

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-132-140

ЗАЩИТНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ

О.В. Власова¹, Ст.С. Солнцев¹, В.С. Денисова¹, В.Г. Лепшиков¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследованы технологические покрытия на основе стеклообразующих систем $K_2O-BaO-SiO_2$ и $Na_2O-BaO-SiO_2$, применяемые для защиты от окисления циркониевых сплавов в процессе горячей деформации. Среди 12 синтезированных составов выбрана композиция с таким соотношением компонентов (стекла и модифицирующих добавок), которая обеспечивает плотное стекловидное покрытие на образцах циркониевых сплавов, предотвращает стремительное повышение значений микротвердости в приповерхностном слое металла и эффективно защищает материал от изменения массы в процессе нагрева под деформацию и длительной выдержки.

Ключевые слова: покрытие, циркониевый сплав, термообработка, окисление, защитная эмаль, обработка давлением

Для цитирования: Власова О.В., Солнцев Ст.С., Денисова В.С., Лепшиков В.Г. Защитное технологическое покрытие для циркониевых сплавов // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-132-140.

Scientific article

PROTECTIVE TECHNOLOGICAL COATING FOR ZIRCONIUM ALLOYS

O.V. Vlasova¹, St.S. Solntsev¹, V.S. Denisova¹, V.G. Lepschikov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. In this work technological coatings based on glass-forming systems $K_2O-BaO-SiO_2$ and $Na_2O-BaO-SiO_2$, used to protect zirconium alloys from oxidation during hot deformation was studied. Among 12 synthesized compositions a composition was selected with such a ratio of base glass components and modifying additives that provides a dense glassy visible coating on samples of zirconium alloys, prevents rapid increase in microhardness in near-surface layer of metal and effectively protects material from changes in mass during heating for deformation and prolonged excerpts.

Keywords: coating, zirconium alloy, heat treatment, oxidation, protective enamel, pressure treatment

For citation: Vlasova O.V., Solntsev St.S., Denisova V.S., Lepschikov V.G. Protective technological coating for zirconium alloys. *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-132-140.

Введение

Современную промышленность нельзя представить без развития энергетики. Достижения ученых в области квантовой и ядерной физики, материало- и металловедения уже нашли свое применение в создании атомных электростанций. Безопасная ядерная энергетика, безусловно, возможна, и атомные электростанции в настоящее время во

многим экологически безопаснее, чем электростанции, функционирующие на органическом топливе. Среди приоритетных направлений развития науки и ядерных технологий можно выделить разработки технологий делящихся и радиоактивных материалов, технологий переработки облученного ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами, а также разработку поглощающих элементов [1, 2]. Особое место в ядерной промышленности и энергетике занимает проблема создания и модернизации материалов, из которых конструируют области ядерных реакторов, где располагается ядерное топливо и происходит цепная реакция деления. К таким материалам относятся прежде всего циркониевые сплавы. Цирконий и его сплавы отличаются высокой пластичностью, износоустойчивостью, теплопроводностью, жаростойкостью, исключительной стойкостью к коррозии в условиях интенсивного нейтронного облучения и агрессивных средах [3, 4].

К отечественным сплавам, применяемым для решеток тепловыделяющей сборки ядерного реактора и оболочек ТВЭЛов, относятся сплавы Э110, Э635 и Э125, а к зарубежным сплавам аналогичного назначения – Zircaloy-2, Zr–2,5 % Nb, M4, MDA и HANA. Циркониевые сплавы постоянно совершенствуются, применяются сложные композиции с модифицирующими добавками олова и ниобия, варьируются значения содержания добавок кислорода и железа [5, 6].

В машиностроении цирконий применяется для таких изделий, как трубозапорная арматура и насосы, работающих в щелочных и кислотных средах.

