	Fe, вес. %	H, ГПа	СКО, ГПа	E, ГПа	СКО, ГПа
камасит (α)	7,1	92,1	3,55	0,14	241	7
плессит ($\alpha + \gamma$)	15,1	84,1	4,22	0,51	219	52
тэнит (γ)	21,7	77,7	3,98	0,24	67	2

Из таблицы видно, что твердость тэнита немного больше твердости камасита, однако модуль упругости камасита выше, чем у тэнита в 3 раза. Самым твердым является плессит, поскольку имеет многофазную мелкодисперсную структуру. Большое значение среднеквадратического отклонения (СКО) модуля упругости в плессите можно объяснить также многофазным составом.

В области зонального тэнита (участок 5 на рис. 1) было выполнено 100 измерений с шагом 2,5 мкм и нагрузкой 1 мН. При наблюдении в электронном микроскопе было установлено, что часть измерений приходится на область тетратэнита — упорядоченной γ -фазы. По этим измерениям определено, что значение твердости тетратэнита составляет 8,43 ГПа и модуль упругости 237 ГПа. Твердость тетратэнита в два раза выше твердости тэнита, что свойственно всем упорядоченным структурам. Также определены твердость облачной зоны ($\text{FeNi} + \alpha\text{-Fe} (\text{Ni}, \text{Co})$) (рис. 2) — 7,23 ГПа и модуль упругости — 208 ГПа.

Для сравнения полученных результатов с данными работы [3], где измерялась твердость по Виккерсу в отдельном зерне тетратэнита, значение твердости тетратэнита по Берковичу ($H_{\text{ГТ}}$) было переведено в значение твердости по Виккерсу (HV), исходя из коэффициентов, предложенных в статье [5]. Полученные нами значения твердости тетратэнита в несколько раз превышают значения, измеренные ранее. Такое различие можно объяснить методическими проблемами при измерении дисперсных структур в стандартных испытаниях на твердость по Виккерсу.

Применение метода наноиндентирования позволило впервые определить твердость и модуль упругости структурных составляющих зонального тэнита. В дальнейших исследованиях планируется измерение механических характеристик дисперсных фаз, составляющих структурные зоны в различных метеоритах.

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 Buchwald V. F. Handbook of Iron Meteorites. V. 1. C. : The Regents of the University of California, 1975. 243 p.
- 2 Massalski T. B., Park F. R. A study of four pallasites using metallographic, microhardness and microprobe techniques // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1964. V. 28. P. 1165–1175
- 3 Clarke R. S. J., Scott E. R. D. Tetrataenite — ordered FeNi, a new mineral in meteorites // *American Mineralogist*. 1980. V. 65. P. 624–630
- 4 Russel K. F., Kenik E. A., Miller M. K. Characterization of the Tishomingo meteorite // *Surface Science*. 1991. V. 246. P. 292–298
- 5 Method for Identifying Vickers Hardness by Instrumented Indentation Curves with Berkovich — Vickers Indenter / D. J. Ma [et. al] // *Experimental Mechanics*. 2016. V. 56. P. 891–900