

## ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБАЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ

М.А. Мокеев<sup>1)</sup>, Д.А. Горьковская<sup>1)</sup>, Е.А. Петрикова<sup>1)</sup>, П.В. Москвин<sup>1)</sup>,  
Н.Н. Ковал<sup>1)</sup>, О.С. Толкачёв<sup>1), 2)</sup>, Ю.Ф. Иванов<sup>1)</sup>, М.С. Воробьёв<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,

*maks\_mok@mail.ru, diana191@inbox.ru, elizmarkova@yahoo.com,*

*koval@opee.hcei.tsc.ru, pavelmoskvin@mail.ru, yufi55@mail.ru*

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия, *tolkachev@tpu.ru, vorobyovms@yandex.ru*

Проведена электронно-пучковая модификация поверхности керамики на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием, с напыленным слоем титана толщиной 3 мкм. Облучение проводилось в источнике электронов с многодуговой разрядной системой, позволяющей управлять мощностью субмиллисекундного пучка за счет динамической регулировки амплитуды импульса тока дугового разряда в сеточном плазменном катоде для предотвращения хрупкого разрушения керамики в процессе облучения. Модификация поверхности проводилась в трех режимах, отличающихся между собой плотностью энергии и длительностью импульса. Результаты демонстрируют увеличение микротвердости поверхностного слоя в 1.4 раза, при этом скорость износа снизилась в 1.6 раза, коэффициент трения в 3 раза, соответственно, по сравнению с исходной керамикой. На поверхности образцов выявлена сетка мелких трещин, разделяющих покрытие на фрагменты. внутри которых обнаружена структура кристаллизации, отвечающая за улучшение механических свойств.

**Ключевые слова:** дуговой разряд; плазма; источник электронов; керамика; модификация.

## ELECTRON BEAM MODIFICATION SURFACES OF YTTRIUM-STABILIZED CERAMICS BASED ON ZIRCONIUM DIOXIDE

М.А. Мокеев<sup>1)</sup>, Д.А. Горьковская<sup>1)</sup>, Е.А. Петрикова<sup>1)</sup>, П.В. Москвин<sup>1)</sup>,  
Н.Н. Ковал<sup>1)</sup>, О.С. Толкачёв<sup>1), 2)</sup>, Ю.Ф. Иванов<sup>1)</sup>, М.С. Воробьёв<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS,

2/3 Akademichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia,

*maks\_mok@mail.ru, diana191@inbox.ru, elizmarkova@yahoo.com,*

*koval@opee.hcei.tsc.ru, pavelmoskvin@mail.ru, yufi55@mail.ru*

<sup>2)</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,

30 Lenina Ave., 634050 Tomsk, Russia, *tolkachev@tpu.ru, vorobyovms@yandex.ru*

Electron beam modification of the surface of ceramics based on yttrium-stabilized zirconium dioxide with a deposited titanium layer 3  $\mu\text{m}$  thick was carried out. Irradiation was carried out in an electron source with a multi-arc discharge system, which allows controlling the submillisecond beam power due to dynamic adjustment of the arc discharge current pulse amplitude in the grid plasma cathode to prevent brittle fracture of the ceramics during irradiation. The surface modification was carried out in three modes, which differed in energy density and pulse duration. The results demonstrate an increase in the microhardness of the surface layer by 1.4 times, while the wear rate decreased by 1.6 times, the friction coefficient by 3 times, respectively, compared to the original ceramics. A network of small cracks was revealed on the surface of the samples, dividing the coating into fragments, inside which a crystallization structure was found, responsible for the improvement of mechanical properties. The conducted mechanical (measurement of microhardness) and tribological (determination of wear resistance and friction coefficient) tests of Y-TZP ceramic samples subjected to electron-ion-plasma treatment require a more detailed selection of modification modes.

**Keywords:** arc discharge; plasma; electron source; ceramics; modification.

## Введение

Керамические материалы, в частности стабилизированный оксид циркония (Y-TZP), широко применяются в технике благодаря своей высокой микротвердости, термостойкости, химической инертности и устойчивости к износу. Эти свойства делают Y-TZP перспективным материалом для использования в условиях высоких температур, агрессивных сред и интенсивных механических нагрузок. Однако наряду с преимуществами, циркониевая керамика обладает рядом недостатков: низкой электропроводностью, склонностью к хрупкому разрушению при циклических и ударных воздействиях, а также сложностью модификации свойств поверхности без нарушения объемной целостности. Особенно остро эти ограничения проявляются при использовании керамики в микроэлектронике, где требуется высокая прецизионность процесса модификации.

Благодаря использованию электронно-пучковой модификации удается достичь направленного изменения структуры поверхностного слоя, сопровождающегося улучшением триботехнических характеристик: повышением микротвердости, снижением износа и коэффициента трения [1]. Такие свойства критически важны для расширения областей применения керамических материалов [2,3].

## Эксперимент и обсуждение результатов

В данной работе представлены результаты по модификации Y-TZP + Ti (3 мкм), с использованием электронно-пучковой обработки в различных режимах.

Нанесение пленки титана проводилось на вакуумной ионно-плазменной установке «КВИНТА» [4]. Рентгенофазовый анализ выявил присутствие в покрытии фазы альфа-Ти и незначительное количество оксида титана (рис. 1).

Облучение образцов Y-TZP + Ti (3 мкм) проводили в системе источника электронов с многодуговым сеточным плазменным катодом (рис. 2).

