

УДК 621.318.2

Д.С. Горлов<sup>1</sup>, И.В. Чередниченко<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>1</sup>, Д.В. Чесноков<sup>1</sup>

## ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАГНИТОВ СИСТЕМЫ РЗМ–Fe–В

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-97-107

*Приведены результаты работ по повышению коррозионной стойкости магнитов системы РЗМ–Fe–В производства КНР путем нанесения ионно-плазменного покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 на промышленной вакуумно-дуговой установке МАП-3. Проведена сравнительная оценка протекторной защиты вакуумно-дугового покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 с уже нанесенным покрытием системы Ni–Cu–Ni в условиях ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 300 °С. Покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13, разработанное и нанесенное во ФГУП «ВИАМ», создает значительно более стойкую защиту магнитов системы РЗМ–Fe–В от коррозионного воздействия по сравнению с гальваническим покрытием системы Ni–Cu–Ni производства КНР.*

**Ключевые слова:** магниты системы РЗМ–Fe–В, гальваническое покрытие системы Ni–Cu–Ni, ионно-плазменное покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13, коррозионная стойкость, ускоренные циклические коррозионные испытания, протекторная защита, анодный эффект, вакуумно-дуговая установка МАП-3.

D.S. Gorlov<sup>1</sup>, I.V. Cherednichenko<sup>1</sup>, R.A. Valeev<sup>1</sup>, D.V. Chesnokov<sup>1</sup>

## IMPROVING THE CORROSION RESISTANCE OF REM–Fe–B MAGNETS

*The article presents the results of work on improving the corrosion resistance of magnets of the REM–Fe–B system manufactured in China, by applying an ion-plasma coating of the SDP-1T + VSDP-13 system on an industrial vacuum-arc installation MAP-3. A comparative assessment of the tread protection of the vacuum-arc coating of the SP-1T + VSP-13 system was carried out with an already applied Ni–Cu–Ni coating under conditions of accelerated cyclic corrosion tests at a temperature of 300 °C. The coating of the SDP-1T + VSDP-13 system, applied in the FSUE «VIAM», creates a much more resistant protection of the magnets of the REM–Fe–B system from corrosion compared to the electroplating of the Ni–Cu–Ni system, manufactured in China.*

**Keywords:** magnets of the REM–Fe–B system, electroplating of the Ni–Cu–Ni system, ion-plasma coating of the SDP-1T + VSDP-13 system, corrosion resistance, accelerated cyclic corrosion tests, tread protection, anode effect, MAP-3 vacuum arc installation.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Постоянные магниты на основе редкоземельных элементов обладают высокими магнитными свойствами, благодаря которым нашли широкое применение во всех отраслях промышленности. Использование высокоэнергетических магнитов позволяет уменьшать масс-габаритные характеристики всевозможных датчиков, двигателей,

генераторов и других электротехнических устройств. В настоящее время это особенно важно, поскольку главная задача состоит в разработке устройств с минимальными объемом и массой. Наиболее эффективными для этой цели являются постоянные магниты на основе интерметаллидных соединений кобальта и железа с редкоземельными металлами (РЗМ), таких как  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{SmPrCo}_5$ ,  $\text{РЗМ}_2\text{Co}_{17}$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  [1–3].

Спеченные магниты системы  $\text{Nd-Fe-B}$  обладают высокими магнитными свойствами (максимальное энергетическое произведение в 10 раз больше, чем у ферритового магнита) и используются в различных изделиях – например, в двигателях гибридных транспортных средств, генераторах и др. Однако у таких магнитов имеются и недостатки: невысокая температура применения (низкая температура Кюри), малая термостабильность и низкая стойкость в условиях коррозионной среды вследствие высокого содержания железа (до 75 %) в составе [4].

В настоящее время для предотвращения возникновения коррозионных поражений и защиты от других неблагоприятных условий внешней среды магниты (а особенно магниты системы  $\text{Nd-Fe-B}$ ) в случае необходимости покрывают различными защитными покрытиями, такими как никель–никель и никель–медь–никель (от 10 до 20 мкм), цинк (от 8 до 20 мкм), никель–медь–золото (от 10 до 20 мкм), дополненными в ряде случаев внешним слоем эпоксидной смолы или специального стойкого полимерного материала либо обработанными фосфатами [5–8].

