

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.1'782:537.623

О НЕОДНОРОДНОСТИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

© 2021 г. В. Ф. Тиунов*

Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: tiunov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 14.05.2019 г.

После доработки 04.02.2021 г.

Принята к публикации 08.02.2021 г.

Исследованы особенности перемагничивания листовой электротехнической стали Fe–3% Si с различной степенью текстурованности. Обнаружено, что полосовые образцы даже с очень острой ребровой текстурой $\{110\}\langle 001 \rangle$ имеют неоднородную магнитную проницаемость по длине полосы. Установлено, что причина этой неоднородности связана с различным размером кристаллитов и с разной ориентацией их намагниченности I_s относительно направления прокатки исследуемых образцов. Показано, что для снижения магнитных потерь анизотропной электротехнической стали путем искусственного дробления ее ДС целесообразно нанесение локально деформированных зон не на всю поверхность образцов, а лишь на участки с максимальной магнитной проницаемостью.

Ключевые слова: электротехническая сталь Fe–3% Si, магнитные потери, доменная структура, локально деформированные зоны

10.31857/S0015323021060115

ВВЕДЕНИЕ

Среди магнитомягких материалов, идущих на изготовление сердечников всевозможных электрических устройств, наиболее широко используются аморфные сплавы на основе железа и кобальта, а также анизотропные электротехнические стали (АЭС) (сплав Fe–3% Si) с ребровой текстурой $\{110\}\langle 001 \rangle$. Аморфные материалы в основном применяют в качестве сердечников трансформаторов, работающих при повышенных частотах перемагничивания (десятки и сотни килогерц). В настоящее время, как и ранее, ведутся работы, направленные на улучшение функциональных характеристик данных сплавов, например, [1, 2].

Вторая группа материалов – АЭС широко используется для изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов, электродвигателей, генераторов и других электрических машин, работающих при промышленной частоте перемагничивания. Одним из важнейших показателей качества АЭС является уровень ее полных удельных магнитных потерь P_n (Вт/кг) на перемагничивание. Данная сталь состоит из относительно крупных кристаллических зерен, имеющих широкую 180-градусную доменную структуру (ДС).

Намагниченность ее полосовых доменов I_s ориентирована вдоль оси $\langle 001 \rangle$, близкой по направлению к оси текстуры. Из-за сравнительно большой ширины полосовых доменов доля вихрековых потерь P_v в АЭС весьма значительна и составляет порядка 70% величины полных потерь P_n [3]. По этой причине усилия многих исследователей, направленные на поиски путей снижения магнитных потерь, связаны с поиском способа уменьшения в первую очередь их вихрековой составляющей. Одним из эффективных путей снижения величины P_v является искусственное дробление ДС готовой АЭС путем обработки ее поверхности технологическим лазером (лазерное скрайбирование), например, [4–7], либо механическим нанесением локально деформированных зон [8]. Вблизи этих магнитоструктурных барьеров появляются локальные магнитные заряды, и соответственно, магнитные поля рассеяния, величина которых частично компенсируется возникающими клиновидными доменами. Последние в процессе изменения магнитного поля прорастают в новые полосовые домены и тем самым способствуют дроблению исходной 180-градусной ДС. Этот процесс приводит как к снижению величины полных магнитных потерь стали в среднем на 10–16% в зависимости от ее толщины

