



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Коррозионная стойкость детонационных покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в условиях воздействия соляного тумана

Иванна Кучумова^{1,2,a,*}, Игорь Батраев^{1,b}, Нина Черкасова^{2,c}, Арина Ухина^{3,d},
Александр Штерцер^{1,e}, Альберто Морейра Хорхе^{4,5,f}

¹ Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, ул. Кутателадзе, 18, г. Новосибирск, 630128, Россия

⁴ Department of Materials Science and Engineering, Federal University of São Carlos, Via Washington Luiz, km 235, São Carlos, SP 13565-905, Brazil

⁵ Grenoble Alpes University, CNRS, LEPMI and SIMAP, F-38000 Grenoble, France

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0459-9180>,  ivannakz@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0364-144X>,  ibatraev@gmail.com,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-5603-7852>,  cherkasova.2013@corp.nstu.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-1878-0538>,  auhina181@gmail.com,

^e  <https://orcid.org/0000-0003-4973-0437>,  asterzer@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-8121-9834>,  moreira@ufscar.br

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.79

История статьи:

Поступила: 22 июня 2020

Рецензирование: 14 июля 2020

Принята к печати: 10 августа 2020

Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Детонационное напыление

Аморфная структура

Покрытие

Коррозионная стойкость

Соляной туман

Финансирование

Исследование выполняется при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках проекта № 19-43-543034.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Константину Борисовичу Герасимову за проведение ДСК исследований покрытия.

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка дизайна сплавов с высокой стеклообразующей способностью и исследование их физико-механических свойств является одними из актуальных направлений в материаловедении в настоящее время. Многокомпонентные сплавы на основе железа с высокой стеклообразующей способностью имеют высокую коррозионную стойкость и износостойкость, что делает их перспективными для нанесения на рабочие поверхности изделий, работающих в условиях абразивного износа и агрессивных сред. Методы газотермического напыления (плазменное напыление, детонационное напыление, высокоскоростное газопламенное напыление и др.) позволяют формировать покрытия с аморфной структурой из многокомпонентных сплавов на основе железа. Детонационное напыление вследствие особенностей процесса напыления позволяет формировать более качественные покрытия со структурой металлического стекла по сравнению с другими методами газотермического напыления. **Цель работы:** исследование влияния фазового состава детонационных покрытий из многокомпонентного сплава на основе железа на стойкость к атмосферной коррозии в условиях воздействия нейтрального соляного тумана. **В работе исследованы** детонационные покрытия из аморфного сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученные при различном объеме взрывчатой смеси. **Методами исследования** являются испытания детонационных покрытий в моделируемых условиях воздействия атмосферной коррозии в камере соляного тумана по стандарту ASTM B117 в атмосфере распыляемого пятипроцентного раствора хлорида натрия в воде в течение 600 часов при комнатной температуре, а также проведение рентгенофазовых и металлографических исследований покрытий до и после испытаний. **Результаты и обсуждение.** Результаты исследования фазового состава и морфологии поверхности покрытий после испытаний свидетельствуют об их высокой коррозионной стойкости в нейтральном соляном тумане, содержащем большое количество анионов хлора. На поперечных сечениях покрытий отсутствуют следы распространения коррозии, что подтверждает эффективность применения детонационных покрытий со структурой металлического стекла из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ для защиты изделий, работающих в условиях повышенной влажности, без дополнительной герметизации поверхности.

Для цитирования: Коррозионная стойкость детонационных покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в условиях воздействия соляного тумана / И.Д. Кучумова, И.С. Батраев, Н.Ю. Черкасова, А.В. Ухина, А.А. Штерцер, А.М. Хорхе // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 95–105. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-95-105.

*Адрес для переписки

Кучумова Иванна Денисовна, м.н.с.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,

пр. Академика Лаврентьева, 15,

630090, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +7-923-707-56-51, e-mail: ivannakz@mail.ru

Введение

В последние несколько десятилетий сохраняется повышенный интерес к разработке нового дизайна сплавов на основе железа с высокой стеклообразующей способностью и исследова-

нию их свойств. Такая тенденция объясняется широким комплексом физико-механических и физико-химических свойств этих сплавов. Высокие показатели прочностных и магнитных характеристик, износостойкости и коррозионной стойкости объясняются отсутствием кристаллической анизотропии и структурных дефектов, таких как границы зерен и дислокации [1–3]. Некоторые свойства, например коррозионная стойкость, аморфных сплавов также существенно зависят от их химического состава [4–6]. Несмотря на перечисленные преимущества аморфных сплавов, их широкое промышленное применение ограничено небольшими габаритными размерами объемных изделий, низкой пластичностью и склонностью к отпускной хрупкости при комнатной температуре [7–10].

Газотермическое напыление покрытий из сплавов на основе железа с аморфной структурой представляет собой эффективное решение для защиты рабочих поверхностей от коррозии и повышения их износостойкости [11–13]. При этом проблема низкой пластичности аморфных материалов решается за счет более вязкого материала основы. Благодаря низкой стоимости, по сравнению с другими сплавами с высокой стеклообразующей способностью, сплавы на основе железа представляют особый интерес для практического применения. В работах [14, 15] были успешно получены покрытия из аморфных сплавов на основе железа методами высокоскоростного и плазменного напыления, которые имеют высокую коррозионную стойкость.

В работе [16] Янг с соавторами провели исследование влияния содержания кристаллической фазы на коррозионную стойкость покрытий $Fe_{48}Mo_{14}Cr_{15}Y_2C_{15}B_6$, полученных методом высокоскоростного напыления, после отжига при различных температурах, которое показало, что увеличение содержания кристаллической фазы способствует снижению коррозионной стойкости покрытий, так как коррозия распространяется по границам зерен. Особого внимания заслуживает работа [17], в которой представлены результаты исследования коррозионной стойкости покрытий из сплава $Fe_{60}Cr_8Nb_8B_{24}$, полученных методами высокоскоростного газопламенного (*high-velocity oxygen fuel* – *HVOF*) и газопламенного напыления. Вследствие низкой пористости и высокого содержания аморфной

фазы в покрытиях, полученных методом *HVOF*, их показатели коррозионной стойкости выше, чем у газопламенных покрытий. Образование оксидных пленок на поверхности частиц в процессе газопламенного напыления снижает коррозионную стойкость покрытий. Тем не менее высокое содержание аморфной фазы в покрытиях способствует формированию плотной пассивационной пленки на их поверхности, которая увеличивает коррозионную стойкость полученных покрытий по сравнению с коррозионной стойкостью нержавеющей стали.

