*ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ, 2020, том 121, № 2, с. 142–148*

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

*УДК 539.213.26:537.622.4*

# ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕНТЫ АМОРФНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА В ЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ

**© 2020 г. Н. А. Скулкина[a, *, **], А. К. Мазеева[b], П. А. Кузнецов[b], В. И. Чекис[a], Н. Д. Денисов[a], Е. С. Некрасов[a]**

[a]*Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия*

[b]*НИЦ "Курчатовский институт" – ЦНИИ КМ "Прометей", ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, 191015 Россия*

**e-mail: nadezhda-skulkina@yandex.ru*

***e-mail: nadezhda.skulkina@urfu.ru*

Поступила в редакцию 07.07.2019 г.
После доработки 10.09.2019 г.
Принята к публикации 16.09.2019 г.

На примере образцов ленты аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта АМАГ-172 (Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B) с близкими к нулю отрицательными значениями магнитострикции насыщения изучали влияние полимерного покрытия, применяемого при изготовлении магнитных экранов, и условий его формирования на распределение намагниченности и магнитные свойства. Покрытие наносили на ленту в закаленном состоянии при температурах 90–130°C. Показано, что полимерное покрытие приводит к повышению максимальной магнитной проницаемости и хорошей временной стабильности магнитных характеристик. С ростом температуры формирования покрытия его влияние на магнитные характеристики ослабляется вследствие повышения модуля Юнга в результате термообработки по режиму формирования покрытия.

*Ключевые слова:* аморфные магнитомягкие сплавы, термообработка, магнитная проницаемость, распределение намагниченности, магнитострикция насыщения, прессующее давление, полимерное покрытие, изменение магнитных характеристик с течением времени

**DOI:** 10.31857/S0015323020020163

## ВВЕДЕНИЕ

Ленты аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта находят широкое применение в технике благодаря высокому уровню функциональных свойств. При близкой к нулю магнитострикции насыщения максимальная магнитная проницаемость может достигать значений $10^6$ [1, 2]. Полученная методом быстрой закалки лента обладает высоким уровнем внутренних напряжений, которые ухудшают ее магнитные свойства. Стандартным приемом улучшения магнитных характеристик является термическая обработка. Сравнительно низкая температура обработки позволяет проводить ее на воздухе без видимого окисления поверхности. Исследование механизмов улучшения магнитных свойств при термообработке (ТО) на воздухе показало, что кроме релаксации внутренних напряжений [3] существенное влияние на уровень магнитных характеристик оказывает взаимодействие поверхности ленты с атмосферным паром и формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя [4, 5]. Оксидирование и наводороживание поверхности ленты, а также формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя, толщина которого не превышает оптимальную, индуцируют преимущественно плоские растягивающие напряжения [4]. Характер влияния этих напряжений на распределение намагниченности в ленте и магнитные свойства зависит от знака магнитострикции насыщения. Аморфные сплавы на основе кобальта системы Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B имеют интересную особенность: параметры термообработки оказывают существенное влияние на формирование структурно-фазовых состояний с различными знаками магнитострикции насыщения [6–8]. Следовательно, разным является и отклик магнитных свойств на одно и то же физическое воздействие.

Применение ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в магнитном экранировании предполагает формирование склеивающего покрытия, которое также выполняет и защитные функции. В ЦНИИ КМ "Прометей" [9] разрабо-