Цирконий – материал, который при воздействии определенных факторов может изменять форму, чему способствует полиморфное ($\alpha + \beta$)-превращение. Цирконий также подвержен радиационному росту, который особенно сильно проявляется при длительном облучении (радиационная ползучесть). Циркониевые сплавы обладают высокой коррозионной устойчивостью и низким сечением поглощения тепловых нейтронов при нормальных условиях эксплуатации.

Неотъемлемой частью технологии производства полуфабрикатов циркониевых сплавов является нагрев в печах с воздушной атмосферой. Цирконий и его сплавы являются геттерными материалами (активно вступают в реакцию с кислородом на воздухе). В связи с этим высокотемпературную термическую обработку циркониевых сплавов следует проводить в вакуумных печах либо в печах с инертной атмосферой [7]. Известно, что защитные технологические покрытия эффективно защищают поверхность металлических изделий при термической обработке от окисления и газонасыщения, что позволяет термообработать их в печах с воздушной атмосферой. Для циркониевых сплавов необходимо создание покрытия, которое, кроме защиты от окисления и газонасыщения, позволит совместить температуры формирования покрытия с технологическим режимом нагрева. В то же время покрытие не должно содержать элементы, обладающие большим сечением поглощения тепловых нейтронов, такие как В, Со, W и др. [8–10]. Значительную трудность представляет разработка низкотемпературного безборного покрытия, поскольку борный ангидрид является одним из основных компонентов легкоплавких эмалей, способствует уменьшению кристаллизационной способности покрытий, увеличивает электросопротивление и химическую устойчивость. Одними из основных требований к защитным технологическим покрытиям являются хорошие смазывающие свойства и адгезия с металлом в процессе деформации.

Термическое расширение – одно из важнейших свойств покрытий. В том случае если значение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) покрытия больше, чем у металла, то при охлаждении оно остывает быстрее. Прочное соединение покрытия с металлом противодействует сжатию первого. Растягивающие усилия в покрытии более опасны, чем сжимающие [11–13]. Поэтому при подборе покрытия для

термообработки циркониевых сплавов необходимо стремиться к большому расхождению значений ТКЛР металла и покрытия, чтобы покрытие работало на растяжение. При отсутствии возможности достижения значительной разницы в значениях коэффициентов покрытия и металла применяют грунтовые слои, термодинамически инертные по отношению к цирконии, являющиеся физической преградой от окисления и создающие необходимую разность ТКЛР покрытия и подложки [14–16].

Высокотемпературное окисление циркониевых сплавов исследуют при температурах 600–1200 °С. Кислород взаимодействует с циркониевыми сплавами, начиная с 780 °С. Образуются оксидная пленка и зона под пленкой, обогащенная кислородом, в результате чего наблюдается резкое снижение пластичности. Установлено, что разрушение пленки происходит из-за фазового перехода гексагональной плотноупакованной решетки в объемноцентрированную кубическую. Несоответствие объемных факторов этих фаз приводит к изменению размеров изделий и деформации оксидных пленок. При этом цирконий имеет пониженную прочность, что приводит к появлению трещин и потере эстетического вида. Традиционные способы защиты основаны на том, чтобы сохранить цирконий. Это можно сделать с помощью изменения состояния поверхности для повышения коррозионной стойкости или нанесения защитных покрытий.

Для повышения твердости, износо- и коррозионностойкости циркониевых сплавов на их поверхности различными методами формируют функциональные покрытия, например оксидные. Оптимальными покрытиями являются те, которые включают элементы, образующие наиболее прочные оксидные пленки. Требуемой прочностью обладает оксид циркония, но при повышении температуры происходят фазовые превращения. Оксидами с меньшей теплотой образования являются оксиды алюминия и хрома. Последний позволяет обеспечить препятствие диффузии кислорода [17–19].

Известные технологии формирования на циркониевых сплавах оксидных покрытий обладают рядом недостатков, а именно большой продолжительностью процесса, технологической сложностью и токсичностью применяемых материалов, что способствует появлению новых методов формирования защитных покрытий на изделиях из циркониевых сплавов.

