



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

T. S. Pirozhkova, M. A. Makeeva, Development and production of the prototype hardware for wear-resistant nanostructured ceramics of grinding bodies of small size, *Comp. nanotechnol.*, 2015, Issue 4, 64–68

<https://www.mathnet.ru/eng/cn53>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.90

May 24, 2025, 21:49:25



## 4.2. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАКЕТА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ

*Пирожкова Татьяна Сергеевна, аспирантка НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы», ТГУ имени Г.Р. Державина. E-mail: t-s-pir@ya.ru*

*Макеева Мария Александровна, студентка 4 курса ТГУ имени Г.Р. Державина. E-mail: t-s-pir@ya.ru*

Аннотация: В работе описаны новый подход и изготовленный действующий макет лабораторной установки для производства износостойких мелющих тел малых размеров из высокопрочной наноструктурированной керамики. Получены пробные партии керамических шариков малых размеров. Методом нано- и микроиндентирования определены физико-механические свойства полученных образцов керамики.

Ключевые слова: керамика; микроиндентирование; трение в наномасштабе

### DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF THE PROTOTYPE HARDWARE FOR WEAR-RESISTANT NANOSTRUCTURED CERAMICS OF GRINDING BODIES OF SMALL SIZE

*Pirozhkova Tatyana Sergeevna, post graduate student scientific education center «Nanotechnology and nanomaterials», Tambov State University named after G.R. Derzhavin. E-mail: t-s-pir@ya.ru*

*Makeeva Marya Alexandrovna, student Tambov State University named after G.R. Derzhavin. E-mail: t-s-pir@ya.ru*

Abstract: The paper describes a new operating model laboratory plant for the production of wear-resistant grinding bodies of small size of high nanostructured ceramics. Received feelers ceramic balls of small sizes. The method of nano- and Microindentation defined physical and mechanical properties of ceramics

Index terms: ceramics; nanoindentation; nano- and microfriction

#### Введение

Развитие многих отраслей промышленности основано на дроблении и измельчении исходного сырья или готового продукта. Процессы измельчения широко применяются в химической, горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности, порошковой металлургии, при производстве катализаторов и порошковых средств и во многих других отраслях [1–5].

При этом все более актуальными, практически для всех отраслей, являются вопросы улучшения измельчаемости дробимых веществ с уменьшением размера результирующих фракций помола. Так, в современной химической промышленности, порошковой металлургии и при производстве современных наноструктурированных материалов, например, наноструктурированных керамик, требо-

вания к размеру фракций исходного сырья могут составлять от единиц – десятков мкм до десятков нм. Поэтому вопросу совершенствования технологий измельчения различных материалов уделяется все большее внимание, а поиск путей наиболее оптимального и эффективного процесса ведется постоянно.

В практике измельчения наиболее часто применяются различные виды дробления и помола рис. 1.

На большинстве предприятий (химическая промышленность, парфюмерия, фармацевтика и др.) требуется производить тонкий и сверхтонкий помол, поэтому измельчение исходных компонентов или готового продукта осуществляется в шаровых мельницах [3–5]. Помол чаще всего производится мелющими телами из стали, чугуна, керамики и др., представляющих собой шары правильной формы

различного диаметра. Сам процесс помола и получение качественного равномерно-дисперсного материала зависит от многих факторов (типа применяемого оборудования; оптимизации кинетики измельчения; степени заполнения мельницы; соотношения между измельчаемым материалом и мельящими телами; размера мельящих тел; использования различных добавок влияющих на процесс помола и т.д.). Среди этих факторов одним из наиболее существенных (влияющих на размер частиц и качество помола, особенно равномерно-тонкодисперсного) является размер мельящих тел (шаров) применяемых в таких мельницах (размер частиц измельчаемого вещества уменьшается с уменьшением размеров шаров применяемых при помоле).

