

УДК 621.793.74:621:793.79

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-12-23

# Сравнительный анализ физико-механических свойств газотермических радиационно-стойких электроизоляционных покрытий в зависимости от метода нанесения

А.Н. Зайцев<sup>1</sup>, Ю.П. Александрова<sup>2</sup>, А.Г. Ягопольский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, А-80, ГСП-3

## A Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Gas-Thermal Radiation-Resistant Electrical Insulating Coatings Depending on the Application Method

A.N. Zaytsev<sup>1</sup>, U.P. Aleksandrova<sup>2</sup>, A.G. Yagopolskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, A-80, GSP-3

@ e-mail: skadi221@gmail.com

**i** Возрастающие требования к надежности тяжело нагруженных узлов трения типа опор модулей blankets (теплонапряженных панелей первой стенки и соединителей модулей) строящегося экспериментального термоядерного реактора ИТЭР определяют параметры поиска оптимального способа газотермического напыления радиационно стойких электроизоляционных покрытий  $Al_2O_3$  и  $MgAl_2O_4$ . Экстремальные условия эксплуатации деталей с электроизоляционным покрытием модулей blankets (жесткие гамма- и нейтронное излучения, высокий вакуум и повышенная температура, значительные статические и ударные нагрузки, фрикционные силы при сдвиге) диктуют повышенные требования к физико-механическим свойствам, химической чистоте и кристаллической структуре оксидной керамики, обеспечивающей минимальную деградацию свойств в условиях радиационного облучения. В промышленном производстве к конкурирующим методам нанесения электроизоляционного покрытия толщиной 0,1...0,5 мм относятся плазменное, детонационное и высокоскоростное напыление. Накопленный опыт практического применения различных способов газотермического напыления электроизоляционных покрытий в совокупности с результатами лабораторных, стендовых и реакторных испытаний позволит определить оптимальный метод напыления для модулей blankets термоядерного реактора ИТЭР.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, алюмомагнезиальная шпинель, электроизоляционное покрытие, газотермическое напыление, модули blankets ИТЭР, радиационное облучение

**i** The increasing demands to reliability of heavily loaded friction units such as blanket module supports (enhanced heat flux panels of the first wall, blanket module connectors) of the

ITER experimental fusion reactor under construction, determine search parameters of an optimal method of thermal spraying of radiation-resistant electrical insulating coatings (EIC)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Extreme operating conditions of the blanket module parts with EIC (hard neutron and  $\gamma$ -radiation, high vacuum and high temperature, static and impact loads, frictional forces during shear) dictate strict requirements to physical and mechanical properties, chemical purity and crystal structure of oxide ceramics that provides minimal degradation of properties under the conditions of radiation exposure. In industrial production there are three competing methods of EIC deposition with the thickness of 0.1–0.5 mm, that are plasma spraying, detonation gun spraying and high velocity oxygen fuel spraying. The accumulated experience of practical application of various methods of thermal EIC spraying in combination with the results of laboratory, bench and reactor tests will make it possible to determine the optimal method of spraying for the ITER blanket modules.

**Keywords:** alumina, alumomagnesian spinel, electrical insulating coating, thermal spraying, ITER blanket modules, irradiation

В рамках реализации международного проекта по строительству экспериментального термоядерного реактора ИТЭР в 2014 г. Российская Федерация заключила ряд договоров поставки компонентов модулей blankets, в конструкциях которых применены изделия с радиационно стойким электроизоляционным покрытием (ЭИП) толщиной  $h_n = 0,25 \dots 0,30$  мм. Внутренняя поверхность вакуумной камеры реактора ИТЭР ( $\sim 600 \text{ м}^2$ ) имеет систему защиты (состоящую из 440 модулей размерами  $\sim 1500 \times 1000 \times 450$  мм), воспринимающую потоки быстрых нейтронов  $\Phi = 2,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  (за расчетный период работы реактора), гамма-излучение мощностью дозы  $P_\gamma = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Р/с}$  и тепловые нагрузки до  $4,7 \text{ МВт/м}^2$ .

В процессе эксплуатации реактора ИТЭР возможно развитие плазменных неустойчивостей, приводящих к срыву плазмы (не более 50), следствием которых является пробой токов силой до 137 кА и длительностью до 300 мс через системы крепления модулей на корпус вакуумной камеры, а также значительные (до 2,6 кДж) ударные нагрузки, влекущие за собой вибрацию и сдвиговые перемещения деталей с ЭИП до 1,5 мм за цикл работы реактора. Сдвиговые напряжения при малых линейных и угловых перемещениях изделий с ЭИП, вызванных флуктуацией температурных полей и вибрацией при срывах плазмы, повышают требования к адгезионной/когезионной прочности ЭИП.

Работоспособность ЭИП модулей blankets будет зависеть не только от радиационной стойкости материала (допустимого уровня падения электроизоляционных свойств) в диапазоне температуры  $20 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , но и от способности покрытия воспринимать статические и

динамические нагрузки. Принимая во внимание повышенные требования к надежности реакторной техники, выбор рационального метода нанесения ЭИП должен определяться совокупностью физико-механических свойств формируемого покрытия (с учетом влияния ионизирующего излучения, температуры на электроизоляционные свойства) и гарантированной возможностью среднесерийного производства вне зависимости от геометрических особенностей напыляемой поверхности изделий.

Цель работы — научно обоснованный выбор оптимального метода газотермического напыления ЭИП применительно к изделиям модулей blankets ИТЭР.