тан экран, при изготовлении которого в качестве связующего используется двустороннее полимерное покрытие (ПЭТФ – полиэтилентерефталат). Оно формируется в интервале температур 90–130°C в присутствии создаваемого валками прессующего давления (ПД). Такое покрытие является магнитоактивным, поскольку вследствие усадки при охлаждении индуцирует плоские сжимающие напряжения. Прессующее давление и полимерное покрытие оказывают противоположные воздействия на свойства ленты. Эти воздействия частично нивелируют друг друга [10]. Формирование покрытия в течение 7 мин на ленте с разными знаками магнитострикции в исходном состоянии показало, что характер его влияния на распределение намагниченности зависит от температуры нанесения покрытия. Низкотемпературная термообработка, сопровождающая процесс формирования покрытия, способствует изменению состояния ленты и связанного с этим знака магнитострикции насыщения. Формирование покрытия в интервале температур 110–130°C на поверхности ленты после термообработки при 380°C с длительностью изотермической выдержки $\tau = 40$ мин ($\lambda_s > 0$) приводит к уменьшению объема доменов с ортогональной намагниченностью, что соответствует состоянию с $\lambda_s < 0$. В состоянии с отрицательной магнитострикцией насыщения, например, после ТО при 370°C, $\tau = 10$ мин, изменение знака $\lambda_s$ с отрицательного на положительный происходит уже при температурах 100–120°C. Индуцируемые полимерным покрытием плоские сжимающие напряжения в этом случае способствуют переориентации намагниченности перпендикулярно плоскости ленты [11, 12]. Максимальная магнитная проницаемость ленты с покрытием несколько уменьшается. Это связано с повышением уровня внутренних напряжений, индуцируемых полимерным покрытием независимо от знака магнитострикции насыщения, а также с увеличением стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью при формировании покрытия в состоянии с $\lambda_s > 0$. Тем не менее следует отметить, что на протяжении 2-х лет не наблюдается снижения $\mu_{max}$ в ленте с покрытием, сформированным в интервале температур 110–130°C.

Близкая к нулю магнитострикция насыщения и высокие значения максимальной магнитной проницаемости сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в закаленном состоянии делают возможным изготовление магнитного экрана из ленты даже без термической обработки [2]. Вопросы, касающиеся возможности получения высокого уровня магнитных свойств ленты с покрытием в этом состоянии и их временной стабильности, являются важными и актуальными. Поэтому в настоящей работе исследовали влияние полимерного покрытия и температуры его формирования на магнитные характеристики ленты аморфного магнитомягкого сплава АМАГ-172 (Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B) в закаленном состоянии.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах в форме полос размерами 100 × 10 × 0.020 мм. Кривые намагничивания измеряли индукционно-импульсным методом с погрешностью измерения магнитной индукции и поля, не превышающей 2%, максимальной магнитной проницаемости – 3%. Относительный объем доменов с ортогональной намагниченностью ($V_{орт}$) определяли из корреляционной зависимости между максимальными значениями остаточной индукции ($B_{rs}$) и объема доменов с ортогональной намагниченностью, полученной из мессбауэровских исследований [10, 13]. Для определения распределения намагниченности в плоскости ленты: относительных объемов доменов с планарной (параллельной плоскости ленты) намагниченностью ($V_{пл}$), ориентированной вдоль ($V_{180}$) и поперек ($V_{90}$) ее оси, использовали зависимость остаточной индукции ($B_r$) от максимальной ($B_m$). Значения остаточной индукции, необходимые для построения зависимости $B_r(B_m)$, определяли из частных петель гистерезиса. Относительная погрешность определения распределения намагниченности не превышала 5%. Знак магнитострикции насыщения определяли при помощи обработки поверхности ленты водой комнатной температуры в течение 15 мин без видимого окисления поверхности [8, 13–15]. Полимерное покрытие формировали в присутствии прессующего давления в интервале температур 90–130°C. Для разделения влияния прессующего давления и полимерного покрытия образцы подвергали обработке, имитирующей формирование покрытия (ИП): при тех же условиях, но без нанесения покрытия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным производителя [2], в закаленном состоянии лента исследуемого сплава обладает небольшими отрицательными значениями магнитострикции насыщения. Тем не менее получение корректных результатов по влиянию полимерного покрытия на магнитные характеристики невозможно без проведения исследований исходного состояния ленты. Поэтому для определения знака магнитострикции насыщения в закаленном состоянии исследуемых образцов проводили обработку поверхности ленты водой. В табл. 1 представлены результаты взаимодействия поверхности ленты с водой на распределение намагничен-

**Таблица 1.** Распределение намагниченности в закаленном состоянии ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B до и после обработки поверхности водой ($\eta = V_{180}/V_{90}$)

| Состояние ленты | $V_{орт}$, % | $V_{180}$, % | $V_{90}$, % | η |
|---|---|---|---|---|
| Закаленное | 13.6 | 63 | 23 | 2.7 |
| Обработка водой | 13.6 | 67 | 19 | 3.5 |

ности в закаленном состоянии аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B.