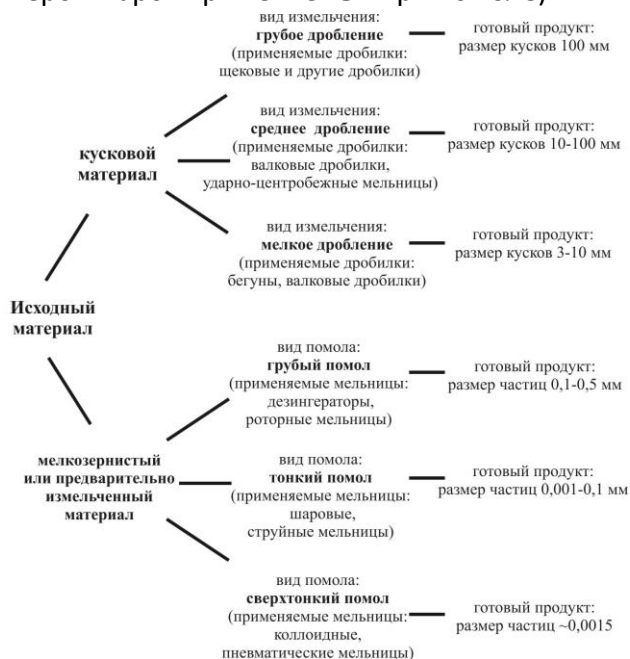


Рис. 1. Виды измельчения тел в зависимости от структуры и свойств исходного материала.

При этом особое внимание уделяется качеству и совершенствованию вида (формы) мельящих шаров, а также повышению их долговечности и износостойкости. Это в значительной степени предопределяет выбор материала для изготовления мельящих тел.

Наиболее перспективными в этом направлении являются керамические материалы, которые обладают существенно более высокой прочностью и износостойкостью по сравнению, например, с металлическими. Однако

обычные керамические материалы наряду с более высокой износостойкостью, обладают и достаточно высокой хрупкостью. Это делает их применение в качестве мельящих тел достаточно проблематичным, особенно в тех случаях (например, при тонком и сверхтонком помоле лекарственных средств или сырья), когда продукты износа или разрушения мельящих тел гарантированно не должны попасть в измельчаемый материал или продукт.

Преодолеть эту проблему можно применяя для производства мельящих тел (шаров), особенно малых и сверхмалых размеров, современные виды наноструктурированных керамических материалов, которые обладают высокой твердостью и износостойкостью [6–12], а по своим прочностным характеристикам сопоставимы с лучшими образцами металлических сплавов (сталей) наиболее широко используемых в настоящее время при производстве мельящих тел. Однако, несмотря на высокие прочностные и эксплуатационные характеристики, а также сравнительно невысокую стоимость материала, мельящие тела из современных высокопрочных и износостойких наноструктурированных материалов пока не получили достаточно широко практического распространения. В основном это обусловлено отсутствием хорошо разработанных основ физико-химического синтеза недорогих высокопрочных наноструктурированных керамик и промышленного оборудования для производства мельящих тел, особенно малых размеров, из этих материалов.

Поэтому целью работы было разработка и создание оригинального оборудования (действующего макета лабораторной установки) для производства износостойких мельящих тел малых размеров из высокопрочной наноструктурированной керамики.

#### **Описание подхода и полученные результаты**

Для достижения заявленной цели была разработана оригинальная установка блок-схема которой приведена на рис.2. Установка состоит из блока управления, блока подачи суспензии, блока формования шариков малых размеров (блока сопел), блока сбора сформиро-

ванных шариков, блока предварительной сушки и блока высокотемпературного отжига.



Рис. 2. Блок-схема установки для формирования керамических шариков малых размеров.

Производство шариков осуществляется путем подготовки керамической суспензии, которая затем через блок подачи суспензии подается на блок формирования шариков малых размеров, который состоит из сопла и кольцевого электрода. Суспензия, выдавливаясь через сопло, подхватывается и вытягивается в электрическом поле, создаваемом между соплом и кольцевым электродом по методу электроспреинга [13–14]. Это позволяет вытягивать суспензию в струю малого диаметра после отрыва от которой формируется шарик малого диаметра и падает в блок сбора сформованных шариков, откуда после накопления достаточного количества шариков они попадают в блок предварительной сушки, а затем в блок высокотемпературного отжига. Варьируя различные параметры установки и суспензии (размер сопла, вязкость и скорость подачи суспензии, расстояние и разность потенциалов между соплом и кольцевым электродом и др.) можно варьировать размеры и скорость производства получаемых шариков.