**Требования, предъявляемые к изделиям с ЭИП модулей blankets.** Модули blankets ИТЭР являются одними из самых напряженных элементов конструкции вакуумной камеры, так как служат первым защитным барьером на пути плазмы. К особенностям эксплуатации изделий с ЭИП модулей blankets относятся значительные циклически меняющиеся (знакопеременные) механические нагрузки на панелях первой стенки (ППС) и соединителей модулей (СМ) (табл. 1) [1–4], которые могут привести к преждевременному разрушению ЭИП (растрескиванию, отслаиванию, образованию сколов и др.) при низких показателях адгезионной/когезионной прочности.

Покрытие наносят на два типа материала подложки — жаропрочный сплав Инконель 718 (Alloy 718) и алюминиевую бронзу с высоким (4...6 %) содержанием никеля. Для обеспечения требуемой прочности сцепления (табл. 2) [2, 3, 5]

Таблица 1

## Расчетные параметры эксплуатации изделий с ЭИП модулей blankets ИТЭР

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Доза радиационного повреждения	$D_n$	сна	0,15...0,50
Плотность полного потока быстрых нейтронов	$\varphi$	$\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{17}$
Тепловая нагрузка	$q_s$	МВт/м <sup>2</sup>	$\leq 4,7$
Средняя/максимальная объемная температура ЭИП	$T$	°С	20...250/400
Количество термических циклов за весь период эксплуатации ППС/СМ реактора	–	цикл	15 000/30 000
Время горения/паузы плазмы	$\tau$	с	400/1 400, 3 000/9 000
Среднее/максимальное контактное давление на поверхности ЭИП	$p_a$	МПа	3...350/500
Среднее/максимальное сдвигающее усилие на поверхности ЭИП при коэффициенте трения $f = 0,6$	$\tau_{\text{сд}}$	МПа	2...210/300
Ударная нагрузка длительностью 0,3 с на ЭИП ППС/СМ	$J$	кДж	500; 750/2 000; 2 600
Сжимающая нагрузка на ЭИП ППС	$N$	кН	450 (8 000 циклов); 650 (1 цикл)
Сжимающая нагрузка на ЭИП СМ	$N$	кН	1 500 (8 000 циклов); 2 000 (1 цикл)
Постоянное напряжение	$U$	В	$\leq 20$
Глубина вакуума	$p_{\text{вак}}$	Па	$10^{-6} \dots 10^{-5}$

Таблица 2

## Качественные параметры ЭИП изделий модулей blankets ИТЭР до облучения

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Сопротивление изоляции*	$R$	Ом	$\geq 10^9$
Сопротивление изоляции при облучении	$R$	Ом	$\geq 10^5$
Пробивное напряжение	$U_{\text{пр}}$	кВ	$> 1$
Отсутствие измеряемого тока короткого замыкания при постоянном напряжении 12 В и силе тока в цепи 500 А	$I_{\text{к.з}}$	А	0
Толщина покрытия	$h_{\text{п}}$	мм	0,25...0,30
Шероховатость покрытия	$Ra$	мкм	$\leq 1,6$
Адгезионная прочность сцепления	$\sigma_{\text{сц}}$	МПа	$\geq 20$
Пористость покрытия	$P_{\text{общ}}$	%	$< 10$
Допустимые потоки газовыделения изотопов водорода/примесей из ЭИП в вакууме при температуре $T = 100$ °С	–	$\text{м}^3\cdot\text{Па}/\text{с}$	$10^{-7}/10^{-9}$

\* Основное требование к электроизоляции изделий модулей blankets.

технологический процесс газотермического напыления включает в себя струйно-абразивную обработку и нанесение промежуточного подслоя толщиной 0,05...0,08 мм из никель-

алюминиевого (ПН85Ю15, NiAl) или нихромового (X20Н80, NiCr) сплавов. После нанесения покрытия сопрягаемые поверхности изделий подвергаются шлифовальной обработке без при-

Таблица 3

Требуемый химический состав ЭИП изделий модулей blankets ИТЭР

Материал покрытия	Содержание, % мас.					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	≥ 69,5	27...30	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 99,4	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1

менения смазочно-охлаждающей жидкости. Значения требуемой шероховатости поверхности приведены в табл. 2.

Удельная электрическая проводимость керамических покрытий в экстремальных условиях эксплуатации вакуумной камеры ИТЭР (см. табл. 1) имеет вид

$$\sigma_v(\rho_v) = \sigma_n + \sigma_c + \sigma_p,$$

где  $\rho_v$  — удельное объемное сопротивление ЭИП;  $\sigma_n$  — примесная проводимость;  $\sigma_c$  — собственная ионная составляющая проводимости;  $\sigma_p$  — проводимость, вызванная воздействием радиационного облучения.

Поскольку удельные объемное  $\rho_v$  и поверхностное  $\rho_s$  электрические сопротивления ЭИП зависят от процентного содержания примесей, фазового состава, пористости, наличия трещин на поверхности и толщины покрытия  $h_n$ , к порошковым материалам и нанесенным оксидным покрытиям (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) предъявляются требования по химическому составу и общей пористости (табл. 2, 3) [3, 6–10]. Диэлектрические свойства оксидной керамики будут определяться не только исходной чистотой порошкового материала, но и количеством вносимых примесей при нанесении ЭИП.

Изделия с ЭИП должны соответствовать вакуумному классу VQC1 по стандарту международной организации ИТЭР [5]. Допустимый уровень газовой выделенности при температуре  $T = 100$  °C приведен в табл. 2.

