

А.М. Игнатова

Пермский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА КАМНЕЛИТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Рассмотрены механизмы структурных процессов, влияющие на поведение камнелитых материалов в условиях интенсивного абразивного износа и обеспечивающие его высокую износостойкость. Предложены модели процесса абразивного износа камнелитых материалов.

Все детали машин в процессе эксплуатации постепенно изнашиваются. Период времени, в течение которого они могут сопротивляться износу и сохранять при этом свои эксплуатационные свойства, определяет срок их службы. Продление срока службы различных деталей является первоочередной задачей при их создании и проектировании. Выбор тех или иных мер по продлению срока службы, или, говоря иначе, по повышению износостойкости, определяется, прежде всего, тем, какому именно виду износа эта деталь будет подвергаться в процессе эксплуатации.

Выделяют несколько видов износа: абразивный, усталостный, адгезионные и коррозионно-механический. Зачастую одна и та же деталь может подвергаться сразу нескольким видам износа, но практически все они подвергаются в той или иной степени абразивному износу. Абразивный износ возникает при трении одной детали о другую или о частицы какого-либо твердого материала (абразива). Причем абразивный износ возникает даже при трении в микроскопических контактных зонах, в этих случаях контактные зоны принимают на себя всю изнашивающую нагрузку [1].

На практике интенсивный абразивный износ возникает при дроблении и транспортировке руды и других материалов минерального происхождения, при бурении грунта, при попадании частиц песчаной пыли в смазочные материалы, при попадании твердых частиц в жидкие и газообразные среды при их транспортировке и т.д. Помимо случаев непосредственного воздействия инородных твердых материалов и частиц на деталь или элемент конструкции, абразивный износ может возникнуть при взаимодействии твердой шероховатой поверхности с более мягкой при работе какой-либо установки, например при движении подшипников.

* Материалы работы выполнены на средства гранта «У.М.Н.И.К.»

Для борьбы с абразивным износом принимаются следующие меры:

- изготовление деталей, подвергающихся абразивному износу, из более твердых материалов, чем абразив;
- нанесение твердых абразивостойких покрытий на готовые детали;
- исключение возможности попадания твердых частиц и пыли в зону контакта деталей или в среду их эксплуатации.

В большинстве случаев исключить контакт деталей между собой или с абразивными материалами просто невозможно, поскольку их основная функция это подразумевает. Подбор наиболее подходящего материала в таком случае должен осуществляться в зависимости от условий эксплуатации, т.е. от твердости самого абразива, от скорости его движения, угла приложения абразивной нагрузки и т.д.

М.М. Хрущовым было установлено, что основным критерием, которым следует руководствоваться при подборе материала соответственно абразиву, является коэффициент K_T . Он является безразмерной величиной и рассчитывается по формуле

$$K_T = H_a / H_M, \quad (1)$$

где H_a – твердость абразива;

H_M – твердость материала.

Графически зависимость между относительным абразивным износом, износостойкостью и величиной K_T выражена в виде диаграммы (рис. 1).

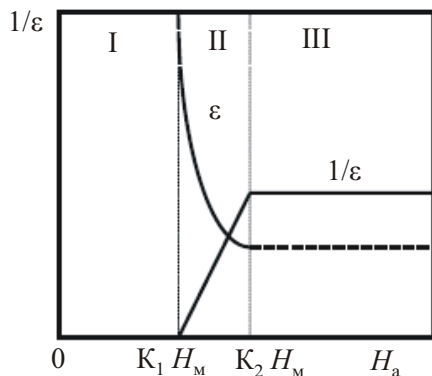


Рис. 1. Диаграмма М.М. Хрущова, описывающая зависимость между относительным абразивным износом, износостойкостью и величиной K_T [1]

Кривые на диаграмме изменяются скачкообразно в критических значениях, это связано с тем, что в этих точках меняется сам механизм абразивного изнашивания. Такое изменение может произойти или по причине снижения твердости абразива, или по причине увеличения твердости изнашиваемой по-

верхности. Зона III характеризует абразивный износ, механизм которого представляется как простое резание с образованием микростружки. При переходе к зоне II простое резание сменяется полидеформационным изнашиванием, при таком характере воздействия абразива на материал его поверхность как будто «шелушится». При переходе к зоне I механизм износа приобретает характер механохимического взаимодействия, уже без образования каких-либо продуктов резания. Установлено что при $K_r = 1,3$ происходит переход от зоны I к зоне II, а при $K_r = 0,7$ процесс износа приобретает механохимический характер.

