

МЕТОД НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КАМЕННОГО ЛИТЬЯ

А. М. Игнатова¹, А. П. Скачков²

¹ – Пермский государственный технический университет, г. Пермь, ignatovaanna2007@rambler.ru

² – Пермский государственный университет, г. Пермь, skachkov@psu.ru

Использование микротвердомеров в исследование минеральных пород имеющих в своем составе несколько структурных составляющих, позволило установить ряд взаимосвязей между твердостью и структурой отдельных минералов. Эти взаимосвязи подтверждаются многолетним опытом и доказано, что они могут использоваться для косвенной идентификации структурных составляющих. С появлением большого количества исследовательского оборудования позволяющего проводить измерения твердости на более тонком наноуровне и в нанообъемах, актуальным становится вопрос использования этих методов и оборудования при изучение структуры и свойств минералов естественного и синтетического происхождения.

В своей работе, мы преследуем цель, рассмотреть способ определения твердости отдельных структурных составляющих методом наноиндентирования и оценить возможности и перспективы использования этих исследований для изучения структуры и свойств синтетических и природных материалов на примере каменного литья.

Принципиальная схема проведения исследований по установлению твердости материалов на поверхности методом наноиндентирования представлена на рис. 1.

Современные установки для наноиндентирования оснащены дополнительно оптическими микроскопами высоко разрешения, позволяющие осуществлять точный выбор места проведения эксперимента, осуществлять фото и видео съемку. Позиционировать место индентирования позволяет высокоточные прецизионные двигатели. Существует несколько моделей современных установок для наноиндентирования, принцип их работы одинаковый, отличаются они между собой техническими характеристиками и набором функций.

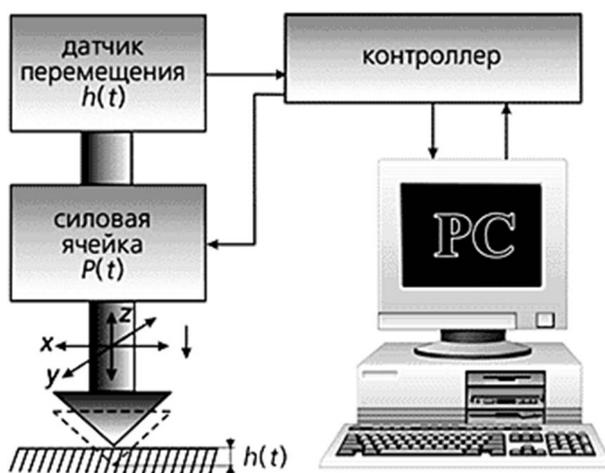


Рис. 1. Принципиальная схема наноиндентирования поверхности.

В процессе индентирования производится измерение зависимости глубины проникновения индента от приложенной нагрузки. Поскольку форма индента заранее известна (чаще всего это индентор Берковича – усеченная трехгранная алмазная пирамидка), определяются локальные значения твердости и модуля Юнга без непосредственного измерения площади отпечатка. Для определения исследуемых величин используется расчетная методика Оливера-Фарра. В соответствие с этим методом зависимость нагрузки P и глубины внедрения индентора h и остаточного отпечатка описывается

зависимостью:

$$P = a(h - h_f)^m,$$

где a и m – константы, зависящие от формы индента.

Графическое выражение этой зависимости представлено на рис. 2.

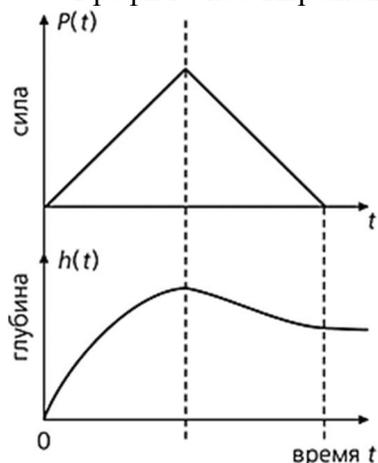


Рис. 2. Зависимости усилия P и глубины погружения h от времени при внедрении индентора.

В данной работе рассматриваются результаты исследований полученные с помощью прибора NanoTest-600. В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается каменное литье полученное из горнблендита с добавлением хромовой руды.

Каменное литье – продукт высокотемпературной переплавки сырья минерального (основные и ультраосновные горные породы) и техногенного (металлургические шлаки, топливные золы и т.д.) происхождения, является материалом на основе силикатов, представляет собой сложную оксидную многокомпонентную систему. В настоящее время применяется в промышленности в качестве абразиво- и коррозионностойкого материала, так как обладает высокой твердостью и химической стойкостью. Классические методики (по Бринеллю, по Роквеллу), позволяющие изучать твердость на макроуровне путем усреднения характеристик по всей поверхности контакта, не являются достоверными применительно к каменному литью, а присвоение балла твердости в соответствие со шкалой Мооса, не дает представления о природе этого свойства.

Химический состав образцов, рассматриваемых в работе, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав горнблендитового каменного литья

Соединение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	Прочее
Масс. доля, %	47.3	12.5	9.5	10.9	8.3	3.4	2.3	2.1	0.5	0–20

Результаты исследований нанотвердости представляются в виде диаграмм, типичный вид диаграммы представлен на рис. 3а, а общий вид данной диаграммы именно для каменного литья представлен на рис. 3б.

