

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.213.26:537.622.4

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ АЦЕТОНОМ НА ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АМОРФНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

© 2022 г. Н. А. Скулкина^{a, *, **}, Е. С. Некрасов^a, Н. Д. Денисов^a,
А. А. Лигус^a, П. А. Кузнецов^b, А. К. Мазеева^c

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

^bНИЦ “Курчатовский институт” – ЦНИИ КМ “Прометей”, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, 191015 Россия

^cСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия

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

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

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Исследования показали, что обработка ацетоном поверхности ленты аморфного магнитомягкого сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B оказывает влияние на изменение магнитных характеристик с течением времени. Наблюдаемое изменение максимальной магнитной проницаемости связано с изменением распределения намагниченности в ленте под действием напряжений, индуцированных диффузионными процессами при комнатной температуре. К ним относятся процессы поверхностной кристаллизации, сопровождающиеся перераспределением атомов водорода и кислорода, внедренными при повышенной температуре в результате взаимодействия поверхности ленты с атмосферным паром. Влияние индуцируемых диффузионными процессами напряжений различно для состояний с разными знаками константы магнитострикции.

Ключевые слова: аморфные магнитомягкие сплавы, термообработка, магнитная проницаемость, распределение намагниченности, магнитострикция насыщения, ацетон, вода

DOI: 10.31857/S0015323022080113

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах [1, 2] по исследованию влияния обработки поверхности ленты ацетоном на магнитные характеристики аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B показано, что это влияние различно для состояний с разными знаками констант магнитострикции (λ_s). В состоянии с $\lambda_s > 0$ наблюдается повышение объема доменов с ортогональной намагниченностью ($V_{\text{орт}}$) и увеличение остроты магнитной текстуры η в плоскости ленты, определяемой отношением объемов доменов с планарной намагниченностью, ориентированной вдоль (V_{180}) и поперек (V_{90}) ее оси ($\eta = V_{180}/V_{90}$). В состоянии с отрицательной константой магнитострикции обработка ацетоном способствует уменьшению и объема доменов с ортогональной намагниченностью, и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Обработка ацетоном поверхности ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B оказывает влияние на распределение намагниченности, противоположное воз-

действию воды [3, 4]. В результате химических реакций взаимодействия элементов поверхности ленты с водой происходит ее анизотропное оксидирование и гидрирование. Согласно теории направленного упорядочения [5], в направлении, перпендикулярном результирующей намагниченности, т. е. поперек оси ленты образуется повышенная концентрация внедренных в поверхность атомов водорода и кислорода. Вследствие этого индуцируются преимущественно плоские анизотропные растягивающие напряжения, псевдоодноосное действие которых ориентировано поперек оси ленты. Такое воздействие приводит к 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 $\lambda_s < 0$ [6–13]. Взаимодействие поверхности ленты с ацетоном вызывает каталитическое окисление и гидрирование ацетона. Катализаторами являются оксиды переходных металлов: хрома, железа, кобальта, марганца, никеля (Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , Co_3O_4 ,

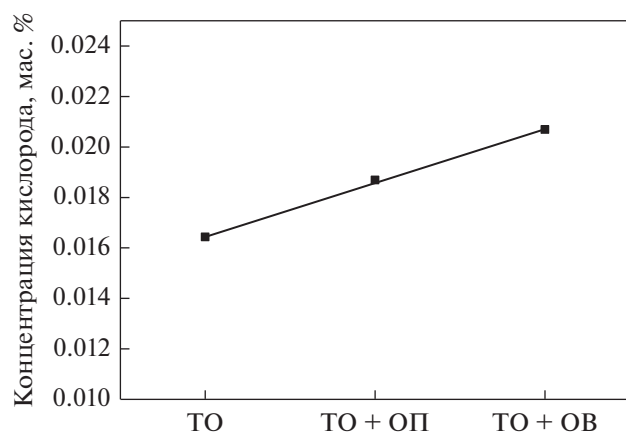


Рис. 1. Массовое содержание кислорода в ленте аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B после термообработки на воздухе при 380°C с длительностью изотермической выдержки 10 мин и последующих обработках в течение 10 мин паром (ТО + ОП) температурой 100°C и водой (ТО + ОВ) комнатной температуры.

