

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.213.26:537.622.4

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОГО МАГНИТОМЯГКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА

© 2022 г. Н. А. Скулкина^а, *, **, Е. С. Некрасов^а

^аУральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

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

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

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 26.05.2022 г.

Принята к публикации 30.05.2022 г.

На примере аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта АМАГ-172 (Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B) исследовали влияние низкотемпературного отжига на магнитные характеристики ленты. Результаты систематического исследования влияния термообработки на воздухе при 90–250°C на распределение намагниченности и максимальную магнитную проницаемость показали, что в интервале длительностей изотермической выдержки от 1 до 30 мин не происходит изменения знака константы магнитострикции. При этом имеет место немонотонная зависимость максимальной магнитной проницаемости от параметров термообработки, которая обусловлена перераспределением намагниченности в ленте в процессе отжига. Изменение магнитных характеристик обусловлено протеканием диффузионных процессов: выходом свободного объема, окислением и гидрированием поверхности ленты при взаимодействии с атмосферным паром и кристаллизацией свободной поверхности ленты.

Ключевые слова: аморфные магнитомягкие сплавы, термообработка, магнитная проницаемость, распределение намагниченности, магнитострикция насыщения, обработка водой

DOI: 10.31857/S0015323022080125

ВВЕДЕНИЕ

Ленты быстрозакаленных сплавов обладают низкими магнитными характеристиками вследствие высокого уровня обусловленных закалкой внутренних напряжений. Как правило, основным приемом улучшения магнитных свойств являются термообработки. Достаточно низкая температура отжига аморфных сплавов, не приводящая к заметной кристаллизации ленты (360–400°C), позволяет проводить отжики на воздухе без видимого окисления поверхности. Улучшение магнитных свойств достигается в основном в результате релаксации закалочных напряжений за счет диффузионных процессов, скорость протекания которых существенно зависит от температуры [1].

Диффузионные процессы в аморфных сплавах протекают и при сравнительно низких температурах, но их влияние на магнитные свойства материала чаще всего не учитывается. Тем не менее отчетливое изменение химического порядка на расстоянии до 0.3 Нм происходит уже при 50°C [2]. Топологическая структурная релаксация протекает при температурах, которые несколько выше, и описывается в рамках модели свободного

объема с энергией активации 250 кДж/моль, выход которого начинается при температурах порядка 100°C через свободную поверхность [3, 4].

Термическая обработка аморфных сплавов на воздухе сопровождается формированием окисленного поверхностного слоя в результате взаимодействия с атмосферным паром. Наличие значительно окисленного поверхностного слоя глубиной до 150 нм обнаружено даже в исходном (закаленном) состоянии ленты [5, 6]. Систематические исследования взаимодействия лент аморфных сплавов с водой и паром показали, что имеет место не только окисление, но и гидрирование поверхности ленты [7–9]. Электролитическое окисление и гидрирование оказывает аналогичное воздействие на ленту и подтверждает эти результаты [10]. Внедренные в поверхность атомы водорода и кислорода, как правило, индуцируют преимущественно плоские анизотропные растягивающие напряжения, ориентированные поперек оси ленты. Согласно теории направленного упорядочения, возникновение таких напряжений обусловлено образованием в этом направлении повышенной концентрации внедренных атомов, поскольку результирующая намагни-

ченность направлена вдоль ее оси [11]. В зависимости от знака константы магнитострикции (λ_s) индуцируемые напряжения по-разному влияют на распределение намагниченности и магнитные характеристики аморфных сплавов.

Поверхностная кристаллизация ленты при термообработке является еще одним фактором, оказывающим влияние на формирование уровня магнитных характеристик. В исходном (закаленном) состоянии неоднородность быстрозакаленных сплавов не только по длине, но также по ширине и толщине ленты, весьма существенна [12]. Наличие градиентов скоростей охлаждения способствует более медленному охлаждению свободной поверхности, вследствие чего на ней уже в закаленном состоянии создаются условия для кристаллизации в виде зародышеобразования и даже обнаруживаются немногочисленные отдельные кристаллиты. Процесс кристаллизации свободной поверхности ленты начинается при 200°C и контролируется ростом имеющихся зародышей, в то время как на контактной поверхности ленты кристаллизация осуществляется за счет зарождения и роста кристаллической фазы при более высокой температуре (порядка 400°C) [13–17]. При поверхностной кристаллизации вследствие локального уменьшения объема в местах образования и роста кристаллитов в ленте индуцируются преимущественно плоские растягивающие напряжения, которые также оказывают влияние на распределение намагниченности в ленте и ее магнитные характеристики [18].