Цель данной работы – исследование структуры и защитного действия жаростойких покрытий на основе стекол систем $K_2O-BaO-SiO_2$ и $Na_2O-BaO-SiO_2$, содержащих модифицирующие добавки. При синтезе защитных технологических покрытий для деформирования тугоплавких малопластичных циркониевых сплавов решена проблема окисления и обезлегирования с образованием летучих оксидов ингредиентов сплавов на начальных стадиях формирования высокотемпературных покрытий. В работе применена относительно несложная шликерно-обжиговая технология получения покрытия.

Материалы и методы

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В качестве объекта исследования применяли циркониевые сплавы Э110 и Э125.

Для проведения испытаний изготовлены суспензии экспериментальных составов. Процесс изготовления покрытия включал следующие технологические операции:

- контроль и подготовка исходных компонентов;
- приготовление шихты;
- варка фритты;
- приготовление шликера покрытия;
- контроль качества шликера покрытия;
- обжиг покрытия.

Исследуемые покрытия наносили на образцы размером 30×30 мм методом оку- нания, сушили на воздухе в течение 0,5–1 ч и обжигали при температуре, совмещенной с температурным режимом нагрева под термообработку (650–850 °С) в зависимости от размеров заготовки (чем заготовка больше, тем температура должна быть выше), а за- тем выдерживали в печи.

Для исследования физико-химических свойств покрытий подготовлены сухие шликеры, из которых прессовали образцы для определения ТКЛР и растекаемости, оцениваемой по ГОСТ Р 50045–92.

Результат формирования покрытия оценивали визуально-оптическим методом, критерием оценки являлось отсутствие дефектов.

Глубину газонасыщенного слоя определяли с помощью изменения микротвердо- сти в поперечном сечении образцов (начиная от поверхности и далее вглубь металла) без покрытия и с защитным технологическим покрытием.

Количественную оценку защитных свойств исследуемых покрытий определяли по изменению массы циркониевых образцов, покрытых эмалью и без покрытия, при нагреве в алундовых тиглях в печи при температуре нагрева под деформацию и вы- держке в течение 0,5–5 ч.

Результаты и обсуждение

На основе стеклообразующих систем $K_2O-BaO-SiO_2$ и $Na_2O-BaO-SiO_2$ с моди- фицирующими добавками (ZrO_2 , Al_2O_3 , $MoSi_2$ – термодинамически инертные по отно- шению к цирконию) синтезировано 12 составов покрытий. Основанием для выбора си- стем являлись хорошая изученность, отсутствие в составе элементов с большим сече- нием поглощения тепловых нейтронов, соответствие температурных интервалов обра- зования эвтектик с температурами пластической деформации материала. Различие меж- ду составами заключалось в соотношении компонентов стекла и добавок.

Наиболее простым и доступным методом оценки защитных свойств исследуе- мых покрытий является визуальный анализ поверхности, производимый после нагрева и охлаждения образцов, позволяющий выявить непрерывность пленочного покрытия, его сплошность, сцепление с металлом и характер взаимодействия с ним. Характери- стики исследуемых покрытий после обжига при температуре 650 °С и выдержке в тече- ние 0,3 ч приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики исследуемых составов покрытий после обжига

Условный номер состава	Внешний вид покрытия
1	Белое, стекловидное, неровное (собралось в капли)
2	Белое, неоплавившееся, стекловидно-матовое, присутствуют пузыри
3	Белое, неоплавившееся, присутствуют пузыри
4	Серое, с белыми разводами, спекшееся
5	Серое, спекшееся, края образца сильно окислены
6	Серое, спекшееся, плотное, скалывается, в месте скола металл темный
7	Черное, стекловидное, плотное
8	Черное, спекшееся, плотное, края металла окислены
9	Черное, стекловидно-матовое, ровное
10	Черное, стекловидное, неровное, с разводами
11	Черное, стекловидное, ровное
12	Черное, стекловидное, с белыми разводами

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что только три покрытия (составы 7, 9, 11) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к защитным технологическим покрытиям.

