

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

А.Н. Зайцев, В.А. Максимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: skadi221@gmail.com; vitelio@rambler.ru

*Приведены результаты исследования свойств керамических покрытий из оксида алюминия, оксида алюминия с 13 % диоксида титана, алюмомагнезильной шпинелью, полученных методом плазменного напыления на подложках, изготовленных из сплава Инконель 718 и стали 316L(N). Проведены трибологические испытания плазменных покрытий в диапазоне скоростей от 0,75 до 6 м/мин при давлении 6,3 и 7 МПа без смазки в паре со сплавом Инконель 718 и сталью 316L(N). Рассмотрены факторы, влияющие на изменение характеристик данных материалов при трении и износе. Плазменные покрытия при высокой твердости достаточно хрупкие, абразивное изнашивание таких покрытий в условиях сухого трения обычно выражается в неравномерном отделении частиц материала покрытия. Наибольшей износостойкостью обладает пара Инконель 718–оксид алюминия + 13 % диоксид титана по сравнению с другими парами, что также коррелируется с низким коэффициентом трения.*

**Ключевые слова:** плазменные электроизоляционные покрытия, трибология, бланкет ИТЭР.

## STUDYING TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF PLASMA ELECTRICAL INSULATING COATINGS

A.N. Zaitsev, V.A. Maksimov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 107005 Russian Federation  
e-mail: skadi221@gmail.com; vitelio@rambler.ru

*The results of studying properties of the ceramic coatings: aluminum oxide, aluminum oxide with 13 % of titanium, and magnesium aluminum spinel (obtained using the method for plasma spraying on the substrates made of the alloy Inconel 718 and the steel 316L(N)) are given. The tribological tests of the plasma coatings have been conducted within a speed range from 0.75 to 6 m/min under pressures of 6.3 and 7 MPa without greasing in pair with the alloy Inconel 718 and the steel 316L(N). The factors effecting the variation in characteristics of these materials with friction and wear are considered. The plasma coatings with high hardness are brittle enough, the abrasive wear of these coatings under conditions of dry friction is typically revealed in the form of inhomogeneous separation of the coating material particles. The pair of Inconel 718–aluminum oxide + 13 % dioxide titanium possesses the highest wear resistance as compared to other pairs, which also correlates with a low friction factor.*

**Keywords:** plasma electrical insulation coatings, tribology, blanket of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER).

Элементы конструкций соединителей модулей (СМ) и несущие конструкции первой стенки (НКПС) бланкета международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) должны сохранять функциональные свойства под одновременным действием нормальных статических нагрузок до 7 МПа и касательных динамических нагрузок до 50 МПа, возникающих в результате воздействия электро-

магнитного нагружения продолжительностью от 25 до 30 мс и тепловых упругих деформаций. При этом для предотвращения прохождения электрического тока между НКПС и защитным модулем blankets необходимо использовать электроизоляционные керамические покрытия в условиях циклического изменения температур от 20 до 250 °С продолжительностью 1800 с в паре со сплавом Инконель 718 и сталью 316L(N).

В течение всего срока эксплуатации ИТЭР поверхности деталей НКПС с нанесенными электроизоляционными покрытиями будут подвержены абразивному изнашиванию в паре со сплавом Инконель 718 и сталью 316L(N). Путь трения за весь цикл работы реактора может варьироваться от нескольких до десятков метров. Микроперемещения, а также полное скольжение между трущимися деталями (керамика–металл) при превышении некоторого значения тангенциальной силы могут вызвать разрушение поверхностного слоя в местах реального контакта, что приведет к снижению электроизоляционных свойств покрытий (рост трещин, сколы, уменьшение толщины электроизоляционного покрытия).

