

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЕЧЕННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ИНТЕНСИВНЫМ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА**

О.С. Толкачев, А.Р. Шамиева, Е.Е. Кузичкин

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ole.ts@mail.ru

**SURFACE MODIFICATION OF THE SINTERED CERAMICS BASED ON YTTRIUM-  
STABILIZED ZIRCONIA INTENSE ELECTRON BEAM: STRUCTURE AND PROPERTIES**

O.S. Tolkachov, A.R. Shamieva, E.E. Kuzichkin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenina ave., 30, 634050

E-mail: ole.ts@mail.ru

*Processing performed based ceramic zirconia intense pulsed electron beam. Revealed fragmentation of the surface layer ceramic net microcracks forming grains and subgrain structure, multiple (in  $\approx 2$ -fold) increase in hardness of the modified layer.*

Обработка металлов и сплавов интенсивным импульсным электронным пучком обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до  $10^6$  град/с) тонкого ( $10^{-7} \dots 10^{-5}$  м) поверхностного слоя материала до температур плавления, формирует предельные по величине градиенты температуры (до  $10^7 \dots 10^8$  град/м), обеспечивающие охлаждение приповерхностного слоя за счет теплоотвода в интегрально холодный объем материала со скоростью ( $10^4 \dots 10^9$ ) град/с. В поверхностном слое облучаемых материалов создаются условия для образования неравновесных структурно-фазовых состояний, которые характеризуются высоким уровнем дисперсности структуры материала (вплоть до нанокристаллической и даже аморфной) и, соответственно высокими значениями прочностных и трибологических характеристик [1].

Цель работы – анализ структуры и прочностных свойств поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония, обработанной высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Материалом исследования являлась керамика состава  $ZrO_2+3\% Y_2O_3$ . В процессе изготовления компактов из нанопорошка ( $120 \pm 14$  нм) были использованы: ультразвуковая прессовая оснастка, гидравлический пресс WK 18. Спекание компактов проводилось в высокотемпературной муфельной печи P310 (Nabertherm, Германия). Модификацию поверхностного слоя керамики осуществляли интенсивными импульсными электронными пучками на установке «СОЛЮ» [2]; варьировали плотность энергии пучка электронов  $E_s$  (от 5 Дж/см<sup>2</sup> до 20 Дж/см<sup>2</sup>), частоту следования импульсов (от 0,3 с<sup>-1</sup> до 10 с<sup>-1</sup>) и число импульсов облучения (от 1 до 3); длительность воздействия (200 мкс), энергия ускоренных электронов 18 кэВ. Исследования элементного и фазового состава, дефектной структуры поверхностного

слоя керамики проводили методами оптической (NEOFOT-32) и сканирующей электронной (SEM-515 Philips) микроскопии, рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000, съемка осуществлялась в медном отфильтрованном излучении Cu-K $\alpha$ 1; монохроматор CM-3121). Для определения физико-механических свойств керамики использовали динамический ультрамикротвердомер (наноиндентор) Shimadzu DUH-211S (максимальная нагрузка на индентор  $\approx 2$  Н).

Методами наноиндентации проведены исследования механических свойств поверхности облучения. Установлено, что при максимальной нагрузке на индентор физико-механические характеристики поверхностного слоя толщиной  $\approx 3,5$  мкм (максимальная глубина вдавливания индентора) близки к соответствующим характеристиками спеченной керамики; расхождения параметров не превышают 10 %. При динамическом режиме нагружения на индентор был выявлен эффект увеличения твердости тонкого поверхностного слоя. Было установлено, что с ростом плотности энергии пучка электронов твердость поверхности увеличивается и достигает 9700 HV (рис. 1, а, б).

