

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.213.26:537.622.4

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕНТЫ С АЦЕТОНОМ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОГО МАГНИТОМЯГКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА

© 2021 г. Н. А. Скулкина^{а, *, **}, Н. Д. Денисов^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 21.04.2021 г.

После доработки 10.07.2021 г.

Принята к публикации 16.07.2021 г.

Проведенные исследования показали, что обработка ацетоном ленты аморфного магнитомягкого сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–В оказывает влияние на ее магнитные характеристики. Оно различно для состояний ленты с разными знаками константы магнитострикции (λ_s). В состоянии с $\lambda_s > 0$ наблюдается увеличение объема доменов с ортогональной намагниченностью и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты; с $\lambda_s < 0$ имеет место уменьшение объема доменов с ортогональной намагниченностью, снижение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты и повышение максимальной магнитной проницаемости. Увеличение длительности обработки усиливает ее влияние на объемную компоненту намагниченности и ослабляет воздействие на перераспределение намагниченности в плоскости ленты. Это может быть связано с повышением уровня сжимающих напряжений, индуцированных каталитическим окислением и гидрированием ацетона.

Ключевые слова: аморфные магнитомягкие сплавы, термообработка, магнитная проницаемость, распределение намагниченности, константа магнитострикции, ацетон, вода

DOI: 10.31857/S0015323021110152

ВВЕДЕНИЕ

Ацетон широко используется для очистки и обезжиривания поверхности различных материалов, входит в состав клеев, лаков, красок. Априори считается, что он не оказывает влияния на магнитные характеристики лент аморфных магнитомягких сплавов. Тем не менее известно, что в присутствии катализатора может иметь место реакция окисления ацетона. Например, катализаторами являются оксиды переходных металлов: хрома, железа, кобальта, марганца, никеля (Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , Co_3O_4 , MnO_2 , NiO), которые присутствуют на поверхности лент исследуемых сплавов и обладают сравнительно низкой энергией связи кислорода на поверхности оксидов. Продуктами реакций каталитического окисления являются, например, уксусная кислота, углекислый газ, вода [1]. Известно также каталитическое гидрирование ацетона. Катализатором этой реакции, например, может выступать никель, а продуктом является изопропиловый спирт или пропан [2].

Исследования, проведенные в работе [3], показали, что обработка поверхности ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–В ацетоном

оказывает эффект противоположного воздействия воды. В результате химических реакций при обработке поверхности ленты водой происходит ее окисление и гидрирование [4–11]. Внедренные в поверхность ленты атомы водорода и кислорода индуцируют преимущественно плоские анизотропные растягивающие напряжения, которые в зависимости от знака константы магнитострикции (λ_s) по-разному влияют на распределение намагниченности. Такие напряжения способствует снижению остроты магнитной текстуры в плоскости ленты и объема доменов с ортогональной намагниченностью ($V_{\text{орт}}$) в состоянии с $\lambda_s > 0$; повышению $V_{\text{орт}}$ и остроты магнитной текстуры в состоянии с $\lambda_s < 0$ [8–10]. В свою очередь, обработка ацетоном поверхности ленты в состоянии с $\lambda_s > 0$ приводит к увеличению остроты магнитной текстуры в плоскости ленты и объема доменов с ортогональной намагниченностью; а в состоянии с $\lambda_s < 0$ к снижению $V_{\text{орт}}$ и остроты магнитной текстуры. Это может быть следствием уменьшения напряжений, индуцируемых атомами кислорода и водорода, при снижении их концентрации на поверхности ленты в результате каталитического окисления и гидрирования ацетона [12]. Отсюда

