



**Received:** 05.08.2022  
**Revised:** 29.08.2022  
**Accepted:** 30.09.2022  
**DOI:** 10.17804/2410-9908.2022.5.006-014

## MAGNETICALLY ACTIVE COATINGS FOR ELECTRICAL MATERIALS

Yu. N. Dragoshanskii<sup>a)</sup>, V. I. Pudov<sup>b)\*</sup>

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation*

<sup>a)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6401-4300>  drago@imp.uran.ru;  
<sup>b)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3143-7195>  pudov@imp.uran.ru

\*Corresponding author. E-mail: pudov@imp.uran.ru;  
Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russian Federation  
Tel.: +7 (343) 378 36 94

The prospects of using nitride-oxide and magnesium phosphate electrical insulating coatings on thin strips of magnetically soft alloys based on silicon iron are considered. X-ray diffraction topography, powder figures, and magnetic measurements have shown that coatings create uniformly distributed tensile stresses in materials, increase uniaxial magnetic anisotropy, and reduce the volume of transversely magnetized domains and the width of longitudinally magnetized ones. This increases magnetic permeability and significantly decreases the coercive force, as well as eddy-current and total (by 20–25 %) magnetic losses. Tensile (magnetically active) coatings enhance the effect of subsequent thermomagnetic treatment of alloys.

**Keywords:** Fe-3%Si anisotropic alloy, crystal structure, coating, domains, magnetic properties.

### Acknowledgments

*The work was performed under a state assignment from the Russian Ministry of Education and Science, themes Magnet, No. 122021000034-9, and Diagnostics, No. 122021000030-1.*

### References

1. *GOST 21427.1–83*. Steel electrical cold-rolled anisotropic sheet. Moscow, Standards Publ., 1983, 17 p.
2. Puzhevich R.B., Tsyrlin M.B., Korzunin G.S. Influence of electrical insulating coatings on the properties of anisotropic electrical steel. *FMM*, 2006, vol. 102, pp. 366–375. DOI: 10.1134/S0031918X06100048.
3. Dragoshanskii Yu.N., Pudov V.I. Optimization by deformation effects of the structure and properties of Fe-Si alloys with different texture. *Letters on Materials*, 2018, 8 (1), pp. 66–70. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-66-70. (In Russian).
4. Dragoshanskii Yu.N., Korzunin G.S., Mel'nikov M.B., Pyatygin A.I., Chistyakov V.K. Effect of tensile stresses on the magnetic characteristics of modern anisotropic electrical-sheet steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2006, vol. 101, No. 4, pp. 329–335. DOI: 10.1134/S0031918X06040041.
5. Hubert A., Schafer R. *Magnetic domains*, Berlin, Springer, 2009, 686 p.
6. Khanzhina T.A., Bamburov V.G., Dragoshansky Yu.N., Vlasova Z.N., Bescherevnykh I.V., Alekseev V.A. A solution for applying an electrically insulating coating on steel and a method for obtaining it. *SU Patent 1608243*, 1990.

7. Zaikova V.A., Startseva I.E., and Filippov B.N. *Domennaya struktura i magnitnye svoistva elektrotekhnicheskikh stali* [Domain Structure and Magnetic Properties of Electric Steels]. Moscow, Nauka Publ., 1992. (In Russian).
8. Shur Ya.Sh., Startseva I.E., Shulika V.V. The method of thermomagnetic processing of magnetically soft materials. *SU Author's certificate 566886*, 1977.
9. Dragoshansky Yu.N., Pudov V.I., Karenina L.S. Optimizing the domains and reducing the magnetic losses of electrical steel via active coating and laser treatment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, ser. Physics*, 2013, 77 (10), pp. 1286–1288. DOI: 10.3103/S1062873813100080.
10. Jensen E.D., Mele A., Reiche R., Schneider M., Stir O. Electrical sheet steel with a coating that improves electrical insulation and a method for its production. *RF Patent 2635501*, 2017.

