

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.1'782:537.623

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЕЕ ПОЛНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

© 2023 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 08.12.2022 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 18.06.2023 г.

Описан ультразвуковой метод формирования локально-деформированных зон (ЛДЗ) в виде механических царапин, наносимых на поверхность анизотропной электротехнической стали (АЭС) для дробления ее доменной структуры с целью снижения полных магнитных потерь P_{Σ} . Показано, что вследствие подобной обработки на примере АЭС типа 3407 величина P_{Σ} снижается в среднем на 10–15%. При этом воздействие ультразвука на рабочий инструмент приводит к существенному увеличению скорости обработки (2.0–2.5 м/с). В отличие от этого, скорость нанесения ЛДЗ обычным механическим скрайбированием не превышала 10–15 см/с при значительном давлении на рабочий инструмент.

Ключевые слова: анизотропная электротехническая сталь, магнитные потери, локальные деформированные зоны, ультразвуковая обработка

DOI: 10.31857/S0015323022601878, EDN: PXCKYY

ВВЕДЕНИЕ

В анизотропной электротехнической стали (АЭС), применяемой для изготовления магнитопроводов электрических машин всевозможного назначения, доля вихрековых потерь P_v среди полных P_{Σ} составляет почти 70% [1]. Кроме того, известно [2], что вихрековые потери P_v наряду с другими факторами зависят в значительной мере от средней ширины $L_{\text{ср}}$ полосовых доменов 180-градусной доменной структуры (ДС): $P_v \sim (L_{\text{ср}} P_{\text{кл}})/d$. Здесь $P_{\text{кл}}$ – потери, вычисленные в предположении однородного перемагничивания образца без наличия ДС, d – его толщина. Современная АЭС имеет сравнительно крупное кристаллическое зерно, и вследствие этого относительно большую ширину $L_{\text{ср}}$. Отсюда видно, что одним из эффективных методов снижения величины P_v , а соответственно, и P_{Σ} является искусственное дробление полосовой ДС. В настоящее время дробление ДС (скрайбирование) осуществляется путем нанесения локально-деформированных зон (ЛДЗ) на поверхность АЭС механическим способом либо лазерной обработкой. В первом случае нанесение ЛДЗ осуществляется в разных компаниях стальным шариком, зубчатым колесиком или алмазным наконечником, см. например, [3]. Во втором случае скрайбирование поверхности об-

разцов АЭС осуществляли с помощью волоконных или газовых CO_2 лазеров, например, [4–6]. Перечисленные методы нанесения ЛДЗ имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Например, лазерное скрайбирование поверхности, обладая наибольшей производительностью обработки АЭС, требует применения дорогостоящего специализированного оборудования, его тщательной настройки. Кроме того, процесс подобной обработки сопровождается нарушением сплошности электроизоляционного покрытия АЭС [4] и, вследствие этого, ухудшением ее коррозионной стойкости. Методы нанесения механическим способом ЛДЗ хотя и сравнительно просты, но имеют небольшую скорость указанной обработки.

Исходя из сказанного, целью настоящей работы является разработка относительно простого механического способа нанесения ЛДЗ, с достаточно высокой скоростью обработки поверхности, позволяющего использовать его, например, на небольших предприятиях для улучшения магнитных характеристик готовой АЭС. Для этого разработали механический способ нанесения ЛДЗ с помощью твердосплавного резца при воздействии на него ультразвуковых колебаний, создаваемых магнитострикционным излучателем (МСИ). Его подключали к ультразвуковому генератору электрической мощностью 200 Вт. Пакет

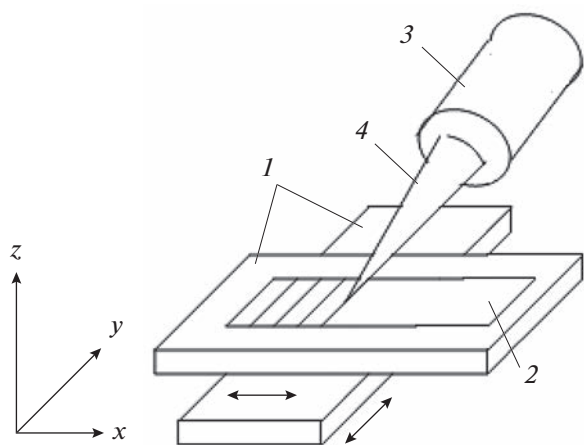


Рис. 1. 1 — направляющие 2-х координатного стола; 2 — обрабатываемый образец; 3 — МСИ; 4 — концентратор.

