

Научная статья

УДК 546.65

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107

## ЗАЩИТНОЕ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЕ ПОКРЫТИЕ МАГНИТОВ СИСТЕМЫ РЗМ–Fe–B

С.А. Демин<sup>1</sup>, С.В. Заварзин<sup>1</sup>, И.В. Чередниченко<sup>1</sup>, И.А. Козлов<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** При современных тенденциях к экономии и повышению эффективности использования электроэнергии магнитные материалы системы Nd–Fe–B находят широкое применение при производстве полностью электрических транспортных средств: автомобилей (Tesla), авиационной техники, а также в новых источниках энергии – например, в ветрогенераторах. Рассмотрены различные способы нанесения защитных покрытий на магнитные материалы системы Nd–Fe–B, режимы подготовки поверхности и произведена оценка влияния технологии нанесения противокоррозионных покрытий на их защитную способность, величину остаточной индукции и коэрцитивной силы по намагниченности магнитных материалов.

**Ключевые слова:** постоянные магниты, редкоземельные магниты Nd–Fe–B, электролитические покрытия, гальванические покрытия, никелирование, защита от коррозии, ионно-плазменные покрытия

**Для цитирования:** Демин С.А., Заварзин С.В., Чередниченко И.В., Козлов И.А. Защитное противокоррозионное покрытие магнитов системы РЗМ–Fe–B // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.

Scientific article

## PROTECTIVE ANTICORROSIVE COATING OF MAGNETS OF THE REM–Fe–B SYSTEM

S.A. Demin<sup>1</sup>, S.V. Zavarzin<sup>1</sup>, I.V. Cherednichenko<sup>1</sup>, I.A. Kozlov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** In the current trends towards saving and increasing the efficiency of electricity use, magnetic materials of the Nd–Fe–B system are widely used in the production of fully electric vehicles: cars (Tesla), aircraft, as well as new energy sources – for example, wind turbines. Considers various methods of applying protective coatings to magnetic materials of the Nd–Fe–B system, surface preparation modes and evaluates the effect of the technology of applying anticorrosive coatings on their protective ability, the magnitude of residual induction and coercive force on the magnetization of magnetic materials.

**Keywords:** permanent magnets, rare earth magnets Nd–Fe–B, electrolytic coatings, electroplating, nickel plating, corrosion protection, ion-plasma coatings

**For citation:** Demin S.A., Zavarzin S.V., Cherednichenko I.V., Kozlov I.A. Protective anticorrosive coating of magnets of the REM–Fe–B system. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.

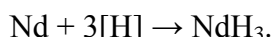
### Введение

При работе в условиях воздействия коррозионно-активных и агрессивных сред повышение уровня эксплуатационных показателей достигается улучшением свойств поверхности изделия – формированием на ней покрытий, обладающих высоким уровнем требуемых свойств – износостойкости, твердости, жаростойкости, коррозионной стойкости и др. [1–5].

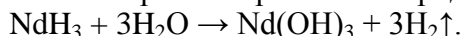
Фаза, богатая неодимом, имеет важное значение в магнитном упрочнении и способствует повышению уровня свойств магнитных материалов системы Nd–Fe–B [6–8]. Химическая активность фаз, богатых неодимом, очень высока, поэтому такие фазы легко подвержены коррозии и активно взаимодействуют с водой с выделением атомарного водорода [9]:



Выделяющийся водород образует гидриды с химически активной фазой магнитных материалов:



Образующиеся гидриды неодима обладают еще большей химической активностью и значительно увеличивают скорость образования продуктов коррозии:



Ускоренные коррозионные испытания свидетельствуют о крайне низкой стойкости магнитных материалов системы Nd–Fe–B в условиях воздействия повышенной влажности и наличия хлорид ионов, которые являются активаторами коррозионного процесса [10–12].

На рис. 1 представлен внешний вид образцов магнита системы Nd–Fe–B без защитных покрытий после коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ).



Рис. 1. Внешний вид магнита системы Nd–Fe–B в исходном состоянии (а) и после коррозионных испытаний в камере солевого тумана в течение 15 мин (б) и 24 ч (в)

Уже через 15 мин экспозиции в КСТ наблюдается образование цветов побежалости и начало образования продуктов коррозии железа бурого цвета, а через сутки экспозиции площадь коррозионных поражений составляет 100 % от площади магнита. Интенсивные коррозионные процессы приводят к разрушению матричной фазы  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , что приводит к механическому разрушению данных материалов вследствие их высокой хрупкости [13–18].

Для предотвращения коррозии стальной основы и матричной фазы  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  на материалы наносят различные системы гальванических покрытий на основе никеля. При определенных режимах нанесения возможно получение беспористых покрытий, что предотвращает контакт основного материала с коррозионно-активной средой, особенно содержащей хлорид-ионы  $\text{Cl}^-$  [19].