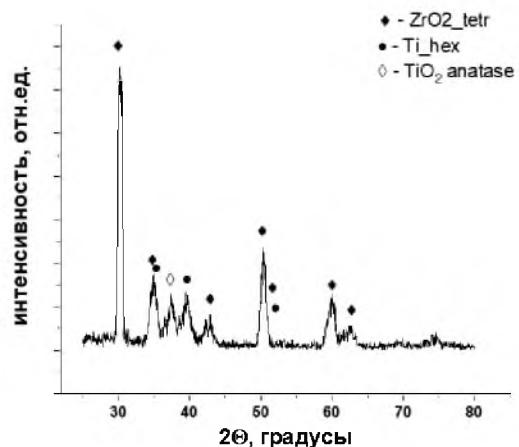


Рис. 1. Фрагмент рентгенограммы системы Y-TZP + Ti (3 мкм)

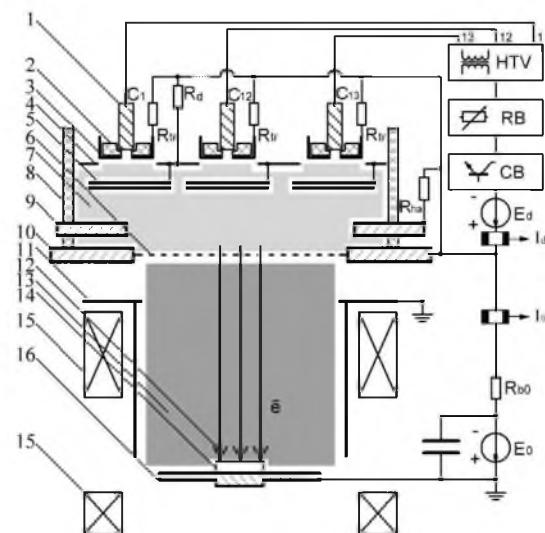


Рис. 2. Схема модернизированного источника «СОЛО» с многодуговой разрядной системой:  
 1 – катод; 2 – изолятор; 3 – поджигающий электрод; 4 – дополнительный электрод; 5 – перераспределяющий электрод; 6 – эмиссионная сетка; 7 – катодная плазма; 8 – изолятор; 9 – промежуточный анод; 10 – анод; 11 – заземленный извлекающий электрод; 12 – электронный пучок; 13 – анодная (пучковая) плазма; 14 – образец; 15 – соленоид; 16 – коллектор

Многодуговая система позволяет не только увеличить диаметр генерируемого электронного пучка, но и эффективно управлять распределением плотности энергии пучка за счет раздельной регулировки токовых каналов. Разрядная система обеспечивает возможность управления мощностью субмиллисекундного пучка за

счет динамической регулировки амплитуды импульса тока дугового разряда в сечечном плазменном катоде [5].

Для предотвращения хрупкого разрушения керамики в процессе облучения электронно-пучковая модификация велась в модулированных режимах с постепенным вводом энергии. В режиме № 1 материал подвергался воздействию плотности энергии 8 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса 150 мкс. В режимах № 2 и № 3 плотность энергии 17 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса 200 мкс и 25 Дж/см<sup>2</sup> при длительности 500 мкс, соответственно. Для всех случаев режим характеризовался нарастающей плотностью мощности.

Проведены механические (измерение микротвердости) и трибологические (определение скорости износа и коэффициента трения) испытания системы Y-TZP + Ti, подвергнутой электронно-пучковой обработке (табл. 1). Выявлено существенное влияние режима облучения на свойства керамики Y-TZP, а именно, снижение скорости износа в 32 раза и коэффициента трения в 4.2 раза (режим облучения № 1), увеличение микротвердости в 1.8 раза (режим № 2).

Табл. 1. Результаты определения скорости износа (k), коэффициента трения ( $\mu$ ) и микротвердости (HV) системы Y-TZP + Ti

№ режима	k, $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ , $10^{-6}$	$\mu$	HV, ГПа
0	17	0.71	8.0
1	0.53	0.17	10.0
2	4.1	0.27	14.3
3	190	0.84	13.7

Методами сканирующей электронной микроскопии показано, что облучение системы Y-TZP + Ti интенсивным импульсным электронным пучком приводит к выглаживанию поверхности. На поверхности образцов выявлена сетка мелких трещин, разделяющих покрытие на фрагменты. Размер фрагментов изменяется в пределах от 10 мкм до 60 мкм. Внутри фрагментов при режимах № 2 и № 3 выявляется струк-

тура кристаллизации с размерами кристаллитов от (0.2-0.4) мкм до (1.7-5) мкм. В режиме № 1 структура кристаллизации не обнаружена. Показано, что образцы, на поверхности которых обнаружена структура кристаллизации, обладают повышенной микротвердостью.

### Заключение

Осуществлена электронно-пучковая (в модулированном режиме) обработка системы «пленка (Ti)/(Y-TZP) подложка». Продемонстрирована возможность управления структурой, прочностными и трибологическими свойствами керамики Y-TZP.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-69-00074).

### Библиографические ссылки

1. Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н., Эмиссионная электроника (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2009), 596 с.
2. Зенин А.А., Климов А. С. Электронно-лучевая пайка алюмооксидной керамики с металлом с применением форвакуумного плазменного источника электронов. В кн.: Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (2013 г.), г. Томск. Томск: ТГУ, 2013. С. 10-13.
3. Basu S.N., Ping Hou, V.K. Sarin. Formation of mullite coatings on silicon-based ceramics by chemical vapor deposition. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 1998; 16 (4-6): 343–352.
4. Прокопенко Н.А., Коваль Н.Н., Воробьев М. С. и др. Синтез оксида титана вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом. В кн.: Вакуумная техника и технологии - 2024: Труды 31-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 25–27 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2024. С. 315-317.
5. Девятков В.Н., Мокеев М.А., Воробьев М.С. и др. Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности. *Письма в Журнал технической физики* 2024; 50(19): 23-26.