Однако на практике, например при том же бурении или транспортировке пульпы по трубопроводам, абразивная масса, с которой взаимодействует деталь, крайне неоднородна по составу, а значит, и по размеру частиц абразива и их твердости. Следовательно, в таких случаях процесс износа происходит сразу по нескольким механизмам. Таким образом, управление фактической износостойкостью, а значит, и сроком службы детали должно осуществляться не только подбором материала для ее изготовления по твердости, но и с учетом других параметров. Логичным представляется, что гетерогенной среде должен противостоять и гетерогенный материал. Иначе говоря, следует рассматривать возможность увеличения износостойкости через замену традиционных материалов на композиционные, способные сопротивляться воздействию различных абразивов с различной интенсивностью сразу.

Камнелитые материалы, сочетающие в себе высокую твердость, износостойкость, хорошую обрабатываемость и при этом доступность, являются камнелитыми. Камнелитые материалы – вещества, полученные в результате высокотемпературной переплавки сырья минерального (основные и ультраосновные горные породы) или техногенного (металлургические шлаки, топливные золы и т.д.) происхождения. Материал каменного литья представляет собой сложную оксидную многокомпонентную систему. Его структура состоит из кристаллических составляющих и стеклофазы. Количественное соотношение этих составляющих, характер их распределения в материале и относительно друг друга, а также структура каждой в отдельности определяют все технологические и рабочие свойства материала, в том числе твердость. В настоящее время механизм формирования структуры камнелитых материалов и характер влияния структурных параметров на его эксплуатационные свойства окончательно не выяснен.

Целью настоящей работы является предложение модели (механизма) абразивного износа материала каменного литья через установление корреляционной связи между твердостью его структурных составляющих и общей фактической износостойкостью материала каменного литья.

Значение твердости материала каменного литья было установлено предыдущими исследователями, согласно этим данным твердость каменного литья составляет 6–8 ГПа по Виккерсу, а при оценке по шкале Мооса ему при-

своею 7–8 баллов. Однако ни одно проведенное исследование не давало объяснения природы столь высоких показателей.

Учитывая, что камнелитный материал является в высокой степени структурно неоднородным материалом, с помощью оптической микроскопии установлено, что минимальный размер его структурных компонентов составляет 10–20 мкм (рис. 2), поэтому для его изучения необходимо оборудование, позволяющее производить измерение твердости каждого структурного компонента в отдельности, исключая влияние соседствующих структур. Наиболее современным способом исследования твердости в микрообъемах является метод наноиндентирования, на рис. 3 представлена общая схема этого метода.

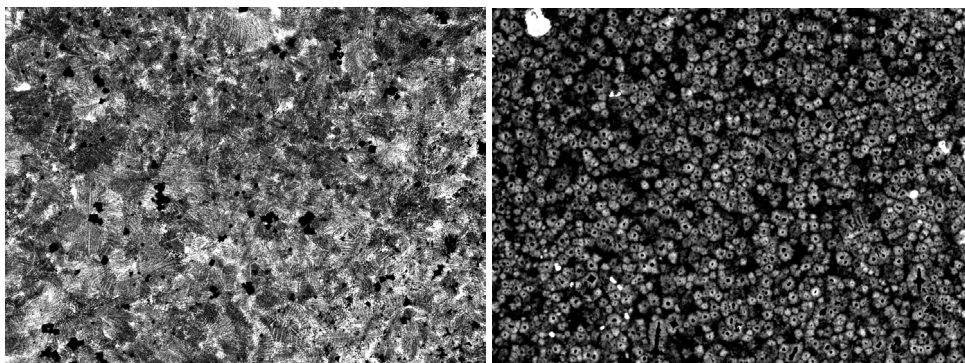


Рис. 2. Изображение микроструктуры каменного литья, $\times 100$, проходящий свет, николи скрещены