**Сравнение методов газотермического напыления оксидных покрытий Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.** При выборе оптимального метода газотермического напыления ЭИП для изделий модулей blankets необходимо учитывать особенности каждого метода и теплофизические свойства порошковых материалов. На сегодняшний день тугоплавкие оксидные покрытия можно получить тремя основными методами напыления: плазменным (атмосферным (APS — Atmospheric Plasma Spraying) и в динамическом вакууме

(LPPS — Low Pressure Plasma Spraying)), высокоскоростным (HVOF — High Velocity Oxygen Fuel) и детонационным (DGS — Detonation Gun Spraying). Применяемые порошковые материалы (оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, алюмомагнезиальная шпинель MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) в зависимости от метода газотермического напыления представлены в табл. 4 [3, 6–10].

Свойства оксидных покрытий определяются следующими параметрами:

- прочностью сцепления между отдельными частицами (splats) и слоями покрытия;
- пористостью, дефектами (возникающими вследствие кристаллизации, газовой выделенности, разбрызгивания и др.);
- структурой, химическим и фазовым составом, деструкцией при химико-термическом воздействии газовой струи;
- остаточными напряжениями как в объеме материала, так и в отдельных частицах покрытия.

**Атмосферное плазменное напыление** основано на создании высокотемпературной (табл. 5) высокоэнтальпийной струи, позволяющей наносить все виды тугоплавких порошковых материалов с минимальным содержанием примесей щелочных металлов благодаря их температурной деструкции (≥ 0,05 %). Используемые в процессе напыления на воздухе смеси плазмообразующих газов (Ar, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, He, NH<sub>3</sub>) минимизируют возможность попадания примесей в формируемое покрытие. Экономичность процесса и относительная простота технологического оборудования такого метода напыления способствовали его распространению в авиационной, атомной, автомобильной и нефтегазовой промышленности.

**Плазменное напыление в динамическом вакууме** ( $p_{\text{вак}} = 10...24$  кПа) [11–13] вследствие большей скорости частиц порошкового материала (см. табл. 5) позволяет повысить плотность и адгезионную прочность, снизить пористость и исключить возможность попадания примесей из воздуха.

Таблица 4

**Фракционный и химический состав порошковых материалов, применяемых для газотермического напыления**

Марка порошка (фирма-изготовитель)	Материал (метод напыления)	Фракция, мкм	Содержание, % мас.					
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O
(Ceram GmbH)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (APS)	10...40	99,47	0,04	0,03	0,02	0,02	0,10
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (HVOF, DGS)	5...25	99,74	0,04	0,03	0,01	0,03	0,13
	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (APS)	10...40	71,61	28,22	0,04	0,09	0,02	-
	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (HVOF, DGS)	5...25						
GTV 40.70.1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO 72/28 (GTV GmbH)	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (APS)	20...45	72,20	27,50	0,04	0,10	0,06	0,10
Amperit 740.000 Amperit 740.008 (H.C. Stack)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (HVOF, DGS)	5...22 5...20	99,55	-	0,10	-	0,05	0,30
Amperit 740.001 Amperit 740.002 (H.C. Stack)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (APS)	22...45 45...90						
Metco 6100 (Sulzer Metco Inc.)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (APS)	11...62	99,950	-	0,002	0,020	0,008	0,006
Amdry 6062 (Sulzer Metco Inc.)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (APS)	22...45	99,50	-	0,02	0,05	0,05	0,30
Metco 105SFP (Sulzer Metco Inc.)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (APS)	4...31	99,50	-	0,01	0,01	0,03	0,15

Таблица 5

**Характеристики методов газотермического напыления ЭИП**

Метод	Температура нагрева подложки T <sub>н.п.</sub> , °C	Температура газовой струи T <sub>стр.</sub> , °C	Дистанция напыления L <sub>нап.</sub> , мм	Скорость частиц v <sub>ч.</sub> , м/с	Расход материала P <sub>мат.</sub> , кг/ч
APS, LPPS	180...200	5 000...55 000	75...250	200...500 (APS), ≤ 800 (LPPS)	4...15
HVOF	-	2 800...3 200	230...250, 350...380	650...1 000	2...8
DGS	200...250	2 200...5 500	500...100	600...1 300	3...6

**Детонационное напыление** — импульсный метод, разработанный для нанесения карбидных покрытий. Детонация горючей смеси обеспечивает высокие скорости напыляемых частиц (см. табл. 5), что значительно улучшает качественные показатели ЭИП (адгезионную прочность, микротвердость, плотность и др.). Количество выстрелов в среднем составляет от 4 до 10 в секунду. Данная технология не нашла широкого применения в промышленности вследствие сложности оборудования, высокой

стоимости получаемых покрытий, низкой производительности, прерывистости процесса напыления и повышенных требований к безопасности.

**Высокоскоростное напыление**, являющееся разновидностью пламенного метода, характеризуется непрерывностью процесса горения топливокислородной смеси при среднем избыточном давлении воздуха в камере сгорания, равном 0,3...0,5 МПа [14], что дает возможность исключить недостатки детонационного

напыления. Распространенность использования ацетиленокислородного топлива при высокоскоростном и детонационном методах объясняется большей, чем у других горючих смесей, теплотой сгорания.

Наибольшие значения температуры газовой струи и времени нахождения частицы в тепловом потоке достигаются при плазменном напылении (см. табл. 5). Увеличение скорости частиц при нанесении ЭИП методами HVOF и DGS положительно сказывается на механических свойствах ЭИП, позволяя получать более плотные прочные покрытия, чем при применении технологии APS (табл. 6) [1, 6–7, 9, 15, 16].

В методах APS, DGS и HVOF исходные материалы ( $Al_2O_3$  (корунд)), примеси 0,23...0,50 %;  $MgAl_2O_4$ , примеси 0,15...0,50) покрытий подаются в распыляющее устройство в виде порошка, различием является фракционный состав напыляемых частиц (см. табл. 4). Помимо указанных оксидных соединений металлов

(см. табл. 3) в порошковых материалах и ЭИП могут присутствовать примеси оксидов ( $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  и др.).