Поскольку целью данной работы является создание защитного технологического покрытия, применяемого при термообработке, представляют интерес такие характеристики, как растекаемость, плавкость, адгезия обожженных и необожженных покрытий.

Для уточнения температуры обжига, которую можно использовать для оптимизации предварительных испытаний на жаростойкость образцов из сплавов с покрытиями, проведены dilatометрические испытания. Результаты приведены на рис. 1, а также в табл. 2.

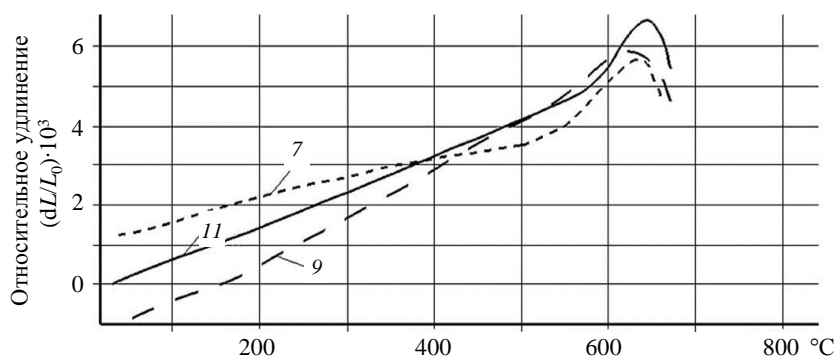


Рис. 1. Dilатометрические кривые покрытий

Таблица 2

Характеристики исследуемых составов покрытий

Условный номер состава	Температура стеклования, °С	Температура начала размягчения, °С	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$, в диапазоне температур 20–800 °С
7	589,0	643,6	8,34
9	557,2	628,4	7,95
11	569,3	635,7	8,11

Для формирования покрытия температура обжига должна превышать температуру стеклования на 50–150 °С. Значения ТКЛР покрытий превышают значение данного коэффициента циркония, что будет способствовать самоудалению покрытия после термической обработки.

Испытания на растекаемость покрытий проводили при температурах 650, 750 и 850 °С. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты растекаемости исследуемых составов покрытий

Условный номер состава	Температура испытания, °С	Среднее значение показателя растекаемости
7	650	0,736
	750	0,739
	850	0,742
9	650	0,592
	750	0,607
	850	0,634
11	650	1,028
	750	1,037
	850	1,050

Образцы покрытия состава 7 имеют близкие значения показателя растекаемости, что может способствовать проведению процессов пластической деформации в данном диапазоне температур при стабильном значении свойств, а также использованию данного покрытия для сплавов, обрабатываемых при нижней и верхней границах температур. Дальнейшие испытания проводили на образцах с покрытием состава 7 на основе стеклообразующих систем $K_2O-BaO-SiO_2$ и $Na_2O-BaO-SiO_2$ с модифицирующими добавками ZrO_2 , Al_2O_3 и $MoSi_2$.

Об эффективности защитного действия технологического покрытия можно судить по результатам исследования распределения микротвердости в поперечном сечении образца. Если оценивать газонасыщенность сплава значением глубины зоны повышенной твердости, то из представленных на рис. 2 данных следует, что величина этой зоны в 3–4 раза больше у сплава без покрытия (0,24–0,32) мм, чем у сплава с покрытием (0,08–0,10) мм после отжига на воздухе. Более равномерное распределение микротвердости может свидетельствовать о меньшем газонасыщении образца с защитно-технологическим покрытием при нагреве под деформацию.