Неоднородность магнитных характеристик в закаленном состоянии и неучет влияния процессов, протекающих в поверхностном слое ленты, не способствуют оптимизации магнитных характеристик в результате термообработок. Поэтому в настоящей работе представлены результаты систематического исследования влияния низкотемпературной обработки на магнитные характеристики ленты аморфного сплава на основе кобальта с целью выявления роли этого воздействия в формировании свойств. Выбор материала обусловлен возможностью получения в результате термообработки состояний с разными знаками константы магнитострикции.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах сплава АМАГ-172 (Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B) в форме полос размерами 100 × 10 × 0.020 мм. В закаленном состоянии лента исследуемого сплава обладает низкими (10^{-7}) отрицательными значениями константы магнитострикции. Кривые намагничивания измеряли индукционно-импульсным методом с погрешностью измерения магнитной индукции и поля, не превышающей 2%, макси-

Таблица 1. Магнитные характеристики ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B после термообработки на воздухе и последующей обработки водой

Состояние ленты	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	$\eta = V_{180}/V_{90}$
ТО 200°C, $\tau = 15$ мин			
ТО	17300	23.5	1.15
ТО + ОВ	16800	23.8	1.35
ТО 250°C, $\tau = 7$ мин			
ТО	37000	35	0.40
ТО + ОВ	34400	42	0.41

мальной магнитной проницаемости – 3%. Распределение намагниченности в ленте определяли при помощи авторской методики по корреляционной зависимости между максимальными значениями остаточной индукции (B_{rs}) и объемом доменов с ортогональной намагниченностью, полученной с помощью мессбауэровских исследований, и измерения остаточной индукции частных петель гистерезиса [18, 19]. Относительная погрешность определения распределения намагниченности не превышала 5%. Знак константы магнитострикции определяли при помощи обработки поверхности ленты водой (ОВ) комнатной температуры в течение 15 мин без видимого окисления поверхности [7–9, 18]. Термообработки на воздухе осуществляли в интервале температур 90–250°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящие исследования являются продолжением исследований, результаты которых представлены в работе [20]. Ранее было показано, что после термообработки в интервале температур 90–130°C лента обладает отрицательной константой магнитострикции [20]. Для определения знака константы магнитострикции после отжига при 200 и 250°C с длительностями изотермической выдержки 15 и 7 мин поверхность ленты обрабатывали водой комнатной температуры. Полученные результаты влияния такой обработки на магнитные характеристики представлены в табл. 1. Видно, что после термообработки при 250°C преимущественно плоские анизотропные растягивающие напряжения, индуцированные внедренными в поверхность ленты атомами водорода и кислорода при ее взаимодействии с водой, способствуют повышению объема доменов с ортогональной компонентой намагниченности ($V_{\text{орт}}$). В то же время ориентированная поперек оси ленты псевдоодносоставная компонента таких напряжений после отжига при 200°C вызывает переориентацию намагниченности в плоскости ленты вдоль ее оси. Это приводит к увеличению остроты магнитной текстуры η , определяемой отношением объемов до-