излучателя изготовили из пермендюра — сплава 51% Co—49% Fe. К торцу пакета припаяли твердым припоем экспоненциальный концентратор, позволяющий значительно увеличить амплитуду колебания рабочего инструмента. Его изготовили в виде небольшой треугольной пластины из сплава ВК6 и припаяли на твердый припой к концу концентратора МСИ. Частота колебаний излучателя была равна 15.0 кГц, амплитуду колебаний рабочего инструмента варьировали от 5 до 40 мкм.

На исследованных образцах измеряли величину максимальной магнитной проницаемости μ_m и полных магнитных потерь P_n , как в исходном состоянии образцов, так и после их обработки. При этом, как и ранее [7, 8], на образцах выявили заметную внутрилистовую неоднородность магнитных свойств. Она проявлялась в значительном расхождении значений P_n и μ_m по длине исследованных образцов. Причем в рассматриваемых работах высказана целесообразность обработки лишь участков с максимальной величиной μ_m . Объясняется это тем, что наибольшее значение μ_m должно быть в кристаллитах, у которых намагниченность I_s направлена наиболее близко к направлению прокатки. Исходя из этого, для получения достоверных результатов влияния скрайбирования поверхности образцов на величину P_n и μ_m , измерения в настоящей работе проводили на небольших участках образцов с максимальными значениями μ_m . Для сопоставления результатов обработки указанных участков образцов скрайбировали также участки с минимальной величиной μ_m . Для проведения подобных измерений изготовили небольшой пермеаметр, состоящий из U-образного магнитопровода с межполюсным расстоянием 40 мм. Между полюсами располагали намагничивающую, и поверх ее из-

мерительную катушку. Внутри катушек помещали исследуемый образец, концы которого для уменьшения магнитных полей рассеивания замыкали сверху П-образным ярмом. Величину полных магнитных потерь определяли с помощью нановаттметра Ф530. Все измерения проводили при частоте 50 Гц в интервале индукций $B_m = 0.25\text{--}1.7$ Тл. Коэффициент изменения формы K_f средней по сечению образца индукции B_{cp} составлял при всех измерениях $K_f = 1.11$. Погрешность определения магнитных потерь не превышала 5%, соответственно для μ_m она составляла порядка 10–12%.

ОБРАЗЦЫ, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Все измерения проводили на малых Эпштейновых полосах АЭС марок 3407 (толщиной 0.27 мм) и 3412 (толщиной 0.35 мм). Длина обеих полос — 280 мм.

Блок-схема устройства для скрайбирования исследованных образцов приведена на рис. 1. Обрабатываемый образец укрепляли на 2-х координатном столе, который позволял перемещать образец как в продольном, так и поперечном направлении относительно рабочего инструмента. Этим самым осуществляли нанесение царапин через заранее определенные интервалы по длине обрабатываемого образца. В зависимости от степени прижима рабочего инструмента и угла наклона концентратора к плоскости образца регулировали глубину ЛДЗ от долей до нескольких десятков мкм. Указанные размеры ЛДЗ определяли с помощью рычажно-зубчатого многооборотного индикатора типа 1МИГс линейным разрешением 1.0 мкм.

