
Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-3-13

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Г.С. Севальнев¹, К.Д. Обливанцев¹, К.В. Дульнев¹, Т.Г. Севальнева¹

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

Аннотация. Исследованы структура, твердость и триботехнические характеристики электроискрового покрытия на основе высокоазотистой конструкционной стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V. Установлено, что предельная толщина покрытия на основе стали составляет 34,5 мкм. При этом в процессе нанесения снижается концентрация азота в самом покрытии. Наилучшей износостойкостью обладают образцы с однослойным покрытием толщиной 18 мкм. Нанесение покрытия способствует увеличению износостойкости стали 30ХГСН2А более чем в 3 раза.

Ключевые слова: высокоазотистые стали, электроискровое легирование, покрытие, твердость, микроструктура, износостойкость

Для цитирования: Севальнев Г.С., Обливанцев К.Д., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Структура и свойства электроискрового покрытия на основе высокоазотистой конструкционной стали // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-3-13.

Scientific article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTROSPARK COATING BASED ON HIGH-NITROGEN STRUCTURAL STEEL

G.S. Sevalnev¹, K.D. Oblivantsev¹, K.V. Dulnev¹, T.G. Sevalneva¹

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

Abstract. The structure, hardness and tribological characteristics of the electrospark coating based on high nitrogen structural steel of the Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V alloying system were studied. It was found that the maximum thickness of the coating based on steel is 34,5 μm. Samples with a single-layer coating of 18 μm thick have the best wear resistance. Application of the coating helps to increase the wear resistance of 30KhGSN2A steel by more than 3 times.

Keywords: high nitrogen steels, electrospark alloying, coating, hardness, microstructure, wear resistance

For citation: Sevalnev G.S., Oblivantsev K.D., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Structure and properties of electrospark coating based on high-nitrogen structural steel. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-3-13.

Введение

Развитие современных конструкционных материалов, направленное на обеспечение требуемых характеристик перспективных изделий, начинает приближаться к пределу своих возможностей [1–5]. Это связано с тем, что достаточно подробно изучены процессы взаимодействия легирующих элементов с материалом матрицы. Как следствие, технологии разработки новых систем легирования практически исчерпали свой потенциал. Кроме того, сформировавшееся перспективное направление по разработке сплавов с высокой степенью энтропии имеет ограничения. Несмотря на уникальный комплекс свойств, такие сплавы характеризуются термической нестабильностью, сложностью и высокой стоимостью получения полуфабрикатов [6–9].

Для повышения уровня характеристик конструкционных материалов зачастую применяется термическая обработка и ее комбинированные варианты. В тех случаях, когда эксплуатационное воздействие приходится только на поверхность, проводят ее модификацию (поверхностную термическую и химико-термическую обработку, механическое воздействие), а также наносят различные покрытия. Такие методы позволяют повысить жаростойкость, коррозионную стойкость, триботехнические характеристики и другие свойства материалов [10–14].

Одними из перспективных конструкционных материалов на основе железа являются высокоазотистые экономно- и комплекснолегированные конструкционные и коррозионностойкие стали. В ряде работ [15–20] показано, что по сравнению с углеродистыми конструкционными сталями высокоазотистые обладают более высоким уровнем пластических характеристик, а также могут эффективно работать в условиях сухого трения скольжения, обладая меньшим коэффициентом трения и аустенитной структурой с высокой склонностью к деформационному упрочнению.

Получение полуфабрикатов из высокоазотистых сталей сопряжено с рядом трудностей, в частности с низкой растворимостью азота в железной матрице при выплавке в условиях атмосферного давления. Для повышения растворимости сталь легируют такими элементами, как Cr, Mn, V, W, Mo, а также проводят выплавку или переплав при избыточном давлении в среде азота. В результате последующей обработки остается много обрезков и неликвидного материала, который не рекомендуется повторно использовать при выплавке с целью исключения кипения расплава.

Благодаря положительным триботехническим качествам высокоазотистые стали можно применять в качестве покрытия, обладающего более высокой износостойкостью по сравнению с материалом подложки. При этом стоимость такого покрытия будет достаточно низкой.