Подача материала в распыляющее устройство (плазменную струю, газовое пламя и т.д.) в виде суспензии нанопорошка (SPS — Suspension Plasma Spraying [17], HVFSFS — High Velocity Suspension Flame Spraying [18]) является одним из перспективных способов улучшения механических характеристик, не получившим в настоящее время распространения в промышленности вследствие низкого уровня технологичности.

Фазовые превращения, происходящие в процессе формирования покрытия  $Al_2O_3$  методами APS, DGS и HVOF, выражаются в преобразовании стабильной фазы  $\alpha-Al_2O_3$  в метастабильные  $\gamma$ -,  $\beta$ -,  $\theta$ - и  $\eta-Al_2O_3$  [9, 19–22]. Повышенные электроизоляционные и радиационные свойства присущи  $\alpha$ -модификации  $Al_2O_3$ , которая под действием реакторного облучения мо-

Таблица 6

Физико-механические свойства ЭИП в зависимости от метода напыления

Свойство	Материал (метод)					
	$Al_2O_3$ (спекание)	$Al_2O_3$ (APS)	$Al_2O_3$ (DGS)	$Al_2O_3$ (HVOF)	$MgAl_2O_4$ (APS)	$MgAl_2O_4$ (HVOF)
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,90...3,95	3,20...3,56	3,40...3,50	–	3,58...3,60	–
Общая пористость $P_{общ}$ , %	0...0,1	3,0...9,5; < 2*	1,0...2,0	< 1,0	4,0...10,0	< 1,0
Микротвердость $H_{\mu}$ , ГПа	20,5...23,0	4,0...11,0; < (10,5...13,2)*	11,0...13,0	11,0...12,0	5,9...8,8	–
Предел прочности при сжатии $\sigma_{в,с}$ , МПа	1 600...3 500	522...801	–	–	–	–
Предел прочности при растяжении $\sigma_{в,р}$ , МПа	350	133...136	147...150	–	98	–
Модуль упругости $E$ , ГПа	380	39...184	–	–	–	–
Прочность сцепления покрытия с подложкой $\sigma_{сц}$ , МПа	–	10...38	60...100	50...82	10...50	–
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	20...30	2,0...2,4	2,7...2,9	–	2,1...2,5	–
Коэффициент теплового расширения $\beta_p \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>	8,0...8,5	6,8...8,0	6,8	–	7,6...8,7	–
Удельное объемное сопротивление $\rho_v$ , Ом·см, при температуре $T = 20$ °С	$\geq 1015$	1012...1014	1011...1013	1011...1013	1013...1015	1013...1014
* LPPS.						

жет переходить в  $\gamma$ -модификацию. Сравнительный количественный фазовый анализ исходных порошковых материалов (powder) и получаемых покрытий (coating)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в зависимости от метода напыления приведен на рис. 1, где  $I$  — интенсивность рассеянного излучения [9, 20–21].

На рис. 1 зависимости интенсивности рассеянного излучения от дифракционного угла  $2\theta$  приведены в относительных единицах — cps (counts per second). Содержание фазы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в плазменных ЭИП достигает 4 %, значительно уступая по этому показателю аналогичным покрытиям при детонационном (~30 %) и высокоскоростном (~20 %) напылении [9]. Соотношение основных фаз  $\alpha$ - и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  существенно зависит от технологических режимов и качества исходного порошкового материала. Гранцентрированная кубическая решетка алюмомagneзильной шпинели остается неизменной как в процессе напыления (см. рис. 1), так и при малых дозах облучения [1].

Согласно работе [23], пористость плазменных ЭИП, составляющая 4...10 %, не оказывает значительного влияния на удельные сопротив-

ления  $\rho_v$  и  $\rho_s$  в среде аргона и вакуума. Ожидаемое падение удельного объемного сопротивления  $\rho_v$  ЭИП  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , напыляемого методом APS, под действием ионизирующего облучения и повышенной температуры в реакторе ИТЭР составит 3–4 порядка [1, 24], что гарантированно обеспечит требуемое сопротивление изоляции ( $R \geq 10^5 \text{ Ом}$ ) при постоянном напряжении (20 В) в условиях  $\gamma$ -нейтронного облучения и температуры до 400 °С.

Обзор литературных источников не выявил работ, связанных с исследованием влияния радиационного облучения и температуры на проводимость покрытий  $\sigma_v(\rho_v^{-1})$ , напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$  и электрическую прочность  $E_{\text{пр}}$  керамики ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , шпинель  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), полученной методами DGS и HVOF (рис. 2) [1, 9, 25]. Кроме того, применение топливокислородной смеси на основе углеводородов при методах DGS и HVOF не может гарантировать 100%-ное выгорание органических соединений, что неизбежно приведет к осаждению продуктов сгорания (углерода) в формируемом покрытии  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

В работе [22] приведены данные рентгеноструктурного анализа плазменно-детонацион-