[4, 7], так и сопровождается уменьшением коэрцитивной силы на 12–25%. В работе [5] в результате оптимизации работы лазера и выбора оптимального расстояния между обработанными зонами удалось достичь аномально высокого снижения полных потерь $P_{1.5/50}$ почти на 38%. В рассмотренных работах структурные барьеры наносили через определенные линейные интервалы, определяемые опытным путем в предположении однородности магнитных свойств обрабатываемых образцов. Однако проведенные исследования на эпштейновских полосах АЭС [9, 10] показали, что магнитная проницаемость, магнитные потери в различных участках полосы заметно отличаются друг от друга. Было высказано предположение, что подобное расхождение главным образом связано с различной ориентацией намагниченности I_s кристаллитов относительно направления прокатки. Отметим, что наблюдаемое ранее [11] существенное расхождение величины магнитных потерь в отдельных зернах образцов Fe–3% Si авторы связывали также с различной ориентацией намагниченности исследованных зерен. Наибольшие потери наблюдали в кристаллитах с полосовой 180-градусной ДС, то есть в зернах, в которых направление I_s совпадало с направлением прокатки образцов. Все это указывает на то, что дополнительную обработку поверхности целесообразно проводить не по всей длине полосы, а выборочно — лишь на участках с наибольшей магнитной проницаемостью. Намагниченность кристаллитов этих участков I_s ориентирована наиболее близко к оси текстуры. В связи с этим в этих кристаллитах имеется сравнительно крупная 180-градусная ДС и поэтому искусственное дробление этой ДС приведет к наибольшему эффекту снижения магнитных потерь рассматриваемых участков. Сказанное подтверждается результатами работы [6], в которой максимальный эффект снижения магнитных потерь после лазерной обработки наблюдается в образцах Fe–3% Si, имеющих в исходном состоянии наибольшую величину магнитных потерь. Напротив, дробление ДС участков образца со сравнительно мелкой ДС может привести даже к росту гистерезисных потерь P_r вследствие увеличения граничной энергии, связанного с возникновением новых 180- и 90-градусных доменных границ. Сказанное подтверждают результаты работы [12], показывающие неэффективность лазерной обработки зерен, кристаллографическая плоскость которых {110} отклонена от плоскости листа на угол $\beta \geq 3^\circ$. Кроме того, как отмечено в этой работе и в [13], лазерное скрайбирование приводит к нарушению сплошности электроизоляционного покрытия электротехнической стали и, соответственно, к коррозии ее поверхности в процессе эксплуатации магнитопроводов электрических машин.

Целью настоящей работы является выявление характера и степени неоднородности магнитной проницаемости образцов электротехнической стали различной текстурованности, причин, приводящих к этой неоднородности, а также влияния ее на процесс искусственного дробления ДС с целью снижения магнитных потерь.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследованы образцы анизотропной холоднокатаной стали марки 3407, 3412, изотропной холоднокатаной стали марки 2412, а также горячекатаной стали марки 1212. Образцы имели форму полос размером $(500-280) \times 30 \times (0.35-0.27)$ мм, используемых для аппарата Эпштейна. Перемагничивание образцов осуществляли с помощью электромагнита с межполюсным расстоянием 150 мм. Образцы устанавливали на полюса электромагнита, намагничивающие катушки которого подключали через коммутатор к источнику постоянного тока. Изменяя с помощью коммутатора направление намагничивающего тока электромагнита, определяли величину индукции $B_m(n)$ в разных участках n эпштейновской полосы, отстоящих друг от друга на 10 мм. Измерения проводили с помощью небольшой измерительной катушки, надетой на исследуемый образец и подключенной к милливексметру М119. Это позволяло определять изменение магнитного потока при коммутации тока электромагнита, и, соответственно, индукцию образца $B_m \sim C\alpha/WS$. Здесь C — постоянная прибора, α — его показания при коммутации тока, WS — число витков измерительной катушки и ее поперечное сечение, соответственно. Все измерения проводили при фиксированном значении намагничивающего тока $I = 1.0$ А. Погрешность определения B_m не превышала 5.0%. Детально методика измерения индукции изложена в работе [9]. Для объяснения особенностей изменения индукции на разных участках эпштейновских полос выявляли вид их кристаллитов, путем стравливания изоляционного покрытия образцов в соляной кислоте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим полученные результаты. На рис. 1 показаны изменения магнитной индукции $B_m(n)$, измеренной в разных участках n ($n = 0.1-28$) вдоль длины 3-х эпштейновских полос АЭС марки 3412. Линейные расстояния между соседними участками равны 10 мм. Из приведенных кривых видно, что индукция во всех трех случаях существенно различна в разных областях образцов. Например, для образца № 3 максимальное различие в B_m (участки № 2 и № 17) составляет почти 30%. В образце № 2 это расхождение свыше 50%