Видно, что вследствие высокого уровня внутренних напряжений преимущественно плоские растягивающие напряжения, индуцированные внедренными в поверхность ленты атомами водорода и кислорода, не приводят к изменению объема доменов с ортогональной намагниченностью. Тем не менее имеет место перераспределение намагниченности в плоскости ленты. Согласно теории направленного упорядочения [16], образование повышенной концентрации внедренных в поверхность ленты атомов поперек ее оси приводит в индуцированию анизотропных растягивающих напряжений в этом направлении. Такие напряжения способствуют переориентации намагниченности в плоскости ленты. В нашем случае намагниченность переориентируется перпендикулярно растягивающим напряжениям, увеличивая объем доменов с планарной намагниченностью, ориентированной вдоль оси ленты, и остроту магнитной текстуры $\eta = V_{180}/V_{90}$ в ее плоскости. Следовательно, используемая в наших исследованиях лента в закаленном состоянии действительно обладает отрицательной магнитострикцией насыщения. Полученные результаты соответствуют заявленным производителем и результатам наших предыдущих исследований [5, 8, 10].

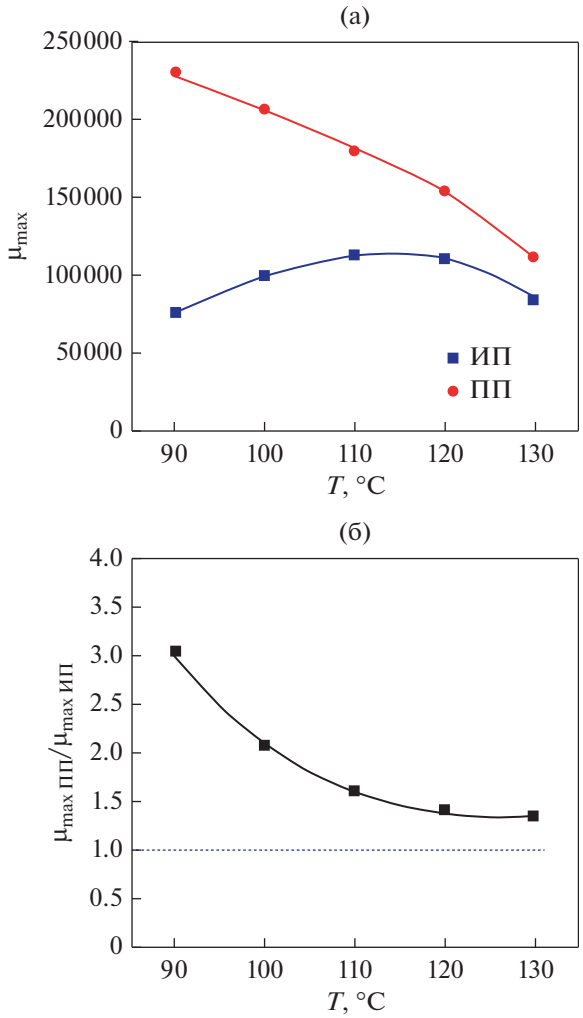


**Рис. 1.** Влияние температуры формирования полимерного покрытия на максимальную магнитную проницаемость (а) и ее изменение в ленте с полимерным покрытием (ПП) относительно имитации покрытия (ИП) (б).

Рисунки 1 и 2 демонстрируют влияние полимерного покрытия и прессующего давления (имитации формирования покрытия) на максимальную магнитную проницаемость и объем доменов с ортогональной намагниченностью при его формировании в интервале температур 90–130°C. Видно, что индуцируемые полимерным покрытием плоские сжимающие напряжения способствуют повышению максимальной магнитной проницаемости во всем интервале температур формирования покрытия. Изменение максимальной магнитной проницаемости коррелирует с соответствующим изменением объема доменов с ортогональной намагниченностью. Во всем температурном интервале формирования полимерного покрытия наблюдается уменьшение объема доменов с ортогональной намагниченностью под действием индуцируемых покрытием сжимающих напряжений. Вследствие переориентации намагниченности в плоскость ленты имеет место ослабление стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью, что и является причиной повышения $\mu_{max}$. Тем не менее температура формирования покрытия влияет на степень изменения магнитных характеристик (рис. 1б и 2б). Наиболее сильное возрастание максимальной магнитной проницаемости наблюдается при формировании покрытия при 90°C. По сравнению с имитацией покрытия, $\mu_{max}$ в ленте с покрытием в 3 раза выше (рис. 1б и 3), а объем доменов с ортогональной намагниченностью на 60% ниже (рис. 2б). При этом на зависимости $\mu(H)$ в образцах с покрытием максимум сдвигается в область более слабых полей (рис. 3).