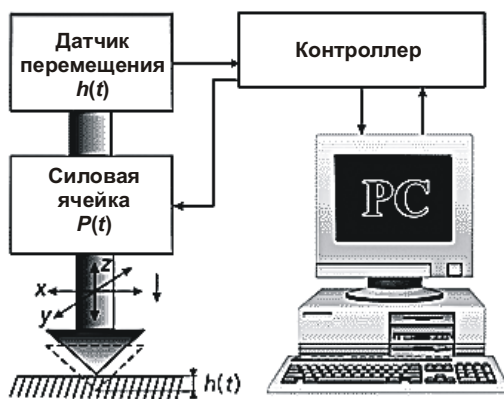


Рис. 3. Принципиальная схема наноиндентирования поверхности

В процессе наноиндентирования производится измерение зависимости глубины проникновения индентора от приложенной нагрузки. Поскольку форма индентора заранее известна, определяются локальные значения твердости и модуля Юнга без непосредственного измерения площади отпечатка.

Для определения исследуемых величин используется расчетная методика Оливера – Фарра [2], которая позволяет исследовать общую глубину внедрения индентора (h_{total}), глубину пластического контакта ($h_{plastic}$) и остаточную глубину (h_{final}) (рис. 4).

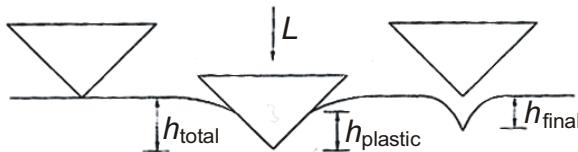


Рис. 4. Схема приложения нагрузки и разгрузки при наноиндентировании

В соответствии с этим методом зависимость нагрузки P , глубины внедрения индентора h и остаточного отпечатка описывается как

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

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

Анализ участка разгрузки кривой нагружения позволяет определить приведенный модуль E_r , связанный со свойствами исследуемого материала и индентора соотношением

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s},$$

где E_s , ν_s – модуль Юнга и коэффициент Пуассона образца;

E_i (1141 ГПа) и ν_i (0,07) – соответствующие свойства индентора [3].

Современные установки для наноиндентирования оснащены оптическими микроскопами высокого разрешения, это позволяет осуществлять точный выбор структурного элемента для проведения эксперимента, осуществлять фото- и видеосъемку качества, достаточного для изучения изображений отпечатков индента. Точное позиционирование индента позволяет осуществлять сверхточные прецизионные двигатели установки.

Существует несколько моделей современных установок для наноиндентирования, принцип их работы одинаковый, отличаются они между собой техническими характеристиками и набором функций. В данной работе рассматриваются результаты исследований, полученные с помощью прибора NanoTest-600 (производитель Micro Materials Ltd., Великобритания).

К образцу для наноиндентирования отсутствуют жесткие требования, поэтому испытание проводилось на образцах, вырезанных из различных участков каменных отливок. Химический состав образцов представлен в табл. 1.

Химический состав горнблендитового камнелитового материала

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
Мас. %	47,3	12,5	9,5	10,9	8,3	3,4	2,3	2,1	0,5	0–20

Перед проведением экспериментов в управляющей программе были заданы параметры испытания: максимальная нагрузка (100 мН), скорость нагружения (0,1 мН/с), время выдержки при максимальной нагрузке (0,5 с) и скорость разгрузки (0,1 мН/с). Регистрация зависимости силы сопротивления P от глубины погружения h или тангенциального перемещения x происходило непрерывно, поэтому наноиндентирование можно охарактеризовать как непрерывное. В данной работе рассматриваются результаты, полученные при индентировании «пирамидкой Берковича».

