

PACS numbers: 46.50.+a, 62.23.Pq, 62.25.Mn, 81.05.Je, 81.07.Wx, 81.20.Ev, 87.85.jf

## Технология изготовления и физико-химические свойства керамики на основе нанокристаллического порошка композита диоксида циркония

А. В. Шевченко, В. В. Лашнева, Е. В. Дудник, А. К. Рубан,  
В. П. Редько, В. В. Цукренко, Д. Г. Вербило, Н. Н. Бричевский

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,  
ул. Кржижановского, 3,  
03680, ГСП, Киев, Украина*

Представлены результаты разработки технологии получения высокочистого нанокристаллического порошка композита на основе  $ZrO_2$  в системе  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3$  и нового керамического материала на его основе. Исследованы химический и фазовый составы, микроструктура и физико-механические характеристики разработанной керамики. Показано, что разработанный материал характеризуется высокой химической чистотой и высокоплотной микроструктурой со средним размером зерна  $\leq 0,3$  мкм, механической прочностью на изгиб не ниже 600 МПа, высокой низкотемпературной стабильностью фазового состава и механических характеристик в гидротермальных условиях, что позволяет его рекомендовать для изготовления изделий медицинского, а также конструкционного и инструментального назначения. Это достигнуто благодаря выбранному химическому составу материала, а также комплексному подходу к методам синтеза исходного нанокристаллического порошка, формования из него заготовок изделий и их последующего спекания.

Представлено результати розробки технології виготовлення високочистого нанокристалічного порошку композита на основі  $ZrO_2$  в системі  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3$  та нового керамічного матеріалу на його основі. Досліджено хімічний і фазовий склад, микроструктуру та фізико-механічні характеристики розробленої кераміки. Показано, що розроблений матеріал відзначається високою хімічною чистотою та високощільною микроструктурою з середнім розміром зерна  $\leq 0,3$  мкм, механічною міцністю на вигин понад 600 МПа, високою низькотемпературною стабільністю фазового складу та механічних характеристик у гідротермальних умовах, що уможливорює рекомендувати його для виготовлення виробів медичного, а також конструкційного й інструментального призначення. Це досягнуто завдяки визначеному хімічному складу матеріалу, а також комплексно-

му підходу до метод синтези вихідного нанокристалічного порошку, формування з нього заготовок виробів та їх спікання.

The designing results of technology for fabrication of high-clean nanocrystalline composite powder and the new ceramics based on  $ZrO_2$  in the  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $CeO_2$ - $Al_2O_3$  system are presented. The chemical and phase compositions, microstructure, and physical-mechanical properties of the developed ceramics are investigated. As shown, the designed material is characterized by high chemical purity and high density of microstructure with a mean grain size of  $\leq 0.3 \mu m$ , bending strength not less than 600 MPa, high low-temperature stability of both phase composition and the mechanical properties under hydrothermal conditions. This allows recommending the designed composite for the manufacture of medical, structural and instrumental ceramics. This is achieved by the selected chemical composition of the material as well as integrated approach to the synthesis of initial nanocrystalline powder, forming of work-piece blanks, and sintering of composites.

**Ключевые слова:** композит на основе диоксида циркония, система  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $CeO_2$ - $Al_2O_3$ , нанокристаллический порошок, физико-химические свойства, низкотемпературная стабильность.

*(Получено 18 ноября 2013 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сочетание таких свойств как повышенная прочность, вязкость разрушения, твёрдость, износостойкость, малые коэффициенты трения, химическая и биологическая инертность делает диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) перспективным материалом для применения во многих областях техники. Он широко используется при получении высокоогнеупорных изделий, жаростойких эмалей, тугоплавких стёкол, различных видов керамики, керамических пигментов, твёрдых электролитов, термозащитных покрытий, катализаторов, искусственных драгоценных камней, режущих инструментов и абразивных материалов.