Представленные на рис. 4 зависимости $B_r(B_m)$ дают информацию о процессах намагничивания,

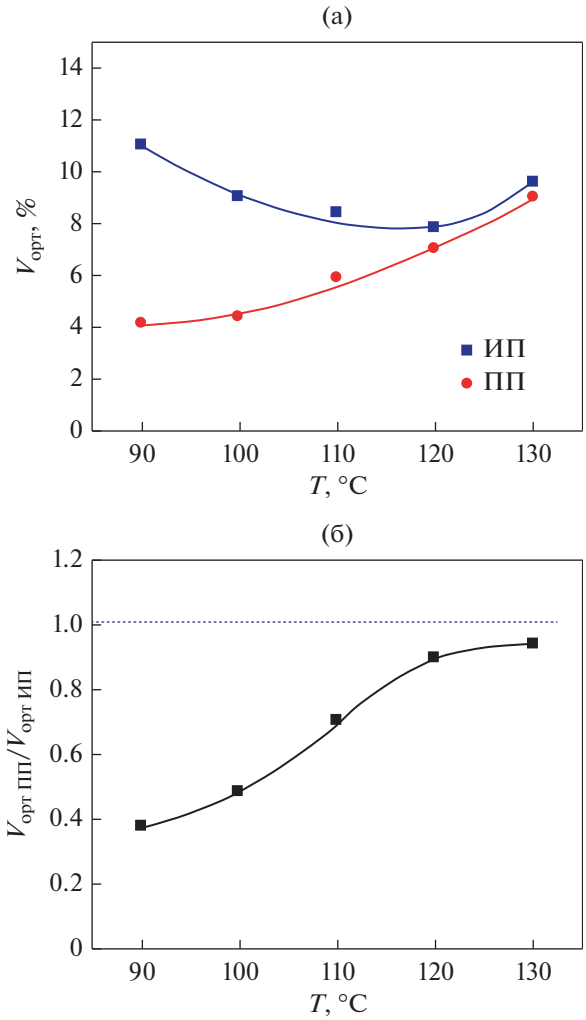


**Рис. 2.** Влияние температуры формирования полимерного покрытия на объем доменов с ортогональной намагниченностью (а) и его изменение в ленте с полимерным покрытием (ПП) относительно имитации покрытия (ИП) (б).

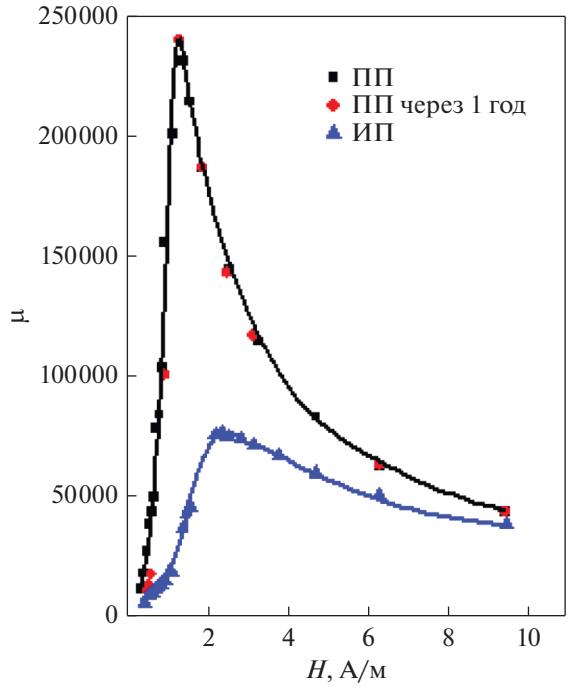


**Рис. 3.** Зависимость магнитной проницаемости от поля в ленте с полимерным покрытием (ПП), сформированным при 90°C, сразу и через 1 г., и имитацией покрытия (ИП).

