

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.1'782:537.634.2

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ
С ОБЫЧНОЙ И ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2014 г. А. А. Редикульцев*, Г. С. Корзунин**, М. Л. Лобанов**,
Г. М. Русаков*, **, Л. В. Лобанова*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург К-2, ул. Мира, 19

**Институт физики металлов УрО РАН
620990 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
e-mail: redikultsev@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2013 г.;
в окончательном варианте – 10.12.2013 г.

Приведены результаты влияния отжига на магнитоотрицательные характеристики электротехнической анизотропной стали с обычной и измельченной доменной структурой. Отжиг листовых образцов достаточно часто приводит к возрастанию значений электромагнитной индукции B_{100} и, одновременно, к повышению удельных электромагнитных потерь $P_{1.7/50}$. До отжига минимальные по модулю значения λ_{o-peak} и $\lambda_{peak-peak}$ наблюдаются для ЭАС с измельченной доменной структурой. После отжига для данных образцов наблюдается наибольшее ухудшение магнитоотрицательных характеристик. Предложен механизм, позволяющий объяснить данный экспериментальный факт.

Ключевые слова: электротехническая анизотропная сталь, магнитные свойства, магнитоотрицательность, доменная структура, лазерная обработка.

DOI: 10.7868/S0015323014070079

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что внешнее магнитное поле приводит к деформации кристаллической решетки ферромагнетика. При этом могут происходить изменения как линейных размеров кристалла (линейная магнитоотрицательность), так и его объема (объемная магнитоотрицательность). Существование магнитоотрицательности в таком практически важном магнитомягком материале, как электротехническая анизотропная сталь (ЭАС, трансформаторная сталь), является одной из основных причин появления шума, в сердечниках трансформаторов [2–7].

В настоящее время одним из способов снижения удельных магнитных потерь в ЭАС является локальная лазерная обработка (ЛЛО), приводящая к измельчению доменной структуры [8, 9]. Однако при этом влияние лазерной обработки на шум сердечника трансформатора является достаточно дискуссионным [5, 10–13]. По данным [11–13] подбором режима лазерной обработки можно значительно снизить магнитоотрицательность. В то же время сталь, подвергнутая лазерной обработке, имеет дополнительные внутренние напряжения, связанные с локальными упругими полями дислокаций, что должно приводить к повыше-

нию высших гармоник магнитоотрицательной вибрации [5]. Т.е. эффективность использования ЭАС, подвергнутой ЛЛО, для снижения шума трансформаторов может быть достаточно низкой. Эффект ЛЛО снимается после отжига [8]. При этом магнитоотрицательные характеристики металла также должны претерпевать существенные изменения. В настоящей работе исследованы магнитоотрицательные характеристики ЭАС с лазерной обработкой и без нее, а также их изменение после отжига для снятия напряжений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований использовалась ЭАС толщинами 0.27 и 0.30 мм с обычной доменной структурой и подвергнутая ЛЛО с целью уменьшения размеров магнитных доменов. Для исследований использовали листовые образцы размером 94 × 305 мм, на которых измерялись магнитные свойства: B_{100} , B_{2500} , $P_{1.7/50}$. Выбор магнитных характеристик осуществлен из следующих соображений:

$P_{1.7/50}$ – удельные магнитные потери, измеренные при индукции 1.7 Тл при частоте тока 50 Гц, –

Средние по группам магнитные характеристики исследуемых образцов ЭАС до и после отжига для снятия напряжений

Обозначение групп образцов*	Магнитные свойства образцов до отжига			Магнитные свойства образцов после отжига		
	B_{100} , Тл	B_{2500} , Тл	$P_{1.7/50}$, Вт/кг	B_{100} , Тл	B_{2500} , Тл	$P_{1.7/50}$, Вт/кг
27L**	1.67	1.94	1.00	1.74	1.94	1.11
27P	1.73	1.94	1.08	1.73	1.94	1.12
27S	1.71	1.93	1.15	1.72	1.93	1.18
27N	1.69	1.93	1.23	1.71	1.93	1.24
30L**	1.66	1.94	1.05	1.74	1.94	1.11
30P	1.73	1.94	1.11	1.73	1.95	1.14
30S	1.71	1.93	1.16	1.72	1.94	1.18
30N	1.70	1.93	1.23	1.72	1.94	1.24

Примечания. * Число в условном обозначении соответствует номинальной толщине стали в мм, умноженной на 100; ** до проведения исследований образцы подвергались локальной лазерной обработке для измельчения доменной структуры.