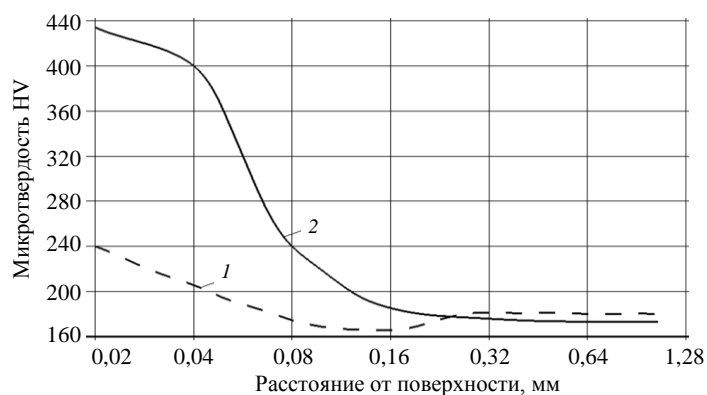


Рис. 2. Изменение микротвердости по сечению образца с покрытием (1) и без него (2)

Эффективность защитного действия покрытия особенно заметно проявляется в снижении микротвердости поверхностных слоев образцов и полуфабрикатов после комплексных нагревов при прокатке и последующей термообработке. После горячей прокатки заготовок без покрытия микротвердость образцов на глубине 0,45 мм от поверхности превышала 800 HV. Микротвердость образцов с покрытием на глубине 0,02 мм от поверхности составила 680 HV. Применение покрытия при нагреве циркониевых сплавов снижает концентрацию кислорода в поверхностных слоях в 20–30 раз.

Перенос элементов внедрения, в частности кислорода, из покрытий в цирконий увеличивает микротвердость. Она будет больше в том случае, когда в исходном составе покрытия будет больше щелочных оксидов, а температура и длительность нагрева будут повышены.

В процессе нагрева масса образцов увеличивалась в результате окисления циркония кислородом воздуха, который диффундирует через расплавленную пленку покрытия. Помимо окисления металла, при нагреве идет процесс улетучивания компонентов покрытия. Для учета этого изменения массы образца параллельно с испытываемым нагревали керамический образец с таким же покрытием, который имел постоянную массу в процессе нагрева.

В результате эксперимента установлено, что в процессе нагрева и последующих выдержек в течение 0,5–5 ч улетучивается 5–7 % (по массе) покрытия, что позволяет не учитывать данную величину при определении окисляемости циркониевых образцов с покрытием. Экспериментальные данные определения окисляемости образцов с покрытием и без него представлены в табл. 4.

Результаты окисляемости циркониевых образцов

Сплав		Значения привеса образца, г/м ² , при нагреве и выдержке в течение, ч				
		0,5	1	2	3	5
Сплав Э110	с покрытием	0,20	0,28	0,31	0,36	0,39
	без покрытия	650	179	398	690	1620
Сплав Э125	с покрытием	0,20	0,25	0,27	0,34	0,41
	без покрытия	52	141	349	747	1534

Таким образом, применение покрытия позволяет уменьшить привес циркониевых образцов, что особенно важно при переходе на крупногабаритные изделия.

Заключения

Исследовано защитное технологическое покрытие, не содержащее оксид бора и имеющее температуру формирования, близкую к температуре нагрева под деформацию. Покрытие предохраняет поверхность заготовок от окисления и способно увеличивать ресурс деформационной способности заготовок из сплавов циркония.

Способ приготовления и нанесения технологического покрытия по шликерно-обжиговой технологии является относительно простым. Для удаления покрытия может быть применен метод пескоструйной обработки поверхности, т. е. использования ванн травления не требуется.

Применение покрытия позволяет уменьшить привес образцов из циркониевых сплавов по сравнению с образцами без покрытия, а также практически полностью защитить их от окисления.