Большая часть работ по тематике газотермического напыления покрытий из аморфных сплавов посвящена методам *HVOF* и плазменного напыления. Значительно реже встречаются работы по детонационному напылению покрытий из аморфных сплавов на основе железа, несмотря на то что данный метод позволяет формировать покрытия с лучшим комплексом физико-механических свойств по сравнению с другими методами газотермического напыления [18]. Детонационное напыление позволяет получать высококачественные покрытия с аморфной структурой, так как в процессе напыления создаются условия для формирования структуры металлического стекла, а именно нагрев частиц до температуры плавления и высокая скорость охлаждения при столкновении с подложкой. Качество покрытий, полученных формированием из полностью расплавленных частиц, лучше по сравнению с покрытиями, образованными твердыми и частично расплавленными частицами с точки зрения адгезии, когезии и пористости. Формирование покрытий с аморфной структурой методом детонационного напыления позволяет предотвратить образование оксидных пленок на поверхности напыляемого порошка, которые являются центрами кристаллизации расплава [19].

Результаты исследования коррозионной стойкости детонационных покрытий из аморфных сплавов на основе железа показывают, что стойкость к точечной коррозии покрытий с аморфной структурой в хлор-хлорсодержащих электролитах достаточно высока за счет высокого содержания аморфной фазы, формирования плотной пассивационной пленки и структурной однородности, в которой отсутствуют границы зерен, чувствительных к анионам хлора [20].

В работе [21] показано, что скорость коррозии нержавеющей стали значительно превышает скорость коррозии покрытий с аморфной структурой.

Метод испытаний в соляном тумане долгое время использовался как универсальный метод испытаний на коррозионную стойкость материалов вне зависимости от того, для каких условий эксплуатации предназначены испытываемые материалы [22]. Испытания в соляном тумане особенно эффективны для определения несплошностей, таких как поры и другие дефекты в металлических, органических, анодно-оксидных покрытиях. На сегодняшний день данный метод используют для оценки коррозионной стойкости различных покрытий и материалов в моделируемых условиях атмосферной коррозии [23, 24].

Целью данной работы является исследование влияния фазового состава детонационных покрытий из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ на их коррозионную стойкость в условиях воздействия нейтрального соляного тумана (пятипроцентного раствора NaCl) в течение 600 часов.

Для выполнения поставленной цели методом детонационного напыления были получены покрытия из многокомпонентного сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ при различном объеме взрывчатой смеси 50...70 % с шагом в 10 % и молярном соотношения газовых компонентов $O_2/C_2H_2 = 1,1$, проведены рентгенофазовые исследования полированных покрытий до и после испытаний в моделируемых условиях атмосферной коррозии, исследована морфология и структура покрытий после испытаний.

Методика исследований

Порошок из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ получен методом газового распыления аргоном под высоким давлением на установке *HERMIGA 75/5VI* (*Phoenix Scientific Industries Ltd.*, Великобритания) и разделен на фракции путем рассеивания на ситах. Предыдущие исследования показали, что порошок фракции 45...75 мкм имеет частично кристаллизованную структуру с содержанием аморфной фазы около 70 вес.%. Температура стеклования и кристаллизации сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ равна 521 и 573 °C соответственно [25].

Эксперименты по детонационному напылению покрытий из порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$

с размером частиц 45...75 мкм проводили с использованием детонационного комплекса *CCDS2000* с дополнительным воздушным охлаждением со стороны подложки [26]. В качестве подложек использовались стальные шайбы диаметром 20 мм и толщиной 6 мм. Непосредственно перед нанесением покрытия напыляемая поверхность шайб подвергалась пескоструйной обработке. При напылении использовался ствол переменного сечения с камерой сгорания Ø 20 мм длиной 700 мм и дульной (разгонной) секцией Ø 16 мм длиной 300 мм. Дистанция напыления составляла 200 мм. В качестве продувочного газа использовался азот. Напыление проводилось с использованием ацетиленокислородной взрывчатой смеси эквимоларного состава ($O_2/C_2H_2 = 1,1$). Взрывчатая смесь характеризуется следующими параметрами: скорость детонации 2894 м/с, динамический напор и температура продуктов детонации, определяющие скорость и температуру напыляемых частиц, 1,8 МПа и 4533 К соответственно [27]. При данном соотношении компонентов взрывчатой смеси в продуктах детонации практически отсутствует атомарный кислород, который способствует окислению частиц в процессе напыления. Объем взрывчатой смеси варьировали в диапазоне 50...70 % от общего объема ствола установки с шагом в 10 %. Ранее были проведены исследования влияния изменения объема взрывчатой смеси и соотношения компонентов ацетиленокислородной взрывчатой смеси на структуру, свойства и фазовый состав покрытий из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$. Исследования показали, что покрытия, полученные при объеме взрывчатой смеси 55...70 % и молярном соотношении $O_2/C_2H_2 = 1,1$ имеют наибольшее содержание аморфной фазы (более 98 вес.%), высокую твердость (770...920 HV₁₀₀), низкую пористость (менее 2 %) и адгезию около 150 МПа [25]. Для испытаний на коррозионную стойкость поверхность покрытий шлифовалась на абразивных кругах и полировалась с коллоидной суспензией оксида кремния. Масса полированных покрытий до и после коррозионных испытаний определялась на аналитических весах ЛВ210-А (Сартосм, Россия).

Испытания на коррозионную стойкость полированных покрытий проводились в камере соляного тумана *ASCOTT S120iS* (*Ascott Analytical Equipment Ltd.*, Великобритания) в течение

600 часов в среде нейтрального соляного тумана (распыляемого пятипроцентного раствора NaCl в воде) при комнатной температуре согласно ASTM B117. По данному стандарту отсутствуют ограничения по времени проведения испытаний. Скорость распыления соляного раствора хлорида натрия в камеру установки составляет 1,0...2,0 мл/мин. Атмосфера внутри камеры на протяжении всего периода испытаний оставалась постоянной. После испытаний образцы были промыты в дистиллированной воде и высушены на воздухе.