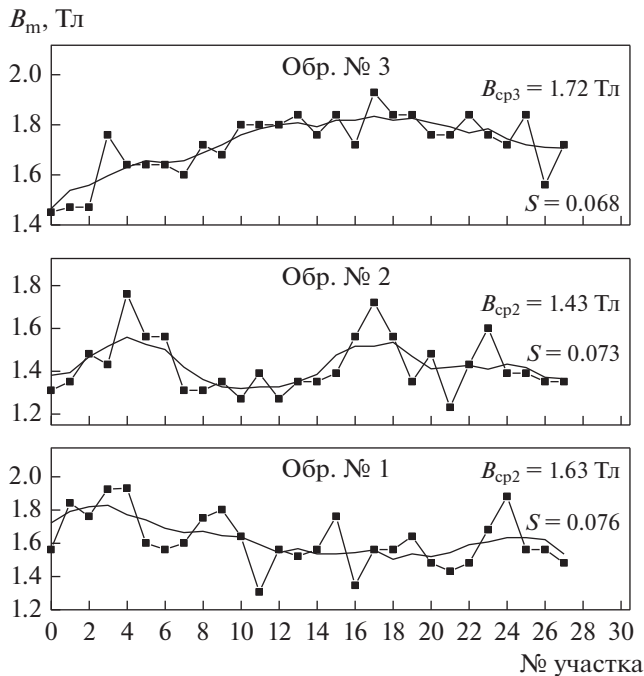


Рис. 1. Изменение магнитной индукции вдоль длины эпштейновских полос образцов № 1–3.

(участки № 4 и № 11). Подобная картина расхождения наблюдается и в образце № 1.

Поскольку все измерения проводили при неизменном значении тока э/магнита $I = 1.0$ А, то выявленное, например, максимальное значение индукции в определенных участках полосы означает, что и величина их магнитной проницаемости μ_m также максимальна. Действительно, по определению $\mu_m = B_m/H_i$, в свою очередь внутреннее поле в образце равно $H_i \approx 0.4\pi\omega I/L_{cp}$, ω – число витков намагничивающей обмотки э/магнита, L_{cp} – длина средней силовой линии.

При измерениях ω , $L_{cp} = \text{const}$, учитывая, что ток в э/магните также был неизменным $I = 1$ А, то отсюда и следует $\mu_m \sim B_m$. На рисунке прямые, параллельные оси ординат, соответствуют среднему значению индукции полосы B_{cp} . Видно, что ее величина в образцах одной и той же марки стали существенно различается, что говорит о различной степени текстурованности рассматриваемых образцов. Так, в образце № 3 значение $B_{cp} = 1.72$ Тл превышает соответствующее значение $B_{cp} = 1.43$ Тл, для образца № 1 почти на 20%. Используя терминологию, введенную Янусом [14], можно говорить в данном случае о наличии по листовой неоднородности магнитной проницаемости. Она проявляется в ее различии в разных образцах, вырезанных из различных участков листовой электротехнической стали. Кроме того, из рисунка нетрудно заметить, что на всех образцах