В рассматриваемом случае нагрузка на инструмент, припаянный к концу концентратора МСИ, составляла около 25 г. При этом скорость скрайбирования поверхности АЭС была около 2.0–2.5 м/с, глубина ЛДЗ составляла порядка 6.5 мкм, ширина не превышала 45 мкм. При скрайбировании поверхности образца путем простого механического нанесения царапин такой же глубины, нагрузка на инструмент достигала 350–400 г. При этом скорость скрайбирования была существенно ниже, и составляла 15–20 см/с. Отметим, что в последнем случае значительная нагрузка на инструмент обусловит значительную локальную деформацию в зоне ЛДЗ. Деформация, в свою очередь, приведет к росту магнитоупругой энергии и, соответственно, к росту гистерезисных потерь обработанного образца. Качественно объяснить высокую скорость обработки при использовании УЗИ можно тем, что в данном случае рабочий инструмент, закрепленный на конце концентратора, совершает возвратно-поступательные колебания с частотой 15.0 кГц и амплитудой $A \approx 8$ мкм. При

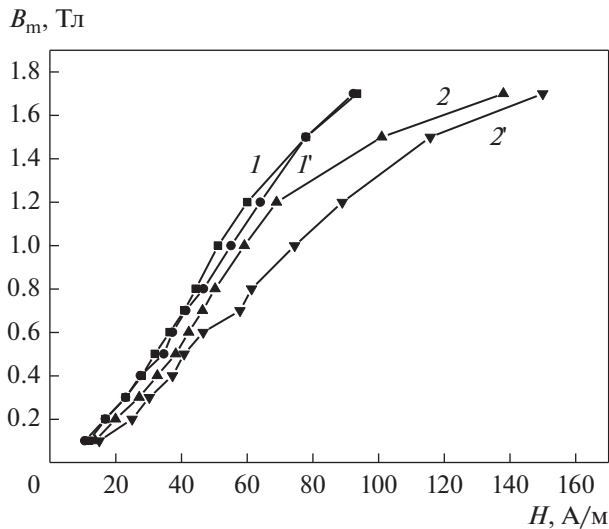


Рис. 2. Кривые намагничивания участков образца стали 3407 (0.27 мм) до и после нанесения дефектов (все подробности в тексте).

этом на инструмент, согласно работе [9], действует сила $F \approx (m4\pi^2 f^2 A)/g$, где m – масса инструмента, f – частота колебаний, A – амплитуда колебаний. Исходя из $m = 82$ мг, $f = 15$ кГц, $A \approx 8$ мкм, имеем $F \approx 52$ кг. Это усилие направлено вдоль длинной оси концентратора. При ее наклоне относительно плоскости образца на угол $\alpha \approx 2^\circ - 3^\circ$ ($\text{tg} \approx 0.03$) нормальная составляющая силы к поверхности образца составляет порядка 1.56 кГ и достаточна для прорезания электроизоляционного покрытия и нанесения ЛДЗ необходимой глубины на поверхность АЭС. Отмеченная выше скорость скрайбирования 2.0–2.5 м/с была получена при нагрузке на образец $F \approx 25.0$ г. При ее увеличении амплитуда колебания инструмента снижается. Меняя степень прижатия концентратора, угол его наклона к полосе АЭС, а также скорость скрайбирования можно варьировать размеры локально-деформированных зон в очень широких пределах. Эти сведения о режимах обработки необходимы для оптимизации их величины, обеспечивающих максимальное снижение магнитных потерь АЭС после скрайбирования ее поверхности.

Как уже отмечали выше, на исследованных образцах измеряли величину максимальной магнитной проницаемости μ_m и полных магнитных потерь P_n в разных участках образцов, как в исходном состоянии, так и после их обработки. Скрайбирование образцов АЭС с использованием МСИ проводили ранее в нашей работе [10]. В ней непосредственно на основе динамики доменной структуры объяснена целесообразность нанесения локально-деформированных зон лишь на участки образцов с наибольшим значением μ_m . Рассмотрим некоторые полученные в ней резуль-