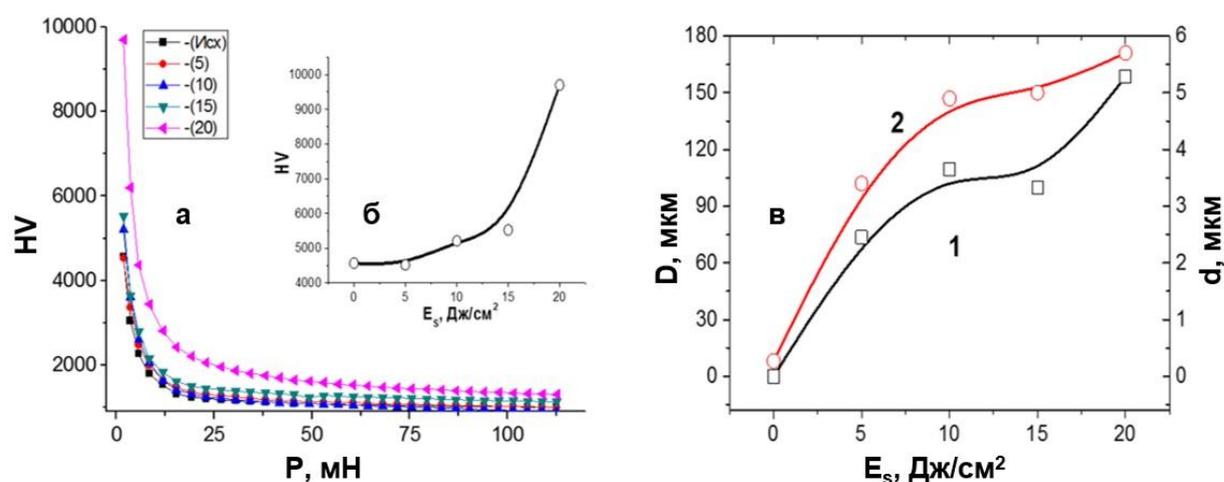


Рис. 1. Зависимость твердости поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония, облученной электронным пучком, от нагрузки на индентор (а); зависимости твердости поверхности (б), зависимости среднего размера фрагментов  $D$  (кривая 1) и зерен  $d$  (кривая 2) (в) от плотности энергии пучка электронов (200 мкс, 3 имп.); на (а) обозначено: Исх – исходное состояние; 5 –  $E_s = 5$  Дж/см<sup>2</sup>; 10 –  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup>; 15 –  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup>; 20 –  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup>.

Проведены исследования структуры поверхности облучения. Показано, что обработка керамики электронным пучком приводит, во-первых, к фрагментации поверхностного слоя сеткой микротрещин (рис. 2, а); во-вторых, к формированию зеренной структуры (рис. 2, б). С ростом плотности энергии пучка электронов средние размеры фрагментов  $D$  и зерен  $d$  увеличиваются (рис. 1, в). При облучении керамики электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 5 Дж/см<sup>2</sup> на поверхности облучения выявляется крапчатая структура, средний размер элементов которой 0,35 мкм, что близко к среднему размеру зерен спеченной керамики (0,27 мкм). Увеличение плотности энергии пучка электронов до (10-15) Дж/см<sup>2</sup> приводит к исчезновению крапчатого контраста на поверхности облучения. Этот факт позволяет заключить, что плавление поверхностного слоя керамики наступает при облучении электронным пучком с плотностью энергии, превышающей 5 Дж/см<sup>2</sup>.

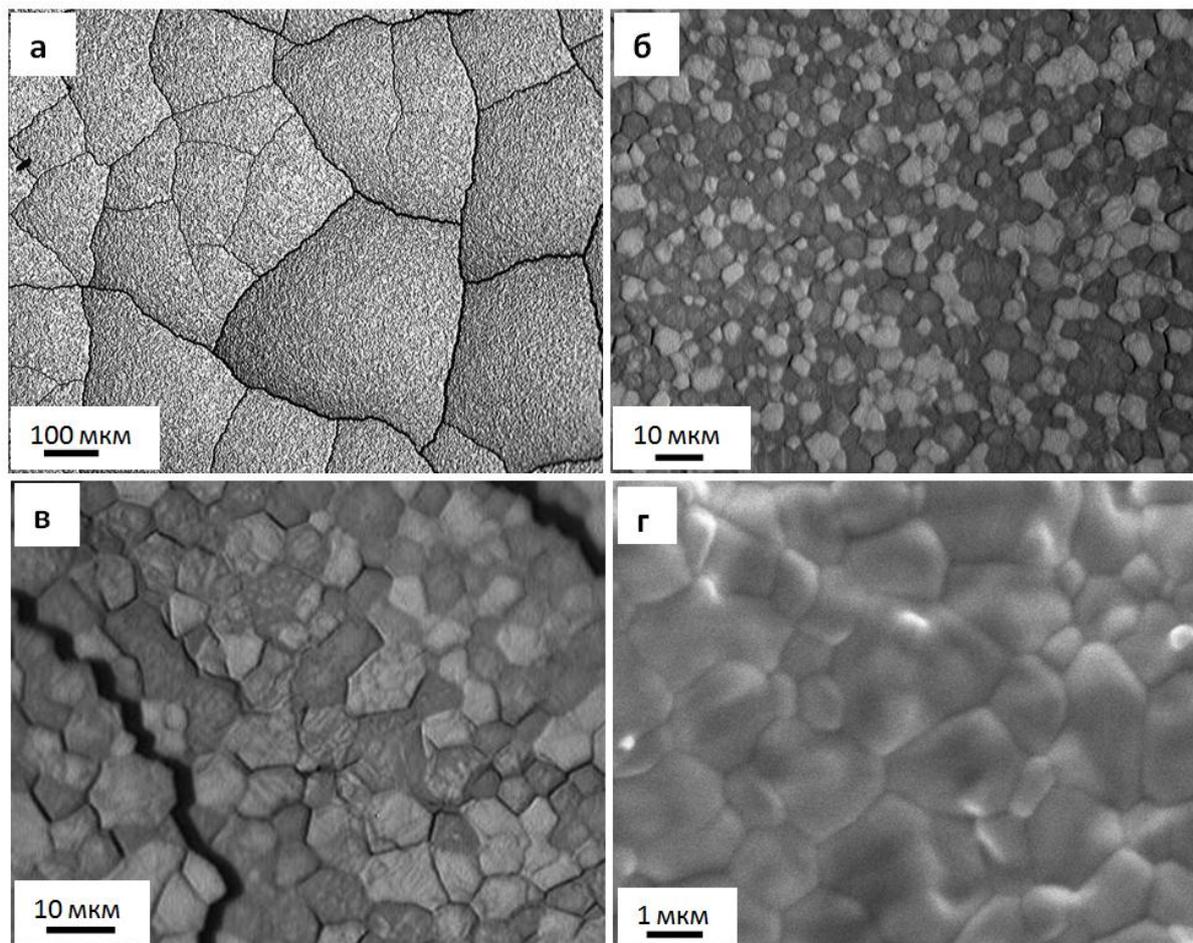


Рис. 2. Структура поверхности керамики, облученной электронным пучком (200 мкс, 20 Дж/см<sup>2</sup>, 3 имп.).

Вновь внутризеренная структура (средний размер субзерен 0,75 мкм) формируется при облучении керамики электронным пучком с плотностью энергии 20 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 2, в, г), что является одной из причин существенного (в  $\approx 2$  раза) увеличения твердости поверхности облучения.

Таким образом, продемонстрирована возможность обработки керамики на основе диоксида циркония интенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что плавление и последующая высокоскоростная кристаллизация приводят к фрагментации поверхностного слоя сеткой микротрещин, формированию зеренной и субзеренной структуры, кратному (в  $\approx 2$  раза) увеличению твердости модифицированного слоя.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 13-08-00416\_а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. Charter 6 in Book “Materials surface processing by directed energy techniques”. - P. 205-240. Ed. by Y. Pauleau: Elsevier. – 2006. – 763 p.
2. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Физика. - 2008. - №5. - С. 60-70.