основная потребительская характеристика, общепринятая в практически всех мировых стандартах, наиболее чувствительная к дисперсности доменной структуры;

B_{100} — магнитная индукция, измеренная в поле напряженностью 100 А/м, — является величиной чувствительной к остаточным напряжениям в стали;

B_{2500} — магнитная индукция, измеренная в поле напряженностью 2500 А/м, — является величиной близкой к индукции насыщения, при этом хорошо коррелирует с остротой кристаллографической текстуры в ЭАС.

Магнитные свойства образцов измерялись на установке Brockhaus MPG-100D вдоль направления прокатки. Погрешности определения: магнитной индукции $B \pm 0.5\% \pm 2$ единицы последнего разряда; удельных потерь $P \pm 1.0\% \pm 2$ единицы последнего разряда.

На основе проведенных измерений формировались группы образцов с практически одинаковыми характеристиками (в пределах погрешности), на которых определялась величина магнитострикции в зависимости от магнитной индукции. В каждой группе находилось 5–7 образцов. Магнитострикция также измерялась на установке Brockhaus MPG-100D вдоль направления прокатки.

После измерений все образцы подвергались отжигу для снятия напряжений при температуре 850°C в течение двух минут в атмосфере азотного защитного газа (95% N₂ + 5% H₂). После отжига вновь проводились измерения магнитных свойств и исследования магнитострикционных характеристик. Результаты всех измерений усреднялись по группе образцов аналогов (см. таблицу).

Для оценки магнитострикции измерялись точки $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ для каждого отдельного значения индукции. Вид кривой магнитострикции и определение $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ представлены на рис. 1 [6].

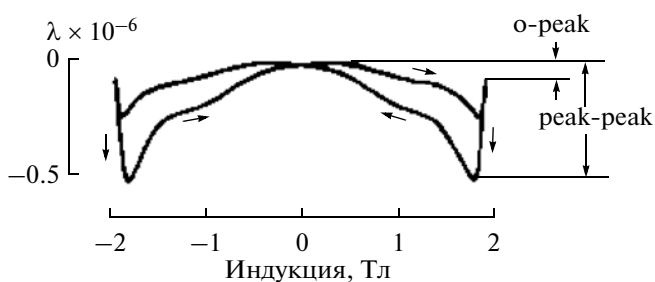


Рис. 1. Характерный вид кривой магнитострикции и определение $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение магнитных свойств ЭАС до и после отжига (таблица) показывает, что отжиг листовых образцов достаточно часто приводит к возрастанию значений электромагнитной индукции B_{100} и, одновременно, к повышению удельных электромагнитных потерь $P_{1.7/50}$. В большей степени это проявляется для металла толщиной 0.27 мм. По-видимому, это связано со снятием при отжиге растягивающих напряжений, созданных электро-

изоляционным покрытием за счет разницы в коэффициентах термического расширения металла и материала покрытия [14]. Уменьшение растягивающих напряжений, созданных покрытием, вероятно, происходит вследствие того, что параметры отжига, реализованного в работе, существенно отличаются от промышленной обработки стали: замедленные скорости нагрева и охлаждения (из-за объема изделия), температура выдержки $\sim 800\text{--}830^\circ\text{C}$, время выдержки ~ 20 с. Повторный отжиг сформированного таким образом композиционного материала приводит к релаксации ранее созданных напряжений, как за счет изменения химического состава покрытия (за счет перераспределения элементов между покрытием и основой), так и за счет появления в покрытии микротрещин, связанных с расширением металла при нагреве.