В последние годы диоксид циркония начал широко применяться в медицине, а также волоконной оптике и производстве керамики, используемой в электронике. При этом наиболее высокими значениями механической прочности и трещиностойкости при сохранении устойчивости к коррозии и износу характеризуется керамика на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия ( $Y_2O_3$ )- $ZrO_2(Y_2O_3)$ . Это обусловлено действием эффекта трансформационного упрочнения — фазового превращения диоксида циркония тетрагональной модификации ( $T-ZrO_2$ ) в диоксид циркония моноклинной модификации ( $M-ZrO_2$ ) под действием приложенного напряжения [1, 2].

Недостаток керамики  $ZrO_2(Y_2O_3)$  — деградация механических свойств («старение») под воздействием влаги при температурах до  $300^\circ C$ , а также в биологически агрессивных средах [3].

Для повышения гидротермальной стабильности диоксида циркония используют различные приёмы, среди них: сохранение размера зерна в материалах меньше критического [4], совместная стабилизация  $ZrO_2$  оксидами иттрия и церия ( $CeO_2$ ) [5], разработка композитов на основе  $ZrO_2$  с добавкой от 1 до 8 масс. %  $Al_2O_3$  [6].

Цель настоящей работы — разработать керамический материал на основе композита диоксида циркония в системе  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3$  с повышенной низкотемпературной стабильностью физико-химических свойств во влажной и биологически агрессивной средах.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных веществ взяты химически чистые оксихлорид циркония ( $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ), нитраты иттрия ( $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ), церия ( $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ), алюминия ( $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ), водный раствор аммиака, дистиллированная вода.

Исходные нанокристаллические порошки композита состава 99 масс. %  $ZrO_2$  (3 мол. %  $Y_2O_3$ , 2 мол. %  $CeO_2$ ) + 1 масс. %  $Al_2O_3$  получали методом гидротермального синтеза в щелочной среде с последующей термической обработкой [7–9]. Для чего смесь водных растворов солей исходных компонентов, взятых в необходимом соотношении, вливали в реакционный сосуд с водным раствором аммиака и интенсивно перемешивали с помощью магнитной мешалки. Для поддержания постоянного значения pH, равного 9–10, скорость вливания контролировали блоком автоматического титрования. Из реакционного сосуда через патрубок полученная смесь гелей аморфных гидроксидов циркония, иттрия, церия и алюминия, образующаяся в результате взаимодействия растворов нитратов этих компонентов с раствором аммиака, непрерывно перетекала в накопительную ёмкость, в которой перемешивалась с помощью магнитной мешалки ещё в течение 2–3 ч после окончания процесса осаждения. Для стабилизации свойств смесь гидроксидов кипятили в течение нескольких часов и затем отстаивали 10–12 ч. После чего маточный раствор осторожно сливали, а осадок несколько раз промывали дистиллированной водой. Степень удаления ионов хлора проверяли при помощи 5%-раствора азотнокислого серебра. Гель высушивали до вязко-пластичного состояния и переносили в стеклянную колбу, в которую доливали дистиллированную воду, перемешивали и водным раствором аммиака доводили pH смеси до 9–11. После чего колбу со смесью устанавливали в лабораторный автоклав, помещали в сушильный шкаф и выполняли гидролиз при

температуре 190–220°C при давлении 1,6 МПа в течение 4–5 ч. Осадок отделяли от маточного раствора, декантировали и сушили при температуре 60–80°C в течение 6–8 ч, после чего отжигали при температуре 400–1300°C в течение 2 ч. После отжига порошок деагломерировали в планетарной мельнице конструкции ОКТЬ ИПМ НАН Украины с корпусом и мелющими телами из диоксида циркония в течение не менее 2 ч, после чего сушили при температуре 80–90°C в течение не менее 6 ч.

Заготовки опытных образцов в виде балочек формовали в стальных пресс-формах методом двухстороннего одноосного полусухого прессования. В качестве пластификатора использовали 5% раствор поливинилового спирта в воде. Количество пластификатора в пресс-порошке составляло 8%. Влияние давления на прессуемость порошка исследовали в интервале давлений от 40 до 120 МПа.