MnO₂, 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 [3]. Катализатором реакции гидрирования ацетона может выступать никель, а продуктом является изопропиловый спирт или пропан [4]. В этом случае уменьшение концентрации атомов водорода и кислорода, внедренных в поверхность ленты, например, при ее взаимодействии с водяным паром во время термообработки на воздухе, индуцирует в поверхностном слое преимущественно плоские сжимающие напряжения с анизотропным сжатием поперек оси ленты. [1]. Увеличение длительности обработки поверхности ленты ацетоном не влияет на характер воздействия ацетона на магнитные характеристики. Однако в этом случае усиливается влияние на объемную компоненту намагниченности и ослабляется воздействие на перераспределение намагниченности в плоскости ленты. Причина такого влияния — повышение уровня сжимающих напряжений, индуцированных каталитическим окислением и гидрированием ацетона из-за увеличения толщины поверхностного слоя, обедненного атомами водорода и кислорода. Известно, что протекающие при комнатной температуре диффузионные процессы могут приводить к изменению магнитных характеристик с течением времени, включая знак константы магнитострикции [14]. Влияние обработки поверхности ленты ацетоном на временное изменение магнитных свойств практически не изучено. Поэтому в настоящей работе представлены результаты исследования влияния взаимодействия

поверхности ленты с ацетоном на изменение распределения намагниченности и магнитной проницаемости с течением времени.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах сплава АМАГ-172 (Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B) с низкими (10^{-7}) отрицательными значениями константы магнитострикции, в форме полос размерами $100 \times 10 \times 0.020$ мм. Интересной особенностью материала является возможность формирования состояния ленты с разными знаками константы магнитострикции подбором параметров термообработки без вариации элементного состава. Исследовали образцы в закаленном состоянии (ЗК) и после термообработок (ТО) на воздухе при 370 и 380°C с длительностями изотермической выдержки (τ) 10 и 40 мин и скоростью охлаждения ($v_{\text{охл}}$) 40 и 15 К/мин, формирующих состояния с разными знаками константы магнитострикции [10]. Кривые намагничивания измеряли индукционно-импульсным методом с погрешностью измерения магнитной индукции и поля, не превышающей 2%, максимальной магнитной проницаемости — 3%. Распределение намагниченности в ленте определяли при помощи авторской методики с относительной погрешностью не более 5% [15]. Корреляционная зависимость между максимальными значениями остаточной индукции (B_{rs}) и объемом доменов с ортогональной намагниченностью, полученной с помощью мессбауэровских исследований, позволяет получить относительный объем доменов с компонентой намагниченности перпендикулярной плоскости ленты. Анализ зависимости остаточной индукции частных петель гистерезиса от максимальной дает возможность определить распределение намагниченности в плоскости ленты. Для определения знака константы магнитострикции использовали обработку поверхности ленты паром (ОП) при температуре 100°C и водой (ОВ) комнатной температуры в течение 15 мин без видимого окисления поверхности [10]. Массовое содержание кислорода в образцах определяли методом восстановительного плавления в графитовом тигле в токе несущего газа в печи сопротивления, позволяющим определять содержание кислорода в диапазоне 0.00002–3.0 мас. % с относительной погрешностью 1% [16]. Изменение массового содержания кислорода в ленте в результате обработки ее поверхности паром и водой показано на рис. 1. Обработку ацетоном (ОА) проводили погружением ленты в ацетон при комнатной температуре [1, 2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные в настоящей работе результаты являются продолжением исследований, пред-

ставленных в работах [1, 2]. Ранее было показано, что при термических обработках на воздухе имеют место окисление и гидрирование поверхности ленты и формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя, которые также оказывают влияние на распределение намагниченности и магнитные свойства с течением времени. Для исключения влияния этих процессов рассмотрим изменение магнитных характеристик в закаленном состоянии ленты после обработки ее поверхности ацетоном в течение 20 ч на протяжении двух лет. Заметим, что в течение этого промежутка времени состояние ленты, не подвергнутой каким-либо воздействиям, стабильно (табл. 1). Видно, что в пределах погрешности измерений не изменяются значения максимальной магнитной проницаемости, относительного объема доменов с ортогональной намагниченностью и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты.

На рис. 2 показано изменение с течением времени максимальной магнитной проницаемости и распределения намагниченности в образцах ленты после обработки ее поверхности ацетоном с промежуточной обработкой водой и без нее. Видно, что в этом случае уже наблюдается изменение магнитных характеристик с течением времени, причем в обоих случаях характер изменения одинаков. На протяжении 9 мес. не происходят существенные изменения распределения намагниченности в ленте и максимальной магнитной проницаемости. В интервале времени от 9 мес. до 2 лет имеет место увеличение μ_{\max} , снижение объема доменов с ортогональной намагниченностью и повышение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Ослабление стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью и повышение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты являются причинами повышения максимальной магнитной проницаемости. В силу этих же причин максимум на полевой зависимости магнитной проницаемости с течением времени сдвигается в область более слабых полей.

Взаимодействие ленты с атмосферным паром при охлаждении в процессе производства приводит к окислению и гидрированию ее поверхности. Глубина окисленного слоя может достигать 150 нм [9]. Обработка поверхности ленты ацетоном снижает концентрации водорода и кислорода в поверхностном слое ленты, толщина которого меньше толщины окисленного слоя. В результате этого поперек оси ленты индуцируются преимущественно плоские анизотропные сжимающие напряжения, поскольку в соответствии с законом Фика скорость диффузии внедренных атомов из этого направления выше. После обработки поверхности ЗК ленты ацетоном уровень преимущественно плоских сжимающих напряжений, индуцируемых поверхностным слоем

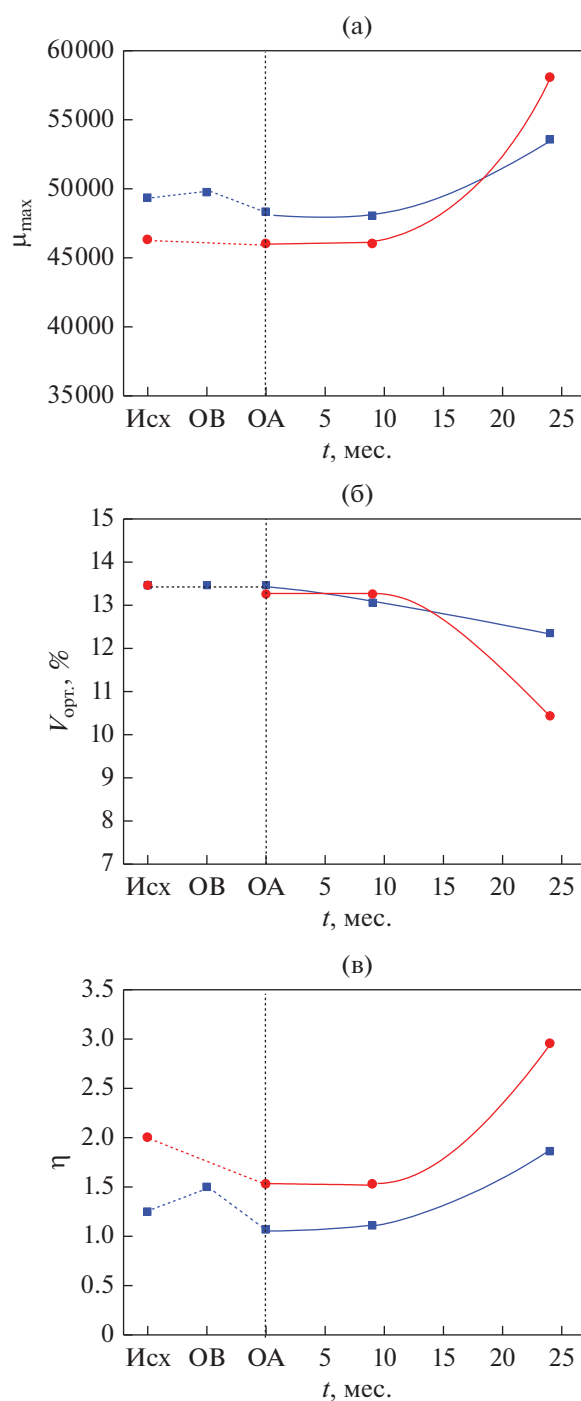


Рис. 2. Изменение с течением времени максимальной магнитной проницаемости (а), объема доменов с ортогональной намагниченностью (б) и остроты магнитной текстуры (в) в закаленном состоянии ленты аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B ($\lambda_s < 0$) после обработки ее поверхности ацетоном в течение 20 ч с промежуточной обработкой водой и без нее.

ленты, недостаточен для переориентации намагниченности в ее плоскость. Тем не менее анизотропные сжимающие напряжения поперек оси ленты приводят к переориентации намагниченно-

Таблица 1. Изменение магнитных характеристик аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в закаленном состоянии на протяжении двух лет

Состояние ленты	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	$\eta = V_{180}/V_{90}$
Исходное	40000	14.2	1.23
Через 2 года	41000	14.2	1.26

Таблица 2. Магнитные характеристики ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B, прошедшей термообработку на воздухе при 370°C ($\tau = 10$ мин, скорость охлаждения ($v_{\text{охл}}$) 15 К/мин)

Состояние ленты	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	η
После ТО	490000	9.4	1.71
Через 2 года	570000	8.5	1.70
После ОВ	600000	8.2	2.73

сти в это направление, уменьшая остроту магнитной текстуры в плоскости ленты и способствуя снижению максимальной магнитной проницаемости в образцах с промежуточной обработкой поверхности ленты водой. С течением времени происходит перераспределение атомов водорода и кислорода по толщине ленты с повышением их поверхностной концентрации, не превышающей исходного значения до обработки ленты ацетоном. При этом толщина слоя, обедненного внедренными атомами, увеличивается, повышая уровень сжимающих напряжений. Преимущественно плоские сжимающие напряжения приводят к уменьшению объема доменов с ортогональной намагниченностью, а анизотропные сжимающие напряжения поперек оси ленты повышают остроту магнитной текстуры в ее плоскости. Так как диффузионные процессы при комнатной температуре протекают медленно, эффект становится заметным не сразу, а по истечении некоторого времени (в нашем случае после 9 мес.). В пользу протекания внутренних диффузионных процессов свидетельствует отсутствие изменений в магнитных характеристиках ленты, не подвергавшейся обработкам ацетоном и водой (табл. 1). Большая концентрация внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода при промежуточной обработке поверхности ленты водой способствует меньшей степени изменения магнитных характеристик с течением времени.

Исследование влияния обработки поверхности ленты ацетоном в закаленном состоянии содействовало выявлению влияния не связанных с кристаллизацией диффузионных процессов на изменение магнитных характеристик с течением времени. Рассмотрим изменение со временем

магнитных характеристик ленты после термообработки при 370°C с длительностью изотермической выдержки 10 мин ($\lambda_s < 0$), в процессе которой имеет место формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя [1, 2] (табл. 2–4).