Для увеличения производительности установки она может включать в себя несколько сопел (от 1 до 10) или нескольких сменных блоков сопел для формирования шариков. Каждый блок сопел содержит от 5 до 10 отдельных сопел. Размещение и разработанная система крепления нескольких блоков сопел, а

также согласование ее работы с работой блока подачи суспензии обеспечивает одновременную подачу суспензии на несколько сопел в одном блоке формирования шариков или одновременную подачу суспензии на несколько блоков формирования шариков. Схематически это показано на рис. 3. Использование в установке разного количества блоков сопел (от одного до десяти), позволяет существенно увеличить производительность установки по изготовлению шариков (от 10 до 100 раз).

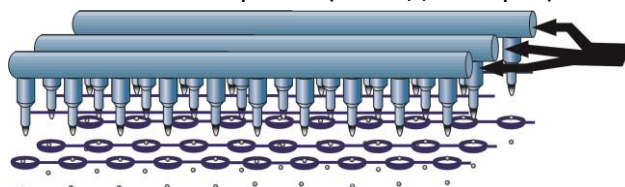


Рис. 3. Схема одновременной подачи суспензии на несколько блоков формирования шариков (блоков сопел). Стрелками показано одновременное направление подачи суспензии на несколько блоков сопел

Увеличение числа одновременно работающих в установке блоков формирования шариков (блоков сопел) и одновременное изготовление большого числа шариков (до 100 и более) позволяет говорить уже не только о действующем лабораторном производстве, а и о полупромышленном объеме производства шариков из керамической суспензии.

Оценка производительности установки, на основе пробных запусков и производства пробных партий керамических шариков, показывает, что увеличение числа сопел в одном блоке сопел и увеличение общего числа блоков сопел существенно повышает производительность установки, и фактически выводит ее уже в данном варианте на объем полупромышленного производства. На рис. 4. приведены параметры временных затрат на производство пробных партий шариков малых размеров состоящих из 1000, 10000 и 100000 шт. Это позволяет делать прогноз на затраты времени необходимого для производства при промышленном изготовлении шариков. Так на рис. 4. вместе с оценкой времени необходимого на производство пробных партий шариков приведен прогноз времени необходимого

для производства промышленной партии шариков из  $10^6$  штук.

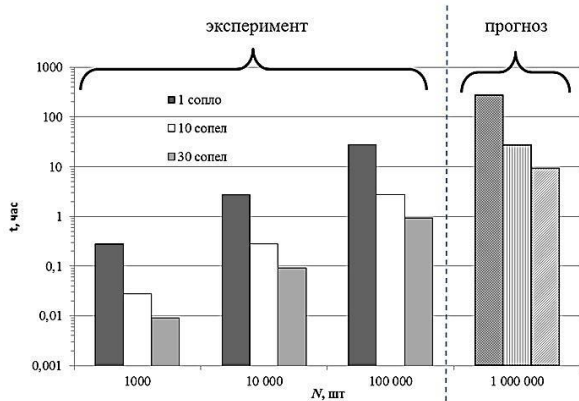


Рис. 4. Параметры временных затрат на производство пробной партии шариков малых размеров из 1000, 10000, 100000 штук и прогнозирование времени необходимого для производства 1000000 штук шариков. При одновременной работе 1 сопла, 1 блока сопел (10 одновременно работающих сопел) и 3 одновременно работающих блока сопел (30 одновременно работающих сопел).

Пробные режимы запуска установки с несколькими блоками формования шариков и оптимизированными режимами работы позволили получить полупромышленную партию керамических шариков (порядка  $10^5$  шт) с радиусом порядка 220 мкм–350 мкм. Фотографии и характерный размер произведенных шариков показан на рисунке 5.

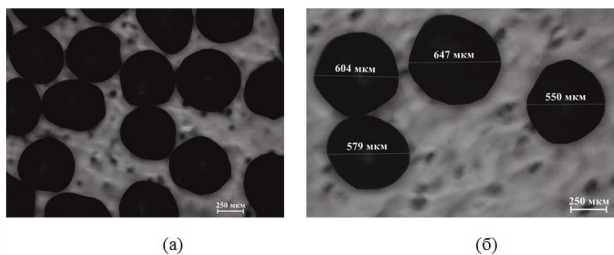


Рис. 5. Фотография выборки отдельных керамических шариков из пробной партии массово произведенных шариков.

а) фотография шариков; б) фотография шариков с указанием их характерных размеров.