Сформованные заготовки спекали на воздухе при температурах от 1200 до 1350°C в течение от 1 до 3 ч при медленном повышении температуры и охлаждении до комнатной температуры вместе с печью.

Свойства синтезированных порошков и полученных керамических материалов исследовали методами рентгенофазового, химического, спектрального, электронно-микроскопического и оптического анализов, используемых в технологии неорганических материалов. Рентгеновские исследования (РФА) выполняли с помощью дифрактометра ДРОН-1,5 ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, скорость сканирования 1–4 град/мин). Интенсивность линий оценивали визуально по десятибалльной шкале или в процентах по относительной высоте пиков на дифрактограмме. Удельную поверхность синтезированных порошков определяли по методу тепловой адсорбции — десорбции азота (БЭТ).

Плотность материалов определяли методом гидростатического взвешивания. Механические исследования выполняли на полированных образцах размером 3,5×5,0×50,0 мм с притупленными кромками. Поверхность образцов полировали с помощью алмазных паст и порошков. Испытания выполняли на специализированной испытательной машине на изгиб CeramTest производства СКТЬ Института проблем прочности НАН Украины с аналого-цифровым преобразователем, передающим сигнал на компьютер для записи диаграммы деформирования. Для точного измерения деформации использовали тензорезисторы. Каждый тензорезистор наклеивали на поверхность исследуемого образца так, чтобы его база совпадала с направлением измерения деформации. Во время деформации образца вместе с ним деформировался наклеенный тензорезистор, вследствие чего изменялось его омическое сопротивление.

Деформация тензорезистора и изменение его сопротивления связаны линейной зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta R}{R}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительное удлинение базы тензорезистора;  $R$  — омическое сопротивление тензорезистора;  $\Delta R$  — прирост сопротивления датчика, соответствующий деформации  $\varepsilon$ ;  $\gamma$  — коэффициент тензочувствительности тензорезистора (в данном случае  $R = 120$  Ом,  $\gamma = 2,1$ ).

Таким образом, удалось измерить деформацию и модуль упругости (модуль Юнга) разработанного материала с точностью до 0,5%.

Предел прочности при изгибе композита на основе  $ZrO_2$  определяли по методу трёхточечного изгиба.

Трещиностойкость оценивали по определению критического коэффициента вязкости разрушения ( $K_{1c}$ ).

Испытания на вязкость разрушения (трещиностойкость) выполняли на образцах с односторонним поперечным надрезом определённой глубины [10]. Для надрезания использовали алмазные круги толщиной 150 мкм.

Вязкость разрушения (трещиностойкость)  $K_{1c}$  рассчитывали по формуле:

$$K_{1c} = Y \frac{2PL}{2bh^2} \sqrt{c} \text{ [МПа}\cdot\text{м}^{1/2}], \quad (2)$$

где  $P$  — максимальная загрузка, Н;  $L$  — расстояние между внешними роликами (20 мм);  $b$  — толщина образца, мм;  $h$  — высота образца, мм;  $c$  — глубина надреза, мм;

$$Y = 1,93 - 3,07w + 14,5w^2 - 25,1w^3 + 25,8w^4, \quad (3)$$

где  $w = c/h$ .

Микроструктурные исследования поверхности изломов спечённых образцов выполняли методами растровой электронной микроскопии с помощью анализатора SuperProbe 722. Для количественного анализа микроструктуры образцов использовали компьютерную систему обработки и анализа изображений SIAMS-600 [11]. За размер зёрен, пор и агломератов принимали средний диаметр Фере (среднюю проекцию), который рассчитывали как среднее значение проекций элемента микроструктуры по 64-м направлениям. Распределение по размерам среднего диаметра Фере зёрен, пор и агломератов отображали на соответствующих гистограммах — для каждого диапазона значений диаметра гистограмма содержит число соответствующих элементов микроструктуры в %.