Подана в журнал: 05.08.2022

УДК 621.758;537.622

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.006-014

## МАГНИТОАКТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. Н. Драгошанский<sup>а)</sup>, В. И. Пудов<sup>б)\*</sup>

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
18, С. Ковалевской, 620108, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

<sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6401-4300>  [drago@imp.uran.ru](mailto:drago@imp.uran.ru);

<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3143-7195>  [pudov@imp.uran.ru](mailto:pudov@imp.uran.ru)

\* Ответственный автор. Эл. почта: [pudov@imp.uran.ru](mailto:pudov@imp.uran.ru)

Адрес для переписки: С. Ковалевской, 18, 620108, Екатеринбург, Российская Федерация

Тел.: +7 (343)378-36-94

Рассмотрены перспективы применения нитридно-оксидных и магний-фосфатных электроизоляционных покрытий на тонкие ленты магнитомягких сплавов на основе кремнистого железа. Методами рентгеновской дифракционной топографии, порошковых фигур и магнитными измерениями показано, что покрытия создают однородно распределенные растягивающие напряжения в материалах, повышают одноосную магнитную анизотропию, уменьшают объем поперечно намагниченных и ширину продольно намагниченных доменов. Это обеспечивает увеличение магнитной проницаемости, значительное снижение коэрцитивной силы, вихретоковых и полных (на 20–25 %) магнитных потерь. Растягивающие (магнитоактивные) покрытия усиливают эффект последующей термомагнитной обработки сплавов.

**Ключевые слова:** анизотропный сплав Fe-3 % Si, кристаллическая структура, покрытие, домены, магнитные свойства.

### 1. Введение

Магнитомягкие стали и сплавы на основе кремнистого железа как в кристаллотекстурованном, так и в аморфном состояниях обладают достаточно высокой магнитной индукцией насыщения (~1,6–2,1 Тл) и максимальной магнитной проницаемостью  $\sim(10^5-10^6 \text{ Гс/Э})$ . Тонкие ленты этих сплавов (~100 мкм толщиной, соответствующей минимуму потерь в их зависимости от толщины материала) широко используются в качестве магнитопроводов различных электротехнических преобразователей и устройств в переменных магнитных полях повышенных частот перемагничивания. В этих условиях работы наряду с увеличением магнитной проницаемости, снижением коэрцитивной силы и магнитострикции требуется понижение удельных потерь энергии на перемагничивание. В настоящее время это достигается прежде всего за счет снижения ширины (D) полосовых магнитных доменов, определяющей скорость смещения доменных границ в магнитном поле и величину вихретоковой составляющей (P<sub>в</sub>) полных магнитных потерь (P). Между тем, повышение остроты кристаллографической текстуры в современных электротехнических сталях, увеличивающее магнитную проницаемость, вызывает и нежелательный рост кристаллических зерен, ослабление магнитных полей рассеяния на их границах, переход полосовых доменов в смежные кристаллы, что увеличивает D, P<sub>в</sub> и P [1].

Аналогичная проблема возникает при формировании большой ширины полосовых доменов и, следовательно, повышенных магнитных потерь, существует также и в тонких слабо анизотропных лентах аморфных ферромагнитных сплавов с преобладанием планарно-

го распределения намагниченности. Отсюда понятна положительная роль текстурирующих воздействий, в частности наведение одноосной магнитной анизотропии путем дробления доменов с поперечной ориентацией намагниченности с уменьшением их суммарного объема, а также и ширины  $D$ , связанных с ними полосовых магнитных доменов.