следует, что грамотное использование ацетона в определенных целях способствует предотвращению нежелательных последствий ухудшения магнитных свойств, а также получению корректных результатов исследования. Поэтому в настоящей работе представлены результаты исследования влияния длительности обработки ацетоном на магнитные характеристики ленты аморфного магнитомягкого сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в состояниях с положительной и отрицательной константами магнитострикции.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах сплава АМАГ-172 (Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B) в форме полос размерами $100 \times 10 \times 0.020$ мм. В закаленном состоянии лента исследуемого сплава обладает низкими (10^{-7}) отрицательными значениями константы магнитострикции (λ_s). Важным моментом в выборе материала является тот факт, что подбором параметров термообработки можно формировать состояния ленты с разными знаками магнитострикции насыщения без вариации элементного состава. Исследования проводили на образцах в закаленном состоянии (ЗК) и после термообработок (ТО) на воздухе при 370 и 380°C с длительностями изотермической выдержки 10 и 40 мин, формирующих состояния с разными знаками константы магнитострикции [13]. Кривые намагничивания измеряли индукционно-импульсным методом с погрешностью измерения магнитной индукции и напряженности поля, не превышающей 2%, максимальной 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 [13, 14]. 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 [3, 8, 9, 14]. Обработку ацетоном (ОА) проводили при комнатной температуре погружением ленты в ацетон. Учитывая медленную скорость реакций ацетона с элементами поверхности ленты, длительности обработки выбрали соизмеримыми с длительностью полимеризации клея БФ-2 при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования, результаты которых приведены в настоящей работе, являются продолжением ис-

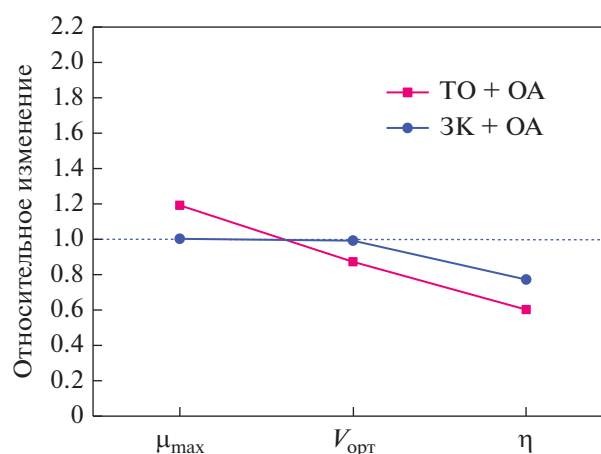


Рис. 1. Диаграмма изменения магнитных характеристик аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B после обработки ацетоном в течение 20 ч ленты в состоянии с $\lambda_s < 0$ относительно исходного состояния (ТО 370°C, 10 мин и ЗК, серии 2.1 и 1.1).

следований, представленных в работе [12]. Обработку ацетоном поверхности ленты исследуемого сплава проводили на образцах в разных исходных состояниях: с положительной и отрицательной константами магнитострикции, которые получали с помощью различных режимов термообработок на воздухе [12]. В табл. 1 представлена информация об исходном состоянии образцов перед обработкой ацетоном, о знаке константы магнитострикции, их магнитных характеристиках в этом состоянии: максимальной магнитной проницаемости, значениях относительного объема доменов с ортогональной намагниченностью ($V_{орт}$) и остроте магнитной текстуры в плоскости ленты $\eta = V_{180}/V_{90}$ (V_{180} и V_{90} – значения относительных объемов доменов с намагниченностью, ориентированной параллельно плоскости ленты вдоль и поперек ее оси). Для большей наглядности изменения магнитных характеристик после обработки ленты ацетоном полученные результаты представлены в виде диаграмм на рис. 1–5. Знак константы магнитострикции исследуемых образцов определен в работе [12].

Приведенные на рис. 1 результаты показывают, что обработка ацетоном в течение 20 ч поверхности ленты в состоянии с $\lambda_s < 0$ (непосредственно после ТО 370°C с длительностью изотермической выдержки 10 мин) вызывает уменьшение и объема доменов с ортогональной намагниченностью, и остроты магнитной текстуры η в плоскости ленты. Это является следствием преимущественно плоских анизотропных сжимающих напряжений, индуцируемых снижением концентрации кислорода и водорода в поверхностном слое ленты в результате каталитического окисления и гидрирования ацетона. Такие напряжения в состоянии ленты с

Таблица 1. Магнитные характеристики исследуемых образцов в исходном (перед обработкой ацетоном) состоянии и длительность последующей обработки ацетоном