Проведенный анализ физико-механических свойств полученных шариков из пробной партии был осуществлен методами нано- и микроиндентирования [15–20]. Это позволило определить твердость –  $H$ , модуль Юнга –  $E$ , коэффициент вязкости разрушения –  $K_c$ , коэффициент трения  $k$  и ряд других характе-

ристик материала шариков из пробной партии. Так для пробной партии  $H = 10$  ГПа (при  $h = 1500$  нм),  $E = 110$  ГПа (при  $h = 1500$  нм),  $K_c = 5,35$  МПа·м<sup>1/2</sup>,  $k = 0,08–0,09$ . Числовые значения ряда характеристик зависимостей  $H$  и  $E$  от глубины отпечатка и величины  $k$  от расстояния  $S$  пройденного контр телом приведены на рис. 6 и рис. 7.

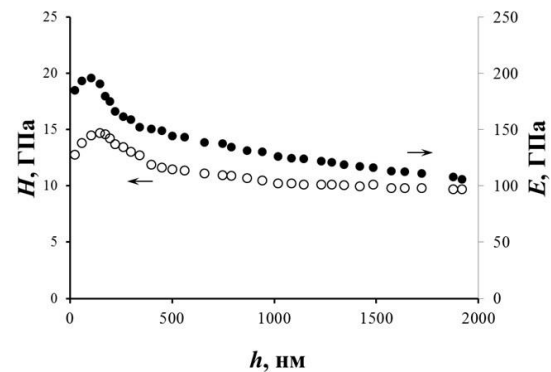


Рис. 6. Зависимость твердости  $H$  и модуля Юнга от глубины отпечатка для керамики на основе  $ZrO_2$ .

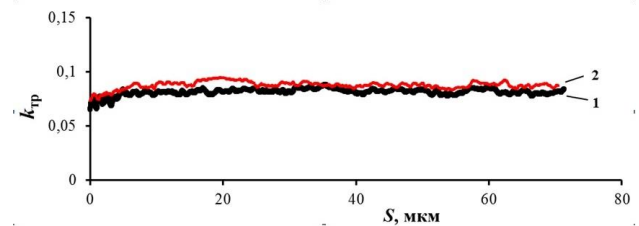


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения керамики  $k_{тр}$  от расстояния  $S$  пройденного контр телом из той же керамики (наноструктурированная TZP керамика на основе  $ZrO_2$ ).

Величина нормальной нагрузки  $F_N = 50$  мН.

1 – Сухое трение. 2 – Трение в водной среде.

#### Выводы

Таким образом, разработан новый подход, изготовлен и апробирован действующий макет лабораторной установки для производства износостойких мелющих тел малых размеров из высокопрочной наноструктурированной керамики методом электроспреинга. Получены пробные партии керамических шариков малых размеров и определены их физико-механические свойства. Показано, что числовые значения ряда важных эксплуатационных характеристик (твердость, модуль Юнга, коэффициент трения, коэффициент вязкости разрушения) значительно превышают соответствующие значения ряда традиционных керамических и металлических материалов

используемых для производства мелющих тел для шаровых мельниц. Это позволяет говорить о перспективности применения разрабатываемого оборудования и производства шариков из высокопрочной наноструктурированной керамики.

*Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К. (договор № 4659ГУ1/2014 от 23 декабря 2014)*