Известно, что растягивающие напряжения значительно снижают электромагнитные потери ЭАС [1, 15, 16]. Тогда отсутствие напряжений, создаваемых покрытием, должно приводить к повышению электромагнитных потерь, что и наблюдается экспериментально. Более сложное влияние растягивающие напряжения оказывают на кривые намагничивания. Согласно [1], растяжение вдоль оси [001] приводит к добавочному сжатию основными полосовыми доменами трехгранных замыкающих доменов (или клиновидных [9]) и увеличению их энергии. Тогда вследствие повышения устойчивости последних к воздействию магнитного поля, будут затруднены и процессы смещения 180° -градусных доменных границ в основной структуре, формирующей суммарную индукцию образца. Следовательно, кривая намагничивания растянутых образцов на этом этапе оказывается более пологой, чем в нерастянутых образцах. Но поскольку при растяжении также уменьшаются размеры субдоменов, образовавшихся около различного рода дефектов кристаллической решетки и снижающих результирующую индукцию, она после завершения смещений 180° -градусных границ оказывается несколько выше. Исходя из этого, снятие растягивающих напряжений покрытия может приводить к возрастанию индукции в слабых полях и снижению в полях большей напряженности. Таким образом, повышение магнитной индукции B_{100} с одновременным увеличением удельных магнитных потерь в результате отжига листовых образцов является вполне объяснимым. При этом важным результатом является факт положительного влияния растягивающих напряжений, созданных покрытием, на магнитные свойства стали.

С увеличением рассеяния кристаллографической текстуры в последовательностях образцов $27P\text{--}27S\text{--}27N$, $30P\text{--}30S\text{--}30N$ положительное влияние растягивающих напряжений на общие потери значительно уменьшается, а негативное влия-

ние на электромагнитную индукцию несколько усиливается (см. таблицу). Данный результат согласуется с хорошо известными данными о зависимости электромагнитных потерь от размерных параметров основных доменов, которые, в свою очередь зависят от величины растягивающих напряжений и ориентации кристалла [1].

Отметим, что при отжиге наряду со снятием растягивающих напряжений покрытия, происходит уменьшение остаточных внутренних напряжений, связанных с упругими полями дислокаций и субграниц. Появление этих напряжений связано: с вытяжкой металла при отжиге для снятия рулонной кривизны после высокотемпературного отжига; анизотропией аномального роста зерен при вторичной рекристаллизации; резом полосы [17]. Как правило, остаточные внутренние напряжения оказывают негативное влияние на магнитные свойства образцов [1, 17]. Вклады остаточных внутренних напряжений и растягивающих напряжений покрытия в магнитные свойства стали определяется их уровнем. Таким образом, релаксация напряжений при отжиге для каждого образца может быть различной, что приводит к некоторому разбросу в свойствах. Кроме того, с уменьшением ширины и длины образцов, негативное влияние остаточных напряжений должно увеличиваться за счет краевых эффектов (главным образом из-за дефектов, связанных с резом). Этим объясняется отличие свойств листовых образцов и образцов в виде полос Эпштейна.

На рис. 2 представлены зависимости характеристик $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ от индукции для ЭАС толщиной 0.27 с различным уровнем удельных магнитных потерь до и после отжига. Видно, что для неотожженных образцов, кривая $\lambda_{o\text{-peak}}$ опускается вниз в область отрицательных значений по мере увеличения $P_{1.7/50}$. До индукций ≈ 1.7 Тл минимальные по модулю значения $\lambda_{o\text{-peak}}$ наблюдаются для ЭАС с ЛЛО. Низкие значения $\lambda_{o\text{-peak}}$ во всем диапазоне индукций наблюдаются для образцов $27P$. При этом значения $\lambda_{\text{peak-peak}}$ также минимальны для образцов $27L$ (до индукций ≈ 1.7 Тл) и $27P$.

После отжига значения $\lambda_{o\text{-peak}}$ становятся достаточно близкими. Однако минимальные по абсолютному значению точки $\lambda_{o\text{-peak}}$ наблюдаются для образцов $27P$. При этом значения $\lambda_{\text{peak-peak}}$ при индукциях более 1.7 Тл несколько увеличились. Лучшие характеристики наблюдаются для образцов $27P$. Во всех случаях для образцов $27L$ после отжига наблюдается наибольшее ухудшение магнитострикционных характеристик.

Известно, что металл после лазерной обработки имеет дополнительные локальные внутренние напряжения, связанные с упругими полями дислокаций [8, 9]. Вариантом объяснения заметного ухудшения магнитострикционных характеристик