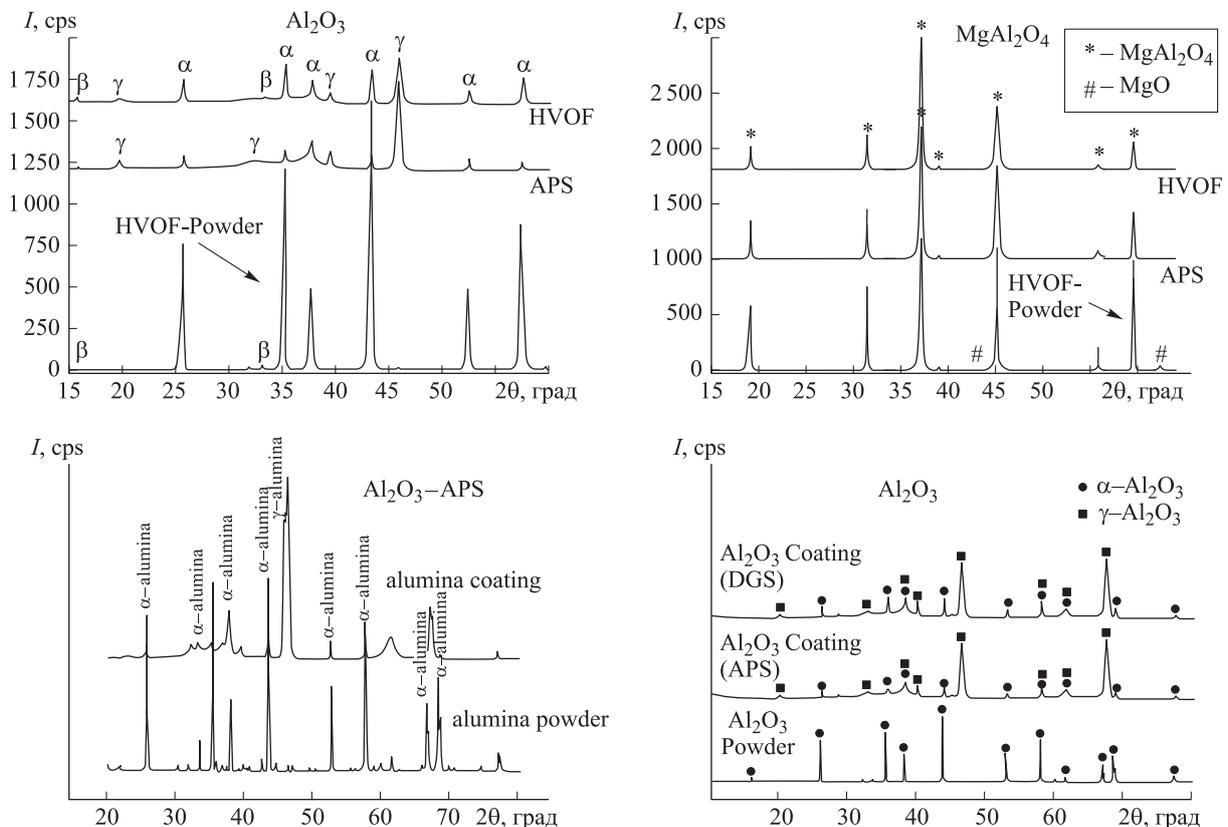


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы исходных порошковых материалов и газотермических покрытий ЭИП