Наиболее эффективными способами создания индуцированной одноосной магнитной анизотропии в ферромагнетиках с положительной магнитострикцией являются приложение одноосных растягивающих напряжений и продольная термомагнитная обработка, уменьшающие период полосовой доменной структуры и, следовательно,  $R_v$  и  $R$  [1]. При этом максимальный эффект растяжений в анизотропных материалах достигается при достаточно высокой оптимальной текстуре [2, 3] и в промышленных условиях реализуется за счет использования магнитоактивных электроизоляционных покрытий (ЭИП) с коэффициентом теплового линейного расширения (КТЛР) меньшим, чем КТЛР сплава. Нанесение и формирование их на поверхности ферромагнитной ленты при повышенных температурах, а затем охлаждение до комнатной температуры всего композита металл–керамика вызывают плоскостное растяжение ферромагнетика, которое в анизотропном материале приводит к усилению одноосной магнитной анизотропии. При этом уменьшаются объем замыкающих и ширина основных полосовых доменов, вихретоковые и полные магнитные потери [2, 3].

Однако современные ЭИП на основе магний-фосфатов, формируемые на ферромагнитных лентах обычной толщины ( $\sim 0,3$  мм) методом растворной керамики, содержат промежуточный грунтовый слой. Такие покрытия создают зону внутреннего окисления, неоднородное распределение растягивающих напряжений и блокируют положительный эффект последующей термомагнитной обработки. Эти покрытия лишь незначительно снижают магнитные потери в стали (на 3–8 % [4]) и непригодны для многослойных магнитопроводов из тончайших ферромагнитных лент.

## 2. Состав образцов и покрытий

Для тончайших ферромагнетиков, используемых в переменных полях повышенной частоты, применяли ленты аморфных сплавов  $Fe_{81}Si_4B_{13}C_2$ ;  $Fe_{81}Si_7B_{12}$ ;  $Fe_{72}Co_8Si_5B_{15}$  толщиной 0,02 мм и поликристаллических сплавов Fe-3 % Si и Fe-7 % Al толщиной 0,08 мм. Были исследованы магнитоактивные покрытия химического состава на основе оксидов и нитридов ряда элементов, радиус ионов которых в растворах замещения меньше, чем у железа (бор, алюминий, титан, хром). Они имели КТЛР от  $(4-5) \cdot 10^{-6} K^{-1}$  ( $SiO_2$ , AlN,  $Si_3N_4$ , CrO) до  $8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  ( $Al_2O_3$ , TiN), существенно меньшие КТЛР =  $13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  кремнистого железа [4], обеспечивали в магнитопроводе электросопротивление поверхностного слоя  $\sim 10^2$  Ом/см<sup>2</sup>.

### 2.1. Методика эксперимента

Покрытия наносили на ленту методом ионно-плазменного осаждения в заданных газовых средах при помощи установки типа «Булат», используя различные способы теплоотвода для варьирования температуры образца при осаждении покрытия, а также приложение к ленте продольных растягивающих напряжений  $\sim 3-10$  МПа. Для сравнения эффективности различных типов покрытий на ферромагнитную ленту наносили также известные ранее ЭИП на основе фосфатов магния методом растворной керамики по технологии, этапы которой схематически представлены на рис. 1 [4].

Метод растворной керамики – погружение ленты листовой стали в раствор, содержащий компоненты покрытия, с последующим нагреванием ленты, до образования образуется тонкая кристаллическая или стекловидная пленка. Метод растворной керамики является наиболее производительным, простым и приемлемым для нанесения электроизоляционных покрытий на листовую или рулонную электротехническую сталь с грунтовым покрытием или в отсутствие его. На рис. 1 представлены сложные этапы нанесения элек-

троизоляционного раствора и термическую обработку для формирования магнитоактивного покрытия.