В элементах конструкций blankets ИТЭР покрытия должны сохранять электроизоляционные свойства (удельное объемное сопротивление не менее  $\rho = 1,0 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , напряжение электрического пробоя не менее  $U = 50 \text{ В}$ ) при скольжении без смазывания в паре со сплавом Инконель 718 и сталью 316L(N) в вакууме  $10^{-7} \text{ Па}$ . При этом наибольшее опасение вызывают импульсные касательные механические нагрузки, возникающие в процессе электромагнитных импульсов во время работы реактора. Эти нагрузки могут привести к сдвигу покрытия относительно основы при условии  $F_{\text{тр}} \geq F_{\text{ад}}$  ( $F_{\text{тр}}$  — сила трения,  $F_{\text{ад}}$  — адгезионная прочность покрытия). Из этого следует актуальность снижения коэффициента трения между трущимися деталями и увеличения адгезионной прочности между покрытием и основой.

Анализ литературных источников [1, 2] показал, что коэффициент трения  $\mu$  для пары  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –Инконель 718 при контактном нормальном давлении 2,67...49 МПа варьируется от 0,51 до 0,72. При этом значение  $\mu$  на 20 % меньше на воздухе, чем в вакууме.

Определяющими факторами при испытании плазменных покрытий на износ являются их механические свойства и структура. Наличие микропор на границе напыленных частиц и низкая когезионная прочность снижают трибологические свойства [3].

Применение электроизоляционных покрытий на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в реакторе типа Токамак показало их работоспособность в условиях,

близких к заявленным требованиям эксплуатации защитных покрытий в термоядерном реакторе типа ИТЭР [1, 4].

Цель настоящей работы – сравнительная оценка триботехнических характеристик плазменных электроизоляционных покрытий на основе  $Al_2O_3$  в паре со сплавом Инконель 718 и сталью 316L(N) при трении без смазывания.

Объектами испытания были выбраны керамические электроизоляционные покрытия  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$ ,  $MgAl_2O_4$ .

**Методика эксперимента.** Для испытаний были изготовлены образцы (контртела) из сплава Инконель 718 (HB = 220) и закаленной стали 316L(N) (HRC = 42) – пластины  $70 \times 20 \times 10$  мм, штифты диаметром 6 и 6,35 мм. Шероховатость после механической обработки составляла  $R_a = 1,6$  мкм.

Покрытия формировались плазменным газотермическим методом на стандартной установке УПУ-8М, оснащенной специальным плазматроном мощностью 15 кВт (разработка ОАО НИКИЭТ). Для подачи порошкового материала использовались дозаторы Praxair 1264 с применением средств автоматизации (робота-манипулятора Almega AX-V16).

Покрытия наносились на рабочую поверхность пластин и торцы штифтов. В процессе напыления контролировалась температура изделия, которая не превышала  $100^\circ C$ . Перед нанесением покрытий поверхности подвергались абразивно-струйной обработке корундом с фракцией 1000 мкм ( $R_z = 70$  мкм (минимум) после обработки).

В качестве материалов керамических покрытий применялись специализированные порошки узкого фракционного состава фирмы Starck и шпинель отечественного производства фирмы ООО “Нейтрино” (табл. 1). Технологические режимы плазменного напыления представлены в табл. 2.

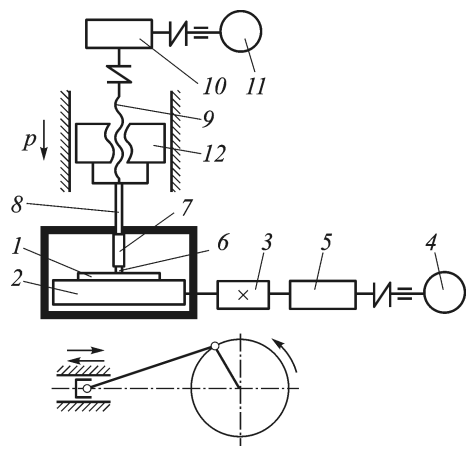
Таблица 1

**Фракционный состав используемых порошков**

Наименование материала	Химическая формула	Примеси щелочных металлов, не более, %	Фракция, мкм
Amperit 250.001	NiCr	0,20	22–45
Amperit 740.001	$Al_2O_3$	0,25	45–90
Amperit 744.001	$Al_2O_3 - 13\% TiO_2$	0,22	22–45
Шпинель	$MgAl_2O_4$	0,15	45–100