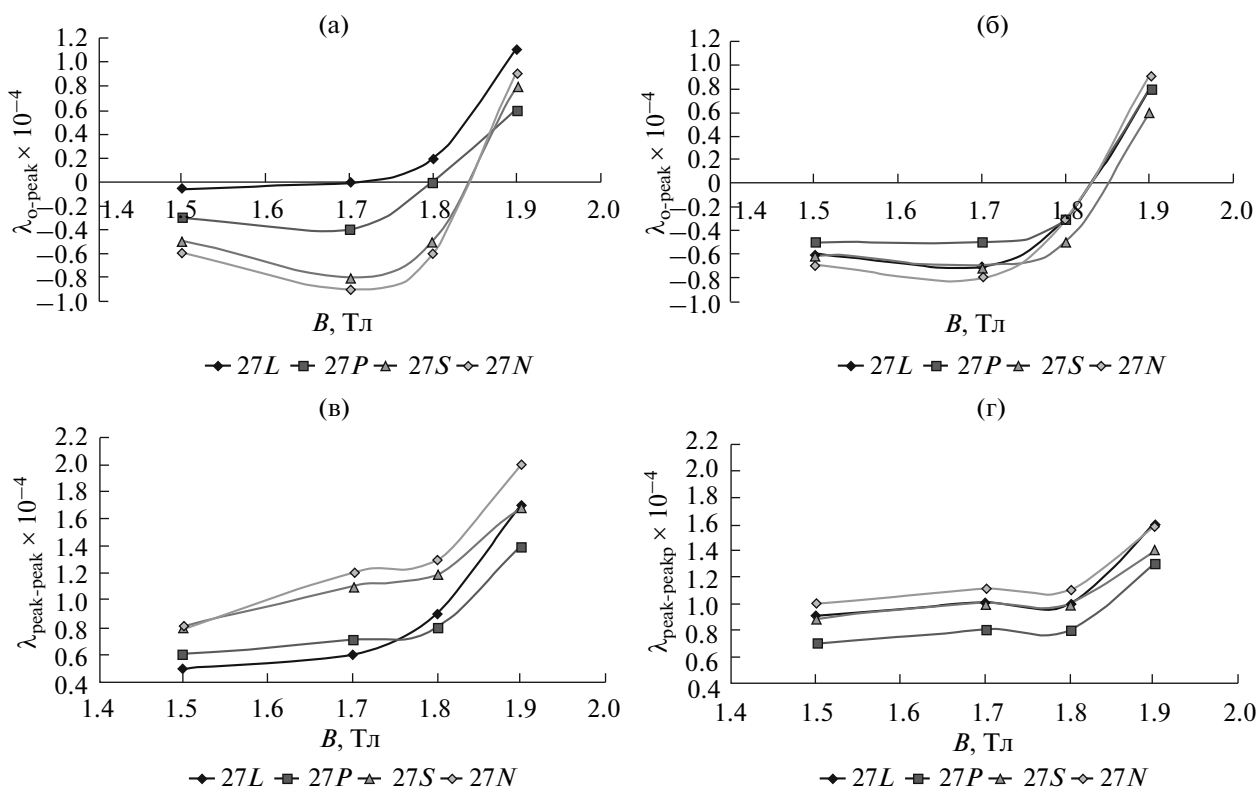


Рис. 2. Зависимость средних значений $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ от индукции для ЭАС толщиной 0.27 мм до отжига (а, б) и после отжига (в, г).

для данной стали после отжига могут быть процессы, связанные с возвратом и полигонизацией. При температурах отжига (до 860°C) снятие упругих полей напряжений может происходить путем аннигиляции дислокаций, выстраивания их в субграницы и дислокационные сетки. Одновременно это приводит к некоторому изменению доменной структуры и образованию дополнительных субдоменов, связанных с новыми дислокационными образованиями. По всей вероятности, новая дислокационная структура, совместно с уменьшением растягивающих напряжений, созданных покрытием, приводит к заметному ухудшению магнитоэлектрических характеристик образцов.

Анализ зависимости средних значений точек $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ от индукции для различных образцов ЭАС толщиной 0.27 показывает, что для образцов 27L и 27P отжиг приводит к общему снижению значений $\lambda_{o\text{-peak}}$ в область отрицательных значений (рис. 2). Однако для материала с более высоким уровнем удельных магнитных потерь (27S и 27N) изменение $\lambda_{o\text{-peak}}$ после отжига минимально. Так как электромагнитная индукция ЭАС образцов 27S и 27N в среднем не отличается больше, чем на 0.02 Тл, от 27P то, по всей

видимости, на их магнитоэлектрические характеристики заметное влияние оказывают остаточные внутренние напряжения и растягивающие напряжения, созданные электроизоляционным покрытием.