Анализ фазового состава покрытий после напыления, полирования и испытаний на коррозионную стойкость проводился с использованием дифрактометра *Bruker D8 ADVANCE* (*Bruker AXS*, Германия) в CuK α -излучении. Содержание аморфной фазы в исходных покрытиях определялся методом Ритвельда с помощью программного обеспечения *TOPAS 4.2* (*Bruker AXS*, Германия).

Термический анализ покрытия, полученного при 70 % объема взрывчатой смеси, проводился с использованием термоаналитического комплекса *STA 449 F1 JUPITER* (*Netzsch*, Германия) в атмосфере аргона при скорости нагрева 10 °C/мин.

Поперечные сечения и морфология покрытий после испытаний на коррозионную стойкость исследовались на оптическом микроскопе *Olympus GX-51* (*Olympus*, Япония), оснащенный программным обеспечением *OLYMPUS Stream Image Analysis Stream Essentials 1.9.1* для измерения пористости материалов, и растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO 50 XVP* (*Carl Zeiss AG*, Германия).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования фазового состава покрытий после детонационного напыления представлены на рис. 1, а. На рентгенограммах образцов покрытий наблюдается широкое дифракционное гало на углах $2\theta = 40^\circ \dots 50^\circ$, что свидетельствует о наличии аморфной фазы в покрытиях. Содержание кристаллической фазы в исходных покрытиях, полученных при 50, 60 и 70 % объема взрывчатой смеси равно $2,7 \pm 0,2$ вес.%, $1,3 \pm 0,2$ вес.%, $0,3 \pm 0,2$ вес.% соответственно. Аморфизация сплава при детонационном напылении происходит вследствие

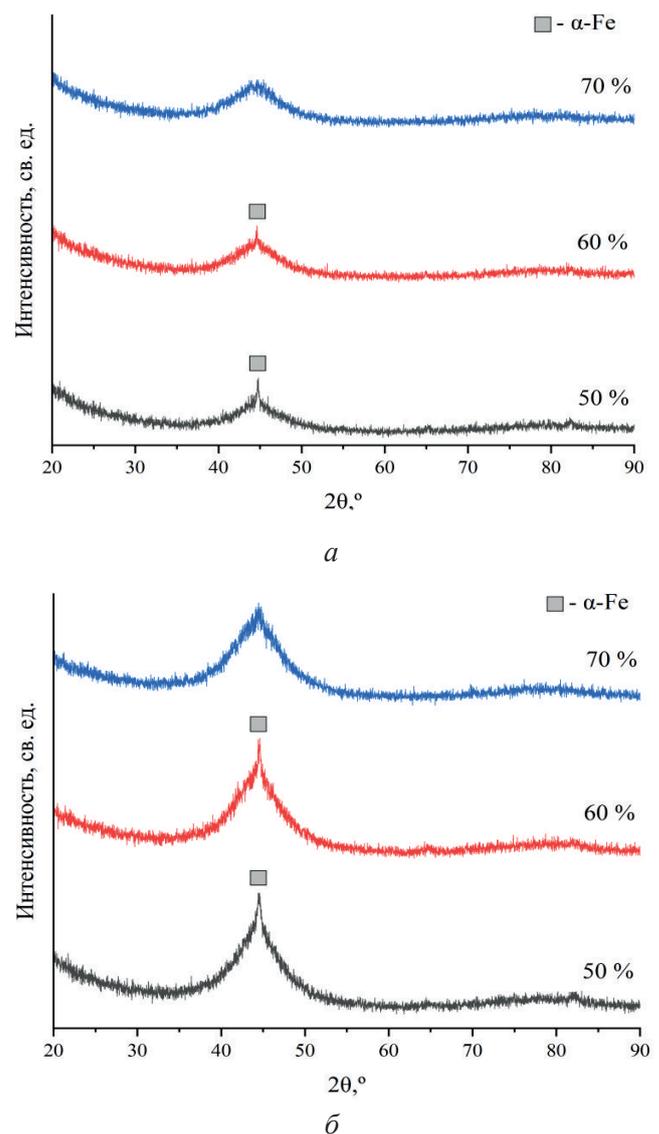


Рис. 1. Рентгенограммы образцов детонационных покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$: а – исходные детонационные покрытия; б – покрытия после полирования

Fig. 1. XRD patterns of detonation $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ coatings obtained at different explosive charges: а – initial detonation coatings; б – coatings after polishing

нагрева частиц порошка до температур плавления и их быстрого охлаждения при столкновении с подложкой за счет быстрого отвода тепла в объем подложки. В работе [25] была проведена оценка скорости охлаждения сплетов порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ толщиной 15 мкм, которая составляет 10^6 К/с. Полученная величина является достаточным условием для образования покрытий с аморфной структурой. Высокая стеклообразующая способность сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ объясняется подобранным хими-

ческим составом, который подчиняется трем эмпирическим правилам А. Иноуэ для сплавов с высокой стеклообразующей способностью [28–30]. В процессе полирования в покрытиях сохранилась аморфная структура (рис. 1, б), о чем свидетельствует отсутствие дифракционных пиков кристаллических фаз на рентгенограммах полированных покрытий. Незначительное увеличение интенсивности дифракционных пиков, рис. 1, б, фазы α -Fe (Cr) связано с отсутствием эффекта микропоглощения рентгеновского излучения, который обусловлен высокой шероховатостью поверхности исходных детонационных покрытий. Содержание кристаллической фазы в полированных покрытиях $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{V}_{19}$ равно $2,2 \pm 0,2$ вес.%, $1,4 \pm 0,2$ вес.%, $0,5 \pm 0,2$ вес.%, полученных при заряде взрывчатой смеси 50, 60 и 70 % соответственно. Результаты оценки содержания кристаллической фазы свидетельствуют о том, что весь материал покрытий имеет структуру металлического стекла.

Помимо результатов рентгенофазового анализа наличие аморфной фазы в покрытиях подтверждается результатами исследования термических характеристик покрытия, полученного при 70 % объема взрывчатой смеси (рис. 2). Начиная с 573°C на ДСК кривой присутствует несколько экзотермических пиков, свидетельствующих о многостадийном процессе кристаллизации. Представленные значения температур фазовых переходов и характер ДСК кривой согласуются с результатами исследования исходного порошка [25].