В качестве одного из перспективных методов получения покрытий на основе высокоазотистых сталей является электроискровое легирование [21–23]. В основе этого метода лежит процесс микродуговой сварки, в результате которой происходит массоперенос электрода на поверхность подложки. Это обеспечивает подложке свойства, характерные для материала электрода. Для электроискрового легирования не требуется разработки специализированных электродов, а мобильность и технологичность метода позволяют наносить покрытие практически на любые поверхности.

В рамках данной работы исследованы возможности применения высокоазотистых сталей в качестве материала покрытия для повышения триботехнических характеристик сталей перлитного класса.

Материалы и методы

Выплавку экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V проводили методом вакуумной индукционной выплавки шихтовой заготовки, которую впоследствии переплавляли методом электрошлакового переплава под давлением азота 30 ат (3 МПа). Основную концентрацию

азота 0,13 % (по массе), превышающую равновесную на 0,05 % (по массе), обеспечивали путем введения при электрошлаковом переплаве под давлением азотсодержащих шихтовых материалов, таких как азотированный феррохром ФХН-10.

Для формирования покрытия из экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V методом электроискрового легирования изготовлен электрод $\varnothing 5 \times 20$ мм. Покрытие наносили на подложку из конструкционной низколегированной стали 30ХГСН2А.

Содержание азота в электроде и формируемом покрытии определяли в соответствии с ГОСТ 17745–90 «Стали и сплавы. Методы определения газов» с применением метода восстановительного плавления образца в токе гелия.

Металлографическое исследование структуры электроискрового покрытия проводили методом световой микроскопии на оптическом конфокальном инвертированном микроскопе при увеличении $\times 500$. Для качественного выявления структуры покрытия на металлографических шлифах проводили электролитическое травление в 10%-ном растворе щавелевой кислоты в дистиллированной воде.

Толщину покрытия определяли по изображениям микроструктуры путем расчета занимаемой площади относительно общей площади исследуемого участка, твердость – методом Виккерса с нагрузкой 1 кг (~ 10 Н) с применением микротвердомера в соответствии с ГОСТ 2999–75. Ввиду высокой пористости покрытия твердость также оценивали на поперечном шлифе при нагрузке 25 г (0,025 Н).

Для исследования износостойкости покрытия в паре трения со сталью ШХ15-ШД проведены испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения на трибометре по схеме «шарик–диск». Скорость скольжения образца относительно контртела составила $V = 0,2$ м/с, нагрузка на шарик $F = 10$ Н. В качестве контртела использовали шарик радиусом $R_{ш} = 3$ мм с твердостью 940 НВ. Длина трека скольжения составила $l = 44$ мм, путь трения $L = 0,5$ м. Количественную оценку износостойкости при испытаниях на изнашивание в условиях сухого трения скольжения осуществляли по удельной интенсивности изнашивания образца W ($\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$), которую рассчитывали по формуле

$$W = \frac{lbh}{LF}, \quad (1)$$

где l – длина трека скольжения, мм; b , h – ширина и глубина дорожки износа, мм; L – путь трения, м; F – нагрузка, Н.

Удельную интенсивность изнашивания контртела из стали ШХ15-ШД W_k ($\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$) рассчитывали по формуле

$$W_r = \frac{\pi h_c^2 \left(R_{ш} - \frac{h_c}{3} \right)}{LF}, \quad (2)$$

где h_c – толщина изношенного сегмента шарика, мм; $R_{ш}$ – радиус шарика, мм.

Толщина изношенного сегмента шарика определяется по формуле

$$h_c = R_{ш} - \sqrt{R_{ш}^2 - \left(\frac{D_{п}}{2} \right)^2}, \quad (3)$$

где $D_{п}$ – диаметр пятна износа, мм.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В зависимости от режима (силы рабочего тока и тока короткого замыкания) формируется разная толщина исходного покрытия. Для экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V изменение «мягкого» режима на «грубый» приводит к увеличению толщины покрытия с 5 до 20 мкм. Зависимость толщины покрытия от силы рабочего тока имеет линейный характер (рис. 1).