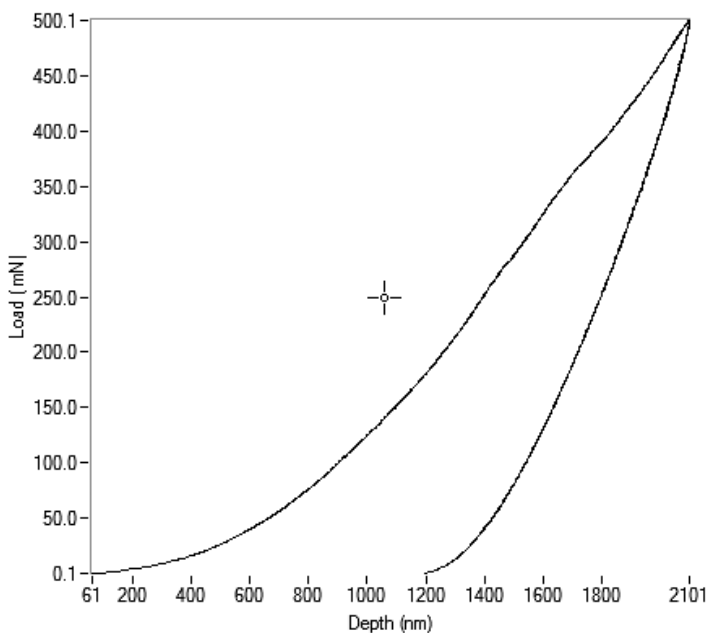


Рис. 5. Типичный вид диаграммы «сила – перемещение» для камнелитых материалов

Результаты измерения твердости с помощью данного прибора представляются графически в виде диаграммы «сила – перемещение», общий вид которой для камнелитых материалов представлен на рис. 5. Кроме того, благодаря возможностям программного обеспечения, поставляемого с установ-

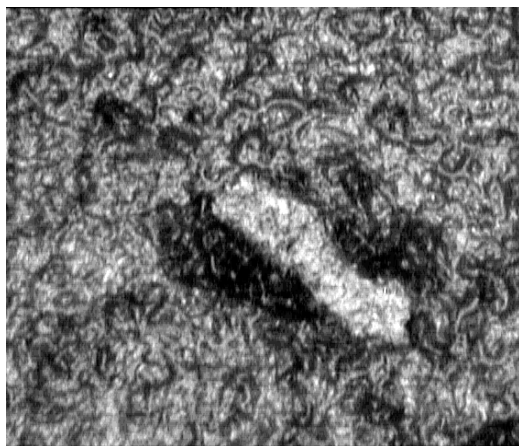
кой, вместе с измерением твердости рассчитываются значения модуля Юнга для каждого локального измерения, а это позволяет судить не только о комплексном значении твердости, но и о пластических характеристиках каждого структурного компонента.

Нами было проведено несколько серий экспериментов на различных участках образца, отличающихся между собой размером, формой, а также набором структурных составляющих, выявленных при осмотре поверхности образца через микроскоп. В каждой серии экспериментов нагрузка, подаваемая на индентор, составляла $F = 100$ мН. Шаг между точками приложения нагрузки на участке, где проводилась серия экспериментов, соответствовала минимальному размеру структурных составляющих и составляла 10 мкм вдоль обеих координат. Размер участка первой серии экспериментов составлял 100×100 мкм (рис. 6, а), второй – 50×224 мкм (рис. 6, б), а третьей – 250×250 мкм (рис. 6, в). Различие размеров участков проведения экспериментов объясняется тем, что каждый из них четко совпадает с «зоной интересов» эксперимента, т.е. захватывает именно ту область, где расположены определенные по форме и размеру структурные составляющие.

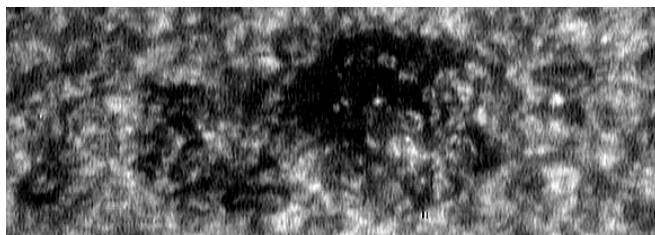
Полученные результаты были оценены по трем направлениям:

- оценка твердости и модуля Юнга структурных составляющих с точки зрения их идентификации;
- изучение отпечатка индента с целью установления других физических и механических характеристик каменного литья;
- выявление характера влияния твердости и пластических характеристик отдельных структурных составляющих на общую абразивную износостойкость каменного литья.