Низкотемпературную стабильность разработанного материала («старение») изучали ускоренным методом — путём выдержки образцов в гидротермальных условиях в лабораторном автоклаве при

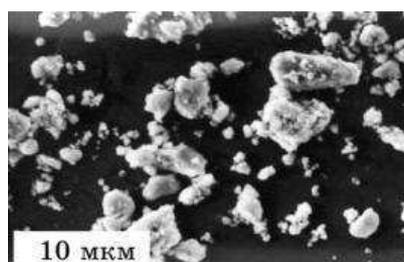
температуре  $135 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 7 ч. Данный метод используется при исследовании гидротермальной стабильности керамических материалов на основе диоксида циркония, подвергаемых воздействию биологически агрессивной многофакторной среды живого организма. Выдержка образцов в указанных условиях эквивалентна 20 годам пребывания материала в организме человека [12]. Изучение физико-химических характеристик образцов до и после указанной гидротермальной обработки позволяет получить надёжные данные о прогнозируемом изменении фазового состава и механических характеристик материала при длительном пребывании во влажных и агрессивных средах.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным химического и спектрального анализов установлено,

**ТАБЛИЦА 1.** Фазовый состав и размер первичных частиц синтезированного порошка композита на основе диоксида циркония в зависимости от температуры термообработки.

Температура обжига, $^\circ\text{C}$	Свойства синтезированного порошка	
	Фазовый состав/размер первичных частиц, нм	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$
400	F-ZrO <sub>2</sub> /10	162
550	F-ZrO <sub>2</sub> /10, следы $\Theta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	115
700	F-ZrO <sub>2</sub> /10, следы T-ZrO <sub>2</sub> и $\Theta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /7	98
850	F-ZrO <sub>2</sub> /12, следы T-ZrO <sub>2</sub> и $\Theta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /7	82
1000	T-ZrO <sub>2</sub> /15, следы M-ZrO <sub>2</sub> /15, следы $\Theta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /10	58
1150	T-ZrO <sub>2</sub> /20, $\Theta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 20, следы M-ZrO <sub>2</sub> /17	38
1300	T-ZrO <sub>2</sub> /25, $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /40, следы M-ZrO <sub>2</sub> /15	2,1



**Рис. 1.** Морфология синтезированного порошка композита на основе ZrO<sub>2</sub>.

что химический состав синтезированных порошков и образцов соответствовал расчётным: основа ( $ZrO_2$ ,  $CeO_2$ ,  $Y_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) — не менее 99 масс.%, примеси ( $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  и другие оксиды) — в сумме не более 1 масс.%.

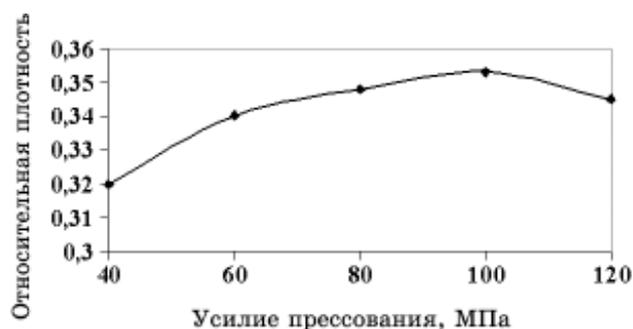
Фазовый состав и размер первичных частиц синтезированного порошка в зависимости от температуры обжига приведён в табл. 1.

Как следует из приведённых результатов после обжига в интервале температур 400–850°C в порошке остаются метастабильные модификации  $ZrO_2$  и  $Al_2O_3$ . Этот фактор объясняет повышенную активность порошка при дальнейшей технологической обработке. Удельная поверхность порошка в зависимости от температуры термообработки изменяется от 162 м<sup>2</sup>/г при температуре обжига 400°C до 2,1 м<sup>2</sup>/г при температуре обжига 1300°C.

Морфология порошка после обжига при 600°C в течение 2 ч приведена на рис. 1. Видно, что синтезированный порошок состоит из сильно агломерированных нанокристаллических частиц. Агломераты «мягкие», пористые, довольно однородные, имеют неправильную форму. Средний размер агломератов — до 5 мкм, при этом встречаются единичные агломераты размером до 7 мкм. Размер первичных частиц — 10–12 нм, удельная поверхность порошка — 102 м<sup>2</sup>/г. Данный порошок использовали в качестве исходного в дальнейших технологических процессах.