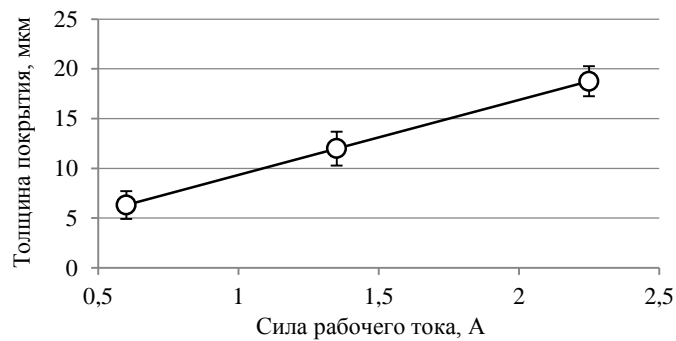


Рис. 1. Зависимость толщины формируемого покрытия из высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V от силы рабочего тока

При электроискровом легировании возможно достижение тонких слоев за один проход, а само покрытие может обладать достаточно большой пористостью. Изучено влияние количества проходов при максимальной силе рабочего тока на толщину формируемого покрытия (рис. 2).

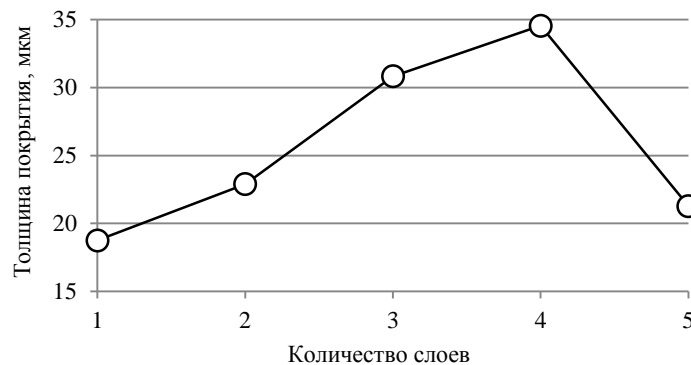


Рис. 2. Зависимость толщины формируемого покрытия из высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V от количества слоев, нанесенных при максимальной силе рабочего тока

Анализ результатов показывает, что при изменении количества слоев с 1 до 4 общая толщина покрытия увеличивается с 18 до 34,5 мкм. Нанесение пятого слоя приводит к уменьшению общей толщины покрытия. В свою очередь это накладывает граничные условия нанесения покрытия: попытка получить покрытие толщиной >30 мкм приводит к его эрозии и уменьшению его толщины до 22 мкм при гальваническом взаимодействии во время короткого замыкания электрода на поверхности.

Металлографические исследования образцов показали, что микроструктура состоит из белого слоя формируемого покрытия, диффузионной зоны перераспределения

легирующих элементов и зоны основного металла подложки (рис. 3). Покрытие представляет собой литую дендритную структуру с высокой степенью искажения, не поддающуюся значительному травлению.

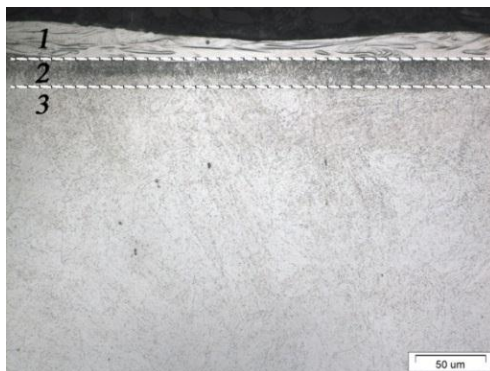


Рис. 3. Микроструктура образца с электроискровым покрытием на основе высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V: 1 – покрытие, 2 – переходная зона, 3 – подложка

В соответствии с законом Сиверса для обеспечения концентраций азота в твердом растворе выше предела растворимости необходимо создать избыточное давление над поверхностью формируемой ванны жидкого расплава. При нанесении покрытия методом электроискрового легирования за счет короткого замыкания электрода на поверхности подложки последовательно реализуются переход в жидкое состояние и ускоренная кристаллизация металла электрода при скорости охлаждения $\geq 10^3$ °C/с в зависимости от температуры материала подложки. Вследствие этого концентрация азота может не снизиться.