Для защиты от коррозионного поражения на магнитотвердые материалы наносят покрытия системы  $\text{Ni-Cu-Ni}$ . Никель обеспечивает защиту от коррозии материалов на основе железа только в отсутствие пористости. Промежуточный подслои меди необходим для обеспечения минимальной пористости покрытия, а также упрощения процесса полирования поверхности, что способствует получению более блестящего никелевого покрытия, увеличивающего декоративность магнитного материала. Данная система покрытий является катодной и защищает от коррозии магнитотвердый материал при отсутствии нарушений, а также сколов и трещин покрытий, образование которых возможно в процессе транспортировки или сборки изделия.

Для дополнительной защиты допустимо применение эпоксидных покрытий толщиной не менее 15 мкм. Однако нанесение такой системы покрытий является трудоемким, требует применения гальванических ванн различного состава и дополнительного окрашивания, что значительно усложняет производственный процесс.

Для предотвращения коррозионного поражения материалов, в основном состоящих из железа, наиболее эффективные – покрытия с анодным потенциалом, защищающие материал основы при наличии внешних дефектов покрытия. Примером покрытий с таким защитным эффектом являются поверхностные слои, основу которых составляют цинк, кадмий и алюминий.

Для обеспечения прочности сцепления поверхностных слоев на магнитотвердые материалы возможно нанесение подслоев никеля или меди. Для повышения коррозионной стойкости и микротвердости покрытий анодного типа применяют покрытия на основе сплавов систем  $\text{Ni-Zn}$  или  $\text{Ni-Cd}$ . Все указанные покрытия наносят гальваническим методом, что требует разработки и изготовления оснастки, а также утилизации растворов травления, электролитов и промывных вод.

Для использования в особо агрессивной среде рекомендуется применять комбинацию различных видов защитных покрытий.

Однако в авиационной промышленности помимо гальванических технологий по защите деталей от коррозионных поражений применяют и вакуумно-дуговые способы формирования ионно-плазменных коррозионностойких покрытий [9, 10].

Во ФГУП «ВИАМ» для защиты от коррозионных поражений изделий из материалов с большим содержанием железа разработаны коррозионностойкие вакуумно-дуговые покрытия, состоящие из конденсированных слоев систем СДП-1 и ВСДП-20 и с вариантом насыщения поверхности сплавом системы ВСДП-20 – так называемое алюмокобальтсилицирование. Для противодействия солевой коррозии разработаны покрытия систем СДП-1Т и ВСДП-13. Значение толщины коррозионностойких защитных вакуумно-дуговых покрытий варьируется в диапазоне от 10 до 80 мкм [11].

Цель данной работы – демонстрация возможности применения ионно-плазменной технологии для защиты магнитов системы РЗМ–Fe–В от коррозионного поражения.

Исследование выполнено в рамках научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионные и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

### Материалы и методы

Для сравнительной оценки протекторной защиты гальванического и вакуумно-дугового покрытий в качестве образцов выбраны магниты системы РЗМ–Fe–В производства КНР с уже нанесенным покрытием системы Ni–Cu–Ni. Альтернативным вариантом коррозионностойкого покрытия выбрано вакуумно-дуговое покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13, которое наносили во ФГУП «ВИАМ» по общепризнанной практике на немагнитные образцы магнитов с использованием промышленной установки МАП-3 [13, 14].

Внешний вид промышленной ионно-плазменной установки МАП-3 для вакуумно-дугового нанесения покрытий представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид промышленной ионно-плазменной установки МАП-3 для вакуумно-дугового нанесения покрытий

Основной операцией при нанесении противокоррозионных покрытий на магниты системы РЗМ–Fe–В является подготовка поверхности.

Для противокоррозионных покрытий, наносимых по гальванической технологии, применяют поверхностную подготовку в виде химической активации, т. е. выполняют удаление естественной оксидной пленки путем обработки в растворах кислот. При нанесении противокоррозионных покрытий вакуумно-дуговым методом одним из вариантов подготовки поверхности является обдувка электрокорундом. При такой технологии часть магнитов с покрытием системы Ni–Cu–Ni подвергается обдувке поверхности электрокорундом марки 25А F100 для удаления гальванического слоя. Обработку проводят до получения однородной матовой поверхности.