Серия	Состояние ленты перед обработкой ацетоном	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	η	Длительность ОА, час
Закаленное ($\lambda_s < 0$)					
1.1	ЗК	46000	13.1	1.88	20
1.2	ЗК + ОВ	50000	13.4	2.00	20
1.3	ЗК	38000	14.7	1.04	170
ТО 370°C, 10 мин ($\lambda_s < 0$)					
2.1	ТО	540000	13.4	2.71	20
2.2	ТО + ОВ	500000	13.6	2.14	20
ТО 380°C, 40 мин ($\lambda_s > 0$)					
3.2	ТО + ОВ	370000	11.5	2.85	20
3.3	ТО + ОВ	560000	7.4	1.28	46
3.4	ТО	430000	7.0	1.54	46

отрицательной константой магнитострикции способствуют переориентации намагниченности в плоскость ленты, уменьшению объема доменов с ортогональной намагниченностью. Переориентация намагниченности в плоскость ленты энергетически выгодна, поскольку способствует уменьшению полей рассеяния. Так как термообработку проводили на воздухе при температуре выше температуры Кюри, в результате взаимодействия с атмосферным паром повышенная концентрация внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода поперек ее оси образуется во время охлаждения при температуре ниже точки Кюри [11, 15]. Во время обработки поверхности ленты ацетоном скорость диффузии атомов из этого направления выше, что приводит к анизотропному сжатию поперек оси ленты. Индуцированные в этом направлении анизотропные сжимающие напряжения способствуют переориентации намагниченности поперек оси ленты и уменьшению остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Фактор ослабления стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью является в этом случае преобладающим и приводит к повышению максимальной магнитной проницаемости.

Аналогичное влияние оказывает обработка ацетоном поверхности ленты в закаленном состоянии. В этом случае также имеет место уменьшение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Тем не менее вследствие высокого уровня обусловленных закалкой внутренних напряжений не наблюдается переориентации намагниченности в плоскость ленты и изменения максимальной магнитной проницаемости.

Увеличение концентрации внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода в

результате промежуточной обработки водой способствует повышению воздействия ацетона на распределение намагниченности в ленте (рис. 2). Более сильное уменьшение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты в этом случае уже приводит к меньшему увеличению максимальной магнитной проницаемости (рис. 2а).

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что обработка ацетоном в течение 20 ч поверхности ленты в состоянии с положительной константой магнитострикции оказывает противоположное воздействие на магнитные характеристики. Преимущественно плоские анизотропные сжимающие напряжения, индуцируемые в результате каталитического окисления и гидрирования ацетона, вызывают переориентацию планарной намагниченности вдоль оси ленты, повышая остроту магнитной текстуры. Тем не менее в этом случае такие напряжения не способствуют увеличению объема доменов с ортогональной намагниченностью из-за того, что влияние энергии анизотропии формы и преимущественно плоских растягивающих напряжений, обусловленных поверхностной кристаллизацией ленты [16, 17] и взаимодействием с атмосферным паром во время отжига, преобладает над влиянием магнитоупругой энергии, индуцированной в результате взаимодействия поверхности ленты с ацетоном. Максимальная магнитная проницаемость в этом случае не изменяется.

Длительность обработки поверхности ленты ацетоном также оказывает влияние на степень изменения магнитных характеристик. Из рис. 4а видно, что в состоянии с положительной константой магнитострикции (после термообработки на воздухе при 380°C с длительностью изотермической выдержки 40 мин) преимущественно