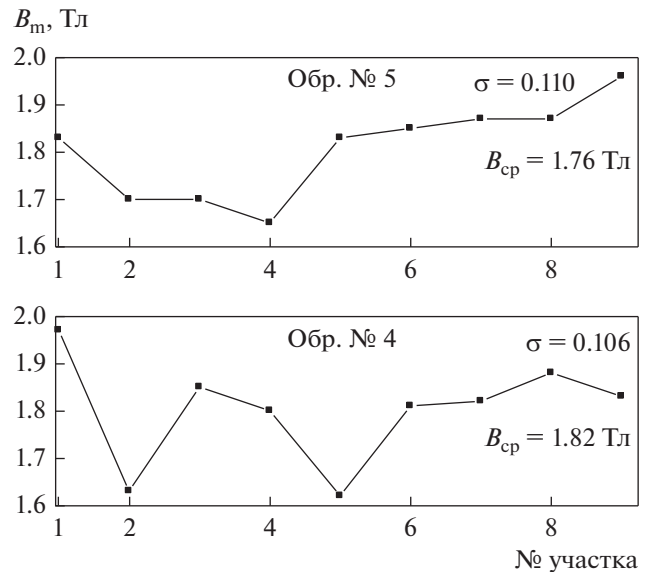


Рис. 2. Изменение магнитной индукции вдоль длины эпштейновских полос № 4, 5 (сталь марки 3407).

имеется также внутрилистная неоднородность магнитной проницаемости μ_m , связанная с ее различием по длине исследуемых образцов. Для количественной оценки неоднородности магнитной проницаемости в образцах вычисляли среднее квадратическое отклонение B_{mi} относительно среднего значения индукции B_{cp} .

Согласно ГОСТу 8.736–2011 среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины), содержащей n результа-

тов измерений, равно $S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$.

Здесь x_i – значение индукции B_{mi} , измеренной на i -ом участке полосы, \bar{x} – средняя индукция B_{cp} по всей длине полосы. Соответственно, для образцов № 1, 2, 3 (рис. 1) получили следующие значения: $S_1 = 0.076$; $S_2 = 0.073$; $S_3 = 0.068$. Видно, что в образце № 3 разброс индукций B_{mi} относительно их среднего значения B_{cp} был меньше, чем в образцах № 1, № 2. Аналогичные измерения локальной индукции $B_m(n)$ были проведены на двух эпштейновских полосах (№ 4, 5) АЭС марки 3407. На рис. 2 приведены кривые изменения индукции по длине этих образцов. Оказалось, что значения их средней индукции равные $B_{cp4} = 1.82$ Тл, $B_{cp5} = 1.76$ Тл пределах погрешности измерений совпали друг с другом. При этом среднее квадратическое отклонение индукции также различается несущественно и составляет $S_4 = 0.063$ и $S_5 = 0.064$. Несмотря на относительно небольшую величину последней, в разных участках данных образцов, как нетрудно заметить из рис. 2, наблюдается значительное расхождение индукции. Например, на об-