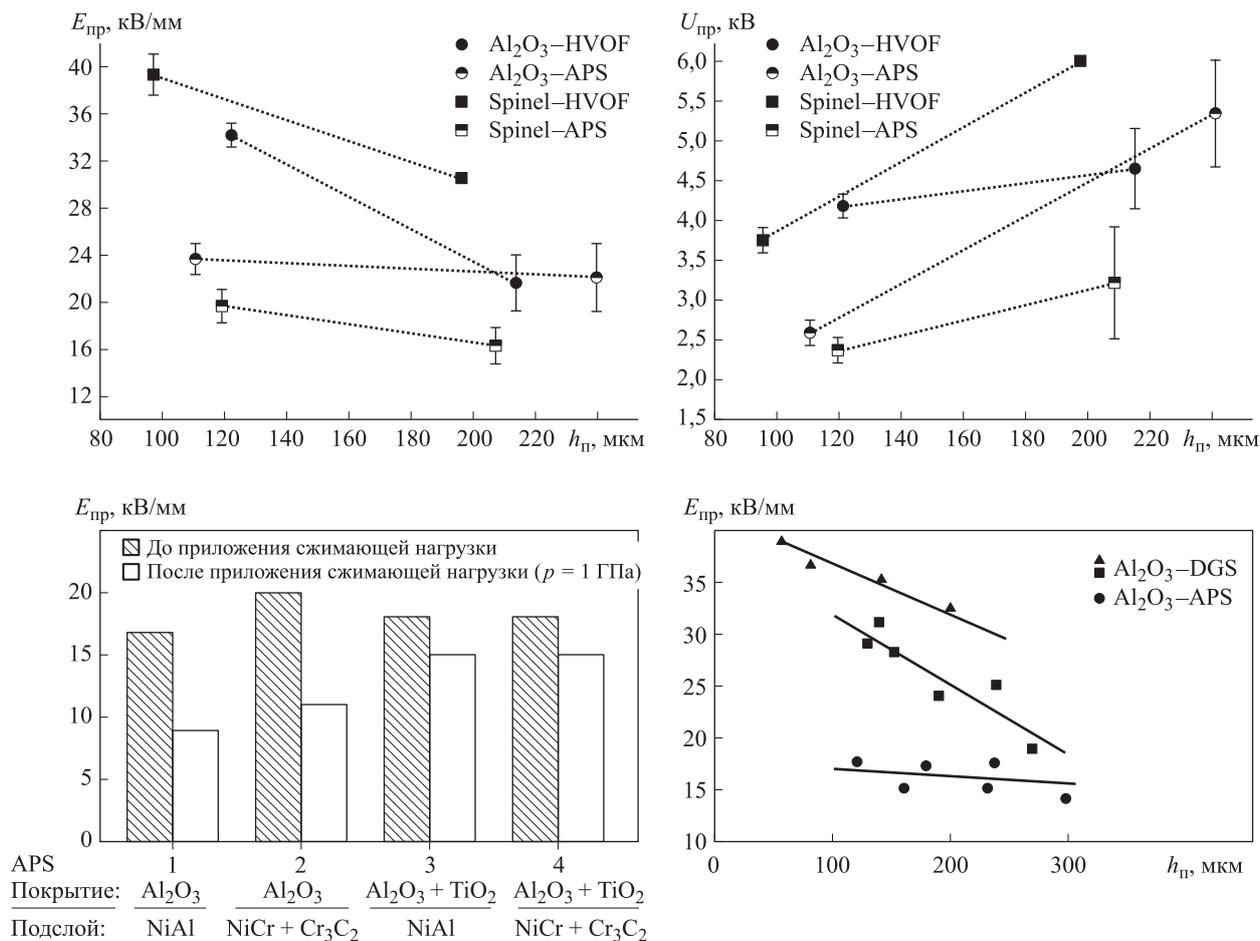


Рис. 2. Зависимости электрической прочности  $E_{пр}$  и напряжения пробоя  $U_{пр}$  ЭИП от метода напыления и толщины покрытия  $h_{п}$

ного покрытия на основе  $Al_2O_3$ , в котором выявлено значительное науглероживание, причем максимальная концентрация углерода на поверхности составляет 20 ат. % (плазмообразующий газ пропан-бутан). Проведенные исследования электроизоляционных свойств ЭИП, напыленных методами APS, DGS и HVOF, без облучения на воздухе при комнатной температуре не показали увеличения проводимости детонационных и высокоскоростных покрытий (см. рис. 2). Следует учитывать, что в условиях реакторного облучения и повышенных температур даже незначительное содержание примесей органических соединений может привести к резкому возрастанию проводимости ЭИП.

## Выводы

1. Среди рассмотренных методов (APS, DGS, HVOF) высокоскоростное и детонационное напыление позволяют получать практически одинаковые по свойствам ЭИП, значительно

превосходящие по механическим показателям плазменные покрытия. Высокоскоростное напыление обладает большей технологичностью, чем детонационное.

2. Для подтверждения возможности применения детонационного и высокоскоростного напыления при создании изделий с ЭИП реакторной техники необходимо провести дополнительные исследования по влиянию примесей на электроизоляционные свойства в условиях ионизирующего облучения и повышенных температур.

3. Наряду с детонационным и высокоскоростным методами плазменное напыление имеет такие достоинства, как возможность создания покрытия с высокими электроизоляционными свойствами при минимальном содержании примесей оксидов щелочных металлов, универсальность и легкость отработки технологии в зависимости от требуемых физико-механических и геометрических свойств изделия.

4. Недостаточно оптимизированная технология нанесения плазменных ЭИП может привести к минимальной адгезионной/когезионной прочности ( $\sigma_{\text{сд min}} = 10 \dots 15$  МПа) с неизбежным отслаиванием покрытия в процессе эксплуатации реактора ИТЭР.

## Литература

- [1] *Material Assessment report 3.6 Electrical-Insulation Ceramic Coating*. ITER\_D\_22eYPW v. 2.0., 2004.
- [2] *Specification for the supply of the Blanket System Components with Electrical Insulation Coatings*. ITER\_D\_25QF6 v. 1.5.
- [3] *Technical Specification Insulation Coatings for the Blanket System Components*. ITER\_D\_UKP7G3 v.1.1., 2017.
- [4] Драгунов Ю.Г., Лешуков А.Ю., Стребков Ю.С., Кириллов С.Ю., Макаров С.В., Трофимович П.Д., Ёлкин В.Н., Свириденко М.Н., Размеров А.В., Паршутин Е.В., Хомяков С.Э., Колганов В.Ю., Сафронов В.М., Путрик А.Б. Разработка конструкций, изготовление и экспериментальное обоснование работоспособности компонентов системы blankets ИТЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 2016, т. 39, вып. 4, с. 13–26.
- [5] *ITER Vacuum Handbook*. ITER\_D\_2EZ9UM v. 2.3.
- [6] Toma F.-L., Scheitz S., Berger L.-M., Sauchuk V., Kuznezoff M., Thiele S. Comparative study of the electrical properties and characteristics of thermally sprayed alumina and spinel coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20(1–2), pp. 195–204.
- [7] Matikainen V., Niemi K., Koivuluoto H., Vuoristo P. Abrasion, Erosion and Cavitation Erosion Wear Properties of Thermally Sprayed Alumina Based Coatings. *Coatings*, 2014, vol. 4(1), pp. 18–36.
- [8] Bolelli G., Cannillo V., Lusvardi L., Manfredini T. Wear behavior of thermally sprayed ceramic oxide coatings. *Wear*, 2006, vol. 261, pp. 1298–1315.
- [9] Niemi K., Hakalahti J., Hyvärinen L., Laurila J., Vuoristo P., Berger L.-M., Toma F.-L., Shakhverdova I. Influence of Chromia Alloying on the Characteristics of APS and HVOF Sprayed Alumina Coatings. *Conference: ITSC 2011, International Thermal Spray Conference & Exhibition*, 27–29 September 2011, Hamburg, Germany, 2011, vol. 276, pp. 1–6.
- [10] Tosaki T., Kobayashi Y., Ohta K., Kitamura J. Comparable Study of Electrical and Mechanical Properties in Plasma Sprayed Alumina Coatings. *Conference: ITSC 2013, International Thermal Spray Conference & Exhibition*, 13–15 May 2013, Busan, South Korea, 2013, pp. 312–317.
- [11] Ouyang J.H., Sasaki S. Tribological characteristics of low-pressure plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating from room temperature to 800°C. *Tribology International*, 2005, vol. 38, pp. 49–57.
- [12] Deng C.-M., Zhou K.-S., Liu M., Deng C.-G., Song J.-B., Zheng Z.-G. Characteristics of Low Pressure Plasma Sprayed Alumina Coating. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, vol. 24(1), pp. 117–121.
- [13] *Sulzer-Metco*. Available at: <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Turbomachinery-Services/Repair-Services/Coatings/Low-Pressure-Plasma-Spray-LPPS> (accessed 21 December 2017).
- [14] Балдаев Л.Х., ред. *Газотермическое напыление*. Москва, ООО «Старая Басманная», 2015. 540 с.
- [15] Мчедлов С.Г. Газотермическое напыление в технологии упрочнения и восстановления деталей машин (обзор). Ч. 1. Газопламенное и детонационное напыление (обзор). *Сварочное производство*, 2007, № 10, с. 35–45.
- [16] Штерцер А.А., Злобин С.Б., Ульяницкий В.Ю. Термоциклические свойства градиентных покрытий керамика-металл, полученных детонационным напылением. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2012, № 7, с. 23–26.
- [17] Tesa T., Musalek R., Medricky J., Kotlan J., Lukac F., Pala Z., Ctibor P., Chraska T., Houdkova S., Rimal V., Curry N. Development of suspension plasma sprayed alumina coatings with high enthalpy plasma torch. *Surface and Coating Technology*, 2017, vol. 325, pp. 277–288.