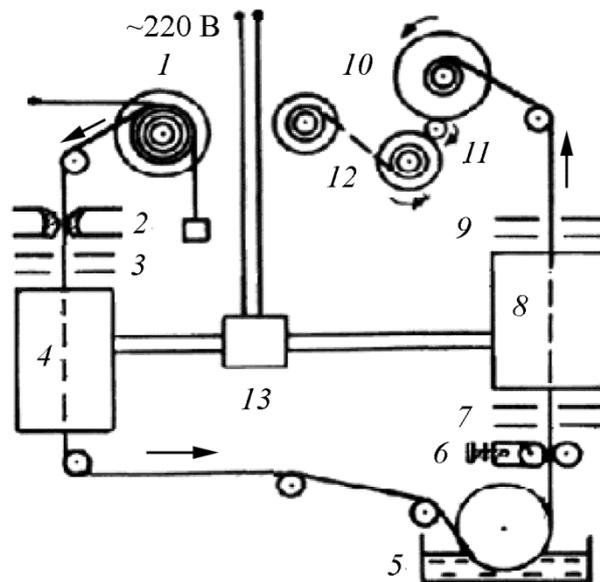


Рис. 1. Термомеханическая установка для нанесения покрытий:

1, 10, 12 – лента стали в рулоне; 2 – устройство для обезжиривания; 3, 7, 9 – тепловые экраны; 4, 8 – муфельные печи с нихромовыми спиралями 50–600 °С, 0–1200 °С; 5 – ванна с рабочим раствором; 6 – отжимные валки; 11 – устройство для намотки торов; 13 – нагревательное устройство, тип 01-ТЧ

Выбор наиболее эффективных составов растворов для ЭИП осуществляли на основе испытаний рабочих растворов, содержащих следующие компоненты: фосфаты магния и борную кислоту, фосфаты бария и борную кислоту, фосфаты магния, бария и борную кислоту, в том числе эти растворы с добавками золи кремниевой кислоты, натрия, лития, оксидов марганца, кобальта, алюминия, железа, хрома в пределах 0,5–3 г/л. Полученные из них в атмосфере воздуха электроизоляционные и магнитоактивные покрытия толщиной 2–3 мкм отличались гибкостью при изгибе металла на диаметре до 1–5 мм. Сопротивление изоляции находилось в пределах  $1,5 \cdot 10^5$ – $30 \cdot 10^5$  Ом/см<sup>2</sup>/лист. Электроизоляционные покрытия, содержащие хром, отличались бóльшей гибкостью, водостойчивостью и лучшим внешним видом. Покрытия, содержащие литий, отличались большими толщиной (4–6 мкм) и сопротивлением ( $3,0 \cdot 10^6$  Ом/см<sup>2</sup>/лист).

Лучшим покрытием по многим характеристикам оказался борсодержащий магний-фосфатный раствор с растворенными в нем оксидами ВаО, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CoO: толщина составила 2–3 мкм, сопротивление –  $1,5 \cdot 10^6$  Ом/см<sup>2</sup>/лист, жаростойкость – 800–850 °С, гибкость – ≤5 мм, а также водостойчивость. Линейный коэффициент теплового расширения покрытия имел величину  $8 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> и выдерживал более 15 теплосмен от 800 °С в воду при 20 °С, т. е. хорошую адгезию.

После нанесения ЭИП ленту ферромагнитного сплава подвергали термообработке на снятие внутренних напряжений при различных температурах или указанный отжиг совмещали с последующей термомагнитной обработкой (ТМО): нагрев до 300–450 °С, выдержка 5–15 мин и охлаждение до комнатной температуры в переменном магнитном поле напряженностью 2 кА/м и частотой 50–600 Гц [5, 6].

Измерение полных магнитных потерь вдоль оси лент магнитомягких сплавов выполняли ваттметровым методом на полосках длиной 100 мм в замкнутой магнитной цепи или торах средним диаметром 40 мм при натяжении намотки 40 МПа. Гистерезисную составля-

ющую магнитных потерь определяли по площади квазистатических петель гистерезиса, вихревою – по разности между полными и гистерезисными потерями.

Величину растягивающих напряжений  $\sigma$ , создаваемых в материале покрытием, считывали с учетом радиуса кривизны  $r$  и стрелы прогиба  $b$  ленты с покрытием, нанесенным на одну ее сторону, по формулам:

$$\sigma = E \cdot \delta \text{ кг/мм}^2; \delta = h/2r; r = (b^2 + l^2/4)/2b,$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\delta$  – деформация;  $h$  – толщина ленты сплава (мм);  $l$  – длина по хорде (мм).

