

Received: 10.11.2018
Revised: 28.11.2018
Accepted: 30.11.2018
DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.165-172

EFFICIENCY OF LOCAL DEFORMATION EFFECTS ON THE MAGNETIC STRUCTURE OF CORE ELEMENTS

V. I. Pudov^{a)}, Yu. N. Dragoshanskii^{b)}, and A. S. Doroshek

*M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-3143-7195>  pudov@imp.uran.ru;
^{b)}  <https://orcid.org/0000-0002-6401-4300>  drago@imp.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: pudov@imp.uran.ru
Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620990, Russian Federation
Tel.: +7 343 378 36 94

Prospects for optimizing the domain structure and reducing specific magnetic losses in Fe-Si (110) – elements of multilayer laminated transformer magnetic cores – are considered. The formation of local deformation zones by mechanical scribing decreases the domain size and the eddy-current component of magnetic losses; it directs the magnetic flux in the linear and angular portions of the magnetic cores along the easy axes. The established optimal processing conditions and the subsequent annealing in a magnetic field reduce specific magnetic losses in the magnetic cores by 10–12 %.

Keywords: transformer steels, stacked core, structure, domains, scribing, thermomagnetic treatment, core losses.

Acknowledgment

The work was performed within the state assignment on the subjects of Magnet (No. AAAA-A18-118020290129-5) and Diagnostics (No. AAAA-A18-118020690196-3) and supported by UB RAS project No. 18-10-2-8.

References

1. Nakamura M., Hirose K., Iuchi T., Yamaguchi S., Ichiyama T., Ohya Y. Characteristics of laser irradiated grain oriented silicon. *IEEE Trans. Magn.*, 1982, vol. 18, no. 6, pp. 1508–1510. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1062057.
2. Sato K., Ishida M., Hina E. Heat-proof domain-refined grain-oriented electrical steel. *Kawasaki Steel Technical Report*, 1998, no. 39, pp. 21–28.
3. Dragoshanskii Yu.N., Pudov V.I., Karenina L.S. Optimizing the domains and reducing the magnetic losses of electrical steel via active coating and laser treatment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2013, vol. 77, no. 10, pp. 1286–1288. DOI: 10.7868/S0367676513100104.
4. Dragoshanskii Yu.N., Pudov V.I., Reutov Yu.J., Doroshek A.S. Perspective of laser-mechanic method used for improvement of physic properties of transformer steel. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 48–56. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.048-056.
5. Dragoshanskii Yu.N., Pudov V.I. An apparatus for optical monitoring of the surfaces of solids. *RF Patent 174673*, 2017. (In Russian).
6. Bagaev K.I. Estimation of the induction effect on the losses in the magnetic circuit of a transformer in the case of different systems of laminating of the magnetic circuit. *Polzunovskiy Vestnik*, 2013, no. 4–2, pp. 4–11. (In Russian).

7. Kobylin V.P., Davydov G.I., Afans'ev D.E., Li-Fir-Su Z.P., Sedalishchev U.A., Vasil'yev P.F. An Analysis of Factors Causing a Growth of No-Load Power Losses in Power Transformers with Cores Made of Anisotropic Steel. *Elektrichestvo*, 2015, iss. 3, pp. 13–18. (In Russian).
8. Gorkunov E.S., Dragoshanskii Yu.N., Solomein M.N., Barkhatov V.A., Zadvorkin S.M. Investigation of the effects of crystallographic anisotropy and the domain structure of ferromagnets on the parameters of double electromagnetic-acoustic transformation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 207–217. DOI: 10.1007/s11181-005-0152-3.
9. Pudov V.I., Dragoshanskii Yu.N. Promising applications of amorphous-crystalline coatings for soft magnetic alloys. *Strengthening Technologies and Coatings*, 2013, iss. 8, pp. 44–48. (In Russian).
10. Pudov V.I., Dragoshanskii Yu.N. Domain structure and magnetic losses in laminated magnetic circuits upon laser treatment. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 6, pp. 538–543. DOI: 10.1134/S0031918X15060083.
11. Pudov V.I., Dragoshanskii Yu.N. A method for processing of the laminated core of a core-type transformer. *RF patent 2565239*, 2015. (In Russian).
12. Pudov V.I., Dragoshanskii Yu.N. Magnetic Domain Structure and Thermal Stabilization of Laser Treatment Zones in Soft Magnetic Materials. *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 258–265. DOI: 10.1134/S1063783416020232. (In Russian).