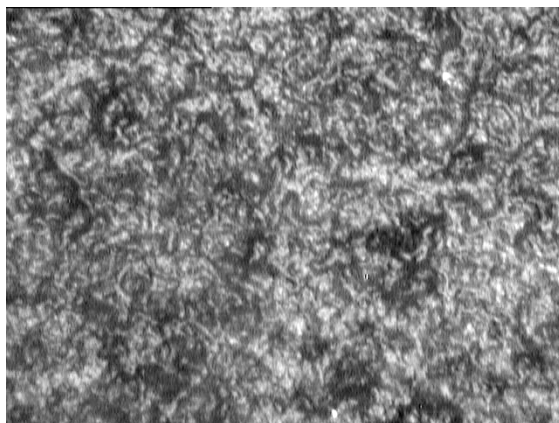
На рис. 7–9 представлены визуализированные показатели распределения твердости и модуля Юнга на каждом из трех участков. Наличие ярко выраженных пиков свидетельствует о присутствии частиц со значением твердости 10–13 ГПа (показатель сравним с твердостью чистых карбидов). Сопоставляя снимки, полученные с помощью микроскопа с измерительной установкой, и данные, полученные при петрографическом изучении каменного литья [4], а также результаты рентгенофазового микрозондового анализа [5], можно утверждать, что эти частицы являются кристаллами хромшпинелида размером 10–15 мкм.



a



б



в

Рис. 6. Экспериментальные участки образцов, подвергнутые эксперименту

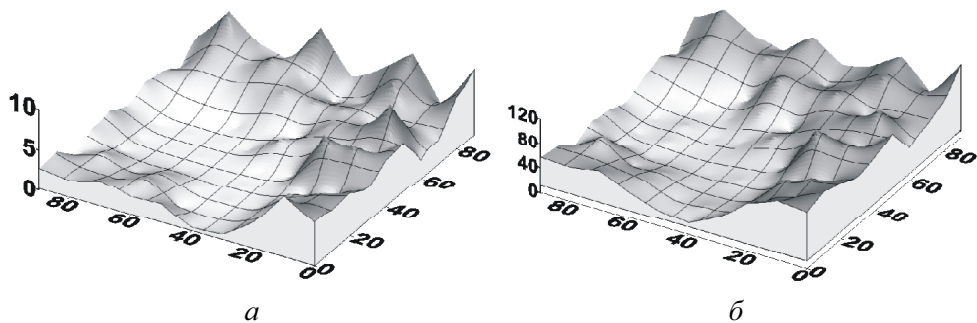


Рис. 7. Топография распределения свойств на участке размером 100×100 мкм:
a – твердость (H , ГПа); *б* – приведенный модуль упругости (E , ГПа)

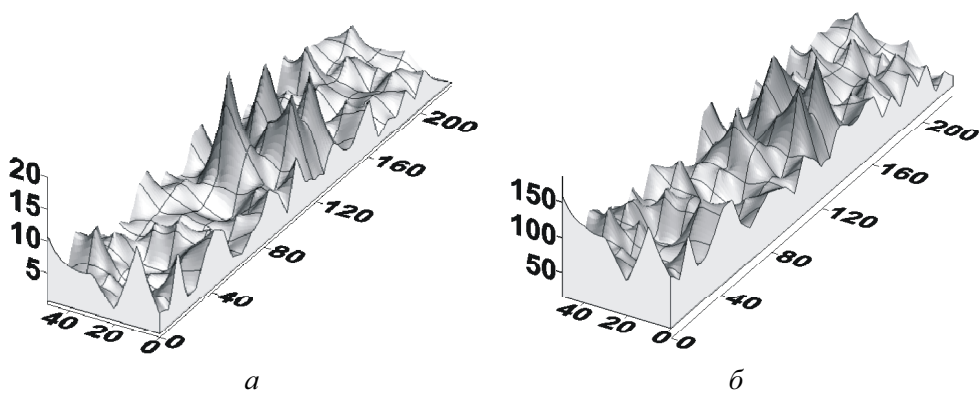


Рис. 8. Топография распределения свойств на участке размером 50×224 мкм:
a – твердость (H , ГПа); *б* – приведенный модуль упругости (E , ГПа)