Для установления оптимального режима компактирования полученного порошка прессование выполняли в интервале давлений от 40 до 120 МПа.

Результаты измерения относительной плотности прессовок в зависимости от давления прессования приведены на рис. 2. Относительная плотность прессовок составляет 0,32 при давлении прессования 40 МПа, несколько повышается до 0,34–0,35 с увеличением давления прессования до 90–100 МПа и снижается при дальнейшем повышении давления прессования. Из приведённых результатов

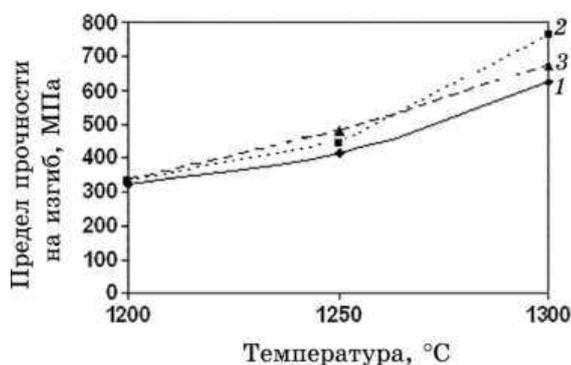


**Рис. 2.** Зависимость относительной плотности прессовок композита на основе диоксида циркония от давления прессования.

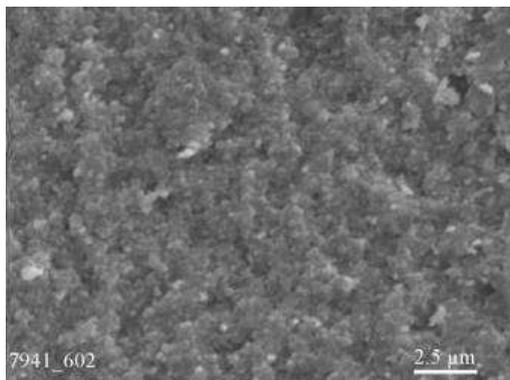
видно, что оптимальным давлением прессования синтезированного порошка является 90–100 МПа. При таких давлениях достигается наиболее высокая относительная плотность прессовок. Необходимо отметить, что плохая прессуемость характерна для нанокристаллических порошков керамических составов из-за их высокой удельной поверхности и низкой плотности [13, 14].

Заготовки образцов, спрессованные при давлении 100 МПа, спекали на воздухе при температурах от 1200 до 1300°C с выдержкой при температуре спекания от 1 до 3 ч при медленном повышении температуры и охлаждении вместе с печью.

Результаты измерения прочности полученных образцов в зависимости от температуры спекания и выдержки при температуре спекания приведены на рис. 3, из которого следует, что наиболее высокие значения прочности достигаются при спекании разрабо-



**Рис. 3.** Прочность образцов в зависимости от температуры спекания и выдержки при температуре спекания: 1 — выдержка 1 ч; 2 — выдержка 2 ч; 3 — выдержка 3 ч.



**Рис. 4.** Характерная микроструктура керамики на основе композита ZrO<sub>2</sub>.

танного материала при температуре 1280–1300°C с выдержкой при температуре спекания в течение 2 ч. При более низких температурах спекания и меньших (1 ч) или более длительных (3 ч) выдержках при температуре спекания прочностные характеристики материала несколько ниже. Все дальнейшие исследования выполнены на образцах, спечённых по оптимальному режиму: температура 1300°C, выдержка 2 ч.

Типичная микроструктура керамики на основе композита  $ZrO_2$  и гистограммы распределения зёрен, пор и агломератов по размерам приведены на рис. 4–7 соответственно.

Видно, что при спекании сформировалась высокоплотная, однородная, структура со средним размером зерна — меньше 0,3 мкм. Средний диаметр пор — 0,197 мкм, средний диаметр агломератов — 1,413 мкм.