Для повышения декоративности магнитных материалов наносят медное покрытие, которое способствует снижению шероховатости многослойных покрытий, снижению числа пор и позволяет наносить финишное блестящее никелевое покрытие [20].

Значение потенциала систем покрытий на основе никеля является катодным по отношению к стальной основе и способствует ускоренному развитию коррозионного процесса при механических повреждениях магнитных материалов (сколов, трещин).

Применение многослойных покрытий значительно увеличивает трудоемкость процесса их нанесения, зачастую требуется дополнительное окрашивание эпоксидными эмалями для увеличения защитной способности покрытий [21].

Наиболее эффективными покрытиями для защиты от коррозии являются покрытия, имеющие более отрицательное значение электрохимического потенциала по отношению как к стальной основе, так и к матричной фазе, содержащей неодим. При небольших нарушениях покрытий такого типа наблюдается активный коррозионный процесс, вызванный анодным растворением защитного покрытия и не затрагивающий основного металла [22]. Наиболее эффективными покрытиями жертвенного типа по отношению к стали являются цинковые и кадмиевые покрытия. Цинковые покрытия обеспечивают наибольшую разницу потенциалов по отношению к стальной основе, что и объясняет их высокую скорость коррозии в условиях воздействия повышенной влажности и в присутствии хлорид-ионов. Кадмиевые покрытия обладают повышенной защитной способностью и коррозионной стойкостью в этих условиях.

### Материалы и методы

Для вакуумно-дугового нанесения противокоррозионных покрытий выплавлены катоды из никелевого сплава марки СДП-1Т и алюминиевого сплава марки ВСДП-13.

Шероховатость поверхности образцов после активации и нанесения защитных покрытий измеряли на профилометре Olympus LEXT OLS4100 по ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Шероховатость оценивали по величине среднего арифметического отклонения профиля шероховатости ( $R_a$ ).

Для оценки эффективности защитных покрытий проведены ускоренные коррозионные испытания в КСТ в соответствии с ГОСТ 9.308–85 (метод 1) с непрерывным распылением 5 %-ного раствора хлористого натрия в течение 720 ч.

Исследования микроструктуры защитных покрытий проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения при увеличении  $\times 500$ .

Коррозионные свойства образцов в виде рабочих электродов оценивали путем измерения электрохимических характеристик в 3 %-ном растворе хлорида натрия при температуре  $20 \pm 5$  °С. Для измерений использовали прижимную трехэлектродную ячейку объемом 250 мл при площади контакта  $1 \text{ см}^2$ . Потенциал рабочего электрода измеряли относительно хлоридсеребряного (Ag/AgCl) электрода сравнения  $E = +197 \pm 3$  мВ/н.в.э. Противоеlectродом служила платиновая сетка. Исследование проводили на потенциостате/гальваностате Solartron 1287 при управлении программным обеспечением CorreWare, обработку результатов производили с помощью программы CView.

Цель данной работы – изучение коррозионного поведения магнитных материалов, содержащих неодим (Nd), разработка метода подготовки поверхности магнитных материалов под нанесение гальванических покрытий, проведение ускоренных коррозионных испытаний и электрохимических исследований многослойных гальванических покрытий на магнитных материалах.

### Результаты и обсуждение

Для защиты от коррозионного повреждения магнитов системы РЗМ\*–Fe–В в рамках исследования предложены следующие варианты противокоррозионных покрытий:

---

\* Редкоземельные металлы.

- покрытие системы Co–Cr–Al–Ti–Y, сформированное при распылении катода из никелевого сплава марки СДП-1Т;
- покрытие системы Al–Ni–Si–Y, сформированное при распылении катода из алюминиевого сплава марки ВСДП-13;
- гальваническое покрытие никель–медь–никель–олово;
- гальваническое кадмиевое и цинковое покрытия;
- гальваническое покрытие никель–цинк.

Присутствие матричной фазы  $Nd_2Fe_{14}B$  из-за повышенной химической активности значительно затрудняет нанесение гальванических покрытий вследствие интенсивного взаимодействия с компонентами электролитов, в связи с чем выбор метода подготовки поверхности является актуальной задачей.

Для повышения адгезионных свойств защитных покрытий может быть использовано химическое активирование в растворах кислот для создания необходимой шероховатости поверхности. Для предотвращения растворения матричной фазы магнитных материалов в электролитах для нанесения гальванических покрытий, необходимо создание пассивной пленки.

В табл. 1 представлены растворы для подготовки поверхности магнитов перед нанесением защитных покрытий.