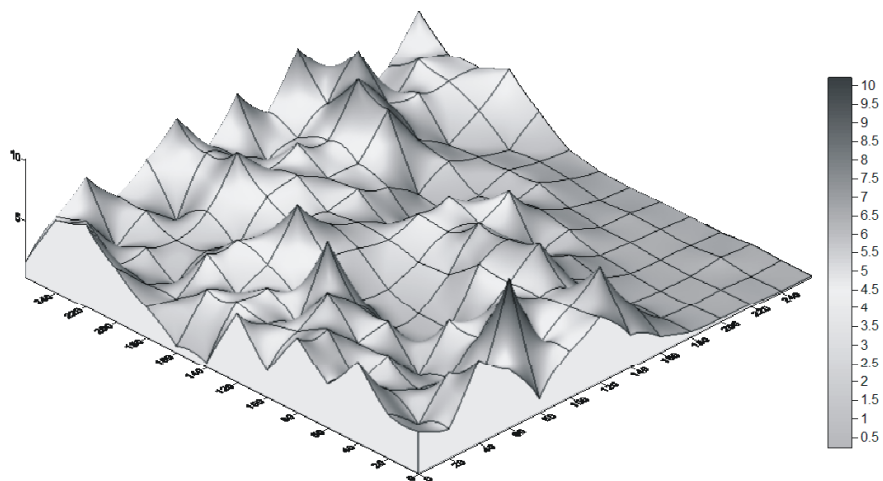


Рис. 9. Топография распределения твердости на участке размером 250×250 мкм

Пики на топографии распределения твердости, показывающие расположение высокотвердых частиц, на всех экспериментальных участках окружены переходными вершинами, частично сокращающими глубину перепадов. При проведении аналогии с перечисленными выше методами исследования установлено, что эти вершины указывают расположение пироксена в структуре, среднее значение твердости которого порядка 3 ГПа.

Впадины на топографических изображениях указывают на наличие некой мягкой «матрицы», в которой распределяются частица пироксена и хромшпинелида. Судя по обобщенным данным, у нее нет четкой формы и она аморфна, располагается в структуре, по всей видимости, в процессе затвердевания каменного литья между кристаллическими составляющими, обладает крайне низкой твердостью, порядка 1–2 ГПа.

Касательно распределения модуля Юнга, нами отмечено, что оно значительно более равномерно. Пики, присутствующие на топографических изображениях, не так ярко выражены, но, что характерно, впадины на порядок мельче по сравнению с топографиями распределения твердости. Следовательно, аморфная матрица, состоящая в большей степени из диоксида кремния, совмещает низкую твердость с высокими показателями упругих характеристик. Это характеризует ее роль в структуре не как отрицательную в силу низкой твердости, а как крайне положительную, в силу того, что она является своеобразным демпфером, гасящим не только напряжения, возникающие в структуре, но и внешние ударные изнашивающие воздействия на микроуровне. Роль аморфной матрицы становится чуть ли не наравне с ролью высокотвердых частиц в случае воздействия на материал каменного литья ударной абразивной нагрузки, поскольку они предотвращают разрушение более твердых частиц за счет своих высоких упругопластических свойств. Функция пироксена, по всей видимости, заключается в том, что он является переходным структурным звеном между сверхтвердыми и сверхпластичными ее элементами [6].

Особое внимание мы обратили на последний участок: при его изучении при воздействии индентора была обнаружена зона, которая характеризуется диаграммой «сила – перемещение» нетипичного вида (рис. 10).

Мы предполагаем что этот участок образован вследствие ликвационного расслоения расплава до его затвердевания, т.е. в этой зоне отсутствуют твердые структурные составляющие и сконцентрирована аморфная матрица, перепады же на диаграмме свидетельствуют о накоплении напряжения при индентировании и резком разрушении.

При наноиндентировании на поверхности материалов остаются отпечатки индента. Многочисленными исследователями замечено, что подробное изучение таких отпечатков позволяет получить информацию о связи механических свойств со строением материала.