Подана в журнал: 10.11.2018

УДК 621.758;537.622

DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.165-172

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МАГНИТНУЮ СТРУКТУРУ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТОПРОВОДА

В. И. Пудов^{а)}, Ю. Н. Драгошанский^{б)}, А. С. Дорошек

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,
18, С. Ковалевской, 620108, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0003-3143-7195>  pudov@imp.uran.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-6401-4300>  drago@imp.uran.ru

*Ответственный автор. E-mail: pudov@imp.uran.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, 620990, Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: +7 (343) 378–36–94

Рассмотрены перспективы оптимизации доменной структуры и снижения удельных магнитных потерь в Fe-Si (110) – элементах многослойных шихтованных трансформаторных магнитопроводов. Формирование зон локальной деформации путем механического скрайбирования уменьшает размеры доменов, вихретоковую составляющую магнитных потерь и направляет магнитный поток в линейных и угловых участках магнитопровода вдоль направлений легкого намагничивания. Установленный оптимальный режим обработки и последующий отжиг в магнитном поле обеспечивают снижение удельных магнитных потерь в магнитопроводах на 10–12 %.

Ключевые слова: трансформаторная сталь, магнитопровод, структура, домены, скрайбирование, термомагнитная обработка, магнитные потери.

1. Введение

Разработка современных технологий обработки анизотропных электротехнических сталей (АЭС) на разных этапах их производства является одной из важнейших задач материаловедения. АЭС – это сплав железа с кремнием в виде тонких (0,2–0,6 мм) лент. Высокая индукция и низкая себестоимость выделили АЭС в качестве основного материала для изготовления трансформаторных магнитопроводов и других электротехнических устройств.

При производстве в лентах АЭС формируется острая кристаллографическая и магнитная текстуры. Это приводит к формированию крупных кристаллитов размером до 50 мм, широких 180° магнитных доменов, в результате возрастают вихретоковые магнитные потери до 70 %.

Однако при изготовлении трансформаторных магнитопроводов магнитные свойства, приобретаемые в рулонной стали, существенно снижаются. Магнитные потери могут значительно возрастать. Отсутствие широких исследований по выявлению оптимальных условий формирования магнитной структуры и свойств в участках с различной кристаллографической ориентацией элементов магнитопровода снижают возможности для эффективного решения этой проблемы.

В перспективе улучшить физические свойства в лентах АЭС и изделиях можно только при реализации современных комплексных способов воздействия на их кристаллическую и магнитную структуру, обеспечивающих существенное превышение суммарного результата, достигаемого на отдельных этапах их обработки. В частности, улучшения можно достигнуть в результате воздействия на П-образные элементы стержневого магнитопровода [1–4] меха-

нического или лазерного скрайбирования, нанесения магнитоактивного (растягивающего металл) электроизоляционного покрытия и термомагнитной обработки.

Цель работы – определение эффективности влияния комплексного метода механического скрайбирования и термомагнитной обработки многослойных трансформаторных магнитопроводов.

2. Материалы и методика эксперимента

Для исследований использовали пластинчатые изделия, полученные промышленным штампованием элементов для магнитопроводов однофазных стержневых трансформаторов малой мощности (~14 VA) типа Пн. Магнитопровод собирали из отдельных пластинчатых ярем и стержневых П-образной формы элементов внахлест. Для рабочих элементов магнитопровода использовалась тонколистовая электротехническая сталь (сплав Fe-3 % Si с ребровой кристаллографической текстурой (110) [001]) марки 3407 [ГОСТ 21427.1–83]. Марка этой стали означает: сталь холоднокатаная анизотропная (3), содержание кремния 3 % в железе (4) и сравнительно высокий нормированный уровень магнитных характеристик (07), например индукции (Тл) и удельных потерь энергии на перемагничивание (Вт/кг) при заданной толщине ленты (мм).

Механическое скрайбирование поверхности элементов с одноосной магнитной анизотропией проводили резцом с нанесением канавок глубиной 0,03–0,05 мм в виде узких (0,2 мм) зон поперек оси текстуры с промежутками 3–4 мм, между зонами скрайбирующего воздействия, меньшими размерами зерен (рис. 1).

Магнитную доменную структуру изучали методом порошковых суспензий. Оптическая установка позволяла наблюдать домены на одном и том же участке образца с двух противоположных его поверхностей одновременно [5].