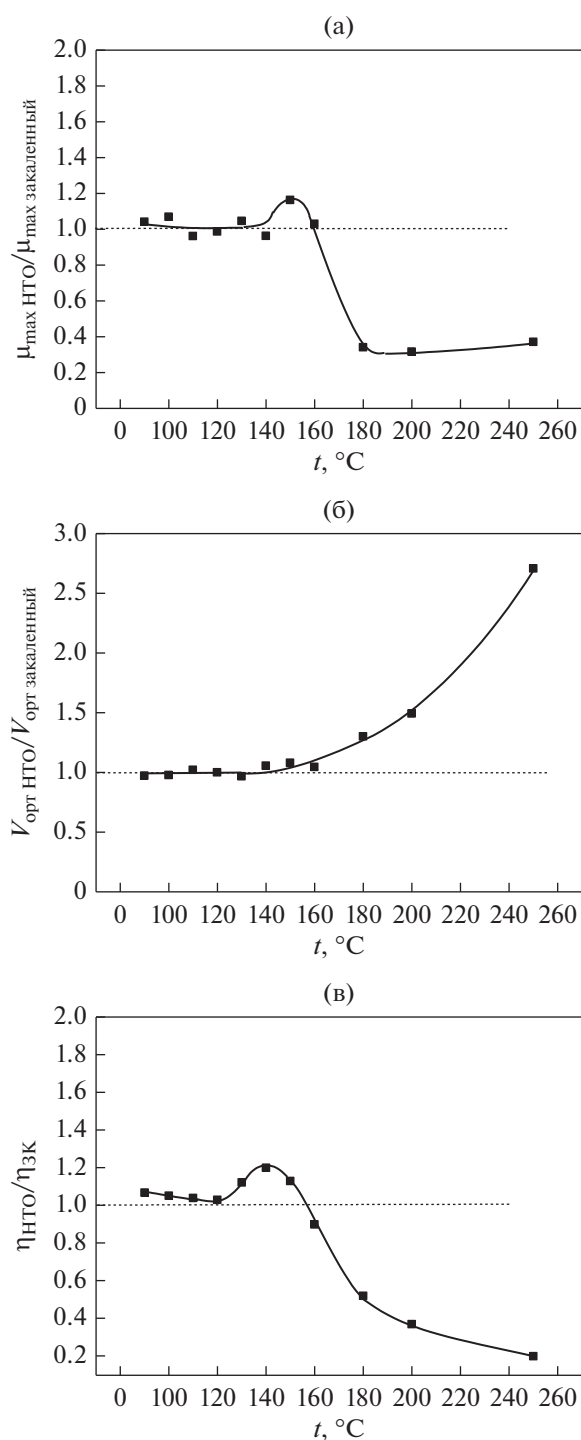


Рис. 1. Влияние температуры обработки на воздухе с длительностью изотермической выдержки $\tau = 7$ мин на относительное изменение магнитных характеристик аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B.

менов с планарной намагниченностью, ориентированной вдоль (V_{180}) и поперек (V_{90}) оси ленты. В обоих случаях имеет место переориентация намагниченности перпендикулярно растягивающим напряжениям. Следовательно, термообработки лен-

ты исследуемого сплава не приводят к изменению знака константы магнитострикции в этом интервале температур.

Влияние низкотемпературной обработки при температурах 90–250°C с длительностью изотермической выдержки 7 мин на относительное изменение магнитных характеристик показано на рис. 1. Видно, что термообработка в интервале температур 90–140°C не приводит к заметному изменению объема доменов с ортогональной компонентой намагниченности, поскольку не способствует существенной релаксации внутренних напряжений. Тем не менее при температурах изотермической выдержки от 90 до 150°C имеет место повышение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты, которое обусловлено взаимодействием ее поверхности с атмосферным паром. В состоянии с $\lambda_s < 0$ преимущественно плоские растягивающие напряжения, ориентированные поперек оси ленты, приводят к переориентации намагниченности вдоль ее оси. Наблюдаемое снижение степени роста η в интервале температур 90–120°C связано с ослаблением влияния псевдоодносных напряжений из-за увеличения модуля Юнга в поверхностном слое ленты в результате выхода свободного объема [20].

При повышении температуры изотермической выдержки до 140°C увеличение степени остроты магнитной текстуры обусловлено усилением влияния псевдоодносных растягивающих напряжений поперек оси ленты из-за повышения активности диффузионных процессов при взаимодействии поверхности ленты с атмосферным паром. Наблюдаемое снижение степени роста остроты магнитной текстуры при температурах изотермической выдержки выше 140 и чуть ниже 160°C может быть связано с ослаблением влияния таких напряжений из-за уменьшения намагниченности насыщения, которое становится уже ощутимым вследствие сравнительно низкой температуры Кюри этого сплава (235°C). В этой области температур изотермической выдержки относительное изменение максимальной магнитной проницаемости обусловлено перераспределением намагниченности в плоскости ленты. Преимущественно плоская компонента растягивающих напряжений способствует небольшому росту $V_{\text{орт}}$ в области 140–160°C.