Исследования фазового состава покрытий (рис. 3) после испытаний в камере соляного тумана показали, что на поверхности отсутствуют оксидные пленки, которые могут свидетельствовать о коррозии покрытий в условиях воздействия нейтрального соляного тумана. Масса образцов покрытий после испытаний остается неизменной в пределах допустимой погрешности аналитических весов, которая составляет $\pm 0,5$ мг.

На рис. 4 представлены изображения структуры покрытий после испытаний в камере соляного тумана. Видно, что покрытия имеют типичную слоистую структуру, что характерно для газотермического напыления. Покрытие, полученное при заряде взрывчатой смеси, равном 70 % объема ствола детонационного комплекса,

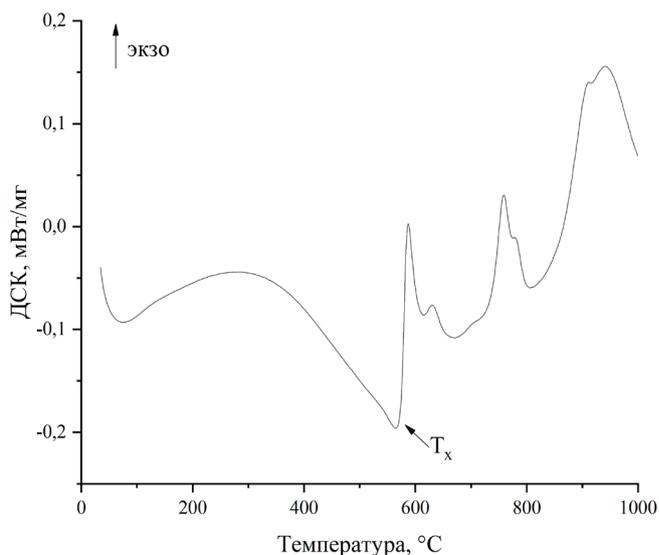


Рис. 2. Кривая ДСК покрытия, полученного при 70 % объема взрывчатой смеси

Fig. 2. Differential scanning calorimetry (DSC) curve of the detonation coating obtained at 70 % of explosive charge

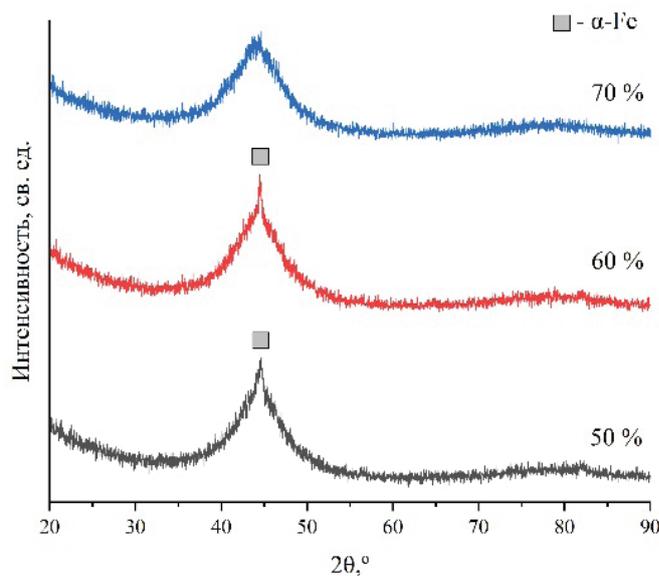


Рис. 3. Фазовый состав полированных покрытий после испытаний в камере соляного тумана в среде распыляемого пятипроцентного раствора NaCl в воде

Fig. 3. Phase composition of polished coatings after testing in salt spray chamber in a spray 5%-NaCl solution in water

имеет более плотную структуру, что свидетельствует о расплавленном состоянии сталкивающихся с подложкой частиц и подтверждается высоким содержанием аморфной фазы. В поперечном сечении всей серии образцов отсутствуют следы коррозии, так называемые «хвосты коррозии», проникающие с поверхности в объем

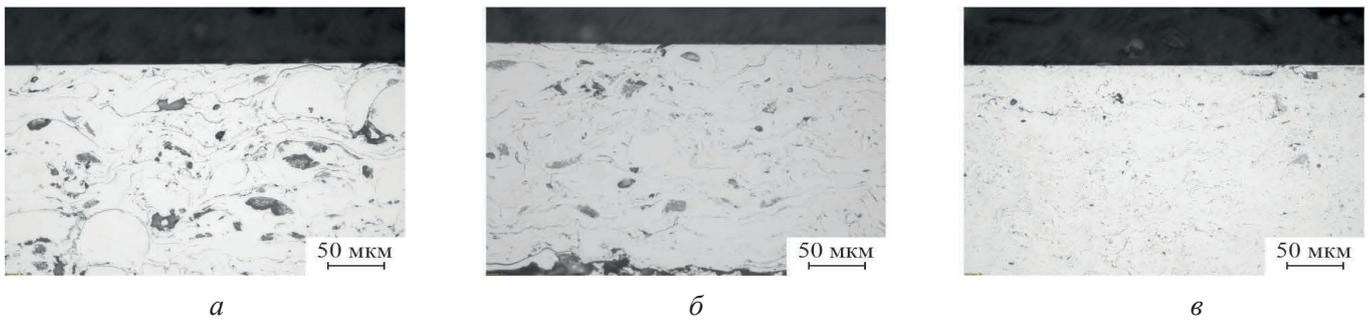


Рис. 4. Структура полированных покрытий, полученных при различном объеме взрывчатой смеси, после испытаний в камере соляного тумана:

a – 50 %; *б* – 60 %; *в* – 70 %

Fig. 4. Structure of polished coatings obtained at different explosive charges, after testing in a salt spray chamber:

a – 50 %; *б* – 60 %; *в* – 70 %

покрытия, характерные для данного метода испытаний на коррозионную стойкость [31]. На поверхности покрытий видны поры (обозначены стрелками), но отсутствуют оксидные пленки и следы коррозии (рис. 5). Пористость покрытий, измеренная на поперечных сечениях, не превышает 1,5 %.