протекающих в ленте с имитацией покрытия и полимерным покрытием, сформированным при 90°C. Линейный участок на этой зависимости соответствует смещению 180-градусных доменных границ, поскольку они стабилизированы лишь в объеме границы. Опустим перпендикуляр из точки, соответствующей индукции, при которой достигается максимальная проницаемости зависимости $B_r(B_m)$. Видно, что максимальная магнитная проницаемость в обоих случаях достигается в области смещения 180-градусных доменных границ. Тем не менее в образцах с полимерным покрытием большая часть объема перемагничивается смещением 180-градусных доменных границ, чем при имитации покрытия. Это соответствует большей остроте магнитной текстуры в плоскости ленты. Заметим также, что при смещении 180-градусных доменных границ в ленте с покрытием имеет место высокая прямоугольность петель гистерезиса ($B_r/B_m$ = 0.93). С повышением температуры формирования полимерного покрытия степень его влияния на магнитные характеристики ослабляется (рис. 1 и 2).

На рис. 5 представлены результаты температурного изменения модуля Юнга в диапазоне 90–130°C. Модуль Юга оценивали по стреле прогиба при одностороннем нанесении покрытия [7]. Видно, что после отжигов ленты 370 и 380°C с длительностью изотермической выдержки 10 и 40 мин повторная термообработка не приводит к изменению модуля Юнга, а его значения практически одинаковы в обоих случаях. Несколько другая картина наблюдается для закаленных образцов.

В результате низкотемпературной термообработки по режиму формирования покрытия при 90 и 100°C не происходит изменения модуля Юнга, а дальнейшее повышение температуры способствует его увеличению вплоть до значений, близких к тем, которые соответствуют образцам предварительно отожженной ленты при 370 и 380°C. Причиной этого может являться уменьшение среднего межатомного расстояния в поверхностном слое ленты вследствие выхода свободного объема. Согласно результатам исследований [17, 18], во время отжига уже при 50°C на расстоя-

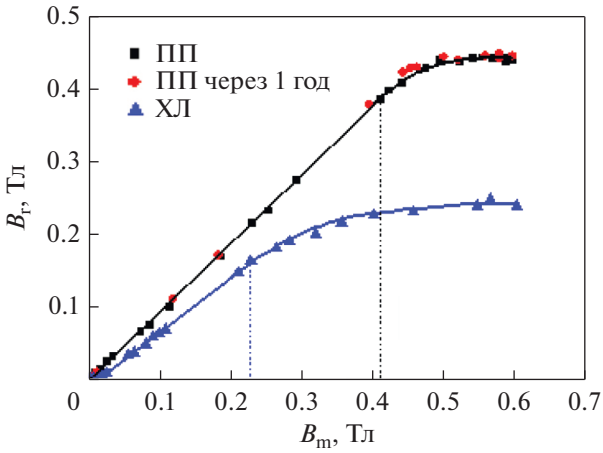


**Рис. 4.** Зависимость остаточной индукции, измеренной по частным петлям гистерезиса от максимальной в ленте с полимерным покрытием (ПП), сформированным при 90°C, сразу и через 1 г., и имитацией покрытия (ИП).

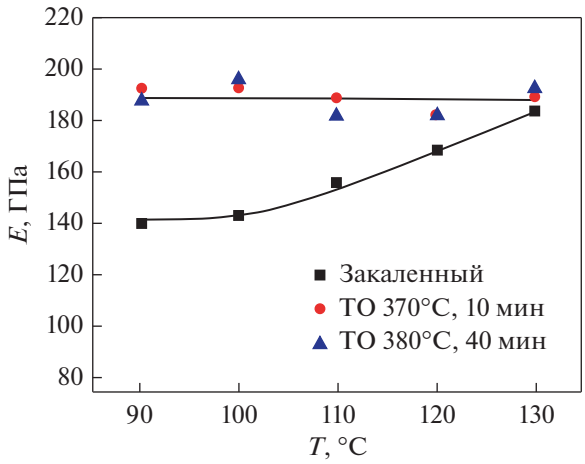


**Рис. 5.** Влияние низкотемпературной термообработки на модуль Юнга образцов сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в закаленном состоянии и после предварительных отжигов при 370 и 380°C с длительностью изотермической выдержки 10 и 40 мин.