Для определения концентрации азота в формируемом покрытии разработана следующая методика:

- берут тонкий лист из стали химического состава, аналогичного составу подложки. Использован лист толщиной 0,3 мм из стали 30ХГСА;
- покрытие наносят с двух сторон при наибольшей силе рабочего тока. В рамках данной работы для корректного определения без реализации процесса эрозии использовали 3 слоя покрытия;
- концентрацию азота [N] (% (по массе)) в покрытии рассчитывают по формуле

$$[N] = \frac{(C_{N_{\text{общ}}} - C_{N_{\text{исход}}})H_{\text{об}}}{H_{\text{п}}V_{\text{пор}}}, \quad (4)$$

где $C_{N_{\text{исход}}}$ – содержание азота в листе без покрытия, % (по массе); $C_{N_{\text{общ}}}$ – содержание азота в листе с покрытием, % (по массе); $H_{\text{об}}$ – толщина образца с покрытием, мкм; $H_{\text{п}}$ – общая толщина покрытия, мкм; $V_{\text{пор}}$ – объемная доля пор в покрытии, %.

Установлено (рис. 4), что концентрация азота в электроде, превышающая равновесное содержание и составляющая 0,130 % (по массе), снизилась до равновесного содержания 0,077 % (по массе). Можно сделать вывод, что для обеспечения исходной концентрации азота нужно проводить процесс под давлением защитного газа (преимущественно азота – для обеспечения градиента концентраций).

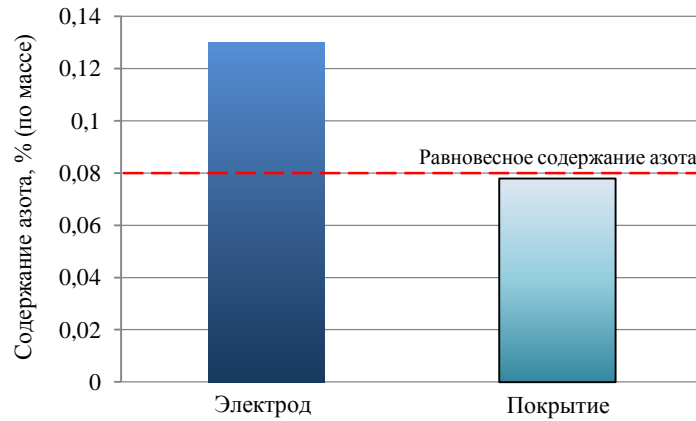


Рис. 4. Сравнение концентрации азота в электроде и в покрытии на основе высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V

Средняя твердость полученного покрытия составляет 710 HV. При этом образец из экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V после закалки и низкого отпуска обладает твердостью 610 HV, т. е. твердость увеличилась на 15 %.

Результаты измерения микротвердости покрытия на микрошлифе представлены на рис. 5. Ввиду пористости покрытия формируется широкий разброс значений микротвердости, средняя величина которой не зависит от количества нанесенных слоев.

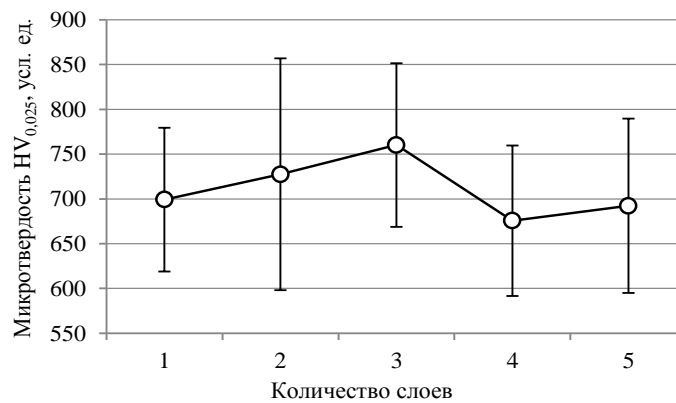


Рис. 5. Зависимость микротвердости покрытия на основе высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V от количества слоев

В работах [17, 18] показано, что высоколегированная высокопрочная высокоазотистая сталь системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V после закалки и низкого отпуска обладает высокой износостойкостью. Формирование покрытия на основе этой стали обеспечивает более высокие значения твердости, что может привести к повышению износостойкости поверхности изделия.

Испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения позволили выявить (рис. 6), что увеличение количества слоев с 1 до 3 приводит к повышению интенсивности изнашивания на 32 и 67 % для образца и контртела соответственно. Предположительно такой характер зависимости свидетельствует о выкрашивании с поверхности покрытия и последующем попадании частиц в зону трибоконтакта, в результате чего происходит абразивное изнашивание. Следует отметить, что каждое последующее нанесение также приводит к увеличению остаточных растягивающих напряжений, которые также негативно сказываются на износостойкости покрытия.

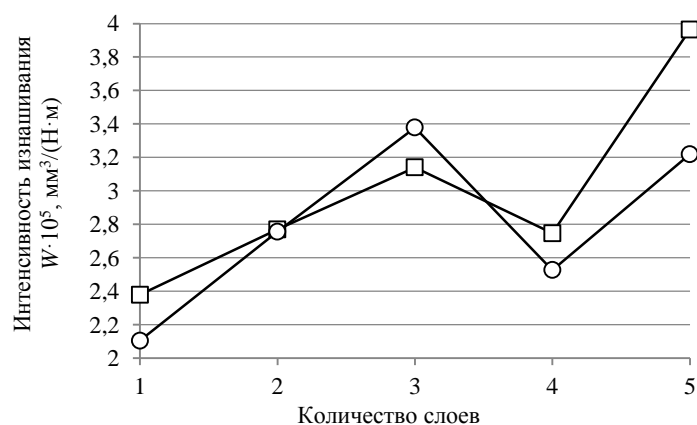


Рис. 6. Влияние количества слоев на интенсивность изнашивания покрытия на основе высокоазотистой стали системы легирования Fe-C-Cr-Mn-Mo-Ni-V (□) и контртела из стали ШХ15-ШД (○)

Увеличение количества слоев до 4 привело к снижению интенсивности изнашивания на 15 и 25 % для образца и контртела соответственно, что может быть связано с процессом «залечивания» дефектов в покрытии при нанесении. Как следствие, интенсивность протекания процесса абразивного изнашивания снижается.

Увеличение количества слоев до 5 вызвало уменьшение толщины покрытия вследствие реализации процесса взаимной эрозии покрытия и электрода при замыкающем контакте. Помимо эрозии, в покрытии могли сформироваться дополнительные дефекты, несплошности и остаточные растягивающие напряжения, что привело к увеличению интенсивности изнашивания образца на 67 % по сравнению с однослойным покрытием. Интенсивность изнашивания контртела также повысилась, но не так значительно, как при трехслойном покрытии: показатель увеличился на 53 % по сравнению со значениями, полученными при фрикционном взаимодействии с образцом с однослойным покрытием.

Для подтверждения работоспособности покрытия проведен сравнительный анализ результатов испытаний на изнашивание в условиях сухого трения исследуемого покрытия, экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe-C-Cr-Mn-Mo-Ni-V и материала подложки – стали 30ХГСН2А (рис. 7). По сравнению с высокоазотистой сталью покрытие на ее основе позволило снизить интенсивность изнашивания образца на 89 %, а по сравнению с материалом подложки – более чем в 3 раза.

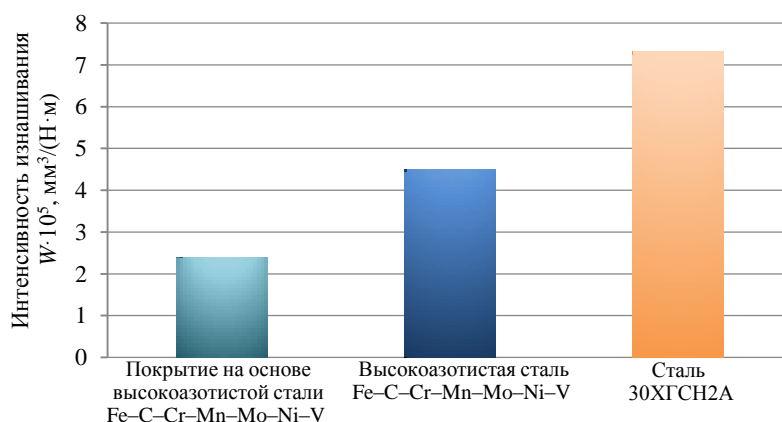


Рис. 7. Сравнение интенсивности изнашивания высокоазотистой стали системы легирования Fe-C-Cr-Mn-Mo-Ni-V, покрытия на ее основе и стали 30ХГСН2А