Трибологические свойства керамических покрытий исследовались при комнатной температуре на многофункциональном трибометре фирмы Center for Tribology Inc., США, мод. UMT-2 по схеме штифт–пластина без смазки при возвратно-поступательном движении. Рассматривались пары двух типов: металл–керамика, керамика–керамика.

Принципиальная схема машины трения приведена на рис. 1. Образец (пластина) 1 закрепляется на подвижном столе 2, совершающем возвратно-поступательное движение посредством кривошипно-шатунного механизма 3, который приводится в движение электродвигателем 4 через редуктор 5. Контртело (штифт) 6 закрепляется в специальной оправке 7, фиксация в продольном и поперечном направлениях осуществляется с помощью двух регулировочных винтов, что позволяет избежать перекосов и биений во время испытаний. Нагрузка на штифт передается через шток 8, приводимый в движение шариковинтовой передачей 9 посредством редуктора 10 и серводвигателя 11. Установка снабжена датчиком (трехкомпонентным), позволяющим измерять действующие на образец силы ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ). Работая в режиме поддержания нормальной нагрузки  $F_z$  на постоянном уровне, измерительная система прибора вырабатывает сигнал рассогласования в том случае, если происходит изменение линейного размера сопряжения (пластина–штифт) вдоль направления нагрузки  $F_z$ .



**Рис. 1. Принципиальная схема трибометра УМТ-2**

Главной причиной такого изменения является износ исследуемого сопряжения. Сигнал рассогласования поступает на привод шариковинтовой передачи, который перемещает гайку 11 и вместе с ней оправку с контртелом по направляющим до тех пор, пока не будет восстановлено прежнее значение нормальной нагрузки  $F_z$ . Это смещение регистрируется прибором в качестве линейного износа. Машина трения также снабжена тензодатчиками, позволяющими определять коэффициент трения и температуру в зоне контакта исследуемых образцов. Износ образцов ( $\Delta h$ ) контролируется бесконтактным емкостным датчиком перемещения с точностью 0,2 мкм.

Прибор обеспечивает непрерывную регистрацию и запись сил трения, сближение исследуемых пар, коэффициент трения и температуру в зоне трения.

Нагрузочно-скоростные характеристики выбирались максимально приближенными к реальным условиям работы деталей НКПС бланкета ИГЭР и составляли соответственно: скорость скольжения  $v = 0,75$  м/мин для пар Инконель 718–керамика и  $v = 6$  м/мин для пар сталь 316L(N)–керамика при нагрузках 6,3 и 7 МПа.

Режимы плазменного напыления керамических электроизоляционных покрытий  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3 - 13\% TiO_2$ 

Вид покрытия	Сила тока $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Расход порошка, г/мин	Расход плазмообразующего газа $Al_2$ , л/мин	Расход плазмообразующего газа $N_2$ , л/мин	Расход транспортирующего газа $Ar_2$ , л/мин	Скорость перемещения плазмотрона $V$ , см/мин	Число проходов
Подслои NiAl	270–300	45–50	4,7	20–25	1,5–2,0	2,0–2,5	1600	1
Рабочий слой	320–350	50–55	16,2	25–30	2,0–2,4	2,5–3,0	1100	6

Таблица 3  
Сводная таблица результатов испытаний керамических покрытий  $Al_2O_3$  и  $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$  в паре со сплавом Инконель 718 и сталью 316L(N)