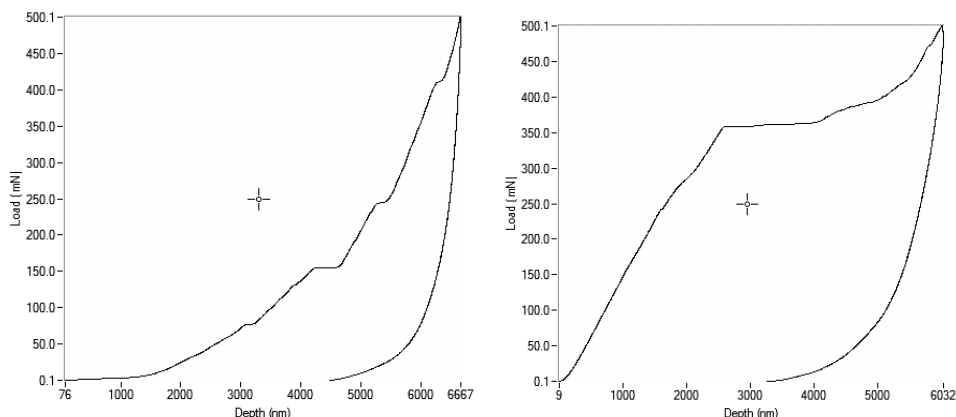


Рис. 10. Площадочные диаграммы камнелитых материалов

Отпечатки индентора на поверхности камнелитых материалов, наблюдаемые нами, не отличались четкостью, в силу высокой шероховатости материала они просто терялись на общем фоне. Для подробного изучения отпечатков мы провели ряд последовательных экспериментов с максимальным нагружением (200 мН) на отдельном участке образца – в результате были получены более четкие отпечатки, приемлемые для дальнейшего анализа, изображения нескольких отпечатков представлены на рис. 11.

Полученные отпечатки различаются по размеру, грани некоторых отпечатков изогнуты, причем степень искажения граней на разных отпечатках различна, согласно классификации В.Н. Вигдоровича и Л.Г. Еланской, это свидетельствует об анизотропности характеристик твердости и упругопластических свойств внутри кристаллов.

Нами замечено, что наибольшее искажение граней отпечатков наблюдается в зоне концентрации высокотвердых частиц, а отсутствие трещин в этих участках говорит об амортизации воздействия индента на твердые хрупкие кристаллы за счет более мягких и упругих структурных составляющих. На гранях отпечатков отсутствуют темные или светлые полосы (площадки скольжения) – это говорит об отсутствии остаточных напряжений в материале.

Как уже было замечено, трещин вокруг отпечатков практически не наблюдается, это свидетельствует о балле хрупкости 0–1 согласно классификации В.Г. Самсонова и характеризует материал как практически нехрупкий на микроуровне [7].

Для некоторых отпечатков на поверхности камнелитых материалов характерно наличие наплыва вокруг контура, это говорит о вязком характере сопротивления при внедрении индентора, большая глубина этих отпечатков говорит о том, что вязкое сопротивление характерно для аморфной «матрицы» материала.