Магнитные потери $P_{В/f}$ – при индукции В (Тл) и частоте перемагничивания f (Гц), а также индукции B_{100} и B_{800} (в магнитных полях 100 и 800 А/м) измеряли на магнитоизмерительной установке МК-4Э, изготовленной ЗАО «НПО Интротест». Относительная погрешность измерений при доверительной вероятности 0,95 не превышала для индукции ± 2 %, для удельных магнитных потерь ± 4 %.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как показывают исследования, в пластинчатых элементах вблизи зоны скрайбирующего воздействия возникают области пластической деформации (рис. 1).

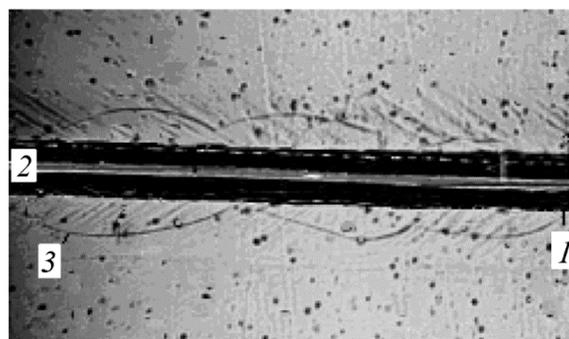


Рис. 1. Боковые напряженные участки (1) полосы механического скрайбирования (2), цепочки новых зерен (3) в исходном зерне стали, возникшие в зоне элемента магнитопровода $\times 50$

Такого рода деформация формирует сжимающие напряжения в зонах и перпендикулярные этим зонам – растягивающие напряжения. В результате обрабатываемая поверх-

ность оказывается вогнутой. Это связано с тем, что на данной поверхности ленты чередуются сжимающие и растягивающие напряжения, а на противоположной стороне ленты присутствуют только растягивающие напряжения. Таким образом, формирование данного изгиба может приводить к существенному росту магнитных потерь при сборке магнитопроводов. Поэтому необходимо на заключительной стадии проводить термическую или термомагнитную обработки.

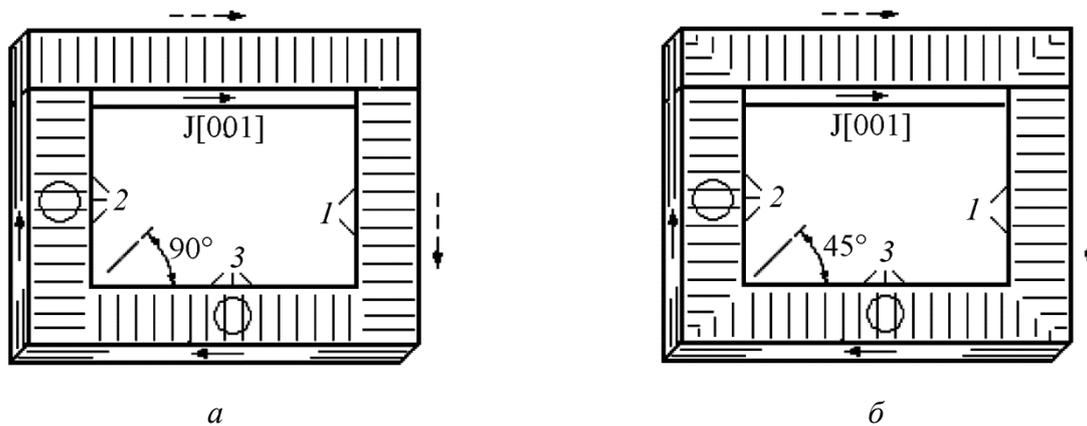


Рис. 2. Неоптимальная (а) и оптимальная (б) схемы скрайбирования ярем и стержневых П-образных элементов шихтованного магнитопровода: → – направление прокатки [001] стали; 1 – деформационные зоны; 2 – участки элемента с ориентацией вдоль (2) и поперек (3) прокатки

На рис. 2 представлены варианты для определения оптимального формирования деформационных зон скрайбирования в пластинчатых отдельных ярях и П-образных элементах шихтованного стержневого магнитопровода. Конструкция шихтованного магнитопровода не позволяет полностью использовать магнитоодноосные свойства текстурированной стали при сборке магнитопровода из отдельных пластин сложной формы, содержащих не только продольные участки (участки 2 и в ярях), но и поперечные относительно текстуры участки (3). Кроме того, это обуславливается и несовпадением направлений потока и текстуры в углах магнитопровода при изгибе магнитной линии (рис. 2 а). Как показывает опыт, потери в собранном сердечнике из холоднокатаной стали превышают потери материала на 30–50 % [6, 7]. Для ослабления этого явления целесообразно делать торцовые края пластин скошенными под углом 45°, а не 90° (рис. 2 а, б).