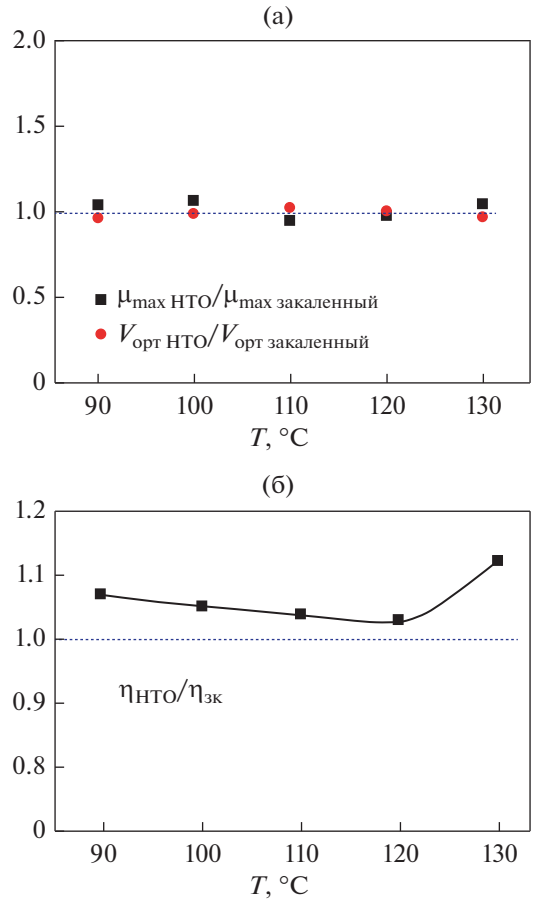


**Рис. 6.** Изменение максимальной магнитной проницаемости, объема доменов с ортогональной намагниченностью (а) и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты (б) аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Vn–Si–B после низкотемпературной обработки относительно закаленного состояния.

нии ближайшего соседа 0.3 Нм происходит отчетливое изменение химического порядка, а выход свободного объема начинается при температурах выше 100°C. Его кинетика зависит от размера образца и включает свободную поверхность. Сравнение рис. 2а и 5 показывает, что изменение объема доменов с ортогональной намагниченностью с температурой формирования покрытия коррелирует с температурным изменением модуля Юнга. Следовательно, возрастание модуля Юнга может быть причиной уменьшения степени влияния полимерного покрытия на магнитные характеристики ленты при повышении температуры его формирования.

Помимо полимерного покрытия и прессующего давления, на магнитные характеристики ленты может оказывать влияние и температура формирования покрытия. С целью исследования влияния этого фактора образцы ленты сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в закаленном состоянии подвергали низкотемпературным термообработкам при температурах формирования полимерного покрытия с длительностью изотермической выдержки 7 мин. В [11] показано, что в отожженных при температуре выше 300°C и длительности изотермической выдержки более 10 мин образцах, подвергнутых низкотемпературной обработке по режиму нанесения покрытия, может наблюдаться изменение состояния ленты, сопровождающееся сменой знака магнитострикции насыщения. Для контроля состояния ленты и знака магнитострикции в этом состоянии после низкотемпературной термообработки закаленных образцов проводили обработку поверхности ленты