Характер зависимости $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ от индукции для образцов ЭАС толщиной 0.30 мм до и после отжига в целом аналогичен зафиксированному для ЭАС толщиной 0.27 мм (рис. 3). Однако ухудшение магнитоэлектрических характеристик ЭАС толщиной 0.30 мм с измельченной доменной структурой, после отжига является не столь ярко выраженным, как для металла толщиной 0.27 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отжиг листовых образцов достаточно часто приводит к возрастанию значений электромагнитной индукции B_{100} и, одновременно, к повышению удельных электромагнитных потерь $P_{1.7/50}$. Это связано со снятием при отжиге растягивающих напряжений, созданных электроизоляционным покрытием. С увеличением рассеяния кристаллографической текстуры положительное влияние растягивающих напряжений на общие потери значительно уменьшается, а негативное влия-

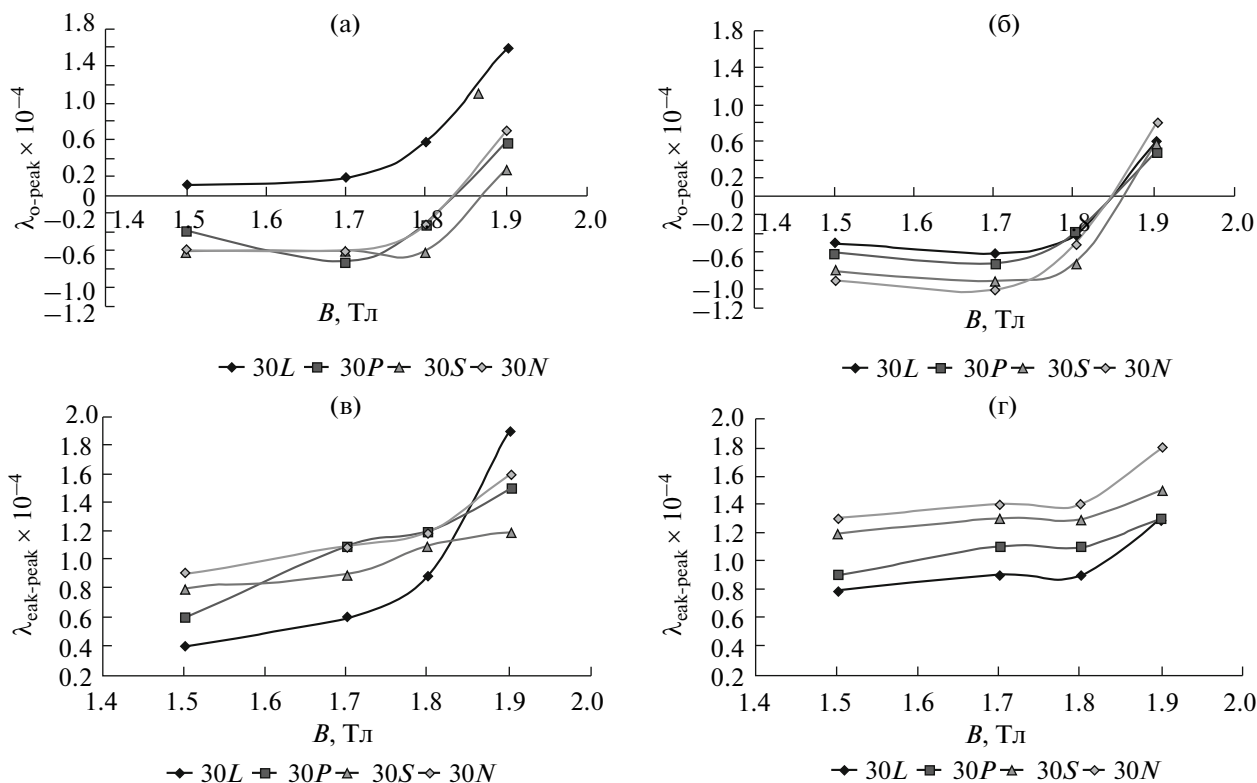


Рис. 3. Зависимость средних значений точек $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ от индукции для ЭАС толщиной 0.30 мм до отжига (а, б) и после отжига (в, г).

яние на электромагнитную индукцию несколько усиливается.