Установлено, что защитное технологическое покрытие на основе силикатных стекол систем $K_2O-BaO-SiO_2$ и $Na_2O-BaO-SiO_2$ может служить эффективным средством защиты циркониевых сплавов от окисления и газонасыщения при высокотемпературном нагреве.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 21.
2. Гаврилов Г.Н., Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т. и др. Материаловедение. Теория и технология термической обработки: учеб. пособие. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2019. 276 с.
3. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1994. 252 с.
4. Борисова О.А., Коломыцев К.А. Получение циркониевых труб из слитка для оболочек тепловыделяющего элемента для атомных реакторов // Сб. науч. тр. по материалам XXX Междунар. науч.-практ. конф. «Современное состояние и перспективы развития науки и образования» (г. Анапа, 7 янв. 2022 г.). Анапа, 2022. С. 19–24.
5. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Многоуровневое масштабное комплексное исследование деформирования металлических материалов // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
6. Mosbacher M., Holzinger M., Galetz M. et al. The influence of oxide color on the surface characteristics of zirconium alloy ZrNb7 (wt. %) after different heat treatments // Oxidation of Metals. 2021. Vol. 95. No. 5. P. 377–388. DOI: 10.1007/s11085-021-10030-1.
7. Yang S., Guo Z., Zhao L. et al. Surface microstructure and high-temperature high-pressure corrosion behavior of N18 zirconium alloy induced by high current pulsed electron beam irradiation // Applied Surface Science. 2019. Vol. 484. P. 453–460. DOI: 10.1006/J.APSUSC.2019.04.124.
8. Каблов Е.Н., Мубояджан С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электротехнология. 2016. № 10. С. 23–38.

9. Петельгузов И.А. Влияние защитных покрытий из алюминия и хрома на окисление циркония и его сплавов // Вопросы атомной науки и техники. 2012. № 2 (78) С. 114–119.
10. Ручкин С.Е., Пирожков А.В. Защитные многослойные ZrO₂/Cr покрытия для циркониевого сплава Э110 // Современные проблемы машиностроения: сб. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Томск, 25–30 окт. 2021 г.). Томск, 2021. С. 179–180.
11. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-219-0-4-41-48.
12. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-393-404.
13. Горлов Д.С., Щепилов А.В. Исследование демпфирующей способности композиции «сплав–покрытие» после испытаний на жаростойкость и коррозионную стойкость // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 62–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-62-69.
14. Башкова И.О., Харанжевский Е.В. Лазерный синтез антикоррозионных покрытий на цирконии // 20-я Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-20» (г. Ижевск, 27 марта – 3 апр. 2014 г.). Ижевск, 2014. 401 с.
15. Мамаева А.И., Чубенко А.К., Мамаева В.А. и др. Формирование неметаллических неорганических наноструктурных покрытий на цирконии методом микроплазменного оксидирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 75–78.
16. Malayoğlu U., Tekin K.C., Malayoğlu U. et al. Mechanical and electrochemical properties of PEO coatings on zirconium alloy // Surface Engineering. 2020. Vol. 36. No. 8. P. 800–808. DOI: 10.1080/02670844.2019.1706233.
17. Kashkarov E.B., Sidelev D.V., Syrtanov M.S. et al. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating thickness and microstructure // Corrosion Science. 2020. Vol. 175. P. 108883. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108883.
18. Kuprin A.S., Belous V.A., Voyevodin V.N. et al. Irradiation resistance of vacuum arc chromium coatings for zirconium alloy fuel claddings // Journal of Nuclear Materials. 2018. Vol. 510. P. 163–167. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.07.063.
19. Li Z.Y., Cai Z.B., Cui X.J. et al. Influence of nanoparticle additions on structure and fretting corrosion behavior of micro-arc oxidation coatings on zirconium alloy // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 410. P. 126949. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126949.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Repors of the XXI Mendeleev Congress on General Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 21.
2. Gavrilov G.N., Kablov E.N., Erofeev V.T. et al. *Material science. Theory and technology of heat treatment*: textbook. Saransk: Ogarev Mordovian State University, 2019, 276 p.
3. Zaimovsky A.S., Nikulina A.V., Reshetnikov N.G. *Zirconium alloys in nuclear power engineering*. 2nd ed., rev. and add. Mosocw: Energoatomizdat, 1994, 252 p.
4. Borisova O.A., Kolomytsev K.A. Obtaining zirconium tubes from an ingot for shells of a fuel element for nuclear reactors. *Collection of scientific papers of the XXX International Scientific-Practical Conference "The current state and prospects for the development of science and education"* (Anapa, January 7, 2022). Anapa, 2022, pp. 19–24.
5. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Multilevel large-scale complex research of deformation of metal materials. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 16, 22). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.
6. Mosbacher M., Holzinger M., Galetz M. et al. The influence of oxide color on the surface characteristics of zirconium alloy ZrNb7 (wt. %) after different heat treatments. *Oxidation of Metals*, 2021, vol. 95, no. 5, pp. 377–388. DOI: 10.1007/s11085-021-10030-1.