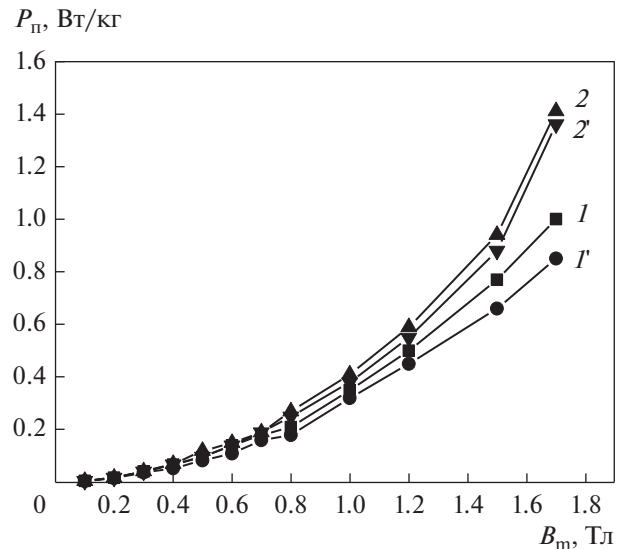


Рис. 3. Зависимость изменения магнитных потерь от индукции образца 3407 (0.27 мм) ($f = 50$ Гц): 1, 2 – до обработки, 1', 2' – после обработки поверхности.

таты. Так, изучали влияние скрайбирования поверхности образцов на кривые намагничивания $B_m = f(H_{эф})$. По максимальному наклону этих кривых относительно оси ординат определили величину μ_m . В качестве примера на рис. 2 приведены кривые $B_m = f(H_{эф})$, измеренные в исходном состоянии исследуемых участков образца 1, 2 и после их обработки 1', 2'. При этом кривые 1, 1' получены для участка образца с наибольшим значением μ_m , а зависимости 2, 2', соответственно с меньшей величиной μ_m .

Нетрудно видеть, что обработка участка с наибольшим значением магнитной проницаемости практически не меняет ее величину 1, 1'. Напротив, скрайбирование участка с наименьшей величиной μ_m приводит к заметному ее снижению, в среднем на 15–20% (кривые 2, 2').

Рассмотрим влияние обработки образца на уровень его полных магнитных потерь. На рис. 3 приведены зависимости изменения магнитных потерь от амплитуды индукции $P = f(B_m)$ рассматриваемого образца. Здесь кривые 2 и 2' измерены на участках образца с наименьшей величиной μ_m . При этом, как и ранее, график 2 получен до обработки, а 2', соответственно после обработки указанной области образца. Напротив, кривые 1 и 1' показывают изменение магнитных потерь на участке образца с максимальным значением μ_m до обработки 1 и после обработки 1'. Нетрудно видеть, что скрайбирование приводит к заметному снижению полных магнитных потерь в участке образца с наибольшей магнитной проницаемостью. И в зависимости от амплитуды индукции это снижение составляет 10–15%. Напротив, ана-

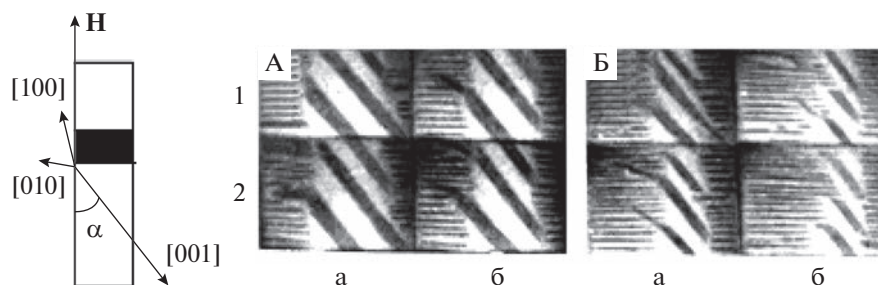


Рис. 4. Вид динамики доменной структуры монокристалла Fe–3% Si вблизи $B_m = 1.2$ Тл при перемагничивании в магнитном поле, направленном под углом $\alpha = 25^\circ$ к оси [001]: А – 40, Б – 80 Гц.

логичная обработка участков образца 2, 2' с наименьшей величиной μ_m не приводит к заметному снижению магнитных потерь. Иными словами, в рассмотренной работе показано, что для снижения уровня магнитных потерь АЭС целесообразно скрайбировать не всю поверхность образцов, а лишь участки с максимальной магнитной проницаемостью. Все рассмотренные особенности изменения магнитных потерь и магнитной проницаемости образцов АЭС после нанесения локально-деформированных зон были качественно объяснены наблюдаемой перестройкой динамической доменной структуры образцов.