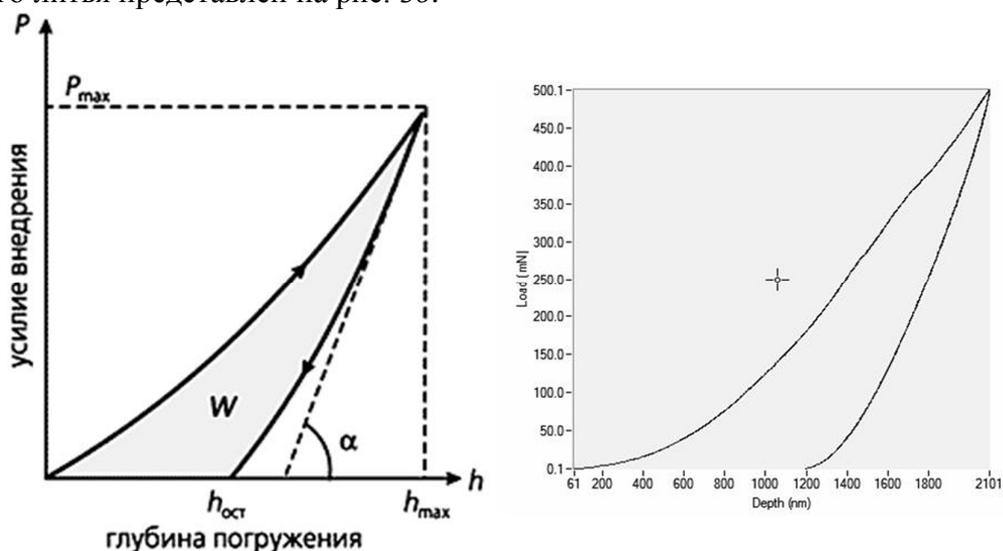


Рис. 3. Типичные вид диаграммы сила-перемещение при наноиндентировании: а – общий вид, где $h_{\max(\text{total})}$ – максимальная глубина погружения индентора, $h_{\text{ост}(\text{fin})}$ – глубина отпечатка, оставшегося после снятия; б – для каменного литья.

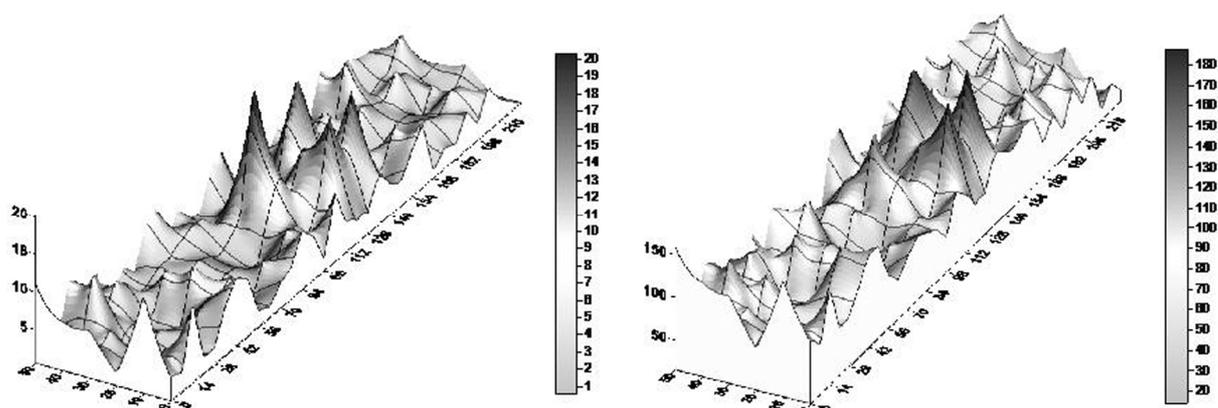


Рис. 4. Топография распределения свойств по площади участка эксперимента:
 а – твердость (H, ГПа), б – приведенный модуль упругости (E, ГПа).

Предыдущие исследования каменного литья петрографическими методами и с помощью рентгеноспектрального микрозондового анализа позволили установить, что его основными структурными составляющими являются хромшпинелиды, клинопироксены и аморфная фаза. По этому для исследования нами был выбран участок, где встречались все эти три составляющие. Эксперимент производился по 100 точкам, нагрузка приложенная к каждой из этих точек составляла $F = 100$ мН, в качестве результатов было получено распределение значений твердости и приведенного локального модуля упругости по площади данного участка, которые были визуализированы. Результаты визуализации испытаний представлены на рис. 4.

Анализ данных полученных в ходе серии экспериментов позволил установить, что в структуре каменного литья встречаются некрупные частицы размером 10–20 мкм, которые обладают крайне высокой твердостью порядка > 10 ГПа, по всей видимости хромшпинелиды. Для сравнения, конструкционная сталь обладает твердостью в 1.5–2 ГПа. Так же установлено, что в структуре встречаются составляющие с крайне низкой твердостью, они имеют внешний вид включений и как правило окружены средой со средним значением твердости в 3 ГПа, включения вероятно пироксениты, а среда – аморфная составляющая.

Полученные данные свидетельствуют, что метод наноиндетирования является наиболее точным способом определения физико-механических свойств материалов с высокогетерогенной структурой. Метод наноиндетирования может быть использован для изучения структуры как синтетических, так и природных минералов, а совмещая полученные данные с результатами идентификации структурных составляющих, можно установить более подробные взаимосвязи между структурой и условиями происхождения минерала, а в случае синтетических материалов взаимосвязь: структура → эксплуатационное свойство → технологический параметр. В частности, подобные исследования позволят получать каменное литье и материалы на его основе с программируемыми свойствами, то есть наноструктурированное каменное литье.

Литература

- Булычев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М., 1990. 236 с.
- Игнатова А. М., Чернов В. П., Ханов А. М. Кристаллизационно-ликвационная модель-схема формирования стеклокристаллических материалов каменного литья. Мат-лы V Всероссийской НТК «АНТЭ-09». Казань. 2009. С. 127–132.
- Скачков А. П., Пестренин В. М. Применение МДТТ в современном материаловедении (наноматериалы и нанотехнологии). Пермь: ПГУ, 2007. 60 с.