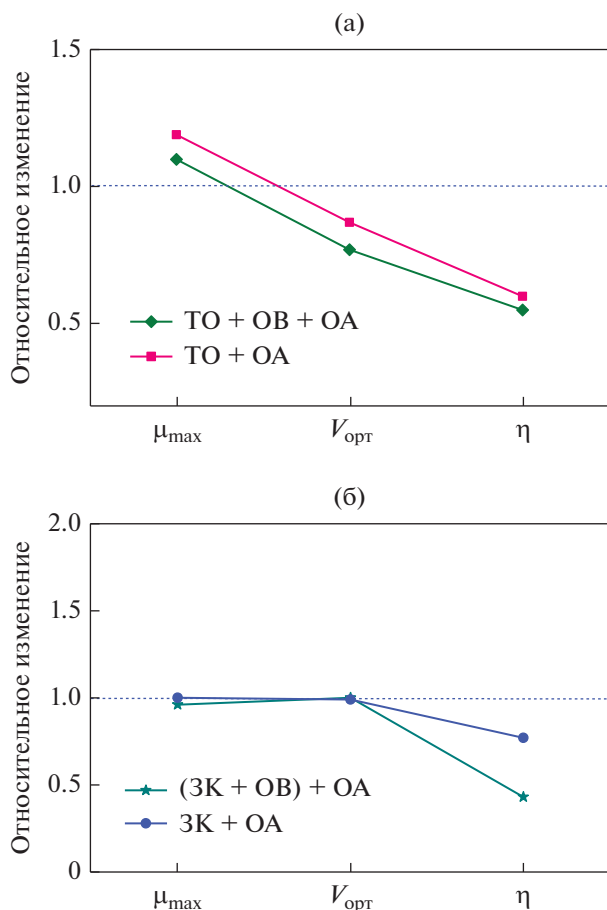


Рис. 2. Диаграмма изменения магнитных характеристик аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B после обработки ацетоном в течение 20 ч с промежуточной обработкой поверхности водой и без нее ленты в состоянии с $\lambda_s < 0$ относительно исходного состояния (ТО 370°C, 10 мин и ЗК, серии 2.1, 2.2; 1.1 и 1.2, рис. а и б соответственно).

плоские сжимающие напряжения, индуцируемые обработкой поверхности ленты ацетоном в течение 46 ч, вызывают увеличение объема доменов с ортогональной намагниченностью. Это обусловлено повышением уровня сжимающих напряжений вследствие увеличения толщины поверхностного слоя, обедненного атомами кислорода и водорода. Меньшая степень роста остроты магнитной текстуры с увеличением длительности обработки ацетоном также может быть связана с анизотропией сжимающих напряжений, уровень которых поперек оси ленты может быть меньше в результате соответствующей анизотропии скорости диффузии атомов кислорода и водорода как изнутри, так и извне ленты. Ослабление внешнего воздействия может быть связано, например, с неполным окислением ацетона. В результате этой реакции одним из продуктов реакции является вода. С увеличением длительности обработки ленты ацетоном динамический процесс деокси-

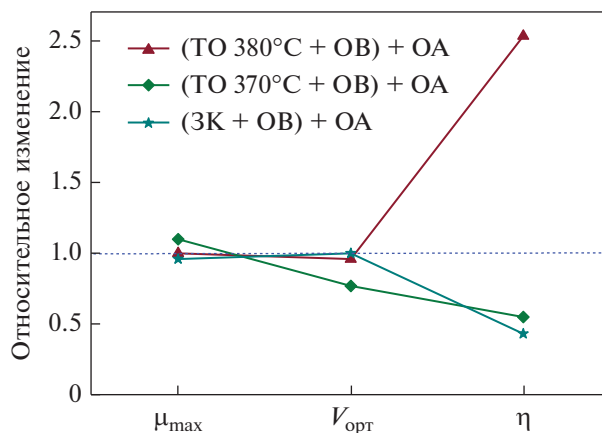


Рис. 3. Диаграмма изменения магнитных характеристик аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B после обработки ленты ацетоном в течение 20 ч с промежуточной обработкой поверхности водой, лента в состоянии с $\lambda_s < 0$: ТО 370°C, 10 мин + ОБ и ЗК + ОБ, серии 2.1 и 1.1 и $\lambda_s > 0$: ТО 380°C, 40 мин + ОБ, серия 3.2.

дирования – окислирования и дегидрирования – гидрирования ее поверхности способствует сохранению большей концентрации внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода поперек ее оси и препятствует переориентации намагниченности вдоль оси ленты. Усиление стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью в этом случае является основной причиной уменьшения максимальной магнитной проницаемости.

На рис. 5 показано относительное изменение магнитных характеристик после обработки поверхности ленты ацетоном в течение 46 ч непосредственно после термообработки при 380°C с длительностью изотермической выдержки 40 мин и с промежуточной обработкой ее поверхности водой ($\lambda_s > 0$). Видно, что в этом случае промежуточная обработка поверхности ленты водой также повышает чувствительность магнитных характеристик к воздействию ацетона, аналогично данным, полученным при обработке ацетоном в течение 20 ч.