### Список литературы:

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра. 1985. 285 с.
2. Назаров В.И., Рагозина Н.М., Макаренков Д.А., Четвертков Г.В., Ставрова М.Е. Переработка и утилизация дисперсных материалов и твердых отходов М.: Альфа-М, инфра-М, 2014. 464 с.
3. Дмитрак Ю.В., Вержанский А.П. Тенденции применения оборудования для тонкого измельчения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. Т. 6. С. 52-56
4. Прядко Н. С., Стрельников Г.А., Терновая Е.В., Грушко В.А., Пясецкий Н.Ю. Оценка скорости тонкого измельчения руд мельницами различных типов // Техническая механика. 2014. № 3. С. 114-121.
5. Домкин К. И., Юрков Н. К. Моделирование процесса сухого измельчения порошковых материалов // Известия высших учебных заведений. Физико-математические науки. 2012. № 1. С. 131–138
6. Basu B., Kalin M. Tribology of ceramics and composites: materials science perspective. – John Wiley & Sons, 2011. 532 p.
7. Красулин Ю.Л. Пористая конструкционная керамика. М.: Металлургия, 1980. 100 с.
8. Latifa Melk, Joan Josep Roa Rovira, Marta-Lena Antti, Marc Anglada. Coefficient of friction and wear resistance of zirconia-MWCNTs composites // Ceramics International. 2015. V.41. P. 459–468.
9. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Современные проблемы нано- и микротвердости твердых тел // Материаловедение. 2001. № 1. С. 14.
10. Тюрин А.И., Воробьев М.О., Пирожкова Т.С. Разработка и изготовление линейки комбинированных приборов для измерения физико-механических свойств материалов в микро- и наномасштабе // Computational nanotechnology. 2015. № 2. С. 42-45
11. Тюрин А.И., Пирожкова Т.С., Шуварин И.А. Новые комбинированные приборы по динамическому наноиндентированию и результаты исследования кинетики формирования отпечатка, микромеханизмов пластичности и разрушения твердых тел в микро- и наномасштабе // Computational nanotechnology. 2015. № 3. С. 45-50.
12. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. Определение времязависимых пластических свойств твердых тел посредством динамического наноиндентирования // Письма в Журнал технической физики. 1997. Т. 23. № 16. С. 15-19.
13. Doshi J., Reneker D. H. Electrospinning process and applications of electrospun fibers // Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE. – IEEE, 1993. P. 1698-1703.
14. Fang J., Zhang Li, Sutton D., Wang X., Lin T. Needleless Melt-Electrospinning of Polypropylene Nanofibres // Journal of Nanomaterials. 2012. P. 9.
15. 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. V. 7. N 6. P. 1564–1583.
16. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004.V. 19. N 1.P. 3–20.
17. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика начальной стадии микроиндентирования ионных кристаллов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 1995. Т. 59. № 10. С. 49.
18. Surmeneva M.A., Surmenev R.A., Mukhametkaliyev T.M., Oehr C., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Teresov A.D., Koval N.N. Comparative study of the radio-frequency magnetron sputter deposited cap films fabricated onto acid-etched or pulsed electron beam-treated titanium // Thin Solid Films. 2014. V. 571. № P. 1. 218–224.
19. Surmeneva M.A., Mukhametkaliyev T.M., Surmenev R.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Syrtanov M.S. Enhancement of the mechanical properties of az31 magnesium alloy via nanostructured hydroxyapatite thin films fabricated via radio-frequency magnetron sputtering // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2015. V. 46. P. 127–136.
20. Ivanova A. A., Surmeneva M.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Prymak O., Epple M., Chaikind M.V., Surmenev R.A. Fabrication and physico-mechanical properties of thin magnetron sputter deposited silver-containing hydroxyapatite films // Applied Surface Science. – 2016. V. 360. P. 929–935

### РЕЦЕНЗИЯ

Статья Т.С. Пирожковой, М.А. Макеевой посвящена разработке действующего макета лабораторной установки для производства керамических шариков малого размера, а так же аттестации полученных образцов наноструктурированной керамики на физико-механические свойства в микро- и наномасштабе.

Актуальность данной статьи не вызывает сомнения, т.к. разработка новых методик и оборудования производства износостойких мелющих тел малых размеров является очень важной задачей современности. Особенно это актуально для современных высокопрочных и износостойких керамических материалов.

Авторами разработан новый подход, изготовлен и апробирован действующий макет лабораторной установки для производства износостойких мелющих тел малых размеров из высокопрочной наноструктурированной керамики методом электроспрейга. Получены пробные партии керамических шариков малых размеров и определены их физико-механические свойства. Приведены числовые значения ряда важных эксплуатационных характеристик для получаемых образцов наноструктурированных керамик.

Научная статья Т.С. Пирожковой, М.А. Макеевой «Разработка и изготовление действующего макета лабораторной установки для производства износостойких мелющих тел малых размеров из высокопрочной наноструктурированной керамики» соответствует всем требованиям, предъявляемым к работам такого рода. Данная статья может быть рекомендована к публикации в журнале «Computational nanotechnology».

Научный руководитель  
зам. директора по НИР  
НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы»  
ТГУ имени Г.Р. Державина,  
к.ф.-м.н., доцент

Тюрин А.И.