В участках П-образных элементов, соединяющих пластины стержней и имеющих ориентацию поперек направления прокатки (рис. 2 а, б, участки 3), нанесение вдоль оси текстуры [001] зон деформации вызывает появление растягивающих напряжений, ориентированных поперек оси текстуры. Это растяжение изменяет продольную магнитную анизотропию на двухосную поперечную, вызывая перестройку исходных основных полосовых 180° доменов шириной D из структуры A , с намагниченностью и границами, параллельными продольной оси [001], в структуру типа C [8], с поверхностными замыкающими доменами (1), намагниченными вдоль и против направления легчайшего намагничивания [001], и внутриобъемными 90° доменами (4), намагниченными поперечно, вдоль двух других осей легкого намагничивания [010] и [100].

Объемная схема доменной структуры представлена на рис. 3. Движение границ внутриобъемных доменов (4) этой структуры и обеспечивает перемагничивание магнитопровода в этих участках путем смещения границ доменов.

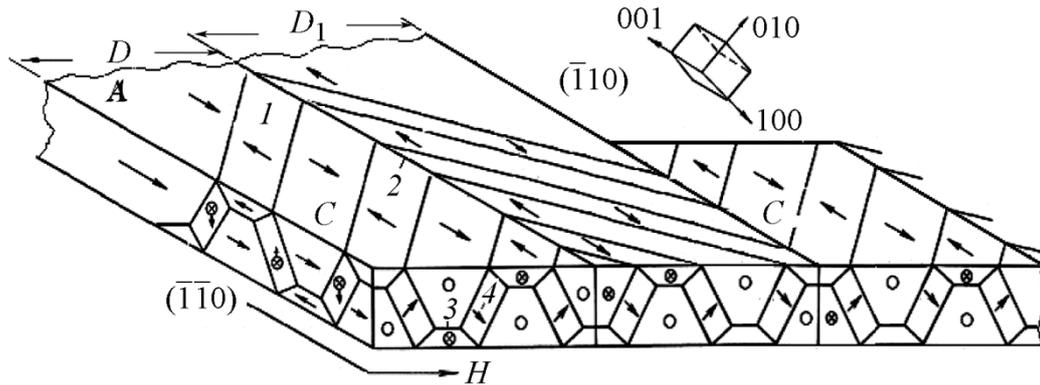


Рис. 3. Схема объемной доменной структуры в угловых участках элементов магнитопровода с продольной (110) [001] и поперечной (110) [011] ориентациями сторон: H – направление намагничивающего поля в трансформаторе за время П2; \rightarrow – ориентация намагниченности поверхностных замыкающих доменов (I), намагниченных вдоль и против направления легчайшего намагничивания [001], внутренних доменов (4), намагниченных вдоль направлений легкого намагничивания [010] и [100]; \otimes – проекции намагниченностей внутренних доменов (4) на боковую плоскость кристаллита $(\bar{1}\bar{1}0)$; 2 – граница между основными полосовыми 180° доменами шириной D ; 3 – внутренняя граница между замыкающими доменами двух поверхностей пластинчатого элемента

Следовательно, после скрайбирования и в этих участках магнитопровода основная намагниченность доменов ориентирована вдоль осей легкого намагничивания (вдоль ребер куба) и процесс перемагничивания совершается энергетически малозатратным механизмом смещения доменных границ, а не более трудным процессом вращения намагниченности в исходной магнитной структуре.

Снижение вихретоковых потерь за счет измельчения полосовых доменов скрайбированием сопровождается нарушением кристаллической решетки вблизи зон воздействия и ростом гистерезисной составляющей магнитных потерь. Поэтому при локальном скрайбировании следует находить оптимальный энергетический режим, узость зон деформации и оптимальные промежутки между ними, а также использовать последующую термомагнитную обработку для уменьшения напряжений вблизи зон скрайбирования. Результаты исследованных воздействий приведены в таблице.