Таблица 1

**Состав растворов для активации поверхности магнитов перед нанесением защитных покрытий**

Условный номер раствора	Состав раствора	Убыль массы, г	Средние значения шероховатости ( $R_a$ ), мкм	
			в исходном состоянии	после обработки
1	100 г/л соляной кислоты + 45 г/л уротропина	2,32	0,9	1,9
2	25 г/л соляной кислоты + 65 г/л серной кислоты	2,38		1,0
3	На основе фторидов	0,24		0,7

Особенностью подготовки поверхности магнитов системы Nd–Fe–B является их высокая химическая активность в растворах кислот, что приводит к сильному растраву и повышенному шламообразованию на поверхности магнита и, как следствие, к ухудшению качества нанесенных защитных покрытий. На рис. 2 представлен внешний вид магнита системы Nd–Fe–B с защитным цинковым покрытием, полученным после различных способов подготовки поверхности.



Рис. 2. Внешний вид магнита системы Nd–Fe–B с защитным цинковым покрытием в зависимости от способа подготовки поверхности – активации в растворах 1 (а) и 2 (б), а также в растворе на основе фторидов 3 (в)

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для активации поверхности магнитов системы Nd–Fe–В предложен состав на основе фторидов, образующий на поверхности пленку, которая защищает от дальнейшего растворения активной матрицы не только в растворе для активации поверхности, но и в растворах электролитов, что позволяет наносить различные защитные гальванические покрытия.

Для повышения адгезионных свойств покрытий, наносимых вакуумно-дуговым методом, требуется пескоструйная обработка поверхности при давлении до 0,5 МПа.

Для исследования защитных свойств противокоррозионных покрытий на образцах магнитов системы Nd–Fe–В проведены испытания на общую коррозионную стойкость в условиях ускоренных коррозионных испытаний в КСТ с непрерывным распылением 5 %-ного раствора хлористого натрия в течение 720 ч экспозиции.

Внешний вид магнитов системы Nd–Fe–В с противокоррозионными покрытиями до и после 720 ч испытаний в КСТ представлен на рис. 3.

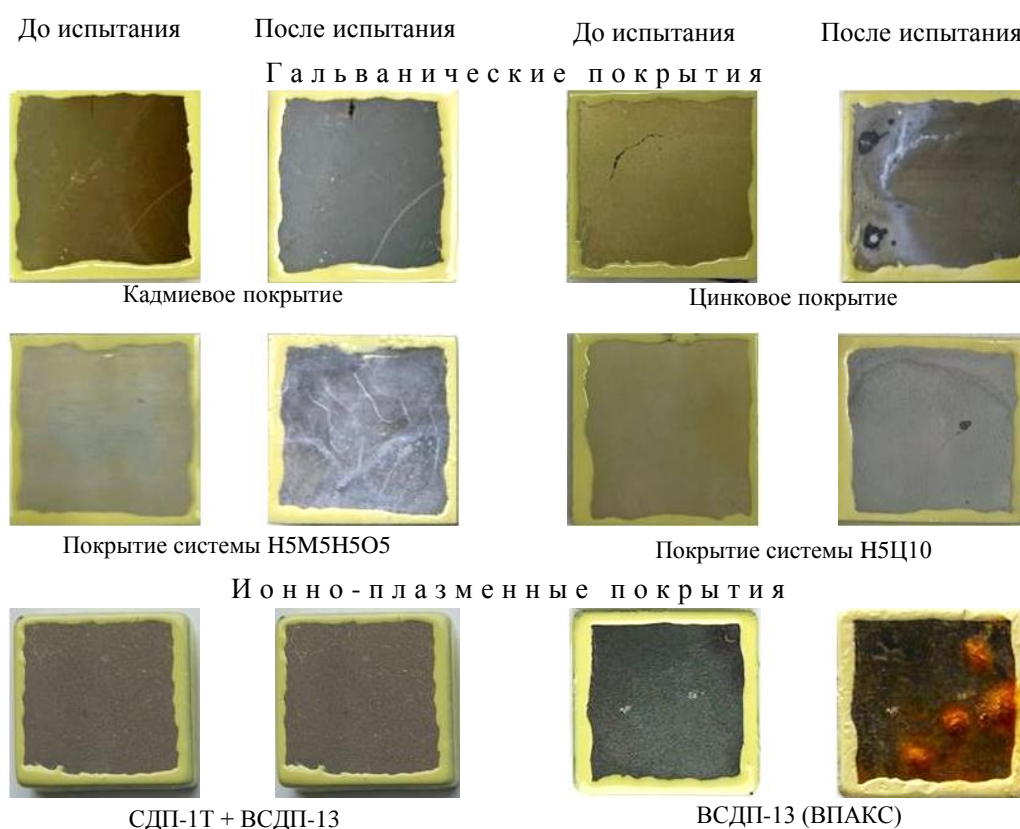


Рис. 3. Внешний вид образцов магнитов системы Nd–Fe–В с противокоррозионными покрытиями до и после 720 ч испытаний в камере солевого тумана

По результатам испытаний установлено, что наиболее стойкими в условиях воздействия солевого тумана оказались гальванические покрытия системы Н5М5Н5О5 и кадмиевое покрытие, а среди ионно-плазменных – покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13.