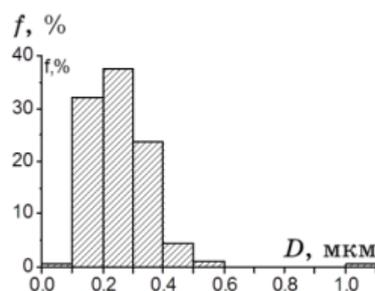
Результаты измерения предела прочности при изгибе ( $\sigma_b$ ) и модуля Юнга ( $E$ ) разработанного материала приведены в табл. 2, а вязкости разрушения  $K_{Ic}$  (трещиностойкости) — в табл. 3.

Приведённые экспериментальные данные показывают, что разработанная керамика на основе композита  $ZrO_2$  характеризуется пределом прочности при изгибе  $\sigma_b$  673,9 МПа, модулем Юнга  $E$  — 224,85 МПа и вязкостью разрушения  $K_{Ic}$  (трещиностойкостью) — 5,93 МПа·м<sup>1/2</sup>. Эти показатели, а также микроструктура материала (средний размер зерна — меньше 0,3 мкм) соответствуют требованиям международных стандартов, предъявляемым к материалам на основе тетрагонального диоксида циркония, которые используются для изготовления керамических имплантатов для костной хирургии [15].

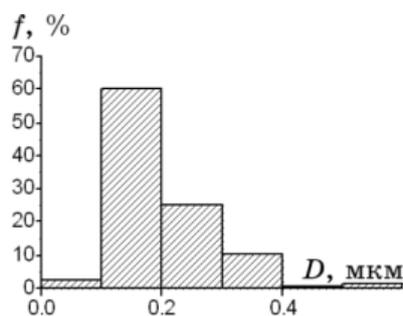
После гидротермальной обработки в автоклаве при температуре 135±5°C в течение 7 ч прочность образцов и их фазовый состав, представляющий собой тетрагональный твёрдый раствор на основе диоксида циркония со следами  $\alpha$ -фазы оксида алюминия, практически не изменились (табл. 4). Это свидетельствует о достаточно высокой гидротермальной стабильности разработанного материала. Следует отметить незначительное повышение прочности материала после указанной гидротермальной обработки.

Таким образом, выбранный химический состав и разработанная технологии изготовления, включающая все операции от синтеза исходного нанокристаллического порошка до его формования и спекания, позволили получить керамический материал на основе композита диоксида циркония с высокими и стабильными во влажных и биологически агрессивных средах физико-механическими характеристиками.

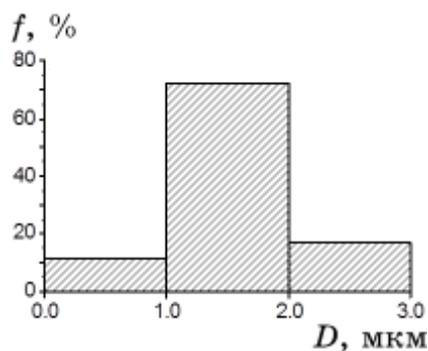
В ходе исследований из разработанного материала были изготовлены опытные образцы головок (шаровых элементов) эндопротезов тазобедренного сустава (рис. 8, а) и искусственных корней зубов



**Рис. 5.** Гистограмма распределения зёрен по размерам в керамике на основе композита  $ZrO_2$ :  $D_{\min}$  — 0,080 мкм;  $D_{\max}$  — 0,557 мкм;  $D_{\text{сред}}$  — 0,197 мкм.



**Рис. 6.** Гистограмма распределения пор по размерам в керамике на основе композита  $ZrO_2$ :  $D_{\min}$  — 0,080 мкм;  $D_{\max}$  — 0,557 мкм;  $D_{\text{сред}}$  — 0,197 мкм.



**Рис. 7.** Гистограмма распределения агломератов в керамике на основе композита  $ZrO_2$  по размерам:  $D_{\min}$  — 0,627 мкм;  $D_{\max}$  — 2,418 мкм;  $D_{\text{сред}}$  — 1,413 мкм.

(дентальных имплантатов) (рис. 8, б).