До индукций ≈ 1.7 Тл минимальные по модулю значения $\lambda_{o\text{-peak}}$ и $\lambda_{\text{peak-peak}}$ наблюдаются для ЭАС с измельченной доменной структурой. После отжига значения $\lambda_{o\text{-peak}}$ для всех образцов становятся близкими. Во всех случаях для образцов с измельченной доменной структурой после отжига наблюдается наибольшее ухудшение магнитострикционных характеристик. Причина этого может быть связана с изменением доменной структуры и образованием дополнительных субдоменов, вызванными перестройкой дислокационной структуры при отжиге. Совместно с уменьшением растягивающих напряжений, созданных покрытием, новая дислокационная структура приводит к заметному ухудшению магнитострикционных характеристик данных образцов.

Показано, что для образцов с высоким уровнем удельных магнитных потерь изменение $\lambda_{o\text{-peak}}$ после отжига минимально. По всей видимости, наряду с низкой величиной электромагнитной индукции, на их магнитострикционные характеристики заметное влияние оказывают остаточные внутренние напряжения и растягивающие напряжения, созданные электроизоляционным покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электро-технических сталей. М.: Наука, 1992. 272 с.
2. Valkovic Z. Effect of electrical steel grade on transformer core audible noise // J. Magn. a. Magn. Mater. 1994. V. 133. № 1–3. P. 607–609.
3. По А., Pfützner H., Nakata T. Critical induction – a key quantity for the optimization of transformer core operation // J. Magn. a. Magn. Mater. 2000. V. 215–216. P. 637–640.
4. Snell D. Noise generated by model step lap core configurations of grain oriented electrical steel // J. Magn. a. Magn. Mater. 2008. V. 320. № 20. P. 887–890.
5. Yabumoto M., Arai S., Kawamata R., Mizokami M., Kubota T. Recent Development in Grain-Oriented Electrical Steel with Low Magnetostriction // J. Mater. Eng. a. Performance. 1997. V. 6. № 6. P. 713–721.
6. Weiser B., Pfützner H., Anger J. Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores // Magn. IEEE Trans. 2000. V. 36. № 5. P. 3759–3777.
7. Лобанов М.Л., Русаков Г.М., Редикунцев А.А. Электротехническая анизотропная сталь. Часть I. История развития // МиТОМ. 2011. № 7. С. 18–25.
8. Лобанов М.Л., Русаков Г.М., Редикунцев А.А. Электротехническая анизотропная сталь. Часть II. Современное состояние // МиТОМ. 2011. № 8. С. 3–7.

9. Каренина Л.С., Драгошанский Ю.Н., Пужевич Р.Б., Корзунин Г.С. Влияние электроизоляционного покрытия на эффективность лазерной обработки электротехнической анизотропной стали // ФММ. 2011. Т. 112. № 3. С. 247–252.
10. Fujikura *et al.* Low iron loss and low noise grain-oriented electrical steel sheet and a method for producing the same // United States Patent № 6558479. 2003.
11. Hastenrath M. Developments of electrical steel (ThyssenKrupp) // Electrical Steel and core performance / IEEE Transformer Committee Fall 2009 Meeting. Chicago. 24 October, 2009.
12. Mogi *et al.* Electrical steel sheet for low-noise transformer and low-noise transformer // United States Patent Application publication № 2004/0178872A1. 2004.
13. Girgis R. Performance of electrical steel in transformer cores (ABB) // Electrical Steel and core performance / IEEE Transformer Committee Fall 2009 Meeting. Chicago. 24 October, 2009.
14. Каренина Л.С., Корзунин Г.С., Пужевич Р.Б. Влияние фосфатной составляющей электроизоляционного покрытия на магнитные потери в электротехнической анизотропной стали // ФММ. 2011. Т. 111. № 1. С. 23–26.
15. Yamamoto T., Nozawa T. Effects of tensile stress on total loss of single crystals of 3% silicon-iron // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. № 7. P. 2981–2984.
16. Драгошанский Ю.Н., Хан Е.Б., Зайкова В.А. Непрерывное поступательное движение доменной структуры в переменных полях и его влияние на величину электромагнитных потерь в сплаве Fe–3%Si // ФММ. 1975. Т. 39. № 2. С. 289.
17. Соколов Б.К., Драгошанский Ю.Н., Матвеева В.С., Цырлин М.Б., Пужевич Р.Б. Неоднородность магнитных свойств анизотропной электротехнической стали и особенности дислокационных структур // Дефектоскопия. 2004. № 11. С. 69–78.