Образцы (вид и покрытие)		Время испытаний $t$ , с	Путь трения $L$ , км	Коэффициент трения $\mu$	Износ $h$ , мкм	Интенсивность изнашивания $I_h$ , мкм/км	$k$
Штифт	Пластина						
$v = 0,75$ м/мин, $p = 7$ МПа							
Керамика ( $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$ )	Керамика ( $Al_2O_3$ )	1200	$12,5 \cdot 10^{-3}$	0,57	383	$14,3 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$
	Керамика ( $Al_2O_3$ )	950	$10,6 \cdot 10^{-3}$	0,54	157	$13,6 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$
	Керамика $MgAl_2O_4$	1060	$14,5 \cdot 10^{-3}$	0,53	278	$324,0 \cdot 10^3$	$46,2 \cdot 10^3$
$v = 6,0$ м/мин, $p = 6,3$ МПа							
Инконель 718	Керамика ( $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$ )	1712	$11,4 \cdot 10^{-3}$	0,55	102	$6,1 \cdot 10^3$	$0,8 \cdot 10^3$
Сталь 316L(N)	Керамика ( $Al_2O_3$ )	1574	$13,4 \cdot 10^{-3}$	0,67	733	$7,0 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$

Для сравнения свойств пар трения использовались такие параметры износа, как средняя линейная интенсивность изнашивания  $I_h$ , мкм/км, и коэффициент износостойкости  $k$ , определяемые по известным соотношениям [5]:

$$I_h = \frac{\Delta h}{\Delta L}, \quad k = \frac{\Delta h}{\Delta L P},$$

где  $\Delta L$  — путь трения образца, км;  $\Delta h$  — линейный износ образца, мкм;  $P$  — нагрузка на образец, МПа.

Интенсивность изнашивания оценивали при установившихся режимах испытаний после приработки пар трения и стабилизации коэффициента трения  $\mu$  (рис. 2).

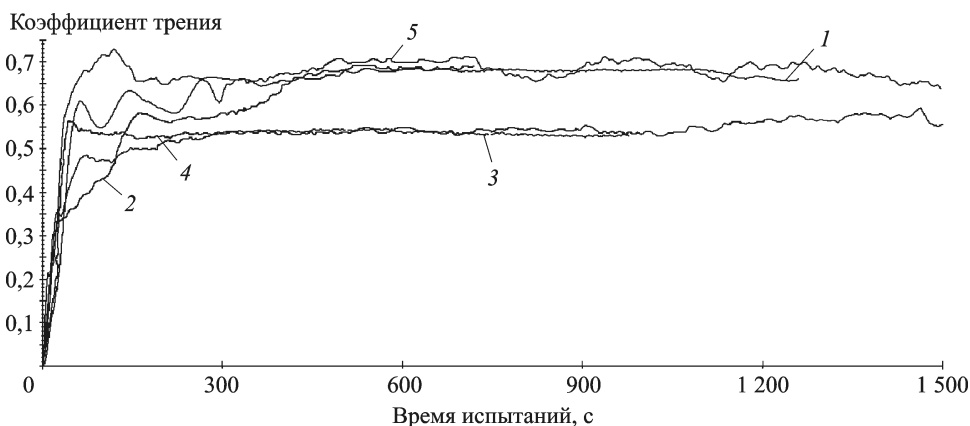
**Результаты испытаний и обсуждение.** Данные триботехнических характеристик различных пар, полученные в ходе проведения экспериментов, представлены в табл. 3. Следует отметить, что визуальная оценка износа трущихся деталей показала, что во всех проведенных испытаниях плазменных покрытий в паре с металлами доминировал износ покрытия.

Динамика изменения коэффициента трения  $\mu$  между различными трибологическими парами представлена на рис. 2.