7. Yang S., Guo Z., Zhao L. et al. Surface microstructure and high-temperature high-pressure corrosion behavior of N18 zirconium alloy induced by high current pulsed electron beam irradiation. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 484, pp. 453–460. DOI: 10.1006/J.APSUSC.2019.04.124.
8. Kablov E.N., Muboyadzhan S.A. Erosion-resistant coatings for compressor blades of gas turbine engines. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 10, pp. 23–38.
9. Petelguzov I.A. Influence of protective coatings from aluminum and chromium on the oxidation of zirconium and its alloys. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, 2012, no. 2 (78), pp. 114–119.
10. Ruchkin S.E., Pirozhkov A.V. Protective multilayer ZrO₂/Cr coatings for E110 zirconium alloy. *Modern problems of mechanical engineering: collection of works of the XIV International Scientific-Technologies Conference (Tomsk, October 25–30, 2021)*. Tomsk, 2021, pp. 179–180.
11. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
12. Nefedov N.I., Semenova L.V., Kuznecova V.A., Vereninova N.P. Paint coatings for protection of metallic and polymer composite materials against aging, corrosion and biodeterioration. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
13. Gorlov D.S., Shchepilov A.V. Study of the damping capacity of the «alloy–coating» composition after tests on heat resistance and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 62–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-62-69.
14. Bashkova I.O., Kharanzhevsky E.V. Laser synthesis of anticorrosive coatings on zirconium. *20th All-Russian Scientific Conference Physics Students and Young Scientists «VNKSF-20» (Izhevsk, March 27 – April 3, 2014)*. Izhevsk, 2014, 401 p.
15. Mamaeva A.I., Chubenko A.K., Mamaeva V.A. Formation of non-metallic inorganic nanostructured coatings on zirconium by microplasma oxidation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya*, 2013, no. 4, pp. 75–78.
16. Malayoğlu U., Tekin K.C., Malayoğlu U. et al. Mechanical and electrochemical properties of PEO coatings on zirconium alloy. *Surface Engineering*, 2020, vol. 36, no. 8, pp. 800–808. DOI: 10.1080/02670844.2019.1706233.
17. Kashkarov E.B., Sidelev D.V., Syrtanov M.S. et al. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating thickness and microstructure. *Corrosion Science*, 2020, vol. 175, p. 108883. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108883.
18. Kuprin A.S., Belous V.A., Voyevodin V.N. et al. Irradiation resistance of vacuum arc chromium coatings for zirconium alloy fuel claddings. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 510, pp. 163–167. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.07.063.
19. Li Z.Y., Cai Z.B., Cui X.J. et al. Influence of nanoparticle additions on structure and fretting corrosion behavior of micro-arc oxidation coatings on zirconium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 410, p. 126949. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126949.

Информация об авторах

Власова Ольга Викторовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Солнцев Станислав Сергеевич, советник генерального директора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Денисова Валентина Сергеевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лепшиков Владимир Геннадьевич, инженер I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga V. Vlasova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav S. Soltsev, Counselor to Director General, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentina S. Denisova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir G. Lepschikov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.05.2022.
The article was submitted 30.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 31.05.2022.