В работе [32] представлены результаты исследования стойкости к атмосферной коррозии в условиях воздействия нейтрального соляного тумана покрытий из нержавеющей стали, полученных методом *HVOF*, с дополнительной обработкой герметиком на нефтяной основе. Полученные результаты показывают, что следы коррозии покрытий без герметика наблюдаются спустя 20 часов испытаний. Образцы покрытий, обработанные герметиком, начинают корродировать спустя 500 часов испытаний. Основной причиной коррозии покрытий из нержавеющей стали, получен-

ных методом *HVOF*, является высокая пористость покрытий, которая способствует распространению коррозии с поверхности в глубь покрытий за счет объемных пор. Обработка покрытий смолами и герметиками часто используется для дополнительной защиты газотермических покрытий в целях защиты от коррозии [33].

Представленные результаты исследования коррозионной стойкости детонационных покрытий из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в условиях воздействия нейтрального соляного тумана показывают высокую коррозионную стойкость в течение 600 часов без дополнительной герметизации поверхности. Наличие хрома и ниобия в сплаве $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и высокое содержание аморфной фазы обеспечивают стойкость к атмосферной коррозии. Низкая пористость детонационных покрытий не оказывает значительного влияния на снижение показателей их коррозионной стойкости.

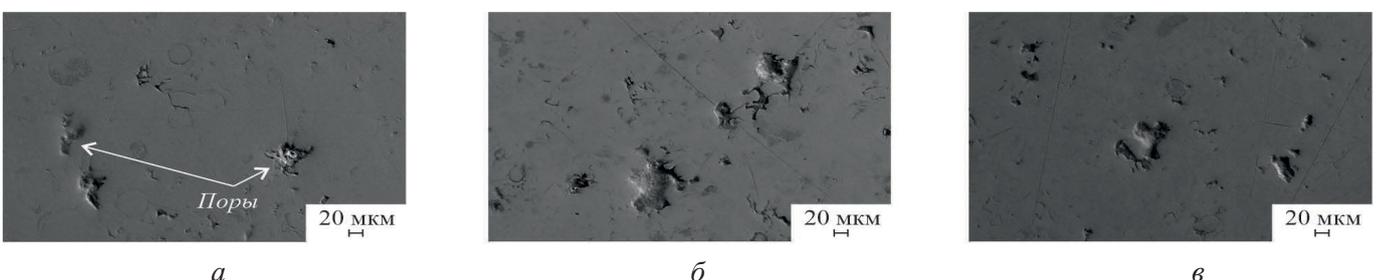


Рис. 5. Морфология поверхности полированных покрытий, полученных при различном заряде взрывчатой смеси, после воздействия нейтрального соляного тумана в течение 600 часов:

a – 50 %; *б* – 60 %; *в* – 70 %

Fig. 5. Surface of polished coatings obtained at different explosive charges after exposure to neutral salt fog for 600 hours:

a – 50 %; *б* – 60 %; *в* – 70 %

Выводы

Детонационные покрытия из сплава $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ имеют низкую пористость и высокое содержание аморфной фазы. Испытания покрытий на атмосферную коррозию в камере соляного тумана в условиях воздействия распыляемого пятипроцентного раствора NaCl в воде в течение 600 часов показали, что покрытия имеют высокую стойкость к анионам хлора, содержащимся в соляном тумане. Высокую коррозионную стойкость покрытий обеспечивает химический состав сплава и высокое содержание аморфной фазы (более 97 %). Наличие пористости, не превышающей 1,5 %, не оказывает влияния на коррозионную стойкость детонационных покрытий. Такие покрытия с аморфной структурой рекомендуются для защиты изделий, работающих в условиях повышенной влажности без дополнительной герметизации.

Список литературы

1. Inoue A., Takeuchi A. Recent development and application products of bulk glassy alloys // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 59, iss. 6. – P. 2243–2267. – DOI: 10.1016/j.actamat.2010.11.027.
2. Structural amorphous steels / Z.P. Lu, C.T. Liu, J.R. Thompson, W.D. Porter // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 92, iss. 24. – P. 501–504. – DOI: 10.1103/physrevlett.92.245503.
3. Synthesis of Fe–Cr–Mo–C–B–P bulk metallic glasses with high corrosion resistance / S. Pang, T. Zhang, K. Asami, A. Inoue // *Acta Materialia*. – 2002. – Vol. 50, iss. 3. – P. 489–497. – DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00366-4.
4. Improvement of corrosion resistance of high-velocity oxyfuel-sprayed stainless steel coatings by addition of molybdenum / J. Kawakita, S. Kuroda, T. Fukushima, T. Kodama // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2005. – Vol. 14. – P. 224–230. – DOI: 10.1361/10599630523782.
5. Masumoto T., Hashimoto K. Chemical properties of amorphous metals // *Annual Review of Material Science*. – 1978. – Vol. 8. – P. 215–233.
6. Naka M., Hashimoto K., Masumoto T. Effects of annealing on the corrosion of glassy chromium-containing alloys // *Science Reports of the Research Institutes*. – 1977. – Vol. 26. – P. 283–289.
7. Keryvin V., Hoang V.H., Shen J. Hardness, toughness, brittleness and cracking systems of an iron-based bulk metallic glass by indentation // *Intermetallics*. – 2009. – Vol. 17. – P. 211–217. – DOI: 10.1016/j.intermet.2008.08.017.
8. Ductility improvement of amorphous steels: roles of shear modulus and electronic structure / X.J. Gu, S.J. Poon, G.J. Shiflet, M. Widom // *Acta Materialia*. – 2008. – Vol. 56. – P. 88–94. – DOI: 10.1016/j.actamat.2007.09.011.
9. Qiao J., Jia H., Liaw P.K. Metallic glass matrix composites // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2016. – Vol. 100. – P. 1–69. – DOI: 10.1016/j.mser.2015.12.001.
10. Mechanical behavior of $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$ bulk metallic glass / M. Stoica, J. Eckert, S. Roth, H.F. Zhang, J. Schultz, W.H. Wang // *Intermetallics*. – 2005. – Vol. 13. – P. 764–769. – DOI: 10.1016/j.intermet.2004.12.016.
11. Wear and corrosion properties of HVOF coatings from Superduplex alloy modified with addition of boron / J.E. Berger, R. Schulz, S. Savoie, J. Gallego, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, W.J. Botta // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 309. – P. 911–919. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.10.062.
12. Microstructural investigation of Fe–Cr–Nb–B amorphous/nanocrystalline coating produced by HVOF / G.Y. Koga, A.M. Jorge, S. Savoie, R. Schulz, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, W.J. Botta // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 111. – P. 608–615. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.027.
13. Corrosion and erosion–corrosion behaviour of activated combustion high-velocity air fuel sprayed Fe-based amorphous coatings in chloride-containing solutions / Y. Wang, Z.Z. Xing, Q. Luo, A. Rahman, J. Jiao, S.J. Qu, Y.G. Zheng, J. Shena // *Corrosion Science*. – 2015. – Vol. 98. – P. 339–353. – DOI: 10.1016/j.corsci.2015.05.044.
14. Pitting initiation in Fe-based amorphous coatings / C. Zhang, K.C. Chan, Y. Wu, L. Liu // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60. – P. 4152–4159. – DOI: 10.1016/j.actamat.2012.04.005.
15. Corrosion mechanism of N-containing Fe–Cr–Mo–Y–C–B bulk amorphous alloys in highly concentrated HCl solution / J. Jayaraj, K.B. Kim, H.S. Ahn, E. Fleury // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 449–451. – P. 517–520. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.418.
16. Effects of crystallization on the corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings / Y. Yang, C. Zhang, Y. Peng, Y. Yu, L. Liu // *Corrosion Science*. – 2012. – Vol. 59. – P. 10–19. – DOI: 10.1016/j.corsci.2012.02.003.
17. Production and corrosion resistance of thermally sprayed Fe-based amorphous coatings from mechanically milled feedstock powders / G.Y. Koga, A.M. Jorge Junior, V. Roche, R.P. Nogueira, R. Schulz, S. Savoie, A.K. Melle, C. Loable, C. Bolfarini, C. Kiminami, W. Botta // *Metallurgical and Materials Transactions A*. –