Головки предназначены для применения в хирургической травматологии и ортопедии для лечения тяжёлых заболеваний и травм

**ТАБЛИЦА 2.** Прочность ( $\sigma_b$ ) и модуль Юнга ( $E$ ) композита на основе  $ZrO_2$ .

№ обр.	Высота, мм	Ширина, мм	$P_{max}$ , Н	$\sigma_b$ , МПа	$E$ , ГПа
1	4,0	4,19	1612,12	721,4	
2	4,21	4,23	1784,72	714,1	211,9
3	4,01	4,42	1601,69	676,1	
4	3,95	4,96	1500,66	581,7	237,8
5	4,1	4,28	1622,26	676,4	
Средние значения:				673,9	224,85

**ТАБЛИЦА 3.** Трещиностойкость ( $K_{1C}$ ) композита на основе  $ZrO_2$ .

№ обр.	$K_{1C}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$h$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мм	$w$	$P$ , Н	$Y$
1	5,46	4,22	4,18	1,98	0,4692	130,01	2,34
2	5,99	4,26	3,26	2,03	0,4765	110,5	2,37
3	5,6	3,95	3,92	2,07	0,5241	95,24	2,66
4	6,37	3,9	3,8	2,1	0,5385	98,11	2,73
5	6,23	2,65	4,06	2,11	0,4538	166,25	2,27
Среднее:	5,93						

**ТАБЛИЦА 4.** Фазовый состав и прочность при изгибе ( $\sigma_b$ ) образцов до и после гидротермальной обработки (ГТО).

До ГТО		После ГТО	
Фазовый состав	$\sigma_b$ , МПа	Фазовый состав	$\sigma_b$ , МПа
T- $ZrO_2$ , следы $\alpha-Al_2O_3$	638,4	T- $ZrO_2$ , следы $\alpha-Al_2O_3$	644,7

тазобедренного сустава методом тотального эндопротезирования. Имеют сферическую форму и внутреннее конусное отверстие для тугой посадки на ножку эндопротеза. Внешний диаметр головок — 28 мм, посадочный конус — европейский (12/14).

Дентальные имплантаты предназначены для применения в стоматологии в качестве опоры несъемных зубных протезов. Имеют цилиндрическую и коническую форму, развитую поверхность, что обеспечивает их надёжную фиксацию в кости. Высота имплантатов — от 10 до 15 мм. Их типоразмеры соответствуют антропологическим вариациям челюстей человека и не требуют механической доработки при установке.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Разработана технология синтеза высокочистого нанокристалли-



**Рис. 8.** Опытные образцы имплантатов, изготовленные из композита на основе  $ZrO_2$ : а) керамические головки эндопротезов тазобедренного сустава; б) керамические дентальные имплантаты (искусственные корни зубов).

ческого порошка композита на основе  $ZrO_2$  в системе  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3$ , с узким распределением частиц по размерам, не имеющего твёрдых агломератов.

2. Разработана технология изготовления керамического материала на основе композита  $ZrO_2$  и исследованы его физико-химические характеристики.

3. Разработанная керамика на основе композита  $ZrO_2$  характеризуется высокими химической чистотой и механической прочностью, высокоплотной микроструктурой со средним размером зерна  $\leq 0,3$  мкм, высокой низкотемпературной стабильностью фазового состава и механических характеристик, что позволяет рекомендовать материал для изготовления изделий медицинского назначения.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины канд. физ.-мат. наук А. Ю. Ковалю и канд. техн. наук О. И. Гетьман за выполнение микроструктурных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информатизации Украины ГЗ/484-2011.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Шевченко, А. К. Рубан, Е. В. Дудник, *Огнеупоры и техническая керамика*, 9: 2 (2000).
2. *Цирконий, циркон, диоксид циркония* [Электронный ресурс] /Режим досту-