Заключения

Для повышения уровня характеристик конструкционных материалов с целью обеспечения работы в жестких условиях эксплуатации применяют термическую обработку и ее комбинированные варианты, а также модификации поверхности и нанесение различных покрытий.

Благодаря триботехническим качествам высокоазотистые стали могут использоваться в качестве покрытия, что позволяет повысить износостойкость материала подложки. При этом стоимость такого покрытия будет достаточно низкой. Для нанесения покрытий на основе высокоазотистых сталей одним из наиболее технологичных методов является электроискровое легирование.

В рамках проведенных исследований сделаны следующие выводы:

– предельная толщина покрытия на основе экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V составляет 34,5 мкм, что достигается путем последовательного нанесения 4 слоев при максимальной силе рабочего тока. Дальнейшее увеличение количества слоев приводило к эрозии покрытия и уменьшению его толщины до 22 мкм при гальваническом взаимодействии во время короткого замыкания электрода на поверхности;

– несмотря на высокую скорость кристаллизации, в процессе нанесения покрытия из высокоазотистой стали сверхравновесная концентрация азота изменяется на равновесную. В случае высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V концентрация азота снизилась с 0,13 % (по массе) в электроде до 0,077 % (по массе) в покрытии, что соответствует пределу равновесного содержания при нормальных условиях;

– твердость покрытия из высокоазотистой стали выше на 15 % по сравнению с образцами после упрочняющей обработки, изготовленными из нее;

– увеличение количества слоев с 1 до 3 приводит к повышению интенсивности изнашивания на 32 и 67 % для образца и контртела соответственно, что свидетельствует о выкрашивании с поверхности покрытия и последующем попадании частиц в зону трибоконтакта, в результате чего происходит абразивное изнашивание;

– по сравнению с высокоазотистой сталью покрытие на ее основе имеет интенсивность изнашивания на 89 % ниже, а по сравнению с материалом подложки (сталь 30ХГСН2А) после упрочняющей термической обработки – более чем в 3 раза ниже.

Применение экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ni–V в качестве покрытия, полученного методом электроискрового легирования, позволяет повысить триботехнические характеристики материала подложки. При этом в качестве материалов электродов могут выступать отходные части полуфабрикатов.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
3. Богачев И.А., Сульянова Е.А., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.

4. Вознесенская Н.М., Тоньшева О.А., Елисеев Э.А. Современные конструкционные стали криогенного назначения и влияние некоторых легирующих элементов на их свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.
5. Банных И.О., Ашмарин А.А., Бецофен С.Я. и др. Оптимизация химического состава и параметров термомеханической обработки трип сталей на основе новых методов рентгеновской тензометрии, текстурного и фазового анализов // Металлы. 2022. № 6. С. 66–72.
6. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
7. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. P. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
9. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768.
10. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
11. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Деговец М.Л. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 2. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
12. Филонников А.Л., Ринчинова С.В. Борирование как способ упрочнения рабочих поверхностей технологической оснастки // Символ науки. 2019. № 1. С. 33–35
13. Baptista A., Silva F., Porteiro J. et al. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands // Coatings. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 402.
14. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // Surface and Coatings Technology. 1995. Vol. 76. P. 328–336.
15. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Изд-во «Проф. Марин Дринов», 1995. 272 с.
16. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
17. Севальнев Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
18. Анцыферова М.В., Банных И.О., Лукин Е.И. и др. Структура и свойства высокопрочных низколегированных мартенситных сталей со сверхравновесным содержанием азота // Электрометаллургия. 2023. № 5. С. 2–11. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-5-2-11.
19. Бакрадзе М.М., Вознесенская Н.М., Леонов А.В. и др. Разработка и исследование высокопрочной коррозионностойкой стали для деталей подшипников // Metallurg. 2019. № 11. С. 39–44.
20. Леонов А.В., Вознесенская Н.М., Тоньшева О.А. Влияние параметров термической обработки на свойства и микроструктуру высокопрочной коррозионностойкой стали со сверхравновесным содержанием азота // Сталь. 2022. № 11. С. 35–39.