2018. – Vol. 49. – P. 4860–4870. – DOI: 10.1007/s11661-018-4785-y.

18. Effects of oxygen fuel rate on microstructure and wear properties of detonation sprayed iron-based amorphous coatings / L. Xie, Y.-M. Wang, X. Xiong, Z.-K. Chen, Y.-L. Wang // *Materials Transactions Received.* – 2018. – Vol. 3. – P. 1867–1871. – DOI: 10.2320/matertrans.M2018273.

19. The influence of the O_2/C_2H_2 ratio on the structure and properties of $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ detonation coatings / I.D. Kuchumova, I.S. Batraev, N.Y. Cherkasova, D.K. Rybin, A.V. Ukhina, W.J. Botta, G.Y. Koga, A.M. Jorge // *Materials Today: Proceedings.* – 2020. – Vol. 25. – P. 384–386. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.098.

20. Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings prepared by detonation gun spraying / Z. Zhou, L. Wang, F. Wang, Y. Liu // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* – 2009. – Vol. 19. – P. 634–638. – DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60123-9.

21. Fabrication, tribological and corrosion behaviors of detonation gun sprayed Fe-based metallic glass coating / H. Wu, X. Lan, Y. Liu, F. Li, W. Zhang, Z. Chen, X. Zai, H. Zeng // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* – 2016. – Vol. 26. – P. 1629–1637. – DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64271-1.

22. ASTM B117–19. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. – DOI: 10.1520/B0117-19.

23. Лабораторные испытания коррозионной стойкости легких сплавов методом соляного тумана путем моделирования субтропического климата / В.И. Сергиенко, Ю.П. Денисенко, В.Г. Добржанский, Ю.Ф. Огнев, О.Ш. Бердиев, Н.Е. Душина // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета.* – 2015. – № 3. – С. 85–91.

24. Метод оценки коррозионной стойкости алюминиевых профилей для светопрозрачных ограждающих конструкций под действием соляного тумана / В.И. Третьяков, Л.К. Богомолова, Э.С. Гузова, О.А. Крупинина // *Вестник МГСУ.* – 2011. – № 3, ч. 2. – С. 116–122.

25. Formation of metallic glass coatings by detonation spraying of a $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ powder / I.D. Kuchumova, I.S. Batraev, V.Yu. Ulianitsky, A.A. Shtertser,

K.B. Gerasimov, A.V. Ukhina, N.V. Bulina, I.A. Bataev, G.Y. Koga, Y. Guo, W.J. Botta, H. Kato, T. Wada, B.B. Bokhonov, D.V. Dudina, A.M. Jorge // *Metals.* – 2019. – Vol. 9. – DOI: 10.3390/met9080846. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/8/846>.

26. Computer-controlled detonation spray ing: from process fundamentals toward advanced applications / V.Yu. Ulianitsky, A.A. Shtertser, S.V. Zlobin, I.Yu. Smurov // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2011. – Vol. 20. – P. 791–801. – DOI: 10.3390/met9121244.

27. Detonation spraying behaviour of refractory metals: case studies for Mo and Ta-based powders / V.Yu. Ulianitsky, I.S. Batraev, A.A. Shtertser, D.V. Dudina, N.V. Bulina, I.Yu. Smurov // *Advanced Powder Technology.* – 2018. – Vol. 29. – P. 1859–1864. – DOI: 10.1016/j.apr.2018.04.023.

28. *Inoue A.* Bulk Amorphous alloys: preparation and fundamental characteristics. – Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 1998. – (Materials science foundations; vol. 4).

29. *Inoue A.* Stabilization of supercooled liquid and opening-up of bulk glassy alloys // *Proceedings of the Japan Academy. Series B.* – 1997. – Vol. 73. – P. 19–24. – DOI: 10.2183/pjab.73.19.

30. *Inoue A.* Recent progress of Zr-based bulk amorphous alloys // *Science Reports of the Research Institutes. Tōhoku Daigaku Kenkyūjo hōkoku, Series A.* – 1996. – Vol. 42. – P. 1–12.

31. *Heller D.K., Fahrenholtz W.G., O'Keefe M.J.* The effect of post-treatment time and temperature on cerium-based conversion coatings on Al 2024-T3 // *Corrosion Science.* – 2010. – Vol. 52, iss. 2. – P. 360–368. – DOI: 10.1016/j.corsci.2009.09.023.

32. Structure and corrosion behavior of 316L stainless steel coatings formed by HVAF spraying with and without sealing / Z. Zeng, N. Sakoda, T. Tajiri, S. Kuroda // *Surface and Coatings Technology.* – 2008. – Vol. 203, iss. 3–4. – P. 284–290. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.09.011.