Проведены исследования микроструктуры опытных образцов магнитов с выбранными защитными покрытиями после экспозиции в КСТ. Результаты исследований приведены на рис. 4.

Установлено, что высокая защитная способность исследуемых покрытий обусловлена прежде всего низкой пористостью предложенных систем покрытий. Средняя толщина покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 составила 26,3 мкм, толщина покрытий

системы H5M5H5O5 находилась в пределах от 18,5 до 23 мкм, кадмиевое покрытие обеспечило защиту магнита системы Nd–Fe–В при толщине 9–12 мкм.

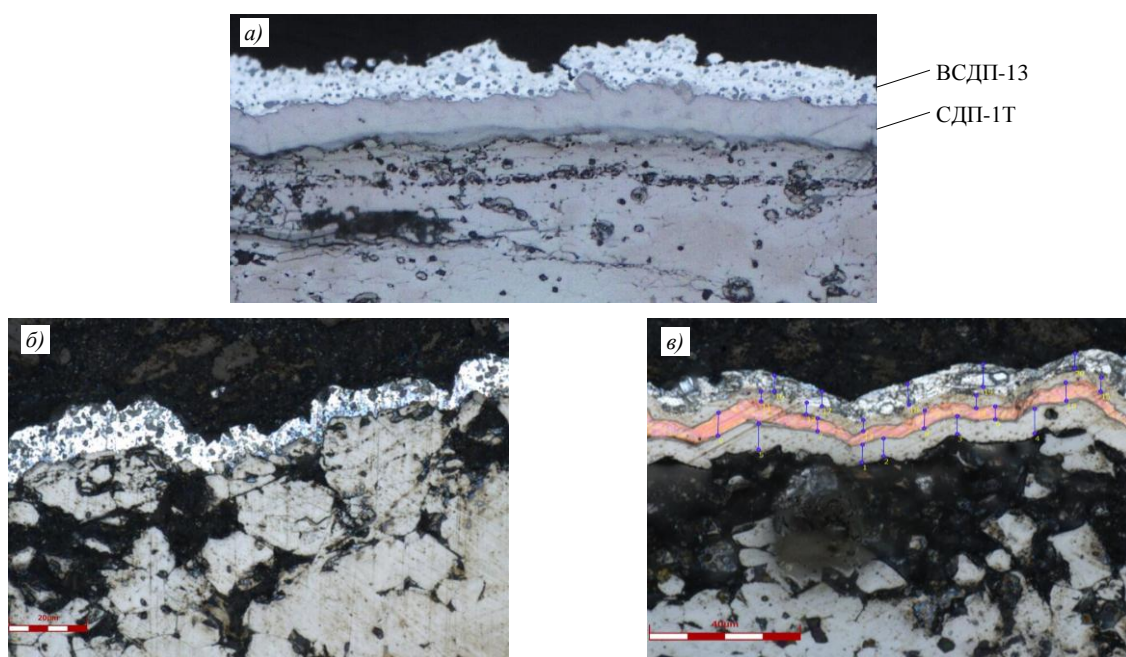


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 500$ ) опытной партии образцов магнита системы Nd–Fe–В с противокоррозионными покрытиями после испытаний в камере солевого тумана в течение 720 ч: а – покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13; б – кадмиевое покрытие; в – гальваническое покрытие системы H5M5H5O5

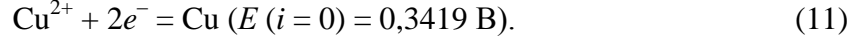
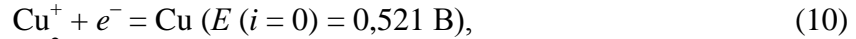
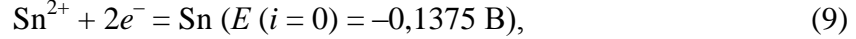
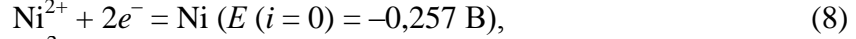
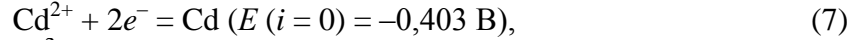
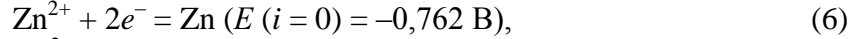
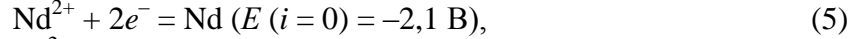
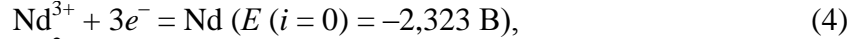
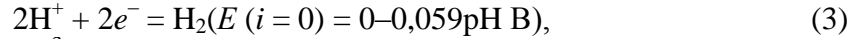
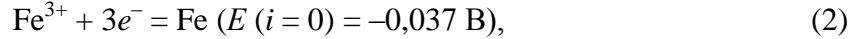
Для уточнения коррозионного поведения цинкового и кадмиевого покрытий и покрытия системы H5M5H5O5 проведено электрохимическое исследование путем измерения потенциала разомкнутой цепи ( $E_{р.ц}$ ) и методом линейной вольтамперометрии (ЛВ). В качестве объекта сравнения выбран магнит системы Nd–Fe–В без покрытия. Измерение  $E_{р.ц}$  проводили до и после регистрации кривых ЛВ. После помещения образцов с покрытиями в электролит значения  $E_{р.ц}$  (табл. 2) быстро достигали плато и принимали стационарное значение. После регистрации кривых ЛВ величина  $E_{р.ц}$  принимала значение, близкое к исходному, что может свидетельствовать об обратимости протекающих на поверхности процессов. При помещении в электролит образца системы Nd–Fe–В без покрытия наблюдалась иная картина. За время измерения (10 мин) значение  $E_{р.ц}$  плавно смещается в отрицательную область, не выходя на плато. Выхода на плато не наблюдалось и при измерении величины  $E_{р.ц}$  после регистрации кривых ЛВ. Подобное поведение может быть следствием коррозии образца без покрытия.