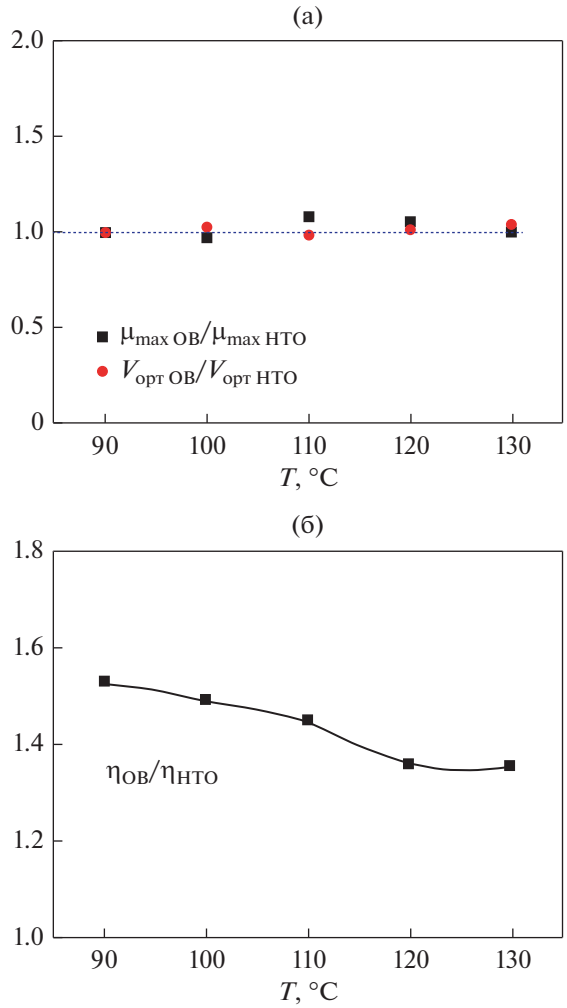


**Рис. 7.** Изменение максимальной магнитной проницаемости, объема доменов с ортогональной намагниченностью (а) и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты (б) аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Vn–Si–B после обработки поверхности ленты водой относительно низкотемпературной обработки.

водой. Относительное изменение магнитных характеристик представлено на рис. 6 и 7.

Поскольку такая обработка не способствует существенной релаксации внутренних напряжений в интервале температур 90–130°C, практически не происходит и заметного изменения максимальной магнитной проницаемости и объема доменов с ортогональной намагниченностью и в результате низкотемпературной термообработки, и после обработки поверхности ленты водой. Тем не менее преимущественно плоские псевдоодноосные растягивающие напряжения, индуцируемые поперек оси ленты в результате ее взаимодействия с водой, способствуют переориентации намагниченности вдоль ее оси, увеличивая остроту магнитной текстуры в плоскости ленты. Следовательно, в результате низкотемпературной обработки закаленных образцов в интервале температур 90–130°C сохраняется состояние ленты с отрицательной магнитострикцией насыщения. Влияние псевдо-одноосных напряжений, индуцируемых взаимодействием поверхности ленты с водой, ослабевает с ростом температуры. Это также может быть следствием увеличения модуля Юнга в поверхностном слое ленты. В результате низкотемпературной обработки также наблюдается небольшое увеличение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты (рис. 7б), которое связано с влиянием анизотропного растяжения поперек ее оси в результате взаимодействия поверхности ленты с атмосферным паром. Увеличение модуля Юнга в поверхностном слое ленты может являться причиной того, что рост остроты магнитной текстуры в плоскости ленты с повышением температуры до 120°C уменьшается. При дальнейшем увеличении температуры изотермической выдержки до 130°C острота магнитной текстуры снова возрастает. Повышение активности диффузионных процессов при взаимодействии поверхности ленты с атмосферным паром приводит к увеличению концентрации внедренных в поверхность ленты атомов [19, 20] и росту псевдоодноосных растягивающих напряжений поперек оси ленты. В состоянии с отрицательной магнитострикцией насыщения такие напряжения способствуют переориентации намагниченности вдоль ее оси. Также заметим, что лента исследуемого сплава с полимерным покрытием, сформированным на ней, в закаленном состоянии обладает хорошей временной стабильностью магнитных характеристик. Из рис. 3 и 4 видно, что на протяжении года не происходит изменения максимальной магнитной проницаемости и распределения намагниченности в ленте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование влияния температуры нанесения полимерного покрытия на поверхности ленты аморфного магнитомягкого сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в закаленном состоянии, показало, что индуцируемые полимерным покрытием сжимающие напряжения приводят к повышению максимальной магнитной проницаемости во всем интервале температур формирования покрытия вследствие уменьшения объема доменов с ортогональной намагниченностью и ослаблением стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью. Наиболее сильное увеличение максимальной магнитной проницаемости наблюдается в образцах с покрытием, сформированным при 90°C. С ростом температуры формирования покрытия его влияние на магнитные характеристики ослабляется вследствие повышения модуля Юнга в результате термообработки по режиму формирования покрытия. В закаленном состоянии ленты с