- па: [www.URL://http://www.espadent.ru/index.php/2011-04-19-14-18-22](http://www.espadent.ru/index.php/2011-04-19-14-18-22).
3. J. Chevalier, L. Gremillard, and S. Deville, *Ann. Rev. Mater. Res.*, **37**: 1 (2007).
  4. E. Djurado, P. Bouvier, and G. Lucazeau, *J. Solid St. Chem.*, **149**: 399 (2000).
  5. J. D. Lin and J. G. Duh, *Mat. Chem. Phys.*, **78**: 253 (2002).
  6. H. B. Lim, K.-S. Oh, Y.-K. Kim et al., *Mat. Sci. Eng. A*, **483–484**: 297 (2008).
  7. А. В. Шевченко, Е. В. Дудник, А. К. Рубан и др., *Порошковая металлургия*, **1/2**: 23 (2007).
  8. Е. В. Дудник, *Порошковая металлургия*, **3/4**: 146 (2009).
  9. А. В. Шевченко, *Неорганическое материаловедение. Основы науки о материалах* (Киев: Наукова думка: 2008), т. 2, с. 272.
  10. Г. А. Гогоци, А. В. Дроздов, М. Свейн, *Проблемы прочности*, **1**: 39 (1991).
  11. *SIAMS600* [Электронный ресурс]/Режим доступа: SIAMS Ltd, г. Екатеринбург (<http://siams.com>).
  12. S. Deville, J. Chevalier, and L. Gremillard, *Biomaterials*, **27**: 2186 (2006).
  13. T. Chartier, T. Gervais, L. Chermant et al., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **10**, No. 4: 299 (1992).
  14. Р. А. Андриевский, *Наноструктурное материаловедение*, **1**: 5 (2005).
  15. *International Standard ISO 13356-1997. Implants for Surgery—Ceramic Materials Based on Yttria-Stabilized Tetragonal Zirconia (Y-TZP)*.

## REFERENCES

1. А. В. Шевченко, А. К. Рубан, and Е. В. Дудник, *Огнеупоры и Техническая Керамика*, **9**: 2 (2000) (in Russian).
2. *Zirconium, Zircon, Zirconium Dioxide* [Electronic Resource] / Access Mode: [www.URL://http://www.espadent.ru/index.php/2011-04-19-14-18-22](http://www.espadent.ru/index.php/2011-04-19-14-18-22) (in Russian).
3. J. Chevalier, L. Gremillard, and S. Deville, *Ann. Rev. Mater. Res.*, **37**: 1 (2007).
4. E. Djurado, P. Bouvier, and G. Lucazeau, *J. Solid St. Chem.*, **149**: 399 (2000).
5. J. D. Lin and J. G. Duh, *Mat. Chem. Phys.*, **78**: 253 (2002).
6. H. B. Lim, K.-S. Oh, Y.-K. Kim et al., *Mat. Sci. Engin. A*, **483–484**: 297 (2008).
7. А. В. Шевченко, Е. В. Дудник, А. К. Рубан et al., *Poroshkovaya Metallurgiya*, **1/2**: 23 (2007) (in Russian).
8. Е. В. Дудник, *Poroshkovaya Metallurgiya*, **3/4**: 146 (2009) (in Russian).
9. А. В. Шевченко, *Neorganicheskoe Materialovedenie. Osnovy Nauki o Materialakh* (Kiev: Naukova Dumka: 2008), vol. 2, p. 272 (in Russian).
10. G. A. Gogozi, A. V. Drozdov, and M. Svein, *Problemy Prochnosti*, **1**: 39 (1991) (in Russian).
11. *SIAMS600* [Electronic Resource] / Access Mode: SIAMS Ltd, Ekaterinburg (<http://siams.som>) (in Russian).
12. S. Deville, J. Chevalier, and L. Gremillard, *Biomaterials*, **27**: 2186 (2006).
13. T. Chartier, T. Gervais, L. Chermant et al., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **10**, No. 4: 299 (1992).
14. R. A. Andrievskiy, *Nanostrukturnoe Materialovedenie*, **1**: 5 (2005).
15. *International Standard ISO 13356-1997. Implants for Surgery—Ceramic Materials Based on Yttria-Stabilized Tetragonal Zirconia (Y-TZP)*.