- [18] Killinger F., Kuhn M., Gadow R. High-velocity suspension flame spraying (HVSFS), a new approach for spraying nanoparticles with hypersonic speed. *Surface and Coating Technology*, 2006, vol. 201, is. 5, pp. 1922–1929.
- [19] Müller J.-H., Kreye H. Mikrostruktur und Eigenschaften von thermisch gespritzten Aluminiumoxidschichten. *Scweissen und Schneiden*, 2001, vol. 53(6), pp. 320–326.
- [20] Shakhova I., Mironov E., Azarmi F., Safonov A. Thermo-electrical properties of the alumina coatings deposited by different thermal spraying technologies. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, is. 17, pp. 15392–15401.
- [21] Morks M.F., Cole I., Corrigan P., Kobayashi A. Electrochemical characterization of plasma sprayed alumina coatings. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 107–111.
- [22] Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй. *Успехи физических наук*, 2005, т. 175, № 5, с. 515–544.
- [23] Кудинов В.В., Иванов В.М. *Нанесение плазмой тугоплавких покрытий*. Москва, Машиностроение, 1981. 188 с.
- [24] Зайцев А.Н., Лешуков А.Ю., Дубинин Г.В., Свириденко М.Н., Александрова Ю.П., Сачек Б.Я., Мезрин А.М. Расчет толщин электроизоляционных плазмо-напыленных оксидных покрытий  $Al_2O_3$  в изделиях бланкета ИТЭР. *Известия Российской Академии Наук. Энергетика*, 2016, № 1, с. 79–91.
- [25] Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С., Штерцер А.А. Детонационные покрытия из оксидов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015, № 9(129), с. 37–44.

## References

- [1] *Material Assessment report 3.6 Electrical-Insulation Ceramic Coating*. ITER\_D\_22eYPW v. 2.0., 2004.
- [2] *Specification for the supply of the Blanket System Components with Electrical Insulation Coatings*. ITER\_D\_25QF6 v. 1.5.
- [3] *Technical Specification Insulation Coatings for the Blanket System Components*. ITER\_D\_UKP7G3 v.1.1., 2017.
- [4] Dragunov Iu.G., Leshukov A.Iu., Strebkov Iu.S., Kirillov S.Iu., Makarov S.V., Trofimovich P.D., Elkin V.N., Sviridenko M.N., Razmerov A.V., Parshutin E.V., Khomiakov S.E., Kolganov V.Iu., Safronov V.M., Putrik A.B. Razrabotka konstruksii, izgotovlenie i eksperimental'noe obosnovanie rabotosposobnosti komponentov sistemy blanketa ITER [Development of design, manufacture and experimental proof of operational availability of ITER blanket components]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Termoiadernyi sintez* [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion]. 2016, vol. 39, is. 4, pp. 13–26.
- [5] *ITER Vacuum Handbook*. ITER\_D\_2EZ9UM v. 2.3.
- [6] Toma F.-L., Scheitz S., Berger L.-M., Sauchuk V., Kuznezoff M., Thiele S. Comparative study of the electrical properties and characteristics of thermally sprayed alumina and spinel coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20(1–2), pp. 195–204.
- [7] Matikainen V., Niemi K., Koivuluoto H., Vuoristo P. Abrasion, Erosion and Cavitation Erosion Wear Properties of Thermally Sprayed Alumina Based Coatings. *Coatings*, 2014, vol. 4(1), pp. 18–36.
- [8] Bolelli G., Cannillo V., Lusvarghi L., Manfredini T. Wear behavior of thermally sprayed ceramic oxide coatings. *Wear*, 2006, vol. 261, pp. 1298–1315.
- [9] Niemi K., Hakalahti J., Hyvärinen L., Laurila J., Vuoristo P., Berger L.-M., Toma F.-L., Shakhverdova I. Influence of Chromia Alloying on the Characteristics of APS and HVOF Sprayed Alumina Coatings. *Conference: ITSC 2011, International Thermal Spray Conference & Exhibition, 27–29 September 2011, Hamburg, Germany, 2011*, vol. 276, pp. 1–6.
- [10] Tosaki T., Kobayashi Y., Ohta K., Kitamura J. Comparable Study of Electrical and Mechanical Properties in Plasma Sprayed Alumina Coatings. *Conference: ITSC 2013, International Thermal Spray Conference & Exhibition, 13–15 May, 2013, Busan, South Korea, 2013*, pp. 312–317.