Внешний вид образцов во время обдувки электрокорундом представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид образцов во время обдувки электрокорундом

После поверхностной обработки электрокорундом проводили обдувку сухим сжатым воздухом класса чистоты 4 с точкой росы не более  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  для удаления электрокорунда с поверхности. Внешний вид магнитов системы РЗМ–Fe–В после обдувки сухим сжатым воздухом представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид магнитов системы РЗМ–Fe–В после обдувки сухим сжатым воздухом

Для процесса нанесения покрытия применяются трубные литые катоды марок СДП-1Т и ВСДП-13.

Внешний вид рабочей камеры промышленной ионно-плазменной установки МАП-3 для вакуумно-дугового нанесения противокоррозионных покрытий представлен на рис. 4.

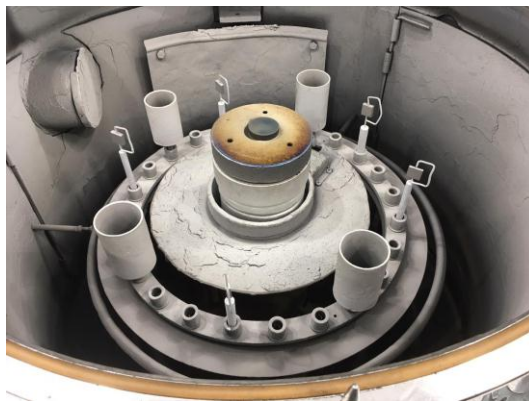


Рис. 4. Внешний вид рабочей камеры промышленной ионно-плазменной установки МАИ-3 для вакуумно-дугового нанесения противокоррозионных покрытий

Образцы пластины из магнитов системы РЗМ–Fe–В располагали в рабочей камере напылительной установки МАИ-3 с возможностью ассистированного осаждения так, чтобы максимум напыления был в центре образца.

Сравнительное испытание на определение стойкости к воздействию хлористого натрия (NaCl) гальванического покрытия системы Ni–Cu–Ni и ионно-плазменного покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 проводили в электропечи ПЛ 20/12,5 методом ускоренных циклических коррозионных испытаний (УЦКИ) при температуре 300 °С в соответствии с регламентом РТМ 1.2.189–2006 [15–18].

Анализ внешнего вида коррозионных повреждений магнитов с покрытиями и толщины коррозионных покрытий до проведения УЦКИ и после них выполняли на инвертируемом оптическом микроскопе Olympus GX51 с системой анализа изображения при увеличении  $\times 500$ .

### Результаты и обсуждение

Одной из косвенных оценок, указывающих на правильность выбора состава и конструкции вакуумно-дуговых покрытий, является оценка адгезии к материалу подложки. Первичные данные о правильности выбора покрытия можно получить после вскрытия рабочей камеры напылительной установки. С помощью визуального осмотра можно убедиться в качественном нанесении покрытия – без сколов, вздутий и отшелушиваний.

На рис. 5 представлен внешний вид образца магнита системы РЗМ–Fe–В после нанесения покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13.



Рис. 5. Внешний вид образца магнита системы РЗМ–Fe–В после нанесения покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13

На образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В после нанесения покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 сколов, вздутий и отшелушиваний не обнаружено.

Внешний вид образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 в исходном состоянии и после термической обработки представлен на рис. 6.