Таблица 2

Сводные данные электрохимических измерений образцов магнита системы Nd–Fe–В с различными покрытиями и без покрытия

Покрытие	$E_{р.ц}$ , В	$E (i = 0)$ , В	$i_0$ , мкА/см <sup>2</sup>
Без покрытия	-0,58	-0,68	3,36
Zn	-0,79	-0,90	3,38
Cd	-0,53	-0,54	2,29
H5M5H5O5	-0,25	-0,24	0,29

После представления результатов ЛВ в полулогарифмических координатах (рис. 5) с помощью уравнения Тафеля получены основные электрохимические характеристики исследуемых систем: потенциал нулевого тока  $E (i = 0)$ , определяемый протекающими на поверхности электрода процессами, и плотность тока обмена  $i_0$ , характеризующая скорость данных процессов. Анализ полученных результатов затрудняется тем, что величина  $E (i = 0)$  является результатом суперпозиции нескольких разнонаправленных процессов. Так, в зависимости от материала покрытия на электроде могут протекать одна или несколько из следующих реакций:



В случае покрытий Zn и H5M5H5O5 потенциалопределяющими процессами, по-видимому, являются реакции (6) и (8) соответственно. Однако в случае Zn покрытия перезарядка электрода происходит на  $\sim 100$  мВ при более отрицательных потенциалах. В случае образца магнита системы Nd–Fe–B без покрытий коррозионные процессы протекают при потенциалах более отрицательных нежели потенциал пары Fe(II)/Fe (реакция (1)), что объясняется присутствием в сплаве более активного металла (неодима). Похожая ситуация наблюдается на образцах с Cd покрытием, однако в данном случае присутствие более активного металла может быть следствием его диффузии из сплава.

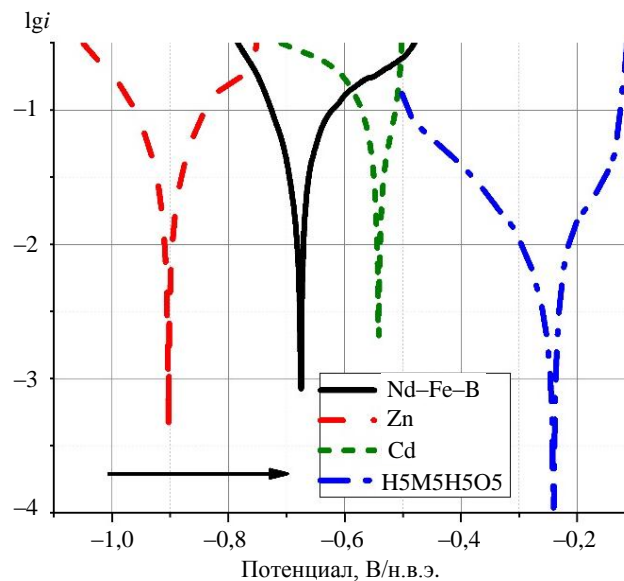


Рис. 5. Кривые, полученные с помощью уравнения Тафеля, для образцов системы Nd–Fe–B с покрытиями и без покрытия

Полученные данные свидетельствуют о том, что для обеспечения коррозионной устойчивости магнитов системы Nd–Fe–B наиболее подходящими являются покрытия на основе кадмия и системы H5M5H5O5. Из всех исследованных систем наименьшим значением  $i_0$  обладали образцы с покрытием H5M5H5O5.

Исследовано влияние систем защитных покрытий на магнитные свойства постоянных магнитов системы Nd–Fe–B: остаточную индукцию  $B_r$ , коэрцитивную силу по намагниченности  $H_{cl}$ , максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{max}$ , а также проведены замеры на образцах магнитов с покрытиями и без них.

На рис. 6 приведена кривая размагничивания магнитного материала, содержащего матричную фазу  $Nd_2Fe_{14}B$ , без покрытия.

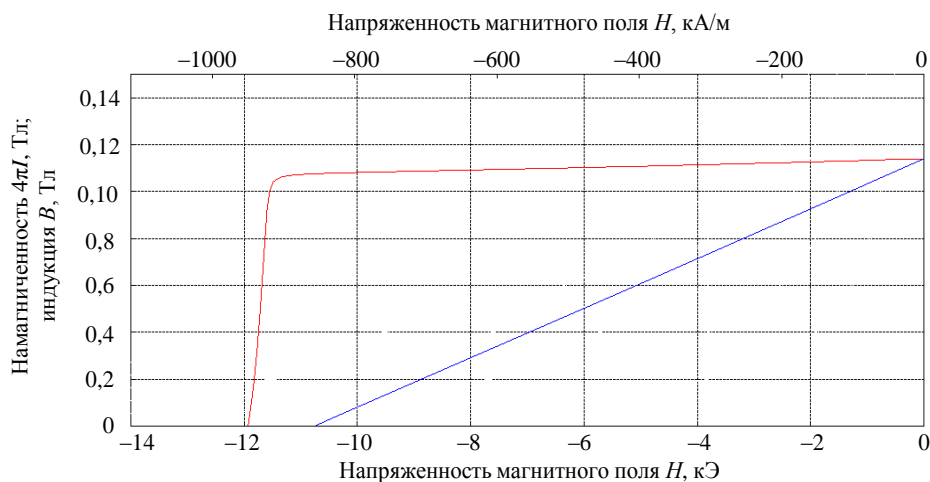


Рис. 6. Кривая размагничивания магнитного материала, содержащего матричную фазу  $Nd_2Fe_{14}B$ , без покрытия

Кривая размагничивания магнитного материала с кадмиевым покрытием представлена на рис. 7.

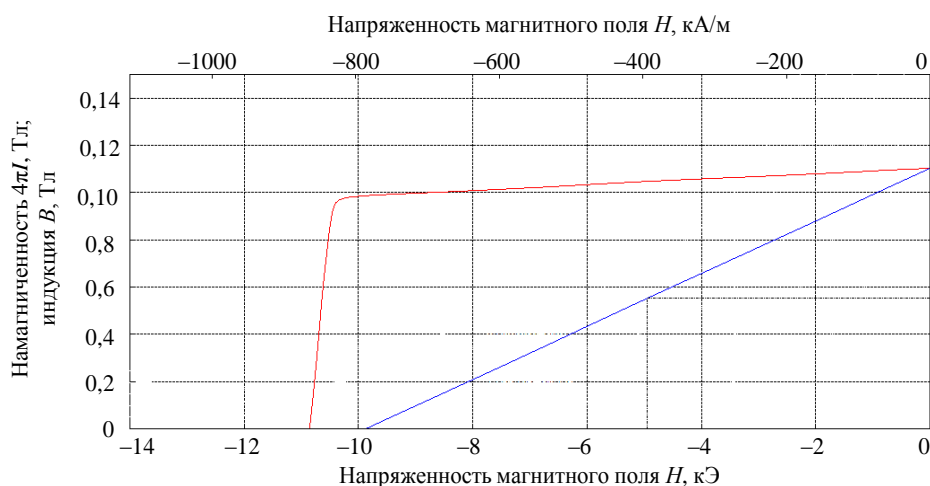


Рис. 7. Кривая размагничивания магнитного материала с кадмиевым покрытием

Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием системы H5M5H5O5 представлена на рис. 8.

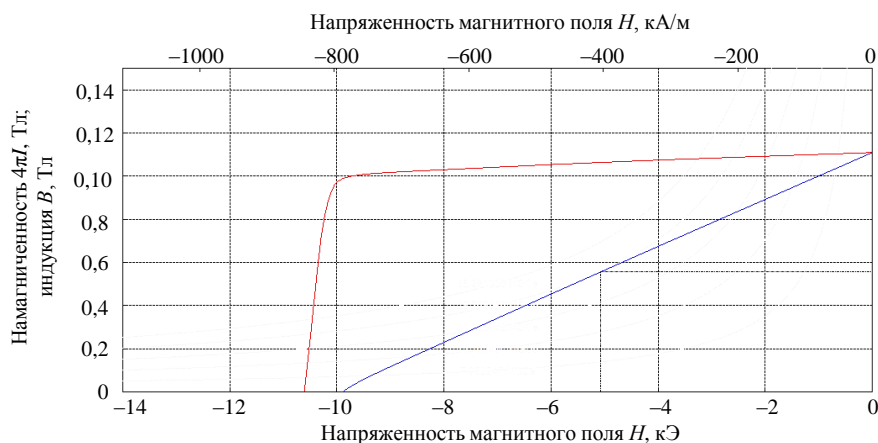


Рис. 8. Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием системы H5M5H5O5

Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13 представлена на рис. 9.

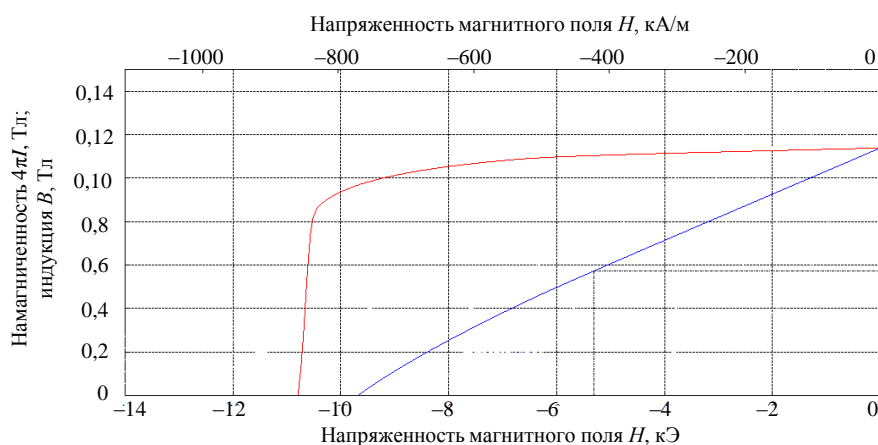


Рис. 9. Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием СДП-1Т + ВСДП-13

В результате исследований установлено, что все выбранные варианты покрытий не снижают значений остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{cl}$ , максимального энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  на магнитах системы Nd-Fe-B.

### Заключения

В рамках исследований предложен способ активации поверхности магнитных материалов системы Nd-Fe-B методом обработки в растворах фторидов, позволяющий наносить широкий спектр защитных гальванических покрытий без растрыва поверхности.

Электрохимическое исследование путем измерения потенциала разомкнутой цепи  $E_{p.c}$  и методом линейной вольтамперометрии показали, что наиболее эффективными покрытиями для магнитных материалов системы Nd-Fe-B являются покрытия, обеспечивающие материалу анодную защиту – в частности, покрытия на основе цинка, однако при этом отмечается высокая скорость коррозионных процессов.

Проведено исследование защитных свойств противокоррозионных покрытий в условиях ускоренных коррозионных испытаний в КСТ, по результатам которых выбраны: покрытие системы H5M5H5O5 и кадмиевое покрытие, полученные

гальваническим методом, а также покрытие СДП-1Т + ВСДП-13, полученное вакуумно-дуговым способом, которые обеспечивают минимальную пористость при толщине покрытий не более 25 мкм.

Исследовано влияние систем защитных покрытий на магнитные свойства постоянных магнитов. Показано, что все выбранные варианты покрытий не снижают эксплуатационных свойств постоянных магнитов: коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимального энергетического произведения.

#### Список источников

1. Пуцыкин Г.Г., Пашков П.П., Вейциль М.Я. Исследование теплофизических условий получения и структуры кристаллически анизотропных постоянных магнитов // Физика металлов и металловедение. 1963. Т. 15. Вып. 4. С. 118–123.
2. Савченко А.Г. Магниты Nd–Fe–В и перспективные технологии их производства // Сб. материалов семинара «Научно-технологическое обеспечение деятельности предприятий, институтов и фирм» (МИСиС, 1 июля 2003 г.). М.: МГИУ, 2003. С. 510–546.
3. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
4. Королев Д.В., Столянков Ю.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бахметьев М.В., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Магнитные свойства и полосовые домены в микрополосках PrDyFeCoB // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
5. Коновалов В.В., Дубинский С.В., Макаров А.Д., Доценко А.М. Исследование корреляционных зависимостей между механическими свойствами авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
6. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
7. 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.
8. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
9. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // Металлы Евразии. 2010. № 2. С. 6–11.
10. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
11. 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.
12. Лобынцев Е.С., Глушко И.М., Кузнецов В.М. Получение магнитов со столбчатой структурой методом литья в сотовые формы // Электротехническая промышленность. Электротехнические стали. 1974. Вып. 9 (38). С. 15–19.
13. Лившиц Б.Г., Еникеев Г.Х., Блатов В.Г. Получение магнитов высоких энергий из сплава ЮНДК35Т5БА в промышленных условиях // IV Всесоюз. конф. по постоянным магнитам. Новочеркасск: АН СССР, 1971. С. 38.
14. Скляр А.Е., Чабан И.П., Гриднев А.И., Власов В.Г. Получение монокристаллов сплавов для постоянных магнитов в промышленных условиях // Выращивание тугоплавких редких металлов. М.: Наука, 1973. С. 8–11.

15. Пикунов М.В., Беляев И.В., Сидоров Е.В. Кристаллизация сплавов и направленное затверждение отливок. Владимир: Владимирск. гос. ун-т, 2002. 213 с.
16. Пискорский В.П. Термостабильные магнитотвердые материалы на основе редкоземельных интерметаллидов с тетрагональной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2014. 36 с.
17. Ayres R.U., Peiró L.T. Material efficiency: Rare and critical metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2013. Vol. 371 (1986). P. 20110563. DOI: 10.1098/rsta.2011.0563.
18. Nakamura H., Hirota K., Shima M. et al. Magnetic properties of extremely small Nd-Fe-B sintered magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005. Vol. 41. No. 10. P. 3844–3846.
19. Schultz L., El-Aziz A.M., Barkleit G., Mummert K. Corrosion behaviour of Nd-Fe-B permanent magnetic alloys // *Materials Science and Engineering A*. 1999. Vol. 267. No. 2. P. 307–313.
20. Ishii R., Miyoshi T., Kanekiyo H., Hirotsawa S. High-coercivity nanocomposite permanent magnet based on Nd-Fe-B-Ti-C with Cr addition for high-temperature applications // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. Vol. 312. No. 2. P. 410–413.
21. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. С. 496–497.
22. Довгалецкий Я.М. Литые магниты из сплавов Магнико. М.: Машиностроение, 1964. С. 151–152.

### References

1. Putsykin G.G., Pashkov P.P., Vejtse M.Ya. Investigation of the thermophysical conditions for obtaining and the structure of crystalline anisotropic permanent magnets. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1963, vol. 15, is. 4, pp. 118–123.
2. Savchenko A.G. Nd-Fe-B magnets and promising technologies for their production. *Materials of the seminar "Scientific and technological support for the activities of enterprises, institutions and firms"*. Moscow: MGIU, 2003, pp. 510–546.
3. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. The thermal stability of rare-earth magnets supported by means of the magnetocaloric effect. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
4. Korolev D.V., Stolyankov Yu.V., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Bahmetiev M.V., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Magnetic properties and magnetic strip domains in micro stripes PrDyFeCoB. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 03, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
5. Konovalov V.V., Dubinskiy S.V., Makarov A.D., Dotsenko A.M. Research of correlation dependencies between mechanical properties of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
6. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-2-3-11.
7. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
9. Kablov E.N. Innovative development is the most important priority of the state. *Metaliy Eurazii*, 2010, no. 2, pp. 6–11.
10. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.

11. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
12. Lobyntsev E.S., Glushko I.M., Kuznetsov V.M. Obtaining magnets with a columnar structure by casting into honeycomb molds. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost'. Elektrotehnicheskkiye stali*, 1974, is. 9 (38), pp. 15–19.
13. Livshits B.G., Enikeev G.Kh., Blatov V.G. Production of high-energy magnets from YUNDK35T5BA alloy under industrial conditions. *IV All-Union. conf. by permanent magnets*. Novocherkassk: AN SSSR, 1971, p. 38.
14. Sklyarov A.E., Chaban I.P., Gridnev A.I., Vlasov V.G. Obtaining single crystals of alloys for permanent magnets in industrial conditions. *Growing refractory rare metals*. Moscow: Nauka, 1973, pp. 8–11.
15. Pikunov M.V., Belyaev I.V., Sidorov E.V. *Crystallization of alloys and directional solidification of castings*. Vladimir: Vladimir State University, 2002, 213 p.
16. Piskorsky V.P. *Thermostable hard magnetic materials based on rare-earth intermetallic compounds with a tetragonal structure*: thesis abstract, Dr. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2014, 36 p.
17. Ayres R.U., Peiro L.T. Material efficiency: Rare and critical metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, vol. 371 (1986), p. 20110563. DOI: 10.1098/rsta.2011.0563.
18. Nakamura H., Hirota K., Shima M. et al. Magnetic properties of extremely small Nd–Fe–B sintered magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 10, pp. 3844–3846.
19. Schultz L., El-Aziz A.M., Barkleit G., Mummert K. Corrosion behavior of Nd–Fe–B permanent magnetic alloys. *Materials Science and Engineering A*, 1999, vol. 267, no. 2, pp. 307–313.
20. Ishii R., Miyoshi T., Kanekiyo H., Hirosawa S. High-coercivity nanocomposite permanent magnet based on Nd–Fe–B–Ti–C with Cr addition for high-temperature applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, vol. 312, no. 2, pp. 410–413.
21. Kekalo I.B., Samarin B.A. Physical metallurgy of precision alloys. *Alloys with special magnetic properties*. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 496–497.
22. Dovgalevsky Ya.M. *Cast magnets from Magnico alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1964, pp. 151–152.

**Информация об авторах**

**Демин Семен Анатольевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Заварзин Семен Витальевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Чередниченко Игорь Валерьевич**, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Козлов Илья Андреевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Semen A. Demin**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Semen V. Zavarzin**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Igor V. Cherednichenko**, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Ilya A. Kozlov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.04.2022.  
The article was submitted 04.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 07.04.2022.