33. Effect of sealing treatment on corrosion resistance of plasma-sprayed NiCrAl/Cr₂O₃-8 wt.%TiO₂ coating / J. Zhang, Z. Wang, P. Lin, W. Lu, Z. Zhou, S. Jiang // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2010. – Vol. 20, iss. 3. – P. 508–513. – DOI: 10.1007/s11666-010-9528-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Influence of Salt fog Exposure on Corrosion Resistance of Detonation Coatings Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉

Ivanna Kuchumova^{1,2,a,*}, Igor Batraev^{1,b}, Nina Cherkasova^{2,c}, Arina Ukhina^{3,d},
Alexander Shtertser^{1,e}, Alberto Moreira Jorge^{4,5,f}

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Lavrenteva Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marksa Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, 18 Kutateladze Street, Novosibirsk, 630128, Russian Federation

⁴ Department of Materials Science and Engineering, Federal University of São Carlos, Via Washington Luiz, km 235, São Carlos, SP 13565-905, Brazil

⁵ Grenoble Alpes University, CNRS, LEPMI and SIMAP, F-38000 Grenoble, France

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0459-9180>,  ivannakz@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0364-144X>,  ibatraev@gmail.com,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-5603-7852>,  cherkasova.2013@corp.nstu.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-1878-0538>,  auhina181@gmail.com,

^e  <https://orcid.org/0000-0003-4973-0437>,  asterzer@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-8121-9834>,  moreira@ufscar.br

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 June 2020

Revised: 14 July 2020

Accepted: 10 August 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

Detonation spraying

Amorphous structure

Coating

Corrosion resistance

Salt fog

Funding

The reported research was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the government of the Novosibirsk region, project 19-43-543034 r_mol_a.

Acknowledgements

The authors are grateful to Konstantin B. Gerasimov for his help in conducting DSC investigation.

ABSTRACT

Introduction. Nowadays, the development of alloys with a high glass-forming ability and the study of its physical and mechanical properties are among the most important directions in materials science. Iron-based multi-component alloys with high glass-forming ability have high corrosion resistance, wear resistance and relatively low cost, which makes it promising for application on the working surfaces of parts that work under conditions of abrasive wear and aggressive environment. Methods of thermal spraying (plasma spraying, detonation spraying, high-velocity oxy-fuel spraying, etc.) allow producing coatings with amorphous structure from iron-based alloys. Due to the process features, detonation spraying allows to obtain high quality coatings with the structure of metal glass in comparison with other methods of thermal spraying. **The purpose of the work** is to study the influence of phase composition of detonation coatings from a multi-component iron-based alloy on the resistance to atmospheric corrosion in conditions of neutral salt spray. Detonation coatings from amorphous alloy Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ obtained at different charges of explosive mixture are investigated. **The methods of investigation:** testing of detonation coatings under simulated conditions of atmospheric corrosion in salt spray chamber according to ASTM B117 in an atmosphere of a spray 5% sodium chloride solution in water for 600 hours at room temperature, as well as conducting X-ray phase and metallographic studies of coatings before and after tests. **Results and Discussion.** The results of investigation the phase composition and morphology of the coatings after the tests showed its high corrosion resistance in a neutral salt fog containing a large amount of chlorine anions. On the cross sections of those coatings no traces of corrosion penetration were found, which confirms the effectiveness of detonation coatings with the structure of metal glass from the alloy Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ for protection of parts that work under conditions of high atmospheric humidity, without sealing the surface.

For citation: Kuchumova I.D., Batraev I.S., Cherkasova N.Y., Ukhina A.V., Shtertser A.A., Jorge A.M. The influence of salt fog exposure on corrosion resistance of detonation coatings Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 95–105. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-95-105. (In Russian).

* Corresponding author

Kuchumova Ivanna D., Research Assistant

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS

15 Ac. Lavrentieva ave.,

630090, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: +7-923-707-56-51, **e-mail:** ivannakz@mail.ru