Целесообразность нанесения ЛДЗ на участки образца с максимальным значением μ_m обусловлена ее зависимостью от кристаллографической ориентации кристаллитов на рассматриваемых участках образца. Так, в кубическом объемно-центрированном кристалле железа вдоль основных кристаллографических направлений [100], [110], [111] выполняется соотношение для μ_m : $\mu_{m100} > \mu_{m110} > \mu_{m111}$. Исходя из этого, наибольшее значение μ_m будет в тех участках образца, где намагниченность I_s большинства кристаллитов ориентирована вдоль направления прокатки образца.

Перемагничивание таких кристаллитов осуществляется смещением 180-градусных границ полосовой ДС. Ожидалось, что обработка этих участков приведет к дроблению исходной ДС образца и соответственно обусловит снижение его полных магнитных потерь. В отличие от этого, на участках образца с наименьшей μ_m намагниченность I_s большинства кристаллитов разориентирована, по-видимому, относительно направления прокатки в плоскости образца на некоторый угол $\alpha > 0$. Для таких участков, как известно [11], вихрековые потери, а соответственно, и полные магнитные потери растут по мере увеличения угла α , достигая максимума при $\alpha \approx 55^\circ$. С подобной разориентацией намагниченности, вероятно, и связано превышение магнитных потерь участков образца 2 над их значением, измеренным в области 1 (рис. 3). При этом обработка участков 2

не приводит к изменению величины магнитных потерь и сопровождается заметным снижением μ_m (рис. 2, кривые 2, 2'). Неизменность значения магнитных потерь свидетельствует об отсутствии дробления 180-градусной ДС после нанесения ЛДЗ. Обусловлено это, по-видимому, тем, что на границе кристаллитов с разной взаимной разориентацией I_s имеется замыкающая ДС в виде совокупности мелких клиновидных доменов, например, [12]. Они компенсируют магнитные поля рассеяния на межзеренной границе и в процессе перемагничивания, прорастая на всю длину кристаллитов, превращаются в новые полосовые домены, то есть способствуют дроблению исходной ДС. После нанесения ЛДЗ вблизи них также возникают новые клиновидные домены. Однако они не приводят к дальнейшему дроблению ДС, как отмечали выше. По-видимому, образование новых 180-градусных доменных границ в данном случае становится энергетически невыгодным, поскольку приводит к значительному росту граничной энергии. Одновременно, после скрайбирования рассматриваемых участков образца их магнитная проницаемость μ_m существенно уменьшается (рис. 3). Это обусловлено, вероятнее всего, задержками смещения 180-градусных границ на клиновидных доменах. Подобное наблюдали ранее [14] при перемагничивании монокристаллов Fe–3% Si, у которых кристаллографическая плоскость [110] имела отклонение от плоскости образца на угол $\beta \approx 3^\circ$. О целесообразности избирательной обработки образцов АЭС указывают также результаты работы [13], проведенной на монокристаллах Fe–3% Si, перемагничиваемых в магнитных полях, направленных под углом α к ОЛН. Было показано, что при $\alpha > 8^\circ$ перемагничивание образцов осуществляется за счет смещения 90-градусных ДГ без смещения 180-градусных границ полосовой ДС. Сказанное можно видеть из двух серий по 4 фотографии (рис. 4), отражающих изменения ДС центрального участка (5×6 мм) монокристалла Fe–3% Si с $\alpha \approx 25^\circ$ размером $100 \times 5 \times 0.35$ мм. Экспозиция каждого кадра серии 20 мкс, временные интервалы между ними 300 мкс, Порядок следова-

ния кадров — сверху вниз и слева направо. Слева от серий схематично указаны особенности проведения съемки. Длинная сторона прямоугольника направлена вдоль длины образца, а выделенный участок — наблюдаемая часть образца (6×5 мм).

Первый кадр 1а каждой серии соответствует состоянию образца $B_{cp} = B_m$. Видно, что по мере увеличения магнитного поля, перемагничивание образца идет преимущественно за счет прорастания большой совокупности мелких доменов с левого края образца. Это так называемые С-домены, намагниченные вдоль двух тетрагональных направлений [100], [010]. Расшифровка подобной ДС рассмотрена в работе [11]. Как видно из приведенной серии, смещения 180-градусных границ полосовой ДС незначительны и вносят небольшой вклад в изменение намагниченности монокристалла. При последующем увеличении индукции С-домены полностью поглощают всю поверхность образца и его перемагничивание идет путем изменения их ширины. Из рассмотренного видно, что нанесение локально-деформированных зон перпендикулярно длине рассматриваемого образца не приведет к улучшению его магнитных характеристик. Так, дробление полосовой ДС обусловит незначительное снижение магнитных потерь образца, поскольку смещением 180-градусных границ перемагничивается его незначительная часть его объема. Во-вторых, нанесение ЛДЗ в рассматриваемом направлении приведет к значительным задержкам смещения 90-градусных границ С-доменов, которые вносят основной вклад в изменение намагниченности рассматриваемого образца. Это в свою очередь, может явиться причиной снижения его магнитной проницаемости и увеличения коэрцитивной силы, а соответственно, роста гистерезисных потерь образца после его обработки.

ВЫВОДЫ

1. Предложен способ обработки поверхности АЭС с воздействием на рабочий элемент ультразвуковых колебаний, имеющий весьма высокую скорость нанесения локально-деформированных зон по сравнению с традиционным механическим методом нанесения царапин на исследуемые образцы.

2. После нанесения ультразвуковым способом локально-деформированных зон глубиной порядка 6,5 мкм полные магнитные потери снижались в среднем на 10–15%.

3. При ультразвуковом методе обработки нагрузка на рабочий инструмент минимальна и не приводит к заметной локальной деформации образца и, соответственно, к росту величины его гистерезисных потерь.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Магнит”, номер госрегистрации АААА-А18-118020290129-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 240 с.
2. Pzy 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.
3. Лобанов М.Л., Юровских А.С., Кардонина Н.И., Русаков Г.М. Методы исследования текстур в материалах: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 115 с.
4. Puchý V., Falat L., Petryshynets I., Džunda R., Šebek M. The Influence of Fiber Laser Pulse Processing on Coercivity and Nanohardness of Fe–3.2Si Grain-Oriented Electrical Steel in relation with its Surface Changes and Magnetic Domains Modifications // Acta Phys. Polonica. 2017. V. 131. № 6. P. 1445–1449.
5. 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 // Phys. Procedia. 2013. V. 41. P. 312–318.
6. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Улучшение функциональных свойств магнитопроводов локальными деформационными воздействиями / Сб. Перспективные материалы и технологии. НАН Беларуси. Брест. 2019. С. 27–31.
7. 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.
8. Тиунов В.Ф., Корзунин Г.С. Контроль неоднородности магнитной проницаемости листовой анизотропной электротехнической стали // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 46–49.
9. Попилов Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. М., Л.: Машгиз, 1963. 400 с.
10. Тиунов В.Ф. Влияние особенностей искусственного дробления доменной структуры анизотропной электротехнической стали Fe–3% Si на эффективность снижения величины ее магнитных потерь // ФММ. 2022. Т. 123. № 3. С. 326–332.
11. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электро-технических сталей. М.: Наука, 1992. 270 с.
12. Тиунов В.Ф., Стародубцев Ю.Н., Катаев В.А. Динамическое поведение доменной структуры и магнитные потери бикристаллов кремнистого железа // ФММ. 1990. № 6. С. 63–68.
13. Тиунов В.Ф., Драгошанский Ю.Н. Влияние динамического поведения замыкающей доменной структуры на магнитные потери в кристаллах Fe–3% Si // ФММ. 1989. Т. 68. Вып. 6. С. 1117–1124.
14. Тиунов В.Ф., Зайкова В.А. Динамика доменной структуры и электромагнитные потери в кристаллах Fe–3% Si, перемагничиваемых непараллельно оси легчайшего намагничивания // ФММ. 1985. Т. 59. Вып. 6. С. 1129–1136.