Видно (табл. 2), что на протяжении двух лет наблюдается повышение максимальной магнитной проницаемости, которое связано с ослаблением стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью вследствие уменьшения $V_{\text{орт}}$. Обработка поверхности ленты водой не способствует переориентации намагниченности в направление, перпендикулярное плоскости ленты, но влияет на ее перераспределение в плоскости. В этом случае наблюдается переориентация намагниченности вдоль оси ленты, т.е. в направление, перпендикулярное анизотропным растягивающим напряжениям, индуцируемым в результате взаимодействия поверхности ленты с водой. Следовательно, на протяжении двух лет в ленте сохраняется состояние с отрицательной константой магнитострикции. Отсюда следует, что наблюдаемое с течением времени уменьшение объема доменов с ортогональной намагниченностью может быть связано с увеличением толщины поверхностного аморфно-кристаллического слоя в результате процессов кристаллизации, протекающих при комнатной температуре, и повышением вследствие этого роли объемной компоненты растягивающих напряжений.

В табл. 3 представлены результаты изменения со временем магнитных характеристик ленты после термообработки при 370°C с одинаковой длительностью изотермической выдержки, но разными скоростями охлаждения. В исходном (закаленном) состоянии эти образцы имели близкие характеристики. Видно, что термообработка со сравнительно низкой скоростью охлаждения (15 К/мин) способствует формированию состояния с меньшим объемом доменов с ортогональной намагниченностью. Более длительное воздействие повышенной температуры влечет за собой формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя большей толщины, что повышает уровень объемной компоненты растягивающих напряжений, индуцируемых при поверхностной кристаллизации. Меньшая степень увеличения остроты магнитной текстуры в этом случае может быть связана с влиянием псевдоодноосных растягивающих напряжений, индуцируемых на стадии охлаждения при температурах ниже точки Кюри: поперек оси ленты вследствие формирования повышенной концентрации внедренных в поверхность ленты атомов и вдоль ее оси из-за анизотропного роста кристаллов в этом направлении [8].

Таблица 3. Магнитные характеристики ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B в закаленном состоянии, после термообработки на воздухе при 370°C ($\tau = 10$ мин), последующей обработки ацетоном и двухлетнего вылеживания

Состояние ленты	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	η
$v_{\text{охл}} = 40 \text{ К/мин}$			
Закаленное	36000	15.8	1.30
После ТО	540000	13.4	1.62
После ОА	640000	11.7	1.28
Через 2 года	510000	12.3	1.15
$v_{\text{охл}} = 15 \text{ К/мин}$			
Закаленное	37300	15.7	1.54
После ТО	510000	10.0	1.77
После ОА	500000	10.5	1.53
Через 2 года	540000	9.0	1.30

Повышение скорости охлаждения способствует замедлению процессов поверхностной кристаллизации. Усиливающееся влияние преимущественно плоских анизотропных растягивающих напряжений поперек оси ленты, индуцированных внедренными в поверхность ленты атомами водорода и кислорода, в этом случае способствует более сильному росту η (табл. 3). Каталитическое окисление и гидрирование ацетона, уменьшая концентрацию внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода, снижает уровень преимущественно плоских анизотропных растягивающих напряжений и способствует уменьшению объема доменов с ортогональной намагниченностью и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. В этом случае ослабление стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью является основной причиной повышения максимальной магнитной проницаемости.

Обработка поверхности ленты ацетоном после отжига со скоростью охлаждения 15 К/мин приводит к снижению остроты магнитной текстуры в плоскости ленты в силу тех же причин. Тем не менее в этом случае не наблюдается изменения объема доменов с ортогональной намагниченностью, что связано с преобладающим влиянием объемной компоненты растягивающих напряжений вследствие формирования поверхностного аморфнокристаллического слоя большей толщины.

Из табл. 3, видно, что после термообработки со скоростью охлаждения 40 К/мин на протяжении двух лет наблюдается уменьшение максимальной магнитной проницаемости, обусловленное перераспределением намагниченности в ленте:

Таблица 4. Магнитные характеристики ленты аморфного сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B после термообработки на воздухе при 370°C ($\tau = 10$ мин, $v_{\text{охл}} = 40 \text{ К/мин}$), последующих обработок водой, ацетоном и двухлетнего вылеживания

Состояние ленты	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	η
ТО + ОВ + ОА	550000	10.5	1.18
Через 9 мес.	400000	11.8	1.40
Через 2 года	360000	10.5	1.09

увеличением объема доменов с ортогональной намагниченностью и снижением остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Такое перераспределение намагниченности может быть связано с преимущественным влиянием поверхностной кристаллизации, поскольку снижение концентрации атомов водорода и кислорода в поверхностном слое ленты в результате обработки ацетоном активизирует эти процессы. В состоянии с отрицательной константой магнитоотрицательности преимущественно плоские растягивающие напряжения вызывают увеличение значений $V_{\text{орт}}$. Анизотропный рост кристаллов вдоль оси ленты, обусловленный меньшей концентрацией внедренных атомов, индуцирует псевдоодноосное растяжение в этом направлении и содействует уменьшению остроты магнитной текстуры. Эта же причина способствует аналогичному перераспределению намагниченности в плоскости ленты при меньшей скорости охлаждения ленты (табл. 3). Тем не менее в этом случае имеет место не возрастание, а некоторое уменьшение объема доменов с ортогональной намагниченностью с течением времени. Основной причиной уменьшения значений $V_{\text{орт}}$ является повышение уровня объемной компоненты растягивающих напряжений вследствие увеличения толщины поверхностного аморфнокристаллического слоя с течением времени.

Результаты изменения со временем магнитных характеристик ленты после обработки ее поверхности ацетоном с промежуточной обработкой водой показывают (табл. 4), что на протяжении 9 мес. в состоянии с $\lambda_s < 0$ наблюдается увеличение объема доменов с ортогональной намагниченностью и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Причиной этого является повышение уровня преимущественно плоских анизотропных растягивающих напряжений вследствие перераспределения с течением времени внедренных в ленту атомов водорода и кислорода с увеличением их концентрации в поверхностном слое. Преобладающее влияние увеличения объема доменов с ортогональной намагниченностью приводит к снижению максимальной магнитной проницаемости. В интервале времени от 9 мес. до 2 лет наблюдается уменьшение и объема доменов с ортогональной намагниченно-

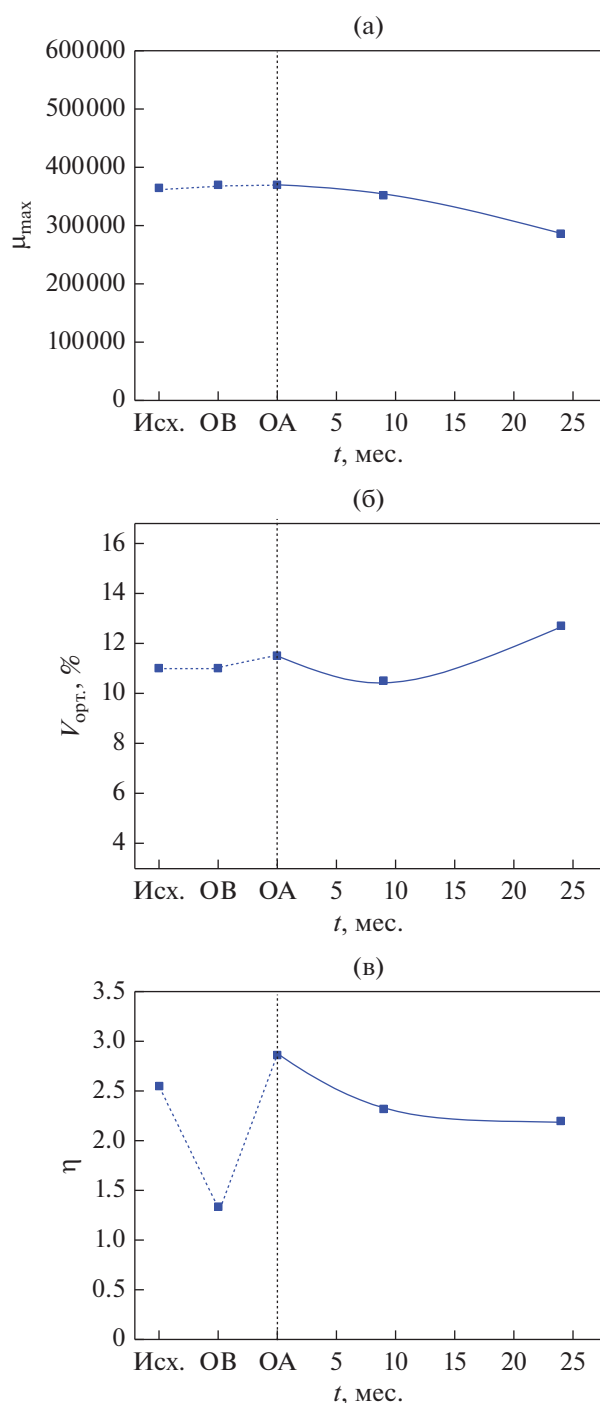


Рис. 3. Изменение с течением времени максимальной магнитной проницаемости (а), объема доменов с ортогональной намагниченностью (б) и остроты магнитной текстуры (в) ленты аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B, отожженной при 380°C ($\lambda_s > 0$), после обработки ее поверхности ацетоном в течение 20 ч с промежуточной обработкой водой.

стью, и остроты магнитной текстуры, которое может быть связано с преобладающим влиянием преимущественно плоских анизотропных растягиваю-

щих напряжений, индуцированных поверхностной кристаллизацией ленты.

Термическая обработка при 380°C с длительностью изотермической выдержки 40 мин формирует состояние ленты с положительной константой магнитострикции [1, 2]. Изменение со временем магнитных характеристик ленты после обработки ее поверхности ацетоном в течение 20 ч с промежуточной обработкой водой представлено на рис. 3. Видно, что на протяжении 9 мес. наблюдается слабое уменьшение максимальной магнитной проницаемости одновременно со снижением объема доменов с ортогональной намагниченностью и остроты магнитной текстуры в плоскости ленты. Наблюдаемое слабое уменьшение μ_{\max} связано с преобладающим влиянием перераспределения намагниченности в плоскости ленты. В интервале времени от 9 мес. до 2 лет снижение максимальной магнитной проницаемости усиливается вследствие роста объема доменов с ортогональной намагниченностью и повышения стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью доменами с ортогональной намагниченностью. Усиление стабилизации границ доменов с планарной намагниченностью в этом случае приводит к сдвигу максимума на полевой зависимости магнитной проницаемости в область более сильных полей. Сравнение полученных результатов с аналогичными для закаленного состояния показывает, что в этом временном интервале магнитные характеристики изменяются в противофазе.

В результате термообработки на воздухе при 380°C с длительностью изотермической выдержки 40 мин формируется поверхностный аморфно-кристаллический слой, толщина которого существенно превышает оптимальную [10]. В этом случае повышается эффективность окисления и гидрирования ленты, поскольку диффузия внедренных атомов наиболее легко осуществляется через аморфную прослойку между кристаллитами в поверхностном аморфно-кристаллическом слое, выполняющую функцию границ зерен [17]. Промежуточная обработка поверхности ленты водой дополнительно повышает концентрацию внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода. Влияние длительности взаимодействия поверхности ленты с водой (паром) на изменение концентрации кислорода в поверхностном слое ленты демонстрирует рис. 4. Преимущественно плоские растягивающие напряжения, ориентированные поперек оси ленты, снижают остроту магнитной текстуры в ее плоскости. При обработке поверхности ленты ацетоном имеет место обратный эффект: преимущественно плоские анизотропные сжимающие напряжения, индуцируемые в результате окислирования и гидрирования ацетона, вызывают небольшое повышение объема доменов с ортогональной намагни-