Из данных табл. 3 следует:

— актуальность нанесения дополнительного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  на уже сформированное покрытие  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , обладающего лучшей износостойкостью  $I_h = 6,1 \cdot 10^3$  мкм/км (пара Инконель 718– $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  по сравнению с парой Инконель 718– $\text{Al}_2\text{O}_3$   $I_h = 13,6 \times 10^3$  мкм/км;

— существенной разницы между антифрикционными свойствами разных плазменных покрытий на основе оксида алюминия в паре с



**Рис. 2. Сравнительные результаты измерения коэффициентов трения:** кривая 1 —  $(\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2)/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ , кривая 2 — Инконель 718/  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , кривая 3 — Инконель 718/ $(\text{Al}_2\text{O}_3)$ , кривая 4 — Инконель 718/ $(\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2)$ , кривая 5 — сталь 316L(N)/ $(\text{Al}_2\text{O}_3)$

металлами не выявлено, при этом коэффициент трения  $\mu$  составил от 0,53 до 0,55 (см. рис. 2);

– износостойкость плазменных покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в паре с  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  и Инконель 718 практически одинаковы, но значения коэффициента трения незначительно различаются; так, для пары  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$   $\mu$  оказался максимальным и составил 0,57;

– пара Инконель 718– $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  показала наименьший коэффициент трения  $\mu = 0,53$ , но при этом максимальную интенсивность изнашивания ( $I_h = 32,4 \cdot 10^4$  мкм/км), что говорит о низкой когезионной прочности покрытия. Это может быть связано с режимами напыления, определяющими температуру разогревания частиц напыляемого материала.

Пониженные трибологические характеристики пары керамика–керамика по сравнению с парой керамика–Инконель 718 можно объяснить высокой теплопроводностью (например, у сплава Инконель 718 при  $T = 20^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности в 7 раз выше, чем у плазмонапыленного покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), а также процессами переноса металла и его оксидов на поверхность керамики [6, 7].

Оксидные покрытия показали стабильный коэффициент трения и равномерный износ в течение всего эксперимента. Подтвердилось предположение о снижении интенсивности изнашивания с ростом скорости скольжения на примере пары сталь 316L(N)–керамика [1].

Трение между контактирующими телами в условиях отсутствия смазочного материала обусловлено двумя основными факторами: адгезия в областях реального контакта, возникновение канавок на сопрягающих поверхностях менее твердой поверхности [5]. В нашем случае неровность металла копировалась на поверхности керамики, что говорит о ее меньшей твердости ( $\text{HV}_1 = 326$ ) и высокой пористости (7... 10%).

Сравнение полученных триботехнических характеристик плазменных покрытий с данными работ [1, 2] показало их хорошее совпадение (табл. 4).

**Выводы.** 1. Проведение трибологических испытаний контактирующих пар на стенде УМТ-2 позволяет определить оптимальный вариант конструкции электроизоляционного покрытия для обеспечения требуемых эксплуатационных условий.

2. Проведенные испытания показали, что покрытие  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в паре с Инконель 718 имеет наибольшую интенсивность изнашивания ( $I_h = 32,4 \cdot 10^4$  мкм/км) и наименьший коэффициент трения ( $\mu = 0,53$ ) по сравнению с другими плазменными покрытиями на основе оксида алюминия.

## Сравнение полученных результатов триботехнических свойств с данными из литературных источников

Данные работ [1, 2]			
Условия испытаний	Пара трения	$I_h$ , мкм/км	$\mu$
$v = 0,426$ м/мин, $p = 6,89$ МПа	Инконель 718 – $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$	$2,4 \cdot 10^3$	0,58
$v = 1,2$ м/мин, $p = 0,5$ МПа	30ХГСА – $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$	$3,4 \cdot 10^3$	0,43
$v = 1,2$ м/мин, $p = 0,5$ МПа	ЖС6К – $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$	$4,4 \cdot 10^3$	0,52
Полученные результаты испытаний			
$v = 0,75$ м/мин, $p = 7$ МПа	Инконель 718 – $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$	$6,15 \cdot 10^3$	0,55
	Инконель 718 – $Al_2O_3$	$13,6 \cdot 10^3$	0,54

3. Наибольшую износостойкость имеет пара Инконель 718 –  $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$  ( $I_h = 6,15 \cdot 10^3$  мкм/км), у этой же пары наименьший период приработки по сравнению с другими парами и стабильный режим в течение всего хода испытания (см. рис. 2).