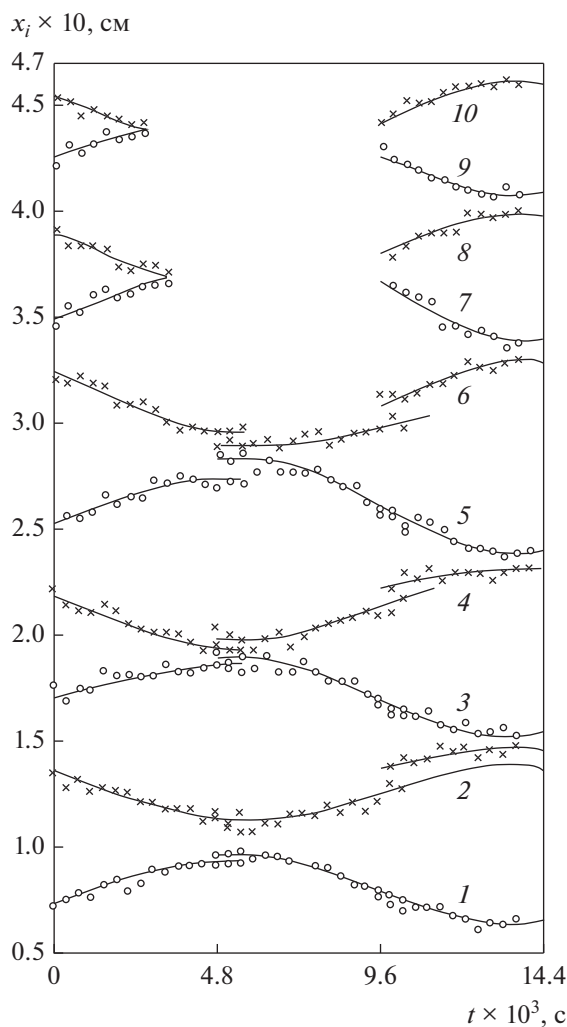


Рис. 3. Временная зависимость положения доменных границ в кристаллите поликристаллического образца, $f = 60$ Гц, $B_m = 1.5$ Тл.

разце 4 это различие на участках № 1 и 2 достигало около 20%.

Таким образом, на всех исследованных образцах выявлена внутрилистная неоднородность магнитной индукции. Ее заметная полистная неоднородность наблюдается лишь на образцах с наименьшей степенью текстурованности. Заметная полистная неоднородность магнитных свойств АЭС отмечена во многих работах. Например, в [4] было найдено, что полные магнитные потери $P_{1.7/50}$ образцов, вырезанных из разных участков АЭС марки М111-30Р ($B_{800} \approx 1.88$ Тл), отличаются почти на 20%. В [15] показано, что на образцах, вырезанных из начального и конечного участков рулонной стали Fe-3% Si, магнитные потери $P_{1.7/50}$ меняются от 1.08 до 1.60 Вт/кг, т.е. почти на 50%. Авторы этой работы попытались объяснить причины полистной неоднородности стали различием дислокационных структур материала при

высокотемпературном отжиге, применяемом для снятия рулонной кривизны стали.

Внутрилистную неоднородность магнитной проницаемости в разных кристаллитах можно связать, в первую очередь, с их различной разориентацией намагниченности I_s как относительно направления прокатки, так и относительно плоскости образцов. Действительно, в сплавах Fe-Si с кубической объемно-центрированной кристаллической решеткой выполняется соотношение вдоль основных направлений $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$: $\mu_{100} > \mu_{110}, \mu_{111}$. Исходя из этого, следует ожидать, что в областях, где намагниченность большинства кристаллитов I_s совпадает или отклонена на небольшие углы α и β от направления прокатки или от плоскости полосы, соответственно, магнитная проницаемость должна быть наибольшей. Напротив, в участках полосы с кристаллитами, имеющими заметную разориентацию намагниченности I_s относительно направления прокатки, значение μ должно быть меньше, чем в первом случае. Сказанное подтверждается прямыми наблюдениями за динамикой ДС, проведенными ранее [16] на поликристаллических образцах Fe-3% Si в виде полосок размерами $100 \times 5.0 \times 0.35$ мм. На рис. 3 изображены зависимости изменения положения $x_i = x_i(t)$ десяти 180-градусных доменных границ одного из исследованных кристаллитов шириной 5.0 мм. Его поверхность совпадает с кристаллографической плоскостью $\{110\}$, а ось легкого намагничивания $\langle 001 \rangle$ — с направлением магнитного поля. Сплошные линии представляют собой синусоиды или их отдельные участки, построенные по экспериментально найденным значениям x_i . Нетрудно заметить, что доменные границы (ДГ) при синусоидальном изменении индукции совершают синусоидальные, синфазные колебания. Из рисунка видно также, что различные части одного и того же кристаллита намагничиваются крайне неоднородно. Часть его поверхности значительное время находится в состоянии насыщения вследствие “схлопывания” 7–8 и 9–10 границ на поверхности образца. Другая его часть, перемагничиваемая 1–6 границами, далека от состояния насыщения. Дополнительные наблюдения ДС показали, что первый участок исследованного кристаллита окружен кристаллитами, близкими по ориентации поверхности и осей легкого намагничивания к рассматриваемому кристаллиту; вторая же часть соседствует с кристаллитами, далекими от ориентации осей легкого намагничивания исследованного кристаллита. Подобная ориентация намагниченности в указанных участках образца и приводит к тому, что скорости смещения 7–10 доменных границ намного выше скоростей движения 1–6 границ. Это показывает, что различные кристаллиты перемагничиваются крайне неоднородно и эта неод-

нородность приводит к повышенным магнитным потерям образцов. Известно [17], что вихретоковые потери образца, перемагничиваемого смещением 180-градусных границ пропорциональны величине. $P_{вт} \sim \sum v_i^2$, где v_i – скорость смещения i -границы. При этом, как показано в [18], при неоднородном смещении границ, когда их скорости различны, магнитные потери намного выше их значений, чем при однородном движении доменных границ. Ниже будет рассмотрено влияние искусственного дробления ДС на степень однородности перемагничивания образцов и магнитные потери.

В настоящей работе помимо образцов АЭС выявляли характер неоднородности магнитной проницаемости в образцах нетекстурованной (марка 2412) и изотропной (марка 1212) электротехнической стали. Как показали измерения, в указанных образцах, в отличие от образцов №№ 1–5, магнитная проницаемость оставалась неизменной по всей длине эпштейновской полосы. Для выявления причин такого различия сопоставляли размеры кристаллитов для всех образцов. Оказалось, что в текстурованных образцах №№ 1–5 средний размер кристаллитов составлял около 25.0 мм², в нетекстурованной стали их размер не превышал 12.0 мм², а в горячекатаной стали размер кристаллитов был порядка 0.8–1.0 мм². По-видимому, различием размеров кристаллитов и разной ориентацией их намагниченности и объясняется различный характер перемагничивания сопоставимых образцов. Действительно, величина магнитного потока, пронизывающего измерительную катушку с поперечным сечением S , равна $\Phi = SB_m(n)\sin\varphi$, где φ – угол между плоскостью катушки и направлением оси легкого намагничивания I_s кристаллитов. При высокой степени текстурованности полосы намагниченность большинства ее зерен I_s ориентирована преимущественно вдоль направления прокатки. Учитывая, что такая сталь имеет сравнительно крупное зерно, то разориентация I_s даже у небольшого числа зерен должна приводить к заметному снижению магнитного потока вследствие уменьшения нормальной составляющей $B_m(n)$ к плоскости катушки, что и наблюдается на ранее приведенных рисунках. В отличие от этого, в нетекстурованной холоднокатаной и горячекатаной стали с некоторой степенью неопределенности можно считать, что направление намагниченности кристаллитов I_s разориентировано равновероятно относительно направления прокатки. Вследствие этого индукция $B_m(n)$ в разных участках полос рассматриваемых сталей должна быть примерно одинаковой, что и выявлено при измерениях.

Предположения о целесообразности избирательной обработки подтверждаются, например,

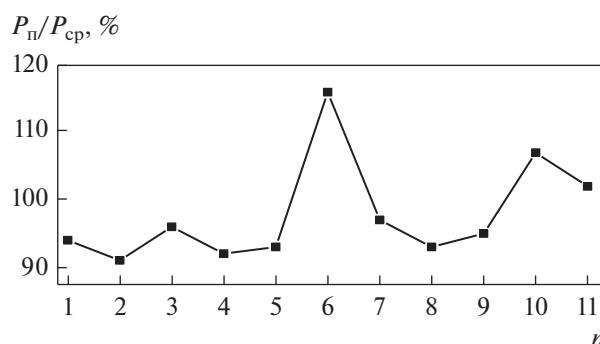


Рис. 4. Относительное изменение полных магнитных потерь вдоль длины эпштейновской полосы АЭС типа 3405.