- [11] Ouyang J.H., Sasaki S. Tribological characteristics of low-pressure plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating from room temperature to 800°C. *Tribology International*, 2005, vol. 38, pp. 49–57.
- [12] Deng C.-M., Zhou K.-S., Liu M., Deng C.-G., Song J.-B., Zheng Z.-G. Characteristics of Low Pressure Plasma Sprayed Alumina Coating. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, vol. 24(1), pp. 117–121.
- [13] Sulzer-Metco. Available at: <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Turbomachinery-Services/Repair-Services/Coatings/Low-Pressure-Plasma-Spray-LPPS> (accessed 21 December 2017).
- [14] *Gazotermicheskoe napylenie* [Thermal spraying]. Ed. Baldaev L.Kh. Moscow, ООО «Staraia Basmannaia» publ., 2015. 540 p.
- [15] Mchedlov S.G. Gazotermicheskoe napylenie v tekhnologii uprochneniia i vosstanovleniia detalei mashin (obzor). Ch. 1. Gazoplamennoe i detonatsionnoe napylenie (obzor) [Gas-thermal coating in machine components strengthening and reconditioning processes: A Review. Part 1. Flame and explosion spraying]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production]. 2007, no. 10, pp. 35–45.
- [16] Shtertser A.A., Zlobin S.B., Ul'ianitskii V.Iu. Termotsiklicheskie svoystva gradientnykh pokrytii keramika-metall, poluchennykh detonatsionnym napyleniem [Thermocyclic properties of gradient ceramics-metal coatings made by detonation spraying]. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2012, no. 7, pp. 23–26.
- [17] Tesa T., Musalek R., Medricky J., Kotlan J., Lukac F., Pala Z., Ctibor P., Chraska T., Houdkova S., Rimal V., Curry N. Development of suspension plasma sprayed alumina coatings with high enthalpy plasma torch. *Surface and Coating Technology*, 2017, vol. 325, pp. 277–288.
- [18] Killinger F., Kuhn M., Gadow R. High-velocity suspension flame spraying (HVSFS), a new approach for spraying nanoparticles with hypersonic speed. *Surface and Coating Technology*, 2006, vol. 201, is. 5, pp. 1922–1929.
- [19] Müller J.-H., Kreye H. Microstructure and properties of thermally sprayed alumina coatings. *Welding and Cutting*, 2001, vol. 53(6), pp. 320–326.
- [20] Shakhova I., Mironov E., Azarmi F., Safonov A. Thermo-electrical properties of the alumina coatings deposited by different thermal spraying technologies. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, is. 17, pp. 15392–15401.
- [21] Morks M.F., Cole I., Corrigan P., Kobayashi A. Electrochemical characterization of plasma sprayed alumina coatings. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 107–111.
- [22] Pogrebniak A.D., Tiurin Iu.N. Modifikatsiia svoystv materialov i osazhdenie pokrytii s pomoshch'iu plazmennyykh strui [Modification of material properties and coating deposition using plasma jets]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences]. 2005, vol. 175, no. 5, pp. 515–544.
- [23] Kudinov V.V., Ivanov V.M. *Naneseniie plazmoi tugoplavkikh pokrytii* [Application of plasma refractory coatings]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981. 188 p.
- [24] Zaitsev A.N., Leshukov A.Iu., Dubinin G.V., Sviridenko M.N., Aleksandrova Iu.P., Sachek B.Ia., Mezrin A.M. Raschet tolshchin elektroizoliatsionnykh plazmo-napylennykh oksidnykh pokrytii  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v izdeliakh blanketa ITER [Calculation thickness of insulation plasma-sprayed oxide coating  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the parts of ITER blanket]. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2016, no. 1, pp. 79–91.
- [25] Ul'ianitskii V.Iu., Batraev I.S., Shtertser A.A. Detonatsionnye pokrytiia iz oksidov [Oxide coatings made by detonation spraying]. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2015, no. 9(129), pp. 37–44.

## Информация об авторах

**ЗАЙЦЕВ Андрей Николаевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: skadi221@gmail.com).

**АЛЕКСАНДРОВА Юлия Петровна** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическая химия». Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, А-80, ГСП-3).

**ЯГОПОЛЬСКИЙ Александр Геннадиевич** (Москва) — старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

## Information about the authors

**ZAYTSEV Andrey Nikolaevich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Metal-Cutting Machines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: skadi221@gmail.com).

**ALEKSANDROVA Yuliya Petrovna** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Physical Chemistry. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, A-80, GSP-3).

**YAGOPOLSKIY Aleksandr Gennadievich** (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Metal-Cutting Machines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайцев А.Н., Александрова Ю.П., Ягопольский А.Г. Сравнительный анализ физико-механических свойств газотермических радиационно-стойких электроизоляционных покрытий в зависимости от метода нанесения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 6, с. 12–23, doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-12-23.

### Please cite this article in English as:

Zaytsev A.N., Aleksandrova U.P., Yagopolskiy A.G. A Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Gas-Thermal Radiation-Resistant Electrical Insulating Coatings Depending on the Application Method. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 6, pp. 12–23, doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-12-23.



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

вышло в свет учебное пособие

**Ж.М. Кокуевой**

**«Управление проектами»**

Проектная деятельность сегодня характерна для экономик всех стран. Производственные предприятия внедряют методы проектного управления как наиболее эффективные способы управления. В издании изложена методология управления проектами в соответствии с Международным стандартом ISO 21500:2012, даны комментарии, разъяснения, приведены примеры из практики.

Для студентов инженерных факультетов, обучающихся по направлению подготовки 270407 «Наукоемкие технологии и экономика инноваций».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru