

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЕЧЕННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ИНТЕНСИВНЫМ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ – АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

О.С. Толкачев, О.В. Иванова, И.А. Иконникова

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

**MODIFICATION THE SURFACE OF THE SINTERED CERAMICS BASED ON YTTRIUM-  
STABILIZED ZIRCONIA INTENSE ELECTRON BEAM - ANALYSIS OF THERMAL  
PROCESSES**

O.S. Tolkachov, O.V. Ivanova, I.A. Ikonnikova

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

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

E-mail: ole.ts@mail.ru

*Computer simulation of temperature fields formed in the surface treatment of zirconia samples intense electron beam irradiation and identified modes that enable the transformation of the structure of a single-phase (solid or liquid phase) or a two-phase (solid + liquid phase) states.*

Формирование многофазных субмикро- и наноразмерных структур, имеющее место при воздействии концентрированных потоков энергии на поверхность материала, приводит, как правило, к существенному повышению энергии зарождения в поверхностном слое концентраторов напряжения, снижению вероятности образования микро- и макродефектов и, в конечном итоге, предотвращает преждевременное зарождение и распространение с поверхности в основной объем материала хрупких микротрещин, приводящих к его разрушению [1].

Цель настоящей работы – численное моделирование температурных полей, формирующихся при обработке поверхности образцов керамики на основе диоксида циркония высокоинтенсивным электронным пучком.

Задача о нахождении температурного поля в определенном диапазоне плотности энергии электронов сводится к решению уравнения теплопроводности [2]. Рассматривается одномерный случай нагрева и охлаждения пластины толщиной  $d$ . Система координат выбрана так, что ось  $x$  направлена вглубь образца. При  $x = 0$  задан тепловой поток, а на тыльной стороне пластины теплообмен отсутствует. Для численного решения поставленной задачи использована разностная сетка с шагом  $\tau$  по времени:  $t_j = j\tau$  и с переменным шагом  $h$  по пространству:  $x_i = ih$ , здесь  $j$  – номер слоя по времени,  $i$  – номер слоя по пространству. Значение температуры определяется в узлах сетки. Используется аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности с первым порядком по времени и со вторым по

пространству, при этом была выбрана явная схема [2]. На основе численного решения уравнения теплопроводности проведено моделирование температурных полей при электронно-пучковой обработке поверхности образцов диоксида циркония. Расчеты выполнялись для интенсивного электронного пучка с плотностью энергии, изменяющейся в диапазоне от 4 Дж/см<sup>2</sup> до 40 Дж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса 50, 100, 150 и 200 мкс. Толщина поверхностного слоя для тепловых расчетов  $d = 5 \cdot 10^{-3}$  м, шаг по пространству от поверхности до центра образца  $h_1 = 5 \cdot 10^{-7}$  м и от центра до основания образца  $h_2 = 45 \cdot 10^{-7}$  м, время наблюдения 1100 мкс, шаг  $\tau = 0.23$  мкс по времени. Учет плавления и испарения материала проводился из следующих физических соображений [3]. При достижении ячейкой температуры плавления  $T_{пл}$ , ее температура фиксировалась и полагалась равной температуре плавления, а все подводимое тепло, предполагалось, идет на плавление образца до перехода вещества в жидкое состояние. Процессы кристаллизации, испарения и конденсации моделировались аналогичным образом.

Результаты расчетов температурного поля, формирующегося в керамике на основе диоксида циркония, представлены на рис. 1 – рис. 3. Анализ результатов показывает, что с уменьшением длительности импульса воздействия пучка электронов двухфазный слой (твердая фаза – жидкость) и слой существования жидкой фазы сокращаются, их формирование сдвигается в область более низких плотностей энергии. Соответственно этому увеличивается двухфазный слой жидкость – пар (рис. 1).

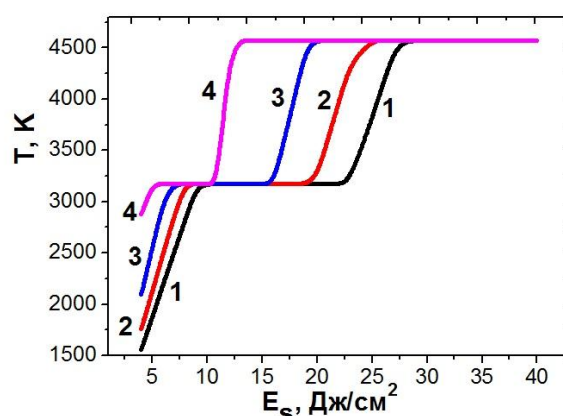


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры прогрева поверхности диоксида циркония, облученного электронным пучком, от плотности энергии пучка для разной длительности импульса воздействия пучка электронов; 1 –  $t_0 = 200$  мкс, 2 –  $t_0 = 150$  мкс, 3 –  $t_0 = 100$  мкс, 4 –  $t_0 = 50$  мкс.