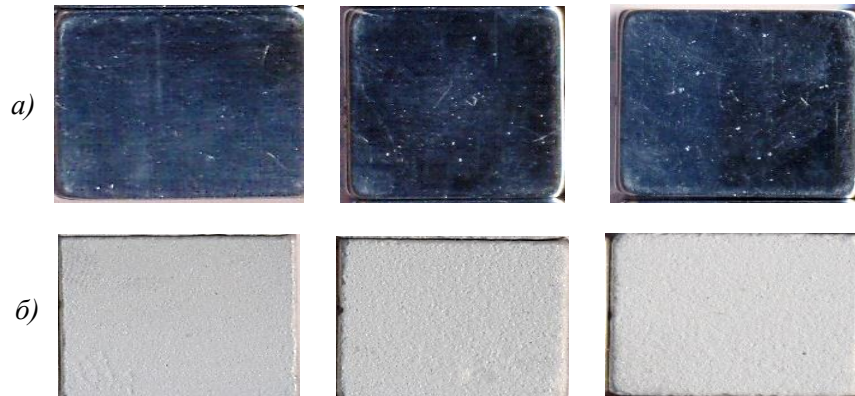


Рис. 6. Внешний вид образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni (а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (б) в исходном состоянии и после термической обработки

На образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В после нанесения покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 сколов, вздутий и отшелушиваний не обнаружено.

Покрытие системы Ni–Cu–Ni имеет блестящий светло-серый цвет, а покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13 – темно-серый матовый цвет. Дефектов на поверхности покрытий не наблюдается.

Для определения толщины противокоррозионных покрытий и косвенной оценки адгезии проведен металлографический анализ образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 в исходном состоянии с помощью металлографического микроскопа Olympus GX51 с цифровой системой обработки изображения при увеличении  $\times 500$ .

Микроструктуры образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с указанными покрытиями в исходном состоянии представлены на рис. 7.

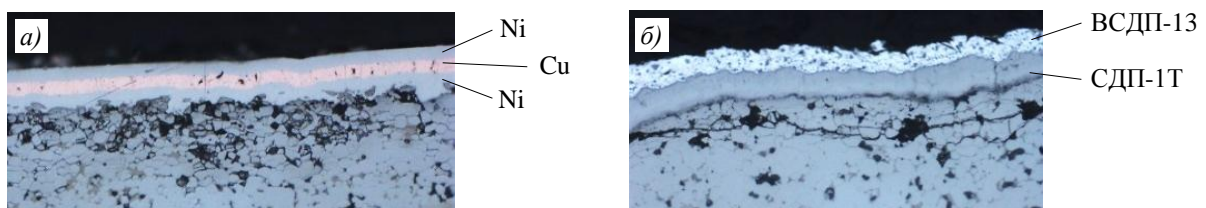


Рис. 7. Микроструктуры ( $\times 500$ ) образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni (а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (б) в исходном состоянии

На микроструктурах четко видна слоистая структура исследуемых покрытий, а также граница раздела «магнит–покрытие».

Показано, что толщина покрытия системы Ni–Cu–Ni равна 15 мкм, где толщина слоев (Ni, Cu и Ni) составляет по 5 мкм каждый. Толщина покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 равна 26,2 мкм, где толщина слоя СДП-1Т составляет 14,7 мкм, а слоя ВСДП-13: 11,5 мкм.

Для исследования защитных противокоррозионных свойств покрытий проведены УЦКИ продолжительностью 10 циклов при температуре 300 °С.

Внешний вид образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 после проведения УЦКИ без продуктов коррозии представлен на рис. 8.

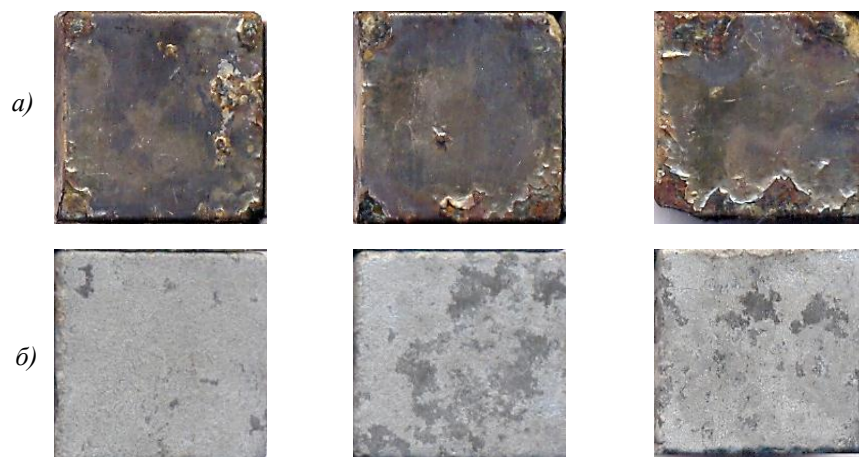


Рис. 8. Внешний вид образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni (а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (б) после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 300 °С без продуктов коррозии

На образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В производства КНР с покрытиями системы Ni–Cu–Ni после проведения УЦКИ продолжительностью 10 циклов при температуре 300 °С видны коррозионные повреждения, которые в основном сосредоточены на краях. По-видимому, это связано с особенностью гальванической технологии формирования покрытия. Тогда как на образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями системы СДП-1Т + ВСДП-13 отшелушиваний на краях не обнаружено. На поверхностном слое покрытия видны более темные области, вызванные реакцией на соль NaCl, однако коррозионных повреждений не наблюдается, что подтверждается данными удельного изменения массы образцов после удаления продуктов коррозии.

Средние значения удельного изменения массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 при температуре 300 °С после 10 циклов УЦКИ с продуктами коррозии и после их удаления представлены в таблице.

**Средние значения удельного изменения массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с различными покрытиями при температуре 300 °С после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний с продуктами коррозии и после их удаления**

Покрытие системы	Средние значения удельного изменения массы образцов, г/м <sup>2</sup> , после проведения испытания	
	с продуктами коррозии	без продуктов коррозии
Ni–Cu–Ni	18,6	–47,9
СДП-1Т + ВСДП-13	13,5	2,9

Установлено, что среднее значение удельного изменения массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытием системы Ni–Cu–Ni при температуре 300 °С после 10 циклов УЦКИ с продуктами коррозии составляет 18,6 г/м<sup>2</sup>, а с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13: 13,5 г/м<sup>2</sup>. Разница составила ~27 %. После удаления

продуктов коррозии среднее значение удельного изменения массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытием системы Ni–Cu–Ni составляет  $-47,9 \text{ г/м}^2$ , а с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13:  $2,9 \text{ г/м}^2$ . Разница составила  $\sim 94 \%$ , что свидетельствует о стойкости вакуумно-дугового покрытия после проведения 10 циклов УЦКИ при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  по сравнению с гальваническим покрытием.

На рис. 9 представлены гистограммы среднего значения удельного изменения массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 после 10 циклов УЦКИ при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  с продуктами коррозии и после их удаления.

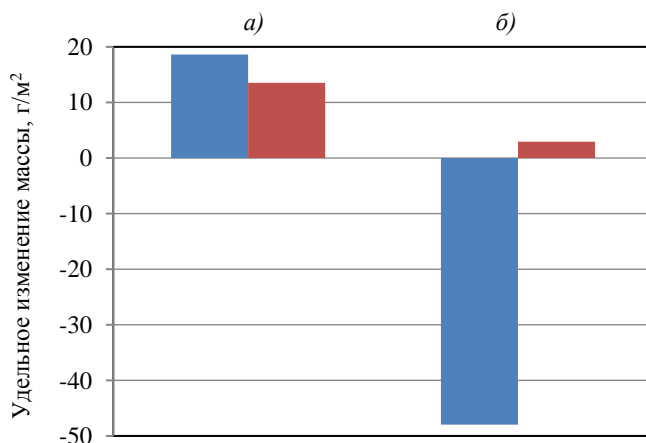


Рис. 9. Гистограммы среднего значения удельного изменения массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В с покрытиями систем Ni–Cu–Ni (■) и СДП-1Т + ВСДП-13 (■) после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  с продуктами коррозии (а) и после их удаления (б)

На рис. 9 наглядно показана разница в поведении покрытий после воздействия определенных условий (10 циклов УЦКИ при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Для покрытия системы Ni–Cu–Ni после удаления продуктов коррозии характерно существенное снижение массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В по причине их разрушения на углах, тогда как покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13 после данной операции имеет незначительное увеличение удельного изменения массы относительно исходного состояния перед испытаниями, что подтверждает защитный эффект ионно-плазменного коррозионностойкого покрытия.

Для исследования структуры покрытий систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 после 10 циклов УЦКИ при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  без продуктов коррозии на образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В проведен металлографический анализ.

Микроструктуры таких покрытий без продуктов коррозии на образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В после проведения УЦКИ представлены на рис. 10.

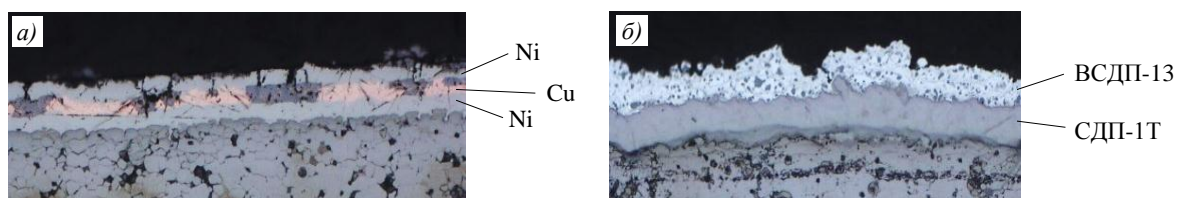


Рис. 10. Микроструктуры покрытий систем Ni–Cu–Ni (а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (б) после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  без продуктов коррозии на образцах магнитов системы РЗМ–Fe–В

Результаты металлографического анализа показали, что обнаружены коррозионные поражения на поверхности магнита системы РЗМ–Fe–В с покрытием системы Ni–Cu–Ni после проведения УЦКИ продолжительностью 10 циклов при температуре 300 °С. Произошла деградация внешнего слоя из никеля и дальнейшее окисление промежуточного слоя из меди. На микроструктуре магнита системы РЗМ–Fe–В с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13 деградации покрытия и коррозионных повреждений не обнаружено.

Значения толщин покрытий систем Ni–Cu–Ni и СДП-1Т + ВСДП-13 практически не изменились по сравнению со значениями толщин указанных покрытий в исходном состоянии перед испытаниями в условиях УЦКИ, что подтверждает стойкость данных коррозионностойких покрытий при воздействии 3 %-ного раствора NaCl.

### **Заключения**

Представлены результаты работ по повышению коррозионной стойкости магнитов системы РЗМ–Fe–В путем нанесения ионно-плазменного покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 с использованием промышленной вакуумно-дуговой установки МАП-3.

Для сравнительной оценки протекторной защиты гальванического и ионно-плазменного покрытий в качестве образцов выбраны магниты системы РЗМ–Fe–В производства КНР с уже нанесенным покрытием системы Ni–Cu–Ni. В качестве альтернативного варианта коррозионностойкого покрытия используется ионно-плазменное покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13.

Ионно-плазменное коррозионностойкое покрытие наносили во ФГУП «ВИАМ» по общепризнанной практике на немагнитные образцы магнитов на промышленной установке МАП-3.

Основной операцией при нанесении противокоррозионных покрытий на магниты системы РЗМ–Fe–В является подготовка поверхности. Для противокоррозионных покрытий, наносимых по гальванической технологии, применяют поверхностную подготовку в виде химической активации, т. е. выполняют удаление естественной оксидной пленки путем обработки в растворах кислот. При нанесении противокоррозионных покрытий вакуумно-дуговым методом одним из вариантов подготовки поверхности является обработка электрокорундом марки 25А F100. Обдувку поверхностного слоя покрытия проводят до получения однородной матовой поверхности.

Сравнительное испытание на определение стойкости к воздействию соли NaCl гальванического покрытия системы Ni–Cu–Ni и ионно-плазменного покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 проводили в электропечи ПЛ 20/12,5 методом УЦКИ при температуре 300 °С в соответствии с регламентом РТМ 1.2.189–2006. Установлены зависимости удельного изменения массы магнитов с коррозионностойкими покрытиями системы Ni–Cu–Ni, полученными гальваническим способом, и покрытиями системы СДП-1Т + ВСДП-13, полученными ионно-плазменным методом, после проведения 10 циклов УЦКИ при температуре 300 °С с продуктами коррозии и после их удаления. Показано, что значение удельного изменения массы магнитов с покрытием системы Ni–Cu–Ni с продуктами коррозии на 28 % больше, чем у магнитов с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13, что свидетельствует о большем окислении поверхности гальванического покрытия по сравнению с ионно-плазменным. После удаления продуктов коррозии значение удельного изменения массы магнитов с покрытием системы Ni–Cu–Ni становится на 94 % меньше, чем у магнитов с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13, что свидетельствует о стойкости ионно-плазменного покрытия к воздействию соли NaCl при температуре 300 °С.

На гистограммах, представленных на рис. 9, наглядно отражена разница в поведении покрытий после проведения 10 циклов УЦКИ при температуре 300 °С. Для покрытия системы Ni–Cu–Ni после удаления продуктов коррозии характерно существенное снижение массы образцов магнитов системы РЗМ–Fe–В по причине их разрушения на углах, тогда как покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13 после данной операции имеет незначительное увеличение удельного изменения массы относительно исходного состояния перед испытаниями, что подтверждает защитный эффект ионно-плазменного коррозионностойкого покрытия.

С помощью металлографического анализа обнаружены следы коррозионных поражений на поверхности магнита системы РЗМ–Fe–В с покрытием системы Ni–Cu–Ni после проведения 10 циклов УЦКИ при температуре 300 °С и деградация внешнего слоя из никеля. На микроструктуре магнита системы РЗМ–Fe–В с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13 деградации покрытия и коррозионных повреждений не обнаружено.

Ионно-плазменное коррозионностойкое покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13, нанесенное во ФГУП «ВИАМ», создает значительно более стойкую защиту магнитов системы РЗМ–Fe–В от коррозионного воздействия по сравнению с гальваническим покрытием системы Ni–Cu–Ni производства КНР.

### Библиографический список

1. Игнатов А.С. Исследование и разработка способа получения гибких магнитных материалов на основе системы Nd–Fe–В: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2018. 127 с.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Piskorskii V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B., Kunitsyna E.I., Talantsev A.D. Competition of Single-ion Anisotropy of Sm and Dy ions During the Spin-reorientation Transition in  $(Nd_{1-x-y}Sm_xDy_y)(FeCo)B$  Supermagnets // *Physics of the Solid State*. 2016. Vol. 58. No. 7. P. 1320–1324.
3. Dmitriev A.I., Kunitsyna E.I., Morgunov R.B., Kucheryaev V.V., Valeev R.A., Piskorskii V.P., Ospennikova O.G., Kablov E.N. Effect of Samarium Impurity on the Relaxation of the Magnetization of a  $(NdDy)(FeCo)B$  alloy // *Physics of the Solid State*. 2016. Vol. 58. No. 8. P. 1582–1586.
4. Савченко Е.С. Формирование структуры и магнитных свойств сплава  $Fe_2NiAl$  после литья и закалки расплава: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МИСиС, 2016. 150 с.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
6. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Балахонов С.В., Лещев К.А. Исследование структуры и свойств химического покрытия Ni–В // *Труды ВИАМ*. 2014. № 12. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-7-7.
7. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.
8. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И. Замена кадмия. Этап 2 – заключительный. Гальванотермическое покрытие системы «цинк–олово» – реальная альтернатива кадмиевому покрытию // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
9. 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.

10. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 71–81.
11. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаропрочного сплава ЖС36 с различными типами ионно-плазменных покрытий на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии в области температур 850–900 °С // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-5-5.
12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. Пискорский В.П., Королев Д.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Куницына Е.И. Физика и инженерия постоянных магнитов / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 360 с.
14. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
15. Баранов А.Н., Гусева Е.А., Комова Е.М. Исследование коррозионной стойкости сталей, применяемых для изготовления дражного оборудования для добычи золота // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 1 (21). С. 102–106.
16. Росляков В.И. Повышение коррозионной стойкости и надежность бытовой техники при эксплуатации // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2012. № 4 (22). С. 29–32.
17. Замалетдинов И.И. Коррозия и защита металлов. Коррозия порошковых материалов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. 188 с.
18. Россина Н.Г., Попов Н.А., Жилиякова М.А., Корелин А.В. Коррозия и защита металлов: учеб.-метод. пособие: в 2 ч. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. Ч. 1: Методы исследований коррозионных процессов. 108 с.