результатами работы [20]. В ней в образцах АЭС типа 3405 выявлена существенная внутрилистная неоднородность полных магнитных потерь. Результаты измерений иллюстрируются на рис. 4, где приведено относительное изменение полных магнитных потерь P_n/P_{cp} в разных участках одной из исследованных полос. Здесь P_n – значение полных потерь, измеренных в n -ом участке полосы; $P_{cp}(100\%)$ – их средняя величина по всей длине полосы. Значение P_n определяли с помощью небольшого приставного датчика на участке образца длиной 25 мм. Данная зависимость получена при $B_m = 1.5$ Тл и $f = 50$ Гц.

Видно, что величина потерь по длине полосы заметно различается. Так, например, значение потерь, определенное на 2-м, 4-м участках, ниже их среднего значения для всей полосы почти на 10%. Напротив, величина потерь 6-го участка превышает их среднюю величину почти на 18%.

В работе предполагается, что аномально высокие значения потерь участков 6 и 10 связаны, в первую очередь, с относительно большой шириной полосовых доменов 180-градусной ДС. Для проверки этого предположения на указанные участки электроэрозионным способом через каждые 5.0 мм наносили локально деформированные зоны. После указанной обработки потери рассматриваемых участков снизились соответственно на 25 и 18%. В дальнейшем магнитооптическим эффектом Керра выявляли ДС исследованных участков. Оказалось, что большую часть участка 6 занимали четыре относительно крупных кристаллита с полосовой 180-градусной ДС, намагниченность доменов которой I_s была ориентирована строго вдоль полосы. Аналогичный вид 180-градусной ДС с подобной ориентацией доменов наблюдали в большинстве кристаллитов и другого исследованного участка 10. Заметное снижение магнитных потерь рассмотренных участков после искровой обработки обусловлено, по-видимому, значительным дроб-

лением их ДС, имеющей в исходном состоянии (до обработки) относительно крупные размеры.

О целесообразности выборочной обработки образцов также свидетельствуют, например, результаты ранее упомянутой работы [2], проведенной на образцах анизотропной стали марки М111-30Р. В ней наибольший эффект снижения магнитных потерь (25%) после лазерного скрайбирования наблюдали на образце, имеющем в исходном состоянии (до обработки) максимальную величину потерь. Авторы не обсуждали причину подобного изменения магнитных потерь. Однако можно предположить, что максимальное снижение потерь рассматриваемого образца обусловлено заметным дроблением крупной 180-градусной ДС, имеющейся в его исходном состоянии. Во-вторых, в работе выявлено, что степень полистной неоднородности магнитных потерь образцов существенно снижается после лазерной обработки их поверхности. По-видимому, такое поведение потерь связано, в первую очередь, с выравниванием средней ширины полосовых доменов L -кристаллитов после лазерной обработки. Действительно, учитывая, что основную долю полных магнитных потерь составляет их вихретоковая составляющая $P_v \sim L/d$ [19], где d — толщина образца, и принимая во внимание зависимость средней ширины доменов L от их длины D как $L \approx D^{1/2}$ [18], нетрудно видеть, что при нанесении барьеров длина полосовых доменов в крупных кристаллитах уменьшается и становится близкой к величине D , равной расстоянию между структурными барьерами. Это и приводит, по-видимому, к выравниванию как средней ширины доменов, так и потерь на разных образцах после лазерной обработки.

Таким образом, в образцах листовой АЭС Fe–3% Si обнаружена неоднородность магнитной проницаемости по длине полосы. Выявлены вероятные причины, приводящие к рассмотренной неоднородности перемагничивания исследованных образцов. Полученные результаты работы могут быть использованы для оптимизации режимов обработки стали путем искусственного дробления ее ДС с целью снижения уровня магнитных потерь.

ВЫВОДЫ

1. На всех исследованных образцах АЭС Fe–3% Si {110}<001> выявлена заметная внутрилистная неоднородность магнитной проницаемости. Ее полистная неоднородность наблюдается в образцах с наименьшей степенью текстурированности.

2. Причина внутрилистной неоднородности магнитной проницаемости образцов Fe–3% Si обусловлена как различием размеров кристаллитов, так и различием отклонения их намагничен-

ности I_s относительно направления прокатки образцов.

3. Показано, что применяемое искусственное дробление ДС АЭС с целью снижения ее магнитных потерь целесообразно осуществлять путем нанесения локально деформированных зон не на всю поверхность образца, а лишь на участки с наибольшим значением магнитной проницаемости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Магнит”, № АААА-А18-118020290129-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали // М.: Энергия, 1974. 240 с.
4. Rauschera P., Hauptmann J., Beyer E. Laser scribing of grain oriented electrical steel under the aspect of industrial utilization using high power laser beam sources // Physics Procedia. 2013. V. 41. P. 312–318.
5. Petryshynets I., Puchyr V., Kovarc F., Sebek M. Effect of laser scribing on soft magnetic properties of conventional grain-oriented silicon steel // Acta Physica Polonica. 2017. T. 131. P. 777–779.
6. Григорьянц А.Г., Шишов А.Ю., Фунтиков В.А. Технология локальной лазерной обработки электротехнической анизотропной стали диодными лазерами прямого действия // Технология машиностроения. 2017. № 8. С. 37–42.
7. Zhang J., Chen Z., Li Z., Zhang W., Long J., Chen F. Morphology and magnetic properties of grain-oriented steel scribed using different picosecond lasers // Applied Physics A. 2020. T. 126(5). P. 327. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-3438-3>
8. Тиунов В.Ф., Соколов Б.К., Губернаторов В.В. Влияние деформированных зон на динамическое поведение доменной структуры и магнитных потерь в кристаллах Fe–3 мас. % Si // ФММ. 1991. № 11. С. 79–84.
9. Тиунов В.Ф., Корзунин Г.С. Контроль неоднородности магнитной проницаемости листовой анизотропной электротехнической стали // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 46–49.
10. Тиунов В.Ф. О влиянии неоднородности перемагничивания анизотропной электротехнической стали Fe–3% Si на магнитные потери во вращающихся магнитных полях // ФММ. 2018. Т. 119. № 9. С. 876–881.
11. Overshott K.J., Blundell M.G. Power loss, domain wall motion and flux density of neighbouring grains in

- grain-oriented 3% silicon-iron // IEEE Trans. Mag. 1984. V. Mag-20. P. 1551–1553.
12. Буханова И.Ф., Дивинский В.В., Журавель В.М. Лазерная обработка пластин магнитопроводов силовых трансформаторов // Электротехника. 2004. № 1. С. 39–42.
 13. Пужевич Р.Б., Каренина Л.С. Дефекты электроизоляционного покрытия, образующиеся в процессе лазерной обработки электротехнической анизотропной стали, и их влияние на магнитные свойства // Дефектоскопия. 2011. № 4. С. 17–21.
 14. Янус Р.И. О полистной неоднородности магнитных свойств электротехнического железа // ФММ. 1955. № 1. Вып. 1. С. 84–91.
 15. Соколов Б.К., Драгошанский Ю.Н., Матвеева В.С., Цирлин М.Б., Минеев Ф.В., Пужевич Р.Б. Неоднородность магнитных свойств анизотропной электротехнической стали и особенности дислокационных структур // Дефектоскопия. 2004. № 11. С. 68–78.
 16. Тиунов В.Ф., Зайкова В.А., Шур Я.С. Динамика 180-градусных доменных границ и электромагнитные потери в кристаллах Fe–3% Si // ФММ. 1979. Т. 47. Вып. 3. С. 539–548.
 17. Williams H., Shockley W., Kittel C. Investigation of the domain wall motion velocity // Phys. Rev. 1950. V. 80. P. 1090–1102.
 18. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1982. 270 с.
 19. Pry R.H., Bean C.P. Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model // J. Appl. Phys. 1958. V. 29. P. 532–533.
 20. Тиунов В.Ф. Измерительное устройство для непрерывного контроля магнитных потерь рулонной электротехнической стали // Дефектоскопия. 2004. № 4. С. 67–72.