Дальнейшее повышение температуры изотермической выдержки вызывает повышение объема доменов с ортогональной намагниченностью и уменьшение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Причем степень изменения этих характеристик увеличивается с ростом температуры изотермической выдержки. Усиление активности взаимодействия поверхности ленты с атмосферным паром при повышении температуры приводит к увеличению концентрации внед-

ренных атомов водорода и кислорода и глубины их проникновения. Это способствует повышению уровня преимущественно плоских растягивающих напряжений. Снижение намагниченности насыщения при приближении температуры изотермической выдержки к точке Кюри на этой стадии влечет за собой ослабление анизотропной компоненты псевдоодноосного растяжения из-за уменьшения различия в концентрациях внедренных атомов вдоль и поперек оси ленты. В этом случае влияние формирования анизотропных напряжений на стадии охлаждения возрастает [21]. Из результатов, представленных в табл. 1, видно, что после термообработки при 200°C результирующая намагниченность направлена вдоль оси ленты, хотя различие между объемами доменов с планарной намагниченностью, ориентированной вдоль и поперек оси ленты, невелико. Однако термообработка при 250°C уже приводит к формированию поперечной анизотропии распределения намагниченности в плоскости ленты, и этот факт не объясняется только влиянием напряжений, индуцируемых взаимодействием поверхности ленты с атмосферным паром. Тем не менее полученные результаты находят объяснение с учетом влияния кристаллизации свободной поверхности ленты при этой температуре [15, 16]. Термообработка при изотермической выдержке 250°C не способствует индуцированию анизотропных растягивающих напряжений как в результате взаимодействия поверхности ленты с паром, так и при кристаллизации ее свободной поверхности, поскольку осуществляется при температуре выше точки Кюри. На стадии охлаждения при температуре ниже точки Кюри образуется повышенная концентрация внедренных в поверхность ленты атомов поперек оси ленты из-за ее взаимодействия с атмосферным паром. Это способствует анизотропному росту кристаллов вдоль оси ленты [22], индуцирующему преимущественно плоские растягивающие напряжения в этом направлении. Преобладающее влияние этого фактора, вызывая переориентацию намагниченности в плоскости ленты поперек ее оси, в состоянии с $\lambda_s < 0$ формирует поперечную магнитную анизотропию. Заметим, что при термообработке с изотермической выдержкой 250°C, несмотря на большие значения объема доменов с ортогональной намагниченностью и поперечный характер распределения намагниченности в плоскости ленты, наблюдаются более высокие значения максимальной магнитной проницаемости. Это может быть следствием процесса релаксации обусловленных закалкой внутренних напряжений, который при этих температурах уже достаточно активен [15].

Уменьшение относительных значений максимальной магнитной проницаемости в интервале

температур изотермической выдержки от 160 до 250°C связано с увеличением объема доменов с ортогональной намагниченностью, стабилизирующих границы доменов с планарной намагниченностью. Снижение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты также способствует уменьшению μ_{\max} .

Из анализа хода кривых, представленных на рис. 1, видно, что характер зависимости магнитных характеристик от температуры изотермической выдержки изменяется уже при 180°C: изменяется ход зависимостей максимальной магнитной проницаемости от температуры изотермической выдержки и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты, наблюдается резкое возрастание объема доменов с ортогональной намагниченностью. Отсюда можно заключить, что для исследуемого сплава влияние кристаллизации свободной поверхности ленты может быть существенным уже при 180°C.

Температура изотермической выдержки при термообработке является одним из наиболее важных факторов, которые влияют на формирование магнитных характеристик. Не менее важным фактором является также и длительность изотермической выдержки. На рис. 2 представлены магнитные характеристики в зависимости от длительности изотермической выдержки на воздухе при 200°C. Сравнение рис. 1 и 2 показывает, что имеет место качественная аналогия хода кривых, а изменение магнитных характеристик объясняется протеканием тех же процессов. Из рис. 2 видно, что изотермические выдержки в течение 1 и 2 минуты не приводят к существенному изменению магнитных характеристик. Тем не менее это не означает, что такой длительности выдержки недостаточно для активации диффузионных процессов.

На рис. 3 приведены полевые зависимости магнитной проницаемости в исходном (закаленном) состоянии и после термообработки при 200°C в течение 1 мин. Видно, что в закаленном состоянии имеет место бимодальная полевая зависимость, которая находит объяснение в рамках неоднородности закалочных напряжений по толщине ленты [12]. Учитывая кривизну поперечного сечения ленты, меньшую скорость охлаждения свободной поверхности и ее взаимодействие с атмосферным паром при изготовлении, можно заключить что в поверхностном слое индуцируются преимущественно плоские растягивающие напряжения. В состоянии с отрицательной константой магнитострикции такие напряжения способствуют формированию состояния с меньшими значениями максимальной магнитной проницаемости. В этом случае второй максимум на полевой зависимости можно отнести к слою, прилегающему к свободной поверхности ленты. В процессе термообработки при 200°C в течение 1 мин (рис. 3) в области