Изменения кристаллической решетки при нанесении покрытия исследовали методом рентгеновской дифракционной топографии на отражение в рефлексах (220) и (200)  $K\alpha$ -излучения.

### 3. Результаты и их обсуждение

Анализ результатов измерений изгибной деформации односторонне покрытых лент магнитомягких сплавов показывает, что нитрид-оксидные покрытия  $\sim 1$  мкм толщиной, наносимые ионно-плазменным осаждением, как и ранее известные покрытия на основе магний-фосфатов толщиной 2–3 мкм, наносимые методом растворной керамики, после охлаждения материала до комнатной температуры создают значительные продольные растягивающие напряжения ( $\sim 0,5\text{--}1,0 \text{ кг/мм}^2$ ). При этом обнаружено, что конкретная величина  $\sigma$ , индуцируемая покрытием, зависит не только от интервала температур охлаждения, толщины и КТЛР сплава и покрытия, а также от адгезионной способности покрытия к металлу и характера распределения вызываемых напряжений по объему образца. Эти факторы удается варьировать в широких пределах за счет выбора способа нанесения покрытий, режимов обработки и условий подготовки поверхности ферромагнетика. Нанесение магнитоактивных магний-фосфатных растягивающих покрытий существенно снижает ширину полосовых доменов в зернах только левой части образца (*a*), создавая продольное растяжение  $\sigma \sim 8\text{--}10 \text{ МПа}$ , и практически не влияет на размеры доменов в его правой части (*б*) (рис. 2). У правого зерна адгезия мала и кристалл испытывает сжатие со стороны соседнего левого удлиненного зерна. При этом в правом зерне исчезают наиболее узкие клиновидные ( $180^\circ$ ) замыкающие домены с продольной намагниченностью при сохранении существующих и росте новых каплевидных доменов, содержащих внутриобъемные ( $90^\circ$ ) области с поперечной ориентацией намагниченности. Это указывает на неравномерное распределение деформации в приповерхностных объемах ферромагнетика, прилегающих к покрытию, и приводит к деградации магнитных свойств материала (снижению магнитной проницаемости, росту гистерезисных потерь).

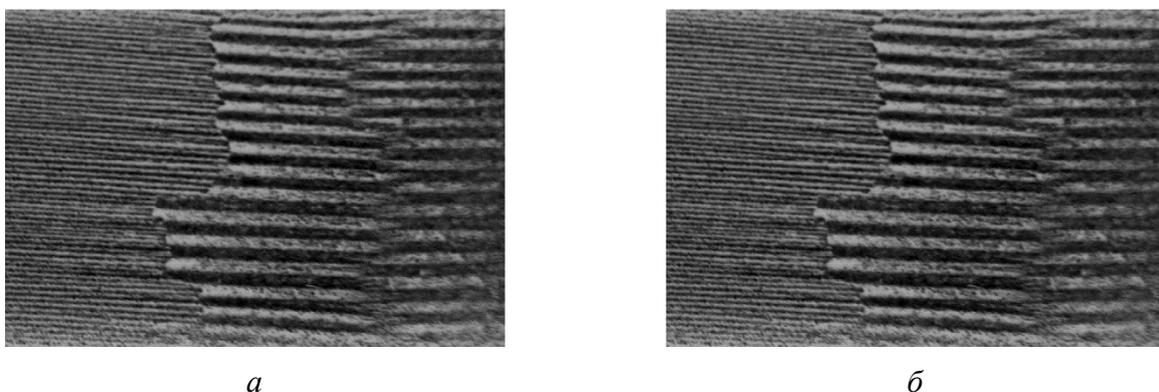


Рис. 2. Ширина доменов стали до (слева) и после (справа) нанесения покрытия

Однородное почернение рентгеновских топограмм, наблюдаемое при оптимальных режимах формирования покрытия методом ионно-плазменного осаждения, обусловленное однородностью сцепления композита металл–покрытие, обеспечивает значительную величину продольного растяжения ленты ( $\sim 1,0$  кг/мм<sup>2</sup>), снижение ширины полосовых доменов, вихретоковых и полных магнитных потерь. Это состояние однородного растяжения ленты положительно сказывается и на реализации эффекта дополнительного снижения потерь при термообработке материала в переменном магнитном поле [7, 8], достигаемого за счет однородного движения доменных границ и их дестабилизации.