К примеру, формирование двухфазного слоя (твердая фаза + жидкость) при длительности импульса 200 мкс фиксируется при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 2, а, кривая 1), а при длительности импульса 50 мкс – при плотности энергии пучка электронов 5 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 2, а, кривая 2). Формирование на поверхности керамики однофазного (жидкая фаза) слоя фиксируется для длительности импульса пучка электронов  $t_0 = 50$  мкс при плотности энергии  $E_S = 14$  Дж/см<sup>2</sup> (рис. 2, б, кривая 2), а для  $t_0 = 200$  мкс при  $E_S = 25$  Дж/см<sup>2</sup> (рис. 2, б, кривая 1).

Время существования двухфазного (жидкая + твердая фазы) и однофазного (жидкость) слоев существенно увеличивается с ростом плотности энергии и длительности импульса пучка электронов (рис. 3). К примеру, при плотности энергии 25 Дж/см<sup>2</sup> для длительности импульса  $t_0 = 200$  мкс время существования жидкого слоя  $\Delta t = 17$  мкс (рис. 3, б, кривая 1), а для  $t_0 = 50$  мкс  $\Delta t = 71$  мкс (рис. 3, б, кривая 2).

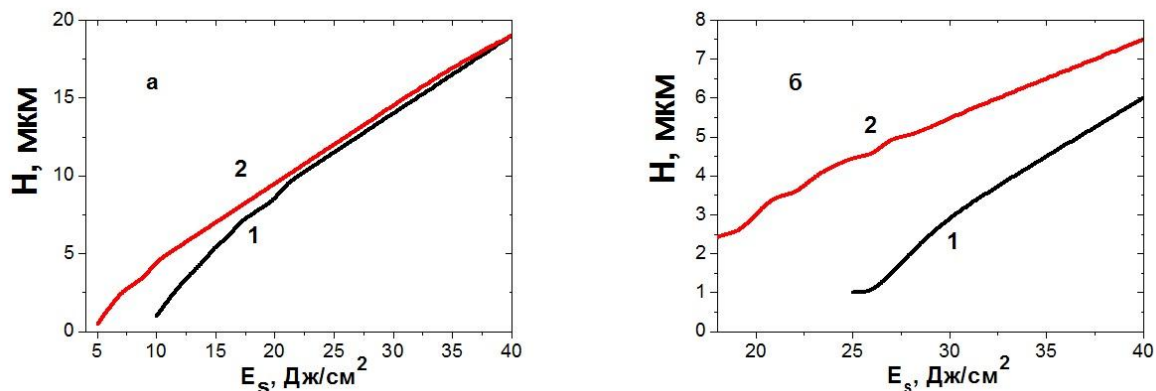


Рис. 2. Зависимость толщины слоя (жидкая + твердая фазы) (а) и жидкой фазы (б) на поверхности диоксида циркония, облученного электронным пучком, от плотности энергии пучка с учетом плавления и испарения материала; 1 –  $t_0 = 200$  мкс, 2 –  $t_0 = 50$  мкс.

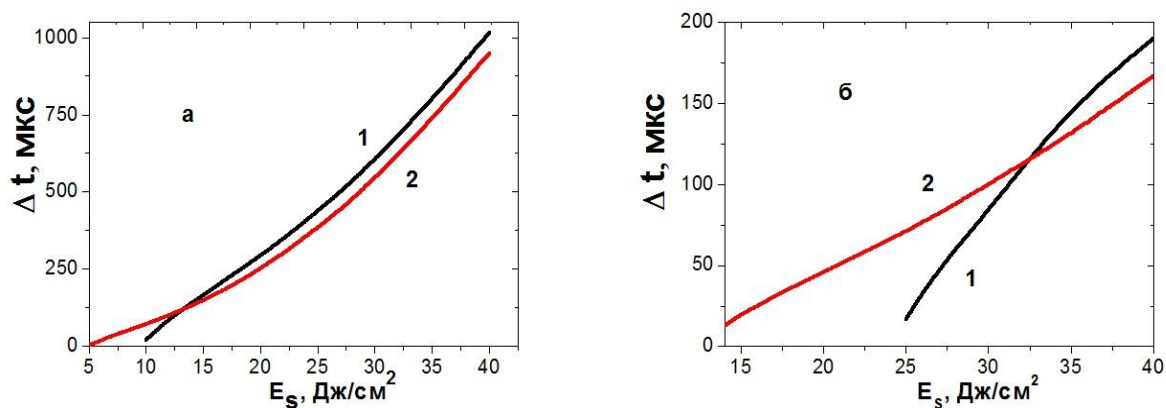


Рис. 3. Зависимость времени существования двухфазного (жидкая + твердая) слоя (а) и слоя жидкой фазы (б) на поверхности диоксида циркония, облученного электронным пучком, от плотности энергии пучка с учетом плавления и испарения материала; 1 –  $t_0 = 200$  мкс, 2 –  $t_0 = 50$  мкс.

Таким образом, результаты моделирования температурного поля позволили выявить пороговые значения параметров пучка электронов (плотность энергии и длительность импульсов), облучение при которых сопровождается преобразованием структуры поверхностного слоя керамики в однофазном (твердая или жидкая фазы) или двухфазном (твердая + жидкая фазы) состояниях.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Иванов Ю.Ф., Моховиков А.А. Закономерности формирования и влияние многомасштабных наноразмерных структур на физические свойства поверхностного слоя твердого сплава // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 56. - № 7/2. – С. 283-291.
2. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1997. – 271 с.
3. 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.