полимерным покрытием обладают хорошей временной стабильностью магнитных характеристик.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект 3.6121.2017/8.9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://mstator.ru/products/amag
2. https://amet.ru
3. *Dai J., Wang Y.G., Yang L., Xia G.T., Zeng Q.S., Lou H.B.* Structural aspects of magnetic softening in Fe-based metallic glass during annealing //Scr. Mater. 2017. V. 127. P. 88–91.
4. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Талипов А.Г., Щекотурова И.С.* Физические причины влияния термической обработки на магнитные свойства аморфных сплавов на основе железа // ФММ. 2005. Т. 99. № 3. С. 34–40.
5. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Степанова Е.А., Шубина Л.Н., Кузнецов П.А., Мазеева А.К.* Механизмы формирования магнитных свойств аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта в результате термообработки на воздухе// ФММ. 2015. Т. 116. № 12. С. 1242–1249.
6. *Иванов О.Г.* Особенности формирования физических свойств и разработка новых аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта. Автореф. дис. ... к. т. н. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
7. *Кекало И.Б., Могильников П.С.* Влияние изгибных напряжений на высокочастотные магнитные свойства и временную их стабильность в аморфном сплаве на основе кобальта с очень низкой магнитострикцией // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 12. С. 80–87.
8. *Скулкина Н.А., Иванов О. А., Степанова Е.А., Блинова О.В., Кузнецов П.А., Мазеева А.К.* Влияние термообработки на воздухе и химически активной среды на магнитные свойства аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта // ФММ. 2016. Т. 117. № 10. С. 1015–1022. https://doi.org/10.7868/S0015323016100120
9. Пат. 2375851 Российская Федерация, МПК H05K 9/900 (2006.01). Способ получения магнитного и электромагнитного экрана / Песков Т.В., Васильева О.В., Кузнецов П.А., Савич А.В., Саргсян А.М., Сергеева О.С., Фармаковский Б.В. – № 2007149333/09, заявл. 29.12.2007, опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34.
10. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Мазеева А.К., Кузнецов П.А., Степанова Е.А., Блинова О.В., Михалицына Е.А., Денисов Н.Д., Чекис В.И.* Влияние полимерного покрытия и прессующего давления на магнитные свойства аморфных сплавов на основе кобальта // ФММ. 2017. Т. 118. № 12. С. 1248–1256.
11. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Мазеева А.К., Кузнецов П.А., Чекис В.И., Денисов Н.Д.* Условия формирования полимерного покрытия и магнитные свойства аморфных сплавов на основе кобальта // ФММ. 2018. Т. 119. № 12. С. 1216–1223.
12. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Мазеева А.К., Кузнецов П.А., Чекис В.И., Денисов Н.Д.* Температура формирования полимерного покрытия и магнитные свойства аморфных сплавов на основе кобальта // ФММ. 2019. Т. 120. № 6. С. 615–621.
13. *Скулкина Н.А.* Распределение намагниченности и магнитные свойства кристаллических, аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов дис. ... д. ф.-м.н. Уральский государственный университет им. А.М. Горького. Екатеринбург, 2007.
14. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О.* Взаимодействие с водой лент аморфных магнито-мягких сплавов на основе железа и их магнитные свойства // ФММ. 2011. Т. 112. № 12. С. 483–490.
15. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О., Минина О.А.* Взаимодействие с паром поверхности лент аморфных магнитомягких сплавов на основе железа // ФММ. 2014. Т. 115. № 6. С. 563–572.
16. *Кекало И.Б., Самарин Б.А.* Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. 496 с.
17. *Evenson Z., Koschine T., Wei S., Gross O., Bednarcik J., Gallino I., Kruzic J.J., Rätzke K., Faupel F., Busch R.* The effect of low-temperature structural relaxation on free volume and chemical short-range ordering in a $Au_{49}Cu_{26.9}$ $Si_{16.3}Ag_{5.5}Pd_{2.3}$ bulk metallic glass // Scr. Mater. 2015. V. 103. 14–17.
18. *Nagel C., Rätzke K, Schmidtke E., Wolff J.* Free-volume changes in the bulk metallic glass $Zr_{46.7}Ti_{8.3}Cu_{7.5}Ni_{10}Be_{27.5}$ and the undercooled liquid // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. № 17.
19. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О., Минина О.А.* Взаимодействие поверхности лент аморфных магнитомягких сплавов с паром во время изотермической выдержки при термообработке // ФММ. 2015. Т. 116. № 11. С. 1143–1152.
20. *Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О., Минина О.А.* Взаимодействие поверхности лент аморфных магнитомягких сплавов с паром на разных стадиях термической обработки // ФММ. 2015. Т. 116. № 10. С. 1031–1039.