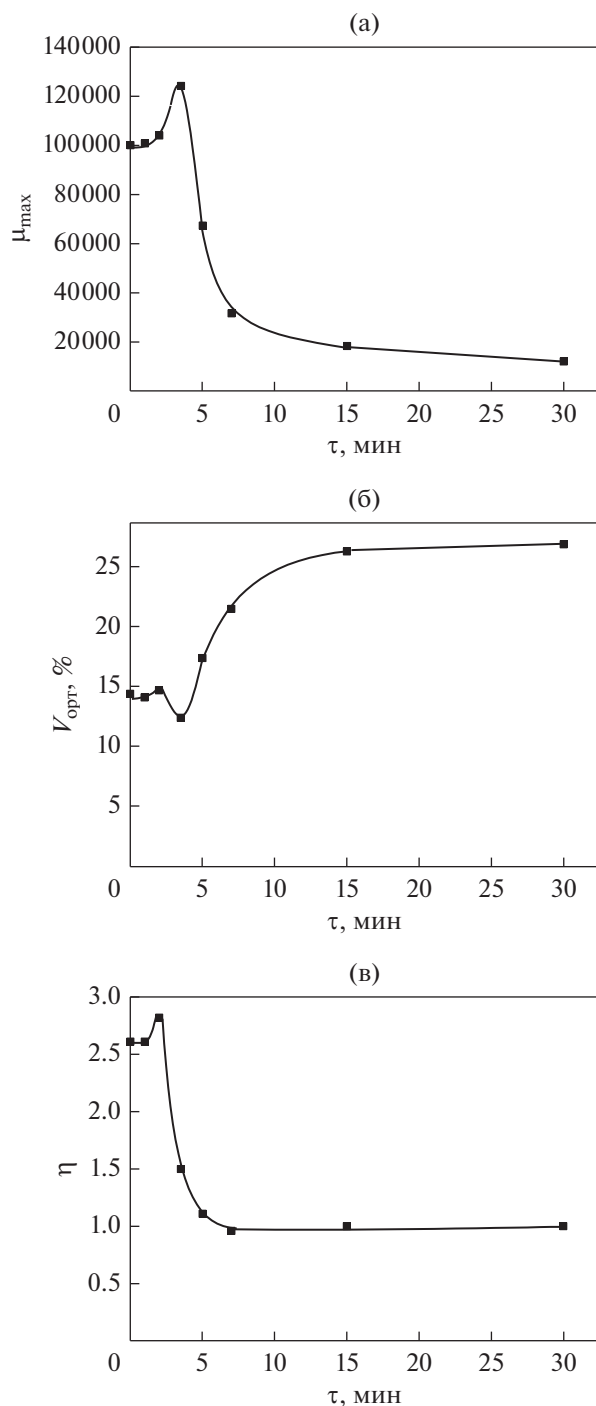


Рис. 2. Влияние длительности термообработки на воздухе при 200°C на магнитные характеристики аморфного сплава Co-Fe-Ni-Cr-Mn-Si-B.

двойного максимума на полевой зависимости магнитной проницаемости наблюдается трансформация формы кривой: имеет место слияние максимумов без изменения значения μ_{\max} в объеме ленты. Это может быть связано со снижением неоднородности напряжений по толщине ленты вследствие

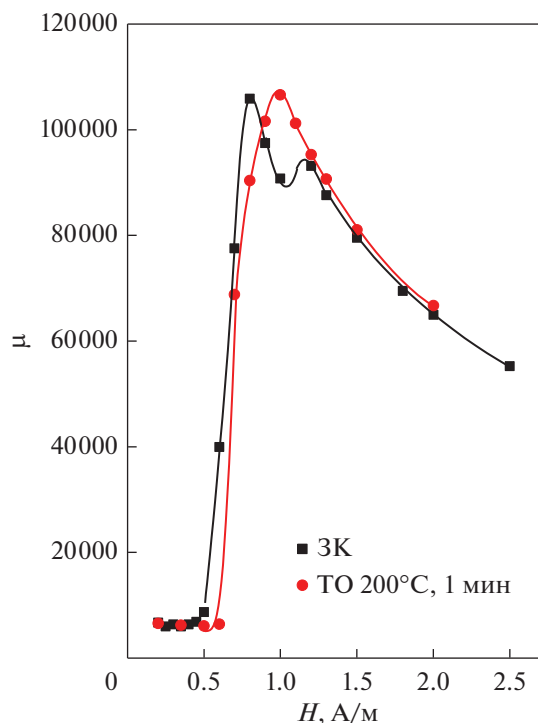


Рис. 3. Влияние температуры обработки на воздухе на полевою зависимость магнитной проницаемости аморфного сплава Co-Fe-Ni-Cr-Mn-Si-B.

выхода свободного объема через ее свободную поверхность [6] и уменьшения растягивающих напряжений в поверхностном слое ленты.

Таким образом, изменение магнитных характеристик при длительности изотермической выдержки до 4 мин является следствием наложения двух факторов: выхода свободного объема и окисления и гидрирования поверхности ленты при ее взаимодействии с атмосферным паром. Преобладающее влияние преимущественно плоских сжимающих напряжений, обусловленных выходом свободного объема, приводит к уменьшению объема доменов с ортогональной намагниченностью. Псевдоодноосные растягивающие напряжения, ориентированные поперек оси ленты в ее плоскости, индуцированные повышенной концентрацией внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода в этом направлении, вызывают переориентацию намагниченности вдоль ее оси, повышая остроту магнитной текстуры. Оба этих фактора способствуют повышению максимальной магнитной проницаемости.

При дальнейшем повышении длительности изотермической выдержки становится заметным влияние кристаллизации свободной поверхности ленты. Преимущественно плоские псевдоодноосные растягивающие напряжения, обусловленные анизотропной кристаллизацией, ориентированы вдоль оси ленты. В то же время поперек ее оси ин-

дуцируются такие же напряжения из-за взаимодействия поверхности с атмосферным паром. Наложение этих напряжений приводит к уменьшению максимальной магнитной проницаемости вследствие увеличения объема доменов с ортогональной намагниченностью и уменьшения остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Повышение длительности изотермической выдержки способствует усилению влияния напряжений, индуцируемых кристаллизацией свободной поверхности ленты, на изменение магнитных характеристик, которое, в свою очередь, может быть связано с увеличением толщины поверхностного аморфно-кристаллического слоя, формируемого на ее свободной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематическое исследование влияния термообработки на воздухе при 90–250°C на магнитные характеристики аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–В показало, что при длительности изотермической выдержки от 1 до 30 мин не происходит изменения знака константы магнитострикции. При этом имеет место немонотонная зависимость максимальной магнитной проницаемости от температуры и длительности изотермической выдержки. Эта зависимость обусловлена перераспределением намагниченности в ленте в процессе отжига. Полученные результаты объясняются протеканием диффузионных процессов: выхода свободного объема, окисления и гидрирования поверхности ленты в результате взаимодействия с атмосферным паром и кристаллизации свободной поверхности ленты.