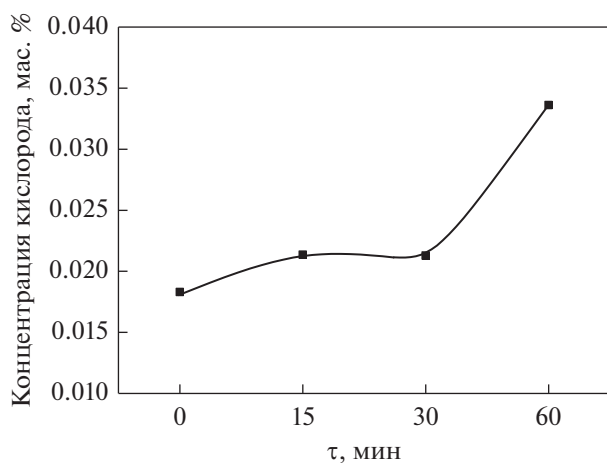


Рис. 4. Зависимость массового содержания кислорода от длительности обработки водой комнатной температуры ленты аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B, прошедшей термообработку на воздухе при 380°C с длительностью изотермической выдержки 40 мин.

ченностью и увеличение остроты магнитной текстуры в плоскости ленты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследования показал, что обработка ацетоном поверхности ленты аморфного магнитомягкого сплава Co–Ni–Fe–Cr–Mn–Si–B оказывает влияние на изменение магнитных характеристик с течением времени. Наблюдаемое изменение максимальной магнитной проницаемости связано с изменением распределения намагниченности в ленте, которое может быть обусловлено влиянием напряжений, индуцированных диффузионными процессами, протекающими при комнатной температуре. Каталитическое окисление и гидрирование ацетона уменьшает концентрации внедренных в поверхность ленты атомов водорода и кислорода при взаимодействии ленты с атмосферным паром во время отжига и активизирует протекание процессов поверхностной кристаллизации. Это способствует перераспределению внедренных при повышенной температуре атомов водорода и кислорода в результате взаимодействия поверхности ленты с атмосферным паром. Влияние индуцируемых диффузионными процессами напряжений различно для состояний с разными знаками константы магнитострикции.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скулкина Н.А., Денисов Н.Д., Боярченко 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>
2. Скулкина Н.А., Денисов Н.Д., Некрасов Е.С. Взаимодействие поверхности ленты с ацетоном и магнитные характеристики аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта // ФММ. 2021. Т. 122. № 11. С. 1142–1148. <https://doi.org/10.31857/S0015323021110152>
3. Суздальев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. 592с.
4. Шуткина О.В. Гидроалкилирование бензола ацетоном на бифункциональных катализаторах / Дис. ... канд. хим. наук. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. М., 2014.
5. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. 496 с.
6. 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.) М., 2009. С. 32–34.
7. Wei G., Cantor B. The oxidation behavior of amorphous and crystalline Fe₇₈Si₉B₁₃// Acta Metal. 1988. V. 36. P. 2293–2305.
8. 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.
9. Bulavin L.A., Karbivskyy V., Artemyuk V., Karbiv-ska L. Relaxation and vitrification processes of disordered iron based systems // Springer Proceed. Phys. 2018. V. 197. P. 331–372.
10. 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>
11. 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>
12. 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>

13. Скулкина Н.А., Иванов О.А., Павлова И.О., Минаева 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>
14. 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. <https://doi.org/10.1134/S0015323020020163>
15. 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>
16. Мазеева А.К. Формирование стабильных магнитных свойств в аморфных и нанокристаллических сплавах кобальта и железа для защитных металлополимерных экранов на их основе / Дис. ... к. т. н. НИЦ “Курчатовский институт” ЦНИИ КМ “Прометей”. Санкт-Петербург, 2017.
17. Silveyra Josefina M., Illekova Emilia. Effects of air annealing on Fe–Si–B–M–Cu (M = Nb, Mo) alloys // J. Alloys Comp. 2014. V. 610. P. 180–183.