21. Гадалов В.Н., Филонович А.В., Шкатов В.В. и др. Описание процесса электроискрового легирования (обобщенная модель) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 4 (21). С. 58–66.
22. Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Дорохов А.С., Коневцов Л.А. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования // Инженерные технологии и системы. 2018. Т. 28. № 3. С. 302–320.
23. Алымов М.И., Столин А.М., Бажин П.М. Исследование структуры и свойств защитных покрытий, полученных методом электроискрового легирования СВС-электродами (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 2. С. 40–48.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
3. Bogachev I.A., Sulyanova E.A., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Microstructure and properties investigations of Fe–Cr–Ni stainless steel obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
4. Voznesenskaya N.M., Tonysheva O.A., Eliseev E.A. Modern structural steels of cryogenic purpose and influence of some alloying elements on their properties (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.
5. Bannykh I.O., Ashmarin A.A., Betzofen S.Ya. et al. Optimization of chemical composition and parameters of thermomechanical processing of TRIP steels based on new methods of X-ray tensiometry, texture and phase analysis. *Metally*, 2022, no. 6, pp. 66–72.
6. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
7. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
9. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768.
10. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
11. Laptev A.B., Zakirova L.I., Degovets M.L. Properties of protective galvanic coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 2. Hydrogen embrittlement and frictional characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
12. Filonnikov A.L., Rinchinova S.V. Borating as a method of strengthening the working surfaces of technological equipment. *Simvol nauki*, 2019, no. 1, pp. 33–35.
13. Baptista A., Silva F., Porteiro J. et al. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*. 2018, vol. 8, no. 11, p. 402.
14. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection. *Surface and Coatings Technology*, 1995, vol. 76, pp. 328–336.

15. Rashev Ts.V. *High-nitrogen became. Metallurgy under pressure*. Sofia: Prof. Marin Drinov, 1995, 272 p.
16. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 31, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
17. Sevalnev G.S., Antsyferova M.V., Dulnev K.V., Sevalneva T.G., Vlasov I.I. Influence of nitrogen concentration on the structure and properties of sparingly alloyed structural steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
18. Antsyferova M.V., Bannykh I.O., Lukin E.I. et al. Structure and properties of high-strength low-alloy martensitic steels with super-equilibrium nitrogen content. *Electrometallurgiya*, 2023, no. 5, pp. 2–11. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-5-2-11.
19. Bakradze M.M., Voznesenskaya N.M., Leonov A.V. et al. Development and study of high-strength corrosion-resistant steel for bearing parts. *Metallurg*, 2019, no. 11, pp. 39–44.
20. Leonov A.V., Voznesenskaya N.M., Tonysheva O.A. Influence of heat treatment parameters on the properties and microstructure of high-strength corrosion-resistant steel with super-equilibrium nitrogen content. *Stal*, 2022, no. 11, pp. 35–39.
21. Gadalov V.N., Filonovich A.V., Shkatov V.V. et al. Description of the electric spark alloying process (generalized model). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 4 (21), pp. 58–66.
22. Verkhoturorov A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., Konevtsov L.A. Influence of the nature of electrode materials on the erosion and properties of the alloyed layer. Criteria for assessing the effectiveness of electric spark alloying. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 302–320.
23. Alymov M.I., Stolin A.M., Bazhin P.M. Study of the structure and properties of protective coatings obtained by the method of electric spark alloying with SHS electrodes (review). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, vol. 88, no. 2, pp. 40–48.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Обливанцев Кирилл Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Севальнева Татьяна Геннадьевна, инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill D. Oblivantsev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Dulnev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana G. Sevalneva, Engineer, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.09.2024.
The article was submitted 10.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.09.2024.