В состоянии с отрицательной константой магнитострикции причиной уменьшения объема доменов с ортогональной намагниченностью является преобладающее влияние выхода свободного объема при сравнительно низких температурах и длительностях изотермической выдержки. Преимущественно плоские псевдоодноосные растягивающие напряжения поперек оси ленты, индуцированные повышенной концентрацией внедренных в этом направлении атомов водорода и кислорода в поверхностный слой ленты, содействуют повышению остроты магнитной текстуры в ее плоскости. Повышение объема доменов с ортогональной намагниченностью и уменьшение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты при более высоких температурах и длительностях изотермической выдержки может быть обусловлено наложением преимущественно плоских анизотропных растягивающих напряжений вдоль и поперек оси ленты. Такие напряжения индуцируются в результате взаимодействия поверхностей ленты с атмосферным паром и анизотропной кристаллизацией ее свободной поверхности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект FTUZ-2020-0051.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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 $\text{Au}_{49}\text{Cu}_{26.9}\text{Si}_{16.3}\text{Ag}_{5.5}\text{Pd}_{2.3}$ bulk metallic glass // *Scr. Mater.* 2015. V. 103. P. 14–17.
3. Van den Beukel A., Van der Zwaag S., Mulder A.L. A semi-quantitative description of the kinetics of structural relaxation in amorphous $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ // *Acta Metallurgica.* 1984. V. 32. № 11. P. 1895–1902.
4. Nagel C., Rätzke K., Schmidtke E., Wolff J. Free-volume changes in the bulk metallic glass $\text{Zr}_{46.7}\text{Ti}_{8.3}\text{Cu}_{7.5}\text{Ni}_{10}\text{B}_{27.5}$ and the under-cooled liquid // *Phys. Rev.* 1998. V. 57 B. № 17.
5. Flanders P.J., Liebermann H.H., Graham C.D., Jr. Changes in curie temperature, physical dimensions, and magnetic anisotropy during annealing of amorphous magnetic alloys // *IEEE Trans. Magn.* 1977. V. 13. № 5. P. 1541–1543.
6. Bulavin L.A., Karbivskyy V., Artemyuk V., Karbivska L. Relaxation and vitrification processes of disordered iron-based systems // *Springer Proceedings in Physics.* 2018. V. 197. P. 331–372.
7. Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О. Взаимодействие с водой лент аморфных магнитомягких сплавов на основе железа и их магнитные свойства // *ФММ.* 2011. Т. 112. № 12. С. 483–490.
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. Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О., Минаева О.А. Взаимодействие с паром поверхности лент аморфных магнитомягких сплавов на основе железа // *ФММ.* 2014. Т. 115. № 6. С. 563–572. <https://doi.org/10.7868/S0015323014060138>
10. Скулкина Н.А., Иванов О.А., Степанова Е.А., Павлова И.О. Влияние электролитического оксидирования и наводороживания на распределение намагниченности и магнитные свойства лент аморфных магнитомягких сплавов на основе железа // *ФММ.* 2011. Т. 111. № 5. С. 480–485.
11. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. 496 с.
12. Скулкина Н.А., Некрасов Е.С., Денисов Н.Д., Кузнецов П.А., Мазеева А.К. Неоднородность магнитных характеристик аморфного сплава на основе ко-

- бальта в закаленном состоянии // ФММ. 2021. Т. 122. № 11. С. 1135–1143.
<https://doi.org/10.31857/S0015323021110140>
13. Крахмалев П.В. Структура и свойства магнитомягких аморфных сплавов на основе железа и кобальта при термической, механотермической и термомагнитной обработке: дис. ... к. т. н. Санкт-Петербург (технический университет), 1999. 142 с.
 14. Дышлок М.А. Закономерности калориметрических эффектов в твердых растворах внедрения металл-водород, железо-углерод и железо-азот. дис. ... к. т. н. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. 156 с.
 15. Minič Dragica M., Minič Dušan M., Žák Tomáš, Roupčová Pavla, Bohumil David. Structural transformations of $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$ amorphous alloy induced by heating // J. Magn. Magn. Mater. 2011. V. 323. P. 400–404.
 16. Modin E.B., Pustovalov E.V., Fedorets A.N., Dubinets A.V., Grudin B.N., Plotnikov V.S., Grabchikov S.S. Atomic structure and crystallization processes of amorphous (Co,Ni)-P metallic alloy // J. Alloys Compounds. 2015. V. 641. P. 139–143.
 17. Masanori Fujinami, Yusuke Ujihira. Transmission and conversion electron Mossbauer studies of the crystallization transformation in the quaternary amorphous $\text{Fe}_{80.5}\text{B}_{12}\text{Si}_{(4.5+x)}\text{C}_{3x}$ ($x = 0, 2$) ribbons // J. Non-Cryst. Solids 1985. V. 69. P. 361–369.
 18. Скулкина Н.А. Распределение намагниченности и магнитные свойства кристаллических, аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук. Уральский государственный университет им. А.М. Горького. Екатеринбург, 2008. 340 с.
 19. 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.
<https://doi.org/10.7868/S0015323017120026>
 20. Скулкина Н.А., Мазеева А.К., Кузнецов П.А., Чекис В.И., Денисов Н.Д., Некрасов Е.С. Влияние полимерного покрытия на магнитные характеристики ленты аморфного сплава на основе кобальта в закаленном состоянии // ФММ. 2020. Т. 121. № 2. С. 142–148.
<https://doi.org/10.31857/S0015323020020163>
 21. 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.
<https://doi.org/10.7868/S0015323015100137>
 22. Vasič Milica, Minič Dušan M., Blagojevič Vladimir A., Minič Dragica M. Mechanism and kinetics of crystallization of amorphous $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$ alloy // Thermochimica Acta. 2013. V. 572. P. 45–50.