Рисунки 6 и 7 демонстрируют влияние длительности обработки поверхности ленты ацетоном на полевую зависимость магнитной проницаемости образцов исследуемого сплава после термообработки при 380°C в течение 40 мин, формирующей состояние с положительной константой магнитострикции. Видно, что в результате обработки поверхности ленты ацетоном продолжительностью 20 ч не изменяется не только максимальная магнитная проницаемость, но и ход ее полевой зависимости (рис. 6). Это также обусловлено недостаточностью уровня преимущественно плоских сжимающих напряжений,

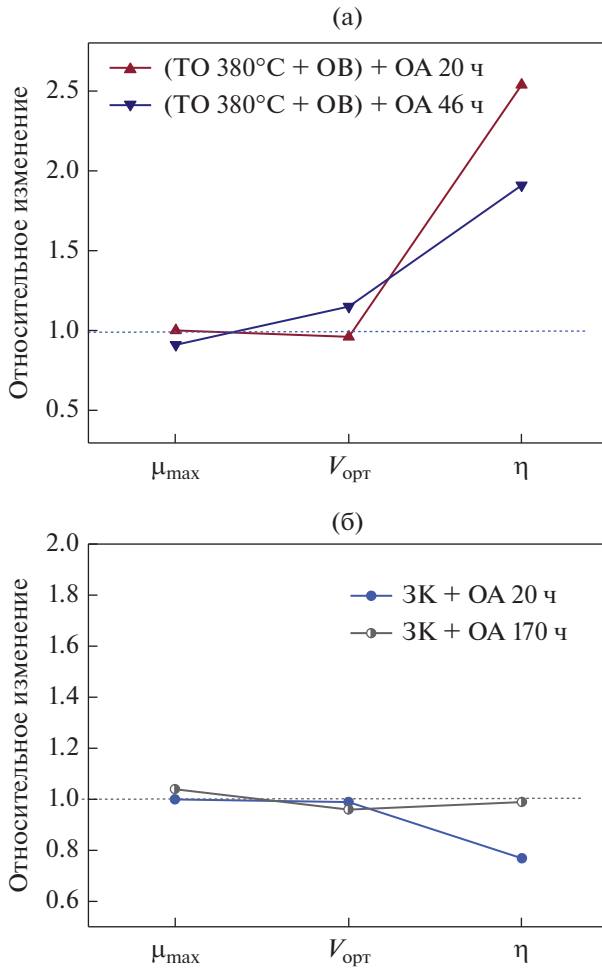


Рис. 4. Диаграмма изменения магнитных характеристик аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B после обработки ленты ацетоном в течение 20 и 46 ч с промежуточной обработкой поверхности водой, лента в состоянии с $\lambda_s > 0$ (рис. 4а: ТО 380°C, 40 мин + ОВ, серии 3.2 и 3.3), и после обработки ленты ацетоном в течение 20 и 170 ч без промежуточной обработки поверхности водой, лента в состоянии с $\lambda_s < 0$ (рис. 4б: 3К, серии 1.1 и 1.3).

индуцированных взаимодействием поверхности ленты с ацетоном, для переориентации намагниченности перпендикулярно плоскости ленты. Другая ситуация имеет место при увеличении длительности обработки поверхности ленты ацетоном (рис. 7). В этом случае наблюдается не только уменьшение максимальной магнитной проницаемости, но и сдвиг максимума на полевой зависимости в область более сильных полей. Это связано с большим уровнем преимущественно плоских сжимающих напряжений в силу следующих причин. Повышение длительности обработки ацетоном способствует более сильному уменьшению внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода при взаимодействии поверхности ленты с водой и атмосферным