References

1. Inoue A., Takeuchi A. Recent development and application products of bulk glassy alloys. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, iss. 6, pp. 2243–2267. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.11.027.
2. Lu Z.P., Liu C.T., Thompson J.R., Porter W.D. Structural amorphous steels. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 92, iss. 24, pp. 501–504. DOI: 10.1103/physrevlett.92.245503.
3. Pang S., Zhang T., Asami K., Inoue A. Synthesis of Fe–Cr–Mo–C–B–P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, iss. 3, pp. 489–497. DOI: 10.1016/s1359-6454(01)00366-4.
4. Kawakita J., Kuroda S., Fukushima T., Kodama T. Improvement of corrosion resistance of high-velocity oxyfuel-sprayed stainless steel coatings by addition of molybdenum. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, vol. 14, pp. 224–230. DOI: 10.1361/10599630523782.
5. Masumoto T., Hashimoto K. Chemical properties of amorphous metals. *Annual Review of Material Science*, 1978, vol. 8, pp. 215–233.
6. Naka M., Hashimoto K., Masumoto T. Effects of annealing on the corrosion of glassy chromium-containing alloys. *Science Reports of the Research Institutes*, 1977, vol. 26, pp. 283–289.
7. Keryvin V., Hoang V.H., Shen J. Hardness, toughness, brittleness and cracking systems of an iron-based bulk metallic glass by indentation. *Intermetallics*, 2009, vol. 17, pp. 211–217. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.08.017.
8. Gu X.J., Poon S.J., Shiflet G.J., Widom M. Ductility improvement of amorphous steels: roles of shear modulus and electronic structure. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, pp. 88–94. DOI: 10.1016/j.mser.2015.12.001. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.09.011.
9. Qiao J., Jia H., Liaw P.K. Metallic glass matrix composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2016, vol. 100, pp. 1–69. DOI: 10.1016/j.mser.2015.12.001.
10. Stoica M., Eckert J., Roth S., Zhang H.F., Schultz J., Wang W.H. Mechanical behavior of $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5.5}$ bulk metallic glass. *Intermetallics*, 2005, vol. 13, pp. 764–769. DOI: 10.1016/j.intermet.2004.12.016.
11. Berger J.E., Schulz R., Savoie S., Gallego J., Kiminami C.S., Bolfarini C., Botta W.J. Wear and corrosion properties of HVOF coatings from Superduplex alloy modified with addition of boron. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 309, pp. 911–919. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.10.062.
12. Guo Y., Koga G.Y., Jorge A.M., Savoie S., Schulz R., Kiminami C.S., Bolfarini C., Botta W.J. Microstructural investigation of Fe–Cr–Nb–B amorphous/nanocrystalline coating produced by HVOF. *Materials & Design*, 2016, vol. 111, pp. 608–615. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.027.
13. Wang Y., Xing Z.Z., Luo Q., Rahman A., Jiao J., Qu S.J., Zheng Y.G., Shena J. Corrosion and erosion–corrosion behaviour of activated combustion high-velocity air fuel sprayed Fe-based amorphous coatings in chloride-containing solutions. *Corrosion Science*, 2015, vol. 98, pp. 339–353. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.05.044.
14. Zhang C., Chan K.C., Wu Y., Liu L. Pitting initiation in Fe-based amorphous coatings. *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, pp. 4152–4159. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.04.005.
15. Jayaraj J., Kim K.B., Ahn H.S., Fleury E. Corrosion mechanism of N-containing Fe–Cr–Mo–Y–C–B bulk amorphous alloys in highly concentrated HCl solution. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 449–451, pp. 517–520. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.418.
16. Yang Y., Zhang C., Peng Y., Yu Y., Liu L. Effects of crystallization on the corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings. *Corrosion Science*, 2012, vol. 59, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.02.003.
17. Koga G.Y., Jorge Junior A.M., Roche V., Nogueira R.P., Schulz R., Savoie S., Melle A.K., Loable C., Bolfarini C., Kiminami C., Botta W. Production and corrosion resistance of thermally sprayed Fe-based amorphous coatings from mechanically milled feedstock powders. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, vol. 49, pp. 4860–4870. DOI: 10.1007/s11661-018-4785-y.
18. Xie L., Wang Y.-M., Xiong X., Chen Z.-K., Wang Y.-L. Effects of oxygen fuel rate on microstructure and wear properties of detonation sprayed iron-based amorphous coatings. *Materials Transactions Received*, 2018, vol. 3, pp. 1867–1871. DOI: 10.2320/matertrans.M2018273.
19. Kuchumova I.D., Batraev I.S., Cherkasova N.Y., Rybin D.K., Ukhina A.V., Botta W.J., Koga G.Y., Jorge A.M. The influence of the $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$ ratio on the structure and properties of $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ detonation coatings. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 25, pp. 384–386. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.098.
20. Zhou Z., Wang L., Wang F., Liu Y. Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings prepared by detonation gun spraying. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19, pp. 634–638. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60123-9.
21. Wu H., Lan X., Liu Y., Li F., Zhang W., Chen Z., Zai X., Zeng H. Fabrication, tribological and corrosion behaviors of detonation gun sprayed Fe-based metallic glass coating. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, vol. 26, pp. 1629–1637. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64271-1.

22. ASTM B117–19. *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2019. DOI: 10.1520/B0117-19.
23. Sergienko V.I., Denisenko Yu.P., Dobrzhansky V.G., Ognev Yu.F., Berdiev O.Sh., Dushina N.E. Laboratornye ispytaniya korrozionnoi stoikosti legkikh splavov metodom solenogo tumana putem modelirovaniya subtropicheskogo klimata [The bench tests of light alloys for corrosion resistance by a salt fog procedure while modelling a subtropical climate]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2015, no. 3, pp. 85–91.
24. Tretyakov V.I., Bogomolova L.K., Guzova T.S., Krupinina O.A. Metod otsenki korrozionnoi stoikosti alyuminievyykh profilei dlya svetoprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruksii pod deistviem solyanogo tumana [The method of an estimation of corrosion firmness of a paint and varnish covering of aluminium profiles for translucent envelopes protecting designs under the influence of a hydrochloric fog]. *Vestnik MGSU = Mechanics and Mechanical Engineering*, 2011, no. 3, pp. 116–122.
25. Kuchumova I.D., Batraev I.S., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A., Gerasimov K.B., Ukhina A.V., Bulina N.V., Bataev I.A., Koga G.Y., Guo Y., Botta W.J., Kato H., Wada T., Bokhonov B.B., Dudina D.V., Jorge A.M. Formation of metallic glass coatings by detonation spraying of a $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ powder. *Metals*, 2019, vol. 9. DOI: 10.3390/met9080846. Available at: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/8/846>.
26. Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A., Zlobin S.V., Smurov I.Yu. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, pp. 791–801. DOI: 10.3390/met9121244.
27. Ulianitsky V.Yu., Batraev I.S., Shtertser A.A., Dudina D.V., Bulina N.V., Smurov I.Yu. Detonation spraying behaviour of refractory metals: case studies for Mo and Ta-based powders. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29, pp. 1859–1864. DOI: 10.1016/j.apt.2018.04.023.
28. Inoue A. *Bulk Amorphous alloys: preparation and fundamental characteristics*. Uetikon-Zurich, Trans Tech Publications, 1998.
29. Inoue A. Stabilization of supercooled liquid and opening-up of bulk glassy alloys. *Proceedings of the Japan Academy. Series B*, 1997, vol. 73, pp. 19–24. DOI: 10.2183/pjab.73.19.
30. Inoue A. Recent progress of Zr-based bulk amorphous alloys. *Science Reports of the Research Institutes. Tohoku Daigaku Kenkyūjo hōkoku, Series A*, 1996, vol. 42, pp. 1–12.
31. Heller D.K., Fahrenholtz W.G., O'Keefe M.J. The effect of post-treatment time and temperature on cerium-based conversion coatings on Al 2024-T3. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, iss. 2, pp. 360–368. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.09.023.
32. Zeng Z., Sakoda N., Tajiri T., Kuroda S. Structure and corrosion behavior of 316L stainless steel coatings formed by HVOF spraying with and without sealing. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 203, iss. 3–4, pp. 284–290. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.09.011.
33. Zhang J., Wang Z., Lin P., Lu W., Zhou Z., Jiang S. Effect of sealing treatment on corrosion resistance of plasma-sprayed NiCrAl/Cr₂O₃-8 wt.%TiO₂ coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 20, iss. 3, pp. 508–513. DOI: 10.1007/s11666-010-9528-6.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).