В табл. 1 и 2 в качестве примера приведены величины магнитной проницаемости ( $\mu_{\max}$ ), магнитострикции ( $\lambda$ ), полных магнитных потерь ( $P$ ), гистерезисной ( $P_{\Gamma}$ ) и вихретоковой ( $P_{\text{В}}$ ) составляющих для тончайших лент аморфных ( $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$ ) и поликристаллических ( $\text{Fe-3 \% Si}$ ) ферромагнетиков. Для нанесения  $\text{TiO}+\text{TiN}$ -покрытия применяли ионно-плазменный метод. Для нанесения ЭИП<sub>1</sub> на основе  $\text{CrO}+\text{CrN}$  применяли ионно-плазменный метод, а для покрытия ЭИП<sub>2</sub> на основе  $\text{MgO}+\text{P}_2\text{O}_5$  – метод растворной керамики.

Таблица 1

Зависимость магнитных свойств аморфного сплава–ленты  $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$  после различных видов обработок

Обработка	$\mu_{\max}$	$P_{1/400} = P_{\Gamma} + P_{\text{В}}$ Вт/кг
ТО	72 000	2,66 = 1,40 + 1,26
ТО+ $\sigma$ +ЭИП	54 000	1,94 = 1,21 + 0,73
ТО+ТМО	142 000	2,02 = 1,08 + 0,94
ЭИП+ТО+ТМО	94 000	1,65 = 0,95 + 0,70

Таблица 2

Зависимость магнитных свойств поликристаллического сплава  $\text{Fe-3 \% Si}$  после различных видов обработок

Обработка	$\lambda \cdot 10^6$	$P_{1,7/50} = P_{\Gamma} + P_{\text{В}}$ Вт/кг
ТО	1,5–2,2	1,57 = 0,90 + 0,67
ЭИП <sub>1</sub> +ТО+ТМО	0,2–0,6	1,16 = 0,74 + 0,42
ТО	1,7–2,3	1,54 = 0,88 + 0,66
ЭИП <sub>2</sub> +ТО+ТМО	2,4–3,2	1,43 = 0,91 + 0,52

Из табл. 1 видно, что в ленте аморфного сплава  $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$  толщиной 20 мкм при формировании на ее поверхности электроизоляционного покрытия из оксида и нитрида титана наблюдается значительное снижение магнитных потерь (на 25–35 %), происходящее в основном за счет уменьшения (на 42 %) их вихретоковой составляющей. Существенное снижение магнитных потерь достигается и в результате ТМО ленты в продольном переменном магнитном поле, создавая суммарный эффект комбинированной (ЭИП+ТМО)-обработки в 35–45 %. Аналогичные результаты получены и на других исследованных аморфных сплавах на основе железа.

Значительный эффект снижения магнитных потерь можно получить и на лентах поликристаллических сплавов  $\text{Fe-Si}$  и  $\text{Fe-Al}$  с использованием магнитоактивных покрытий из нитрида хрома, осажденного на ленты ионно-плазменным методом и при последующей ТМО в переменном магнитном поле. При этом гистерезисные, вихретоковые и полные магнитные потери снижаются (в сплаве  $\text{Fe-3 \% Si}$ , табл. 2) на 18, 32 и 26 % соответственно. В лентах тех же сплавов покрытия на основе фосфатов магния, нанесенных методом растворной керамики,

ки, лишь незначительно снижают полные магнитные потери (на 5–9 %) за счет уменьшения их вихретоковой составляющей.

Из приведенных выше результатов видно, что положительный эффект – уменьшение магнитных потерь, повышение магнитной проницаемости на 15–30 % (табл. 1) и индукции в средних полях, снижение магнитострикции практически до нуля (табл. 2) наблюдается в состояниях, когда магнитоактивное ЭИП создает однородно распределенные растягивающие напряжения с преимущественной ориентацией вдоль оси ферромагнитной ленты. Причиной этого является существенное увеличение исходной одноосной магнитной анизотропии, приводящее к сужению ширины полосовых магнитных доменов. Применение же локальной лазерной обработки, не разрушающей предварительно сформированное электроизоляционное покрытие, приводит к дальнейшему снижению магнитных потерь в электротехнических материалах [9].

Другое решение этой проблемы направлено на разработку покрытия на основе оксидов титана и тантала [10].

#### 4. Заключение

Результаты ионно-плазменного осаждения показывают, что безгрунтовые нанокристаллические и аморфные электроизоляционные покрытия на основе нитридов и оксидов титана и хрома создают при микронной толщине покрытия значительные по величине и достаточно однородные по распределению растягивающие напряжения. В результате существенно улучшаются магнитные характеристики тончайших лент магнитомягких сплавов на основе железа. При последующей операции, связанной с применением термомагнитной обработки в переменном магнитном поле, за счет дестабилизации и увеличения подвижности доменных границ происходит усиление эффекта от магнитоактивного покрытия.

#### Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (темы «Магнит» № 122021000034-9, «Диагностика» № 122021000030-1).*

#### Литература

- ГОСТ 21427.1–83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. – М. : Стандарты, 1983. – 17 с.
- Puzhevich R. B., Tsyrlin M. B., Korzunin G. S. Influence of electrical insulating coatings on the properties of anisotropic electrical steel // FMM. – 2006. – Vol. 102. – P. 366–375. – DOI: 10.1134/S0031918X06100048.
- Dragoshanskii Yu. N., Pudov V. I. Optimization by deformation effects of the structure and properties of Fe-Si alloys with different texture // Letters on Materials. – 2018. – 8 (1). – P. 66–70. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-66-70. (In Russian).
- Effect of tensile stresses on the magnetic characteristics of modern anisotropic electrical-sheet steel / Yu. N. Dragoshanskii, G. S. Korzunin, M. B. Mel'nikov, A. I. Pyatygin, V. K. Chistyakov // The Physics of Metals and Metallography. – 2006. – Vol. 101, No. 4. – P. 329–335. – DOI: 10.1134/S0031918X06040041.
- Hubert A., Schafer R. Magnetic domains. – Berlin : Springer, 2009. – 686 p.
- Раствор для нанесения электроизоляционного покрытия на сталь и способ его получения: пат. 1608243 SU / Ханжина Т. А., Бамбуров В. Г., Драгошанский Ю. Н., Власова З. Н., Бесчеревных И. В., Алексеев В. А. – опубл. 23.11.1990, Бюл. № 43. – 6 с.
- Зайкова В. А., Старцева И. Е., Филиппов Б. Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. – М. : Наука, 1992. – 271 с.

8. Способ терромагнитной обработки магнитно-мягких материалов: авторское свидетельство SU 566886. А1. МПК С21D 1/04 / Шур Я. Ш., Старцева И. Е., Шулика В. В. – опубл. 30.07.1977, Бюл. № 28. – 78 с.
9. Dragoshansky Yu. N., Pudov V. I., Karenina L. S. Optimizing the domains and reducing the magnetic losses of electrical steel via active coating and laser treatment // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, ser. Physics. – 2013. – 77 (10). – P. 1286–1288. – DOI: 10.3103/S1062873813100080.
10. Электротехническая листовая сталь с улучшающим электроизоляцию покрытием и способ ее получения: пат. 2635501 Рос. Федерация / Енсен Е. Д., Меле А., Райхе Р., Шнайдер М., Штир О. – опубл. 13.11. 2017.