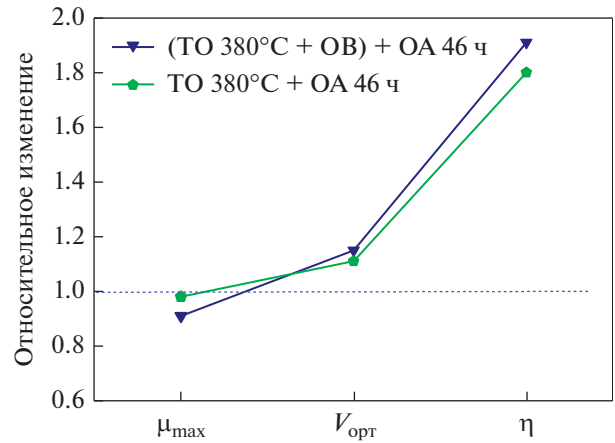


Рис. 5. Диаграмма изменения магнитных характеристик аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B после обработки ленты ацетоном в течение 46 ч непосредственно после ТО и с промежуточной обработкой поверхности водой в состоянии с $\lambda_s > 0$ (ТО 380°C, 40 мин, серии 3.3 и 3.4).

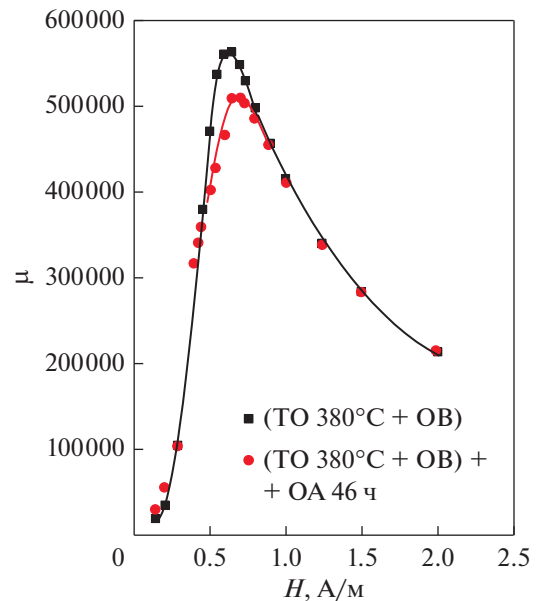


Рис. 6. Полевая зависимость магнитной проницаемости аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B до и после обработки ленты ацетоном в течение 20 ч с промежуточной обработкой поверхности водой, лента в состоянии с $\lambda_s > 0$ (ТО 380°C, 40 мин, серия 3.2).

паром во время отжига. Кроме этого, также должно иметь место, увеличение толщины поверхностного слоя, обедненного атомами водорода и кислорода, поскольку диффузия внедренных атомов наиболее легко осуществляется через аморфную прослойку между кристаллитами в поверхностном аморфно-кристаллическом слое, выполняющую функцию границ зерен [18].

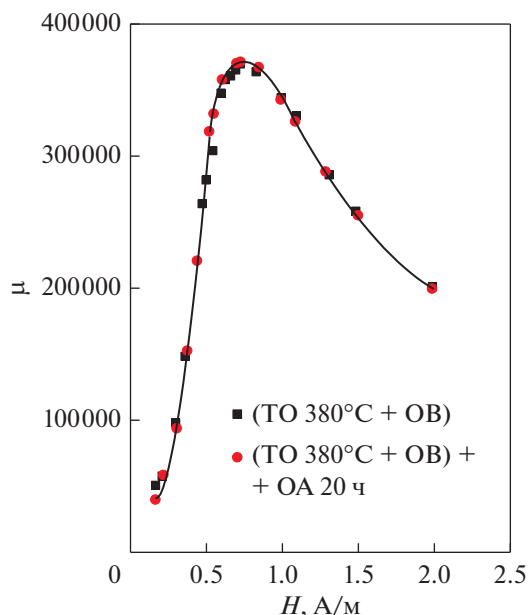


Рис. 7. Полевая зависимость магнитной проницаемости аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–В до и после обработки ленты ацетоном в течение 46 ч с промежуточной обработкой поверхности водой, лента в состоянии с $\lambda_s > 0$ (ТО 380°C, 40 мин, серия 3.3).