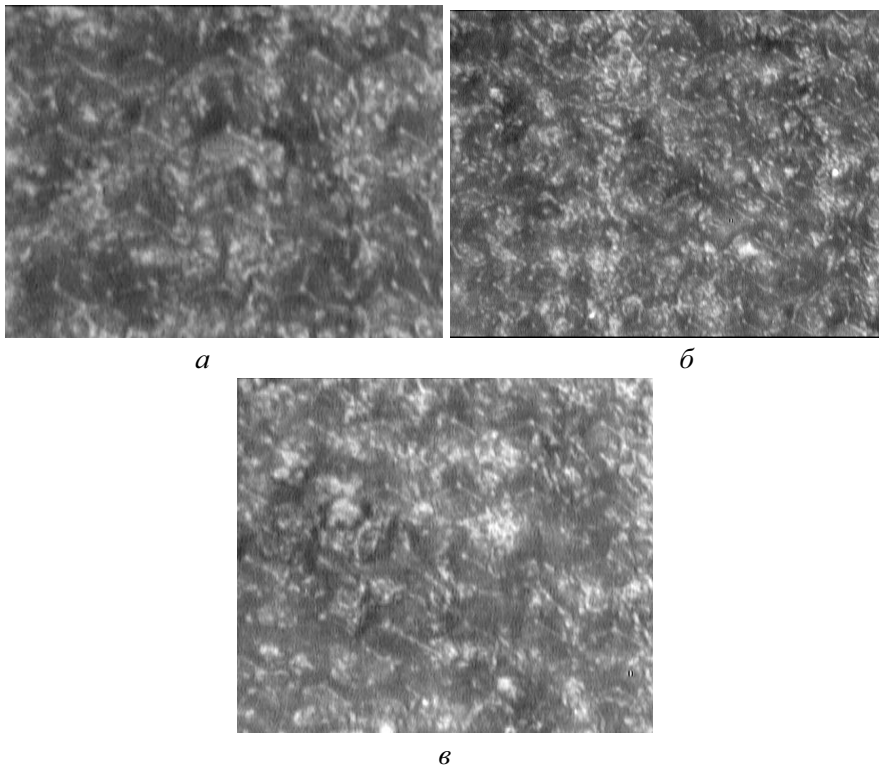


Рис. 11. Отпечатки индентора после максимального нагружения

Для того чтобы учесть полученные данные при расчетном прогнозировании общей твердости материала каменного литья, необходимо воспользоваться правилом аддитивности. Согласно этому правилу, износостойкость структурно неоднородного материала равна сумме произведений из объемной доли отдельного компонента на его относительную износостойкость. Расчет, проведенный нами по этому правилу, установил, что общая твердость каменного литья составляет 5 ГПа, однако этот расчетный показатель отличается от показателя, установленного фактически, и равного, как нами было уже замечено ранее, 6–8 ГПа.

Разница между расчетным и фактическим показателем общей твердости каменного литья объясняется тем, что при расчетной методике не учитываются упругопластические характеристики материала.

Суммирование полученных данных в результате наноиндентирования и изучения отпечатков индента позволяет нам сформулировать предположительные описательные модели абразивного износа камнелитого материала в различных условиях:

1. В случае параллельного движения абразивных частиц наиболее твердые из них прорезают аморфную матрицу, причем скорость их движения

в этом случае постепенно падает в силу ее вязкости. После этого замедленная абразивная частица сталкивается с кристаллом пироксена, который передает импульс от столкновения кристаллу хромшпинелида, вокруг которого пироксен расположен, таким образом кристалл хромшпинелида приходит в движение, в процессе которого он воздействует на другие абразивные частицы, в потоке движения стачивая их, в этом случае происходит механическое резание не материала абразивом, а наоборот.

2. В случае движения абразивных частиц под углом к каменному литью они наносят резкий удар поверхности, в том случае когда удар приходится на кристаллы хромшпинелида, они в силу хрупкости начинают разрушаться, однако этот процесс значительно замедляется за счет передачи ударного импульса пироксену и упругой матрице. В процессе многочисленных ударов матрица накапливает напряжения и резко разрушается на границе раздела с другой фазой. С каждым ударом, как и в предыдущем случае, происходит микроперемещение кристалла хромшпинелида, который начинает воздействовать на абразив, снижая его твердость.

По проведенной работе можно сделать следующие выводы:

– установлены количественные значения твердости отдельных структурных составляющих материала каменного литья: хромшпинелид – 10 ГПа, пироксен – 3 ГПа, аморфная матрица – 1–2 ГПа;

– установлены количественные значения модуля Юнга структурных составляющих материала каменного литья: хромшпинелид – 100 ГПа, пироксен – 90 ГПа, аморфная матрица – 70 ГПа;

– доказано, что метод определения микротвердости непрерывным наноиндентированием позволяет судить об упругопластических и вязких свойствах материала каменного литья;

– предложена модель абразивного износа материала каменного литья при параллельном движении абразива;

– предложена модель абразивного износа материала каменного литья при движении абразива под углом к поверхности материала каменного литья.

Список литературы

1. Износостойкость / под ред. А.А. Благоднарова, Р.А. Матвеевского. – М.: Наука, 1975. – 183 с.

2. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – № 7. – P. 1564–1583.

3. Скачков А.П., Пестренин В.М. Применение МДТГ в современном материаловедении (наноматериалы и нанотехнологии). – Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2007. – 60 с.

4. Игнатова А.М., Николаев М.М., Ханов А.М., Чернов В.П. Исследование и разработка основных правил управления структурным миром силикатов и технологий получения стеклокристаллического и слюдокристаллического каменного литья // Студент и научно-технический прогресс: матер. XLVII МНСК. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 2009. – С. 161.

5. Игнатова А.М., Чернов В.П., Ханов А.М. Кристаллизационно-ликвационная модель-схема формирования стеклокристаллических материалов каменного литья // АНТЭ-09: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. – Казань, 2009. – С. 127–132.

6. Игнатова А.М., Скачков А.П. Метод наноиндентирования для идентификации структурных составляющих каменного литья // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы II Всерос. молодежной науч. конф. – Миасс, 2010. – С. 176–178.

7. Вигдорович В.Н., Еланская Л.Г. Микроскопическое исследование микротвердостных отпечатков // Механические методы испытаний. – 1967. – № 8. – Т. 33. – С. 994–999.

Получено 12.04.2010