4. Трибологические испытания, проведенные на серии образцов контактирующих пар керамика ( $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$ ) и металл (Инконель 718, сталь 316 L(N)) позволили установить возможность их применения на деталях НКПС бланкета ИТЭР при последующей технологической приработке.

5. Все исследуемые пары за исключением пары Инконель 718 –  $MgAl_2O_4$  после проведения триботехнических испытаний сохранили требуемые электроизоляционные свойства, что позволяет говорить о возможности их применения на деталях НКПС бланкета ИТЭР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Trester P. W. et al. Selection and qualification of materials for relative motion and electrical isolation in a vacuum environment // Thin Solid Films. 1984. Vol. 119. P. 113–120.
2. Носовский И.Г. Исследование трения и изнашивания некоторых диффузионных и детонационных покрытий в вакууме // Трение и износ. 1983. Т. 4. № 5. С. 796–800.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу “Технология конструкций из металлокомпозитов”. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
4. Zatz I.J. Dynamic analysis of the TFTR bumper limiter // Nuclear Eng. And Design. 1987. Vol. 4. P. 141–148.
5. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.



6. Lee S.W., Hsu S.H., Shen M.C. Ceramic wear maps: zirconia // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1993. Vol. 76. № 8. P. 1937–1947.
7. Becker P.C., Libsch T.A., Rhee S.K. Wear mechanisms of toughening zirconias // *Ceram. Eng. And Sci. Proceed.* 1985. No. 7. P. 1040–1058.

## REFERENCES

1. Trester P.W., McKelvey T.E., Doll D.W., Sevier D.L., Ulrickson M.A. Selection and qualification of materials for relative motion and electrical isolation in a vacuum environment. *Thin Solid Films*, 1984, vol. 119, pp. 113–120.
2. Nosovskiy I.G. The study of friction and wear processes for certain diffusion and detonation coatings in vacuum. *Trenie i iznos* [Frict. Wear], 1983, vol. 4, no. 5, pp. 796–800 (in Russ.).
3. Puzryakov A.F. Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya: ucheb. posobie po kursu “Tekhnologiya konstruksiy iz metallokompozitov” [Theoretical foundations of plasma spray technology: textbook for the course “Technology of metallic composite structures”]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2008. 360 p.
4. Zatz I.J. Dynamic analysis of the TFTR bumper limiter. *Nucl. Eng. Des.*, 1987, vol. 4, pp. 141–148.
5. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 358 p.
6. Lee S.W., Hsu S.H., Shen M.C. Ceramic wear maps: zirconia. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1993, vol. 76, no. 8, pp. 1937–1947.
7. Becker P.C., Libsch T.A., Rhee S.K. Wear mechanisms of toughening zirconias. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 1985, no. 7, pp. 1040–1058.

Статья поступила в редакцию 2.10.2012

Андрей Николаевич Зайцев — аспирант кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области износостойких антифрикционных электроизоляционных покрытий, применяемых в особо ответственных узлах металлорежущих станков и реакторах синтеза легких ядер. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.N. Zaitsev — post-graduate of “Metal-Cutting Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of the wear-resistant antifriction electrical-insulation coatings used in very critical joints of metal-cutting machines, in reactors for light-nuclei fusion.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Виталий Александрович Максимов — аспирант кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области износостойких антифрикционных электроизоляционных покрытий, применяемых в особо ответственных узлах металлорежущих станков и реакторах синтеза легких ядер.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Maksimov — post-graduate of “Metal-Cutting Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of the wear-resistant antifriction electrical-insulation coatings used in very critical joints of metal-cutting machines, in reactors for light-nuclei fusion.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.