Результаты, представленные на рис. 4б, на примере ленты в закаленном состоянии показывают влияние длительности обработки ацетоном на магнитные характеристики ленты с отрицательной константой магнитострикции. Видно, что вследствие высокого уровня внутренних напряжений, обусловленных изготовлением ленты, повышение длительности обработки ацетоном с 20 до 170 ч практически не влияет на изменение объема доменов с ортогональной намагниченностью. Тем не менее в этом случае, те же причины, как и для ленты в состоянии с положительной константой магнитострикции, приводят к существенно меньшему перераспределению намагниченности в плоскости ленты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследования, представленных в настоящей работе, показал, что обработка ацетоном поверхности ленты аморфного магнитомягкого сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–В, способствуя перераспределению намагниченности, оказывает влияние на ее магнитные характеристики. Изменение магнитных характеристик различно для состояний ленты с разными знаками константы магнитострикции. В состоянии с $\lambda_s > 0$ наблюдается увеличение объема доменов с ортогональной намагниченностью и повышение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Для состояния ленты с $\lambda_s < 0$, наоборот, имеет ме-

сто уменьшение объема доменов с ортогональной намагниченностью и снижение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. В этом случае влияние первого фактора является преобладающим и приводит к повышению максимальной магнитной проницаемости из-за уменьшения стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью. В свою очередь перераспределение намагниченности может быть следствием преимущественно плоских анизотропных сжимающих напряжений, индуцируемых в ленте в результате каталитического окисления и гидрирования ацетона. Повышение длительности обработки поверхности ленты ацетоном не изменяет характера ее влияния на перераспределение намагниченности и максимальную магнитную проницаемость. Тем не менее в этом случае наблюдается усиление влияния обработки на объемную компоненту намагниченности и ослабление воздействия на перераспределение намагниченности в плоскости ленты. Причина такого влияния может заключаться в повышении уровня сжимающих напряжений, индуцированных каталитическим окислением и гидрированием ацетона в результате увеличения толщины поверхностного слоя, обедненного атомами водорода и кислорода.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FEUZ-2020-0051.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суздальев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. 592 с.
2. Шуткина О.В. Гидроалкилирование бензола ацетоном на бифункциональных катализаторах дис. ... канд. хим. наук. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, 2014. 116 с.
3. 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.
4. Зубов В.Е., Кудачков А.Д., Левшин Н.Л. Поверхностная перпендикулярная магнитная анизотропия в аморфном ферромагнетике, индуцируемая процессами адсорбции–десорбции молекул воды // Сб. трудов XXI Международной конференции “Новое в магнетизме и магнитных материалах”. (Москва, 28 июня–4 июля 2009 г.). Москва, 2009. С. 32–34.
5. Wei G., Cantor B. The oxidation behavior of amorphous and crystalline $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ // Acta Metall. 1988. V. 36. P. 2293–2305.
6. Flanders P.J., Liebermann H.H., Graham C.D. Jr. Changes in curie temperature, physical dimensions, and magnetic anisotropy during annealing of amor-

- phous magnetic alloys // IEEE Trans. Magn. 1977. V. 13. № 5. P. 1541–1543.
7. *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.
 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., Минина 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., 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. <https://doi.org/10.7868/S0015323015120116>
 11. *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>
 12. *Скулкина Н.А., Денисов Н.Д., Боярченков А.С., Некрасов Е.С.* Влияние химически активной среды на магнитные характеристики аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта // ФММ. 2020. Т. 121. № 6. С. 576–582. <https://doi.org/10.31857/S001532302006015>
 13. *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>
 14. *Скулкина Н.А.* Распределение намагниченности и магнитные свойства кристаллических, аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов дис. / Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Уральский государственный университет им. А.М. Горького. Екатеринбург, 2008. 340 с.
 15. *Кекало И.Б., Самарин Б.А.* Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. 496 с.
 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 Comp. 2015. V. 641. P. 139–143.
 17. *Minič Dragica M., Minič Dušan M., Žák Tomáš, Roupová Pavla, Bohumil David.* Structural transformations of Fe₈₁B₁₃Si₄C₂ amorphous alloy induced by heating // J. Magn. Magn. Mater. 2011. V. 323. P. 400–404.
 18. *Silveyra Josefina M., Illeková Emília.* Effects of air annealing on Fe–Si–B–M–Cu (M = Nb, Mo) alloys // J. Alloys Comp. 2014. V. 610. P. 180–183.