Магнитные потери и их изменение после механического скрайбирования и ТМО

п/п	Состояния элементов магнитопровода	Магнитные потери ($P_{1,7/50}$), Вт/кг	Проводимые операции	Изменения $P_{1,7/50}$, %
1	Рулонная сталь*	1,17	–	–
2	Обычный магнитопровод	1,38	1–2	18
3	Скрайбирование	1,26	2–3	– 9
4	Скрайб. + ТМО	1,23	2–4	–11

* Толщина пластин 0,27 мм. Сталь 3407.

Эти результаты скрайбирования и термомагнитной обработки существенно дополняют эффект магнитоактивных (растягивающих металл) электроизоляционных покрытий, определенный ранее на магнитомягких лентах электротехнических анизотропных сплавов и изделиях из них [9–12].

Нанесение зон деформации с помощью штампов делает этот метод достаточно экономичным и перспективным для внедрения в производстве.

4. Заключение

Результаты экспериментальных исследований влияния комбинированного воздействия скрайбирования и термомагнитной обработки элементов трансформаторных магнитопроводов подтверждают возможность эффективно оптимизировать прохождение магнитного потока в замкнутой магнитной цепи многослойного шихтованного магнитопровода. За счет введения растягивающих напряжений и перестройки типа доменной структуры в участках магнитопровода, ориентированных не вдоль оси прокатки материала, обеспечивается прохождение магнитного потока по всему магнитопроводу вдоль осей легкого намагничивания электротехнической стали. Кроме того, за счет комбинированной обработки уменьшаются магнитные поля рассеяния в угловых участках многослойных шихтованных магнитопроводов.

Величина снижения магнитных потерь в магнитопроводе составляет 9–10 % за счет скрайбирования элементов магнитопровода и 10–12 % – при комбинированном воздействии механического скрайбирования и термомагнитной обработки, что приближает магнитные свойства изделия к свойствам, заложенным в материал при производстве ленты стали. Результаты, полученные при деформационно-текстурирующих воздействиях, указывают на перспективность практического применения этих воздействий для повышения магнитных свойств магнитопроводов электротехнических изделий.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам «Магнит» № АААА-А18-118020290129-5, «Диагностика» № АААА-А18-118020690196-3 и проекта УрО РАН №18-10-2-8.

Литература

1. Characteristics of laser irradiated grain oriented silicon steel / M. Nakamura, K. Hirose, T. Iuchi, S. Yamaguchi, T. Ichiyama, Y. Ohya // IEEE Trans. Magn. – 1982. – Vol. 18, no. 6. – P. 1508–1510. – DOI: 10.1109/TMAG.1982.1062057.
2. Sato K., Ishida M., Hina E. Heat-proof domain-refined grain-oriented electrical steel // Kawasaki Steel Technical Report. – 1998. – No. 39. – P. 21–28.
3. Dragoshanskii Yu. N., Pudov V. I., Karenina L. S. Optimizing the domains and reducing the magnetic losses of electrical steel via active coating and laser treatment // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2013. – Vol. 77, no. 10. – P. 1286–1288. – DOI: 10.7868/S0367676513100104.
4. Perspective of laser-mechanic method used for impovemet of physic properties of transformer steel / Yu. N. Dragoshanskii, V. I. Pudov, Yu. J. Reutov, A. S. Doroshek // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 6. – P. 48–56. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.048-056.
5. Устройство для оптического мониторинга поверхности твердых тел : пат. 174673 Рос. Федерация / Драгошанский Ю. Н., Пудов В. И. – № 2017112851/28 ; заявл. 13.04.2017 ; опубл. 25.10. 2017, Бюл. №30 (II ч.). – 5 с.
6. Багаев К. И. Оценка влияния индукции на потери в магнитопроводе трансформатора при различных системах шихтовки магнитопровода // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2. – С. 4–11.

7. Анализ причин увеличения потерь мощности на холостой ход в силовых трансформаторах с анизотропной сталью / В. П. Кобылин, Г. И. Давыдов, Д. Е. Афанасьев, Р. П. Ли-Фир-Су, В. А. Седалищев, П. Ф. Васильев // *Электричество*. – 2015 – № 3. – С. 13–18.
8. Investigation of the Effects of Crystallographic Anisotropy and the Domain Structure of Ferromagnets on the Parameters of Double Electromagnetic-Acoustic Transformation / E. S. Gorkunov, Yu. N. Dragoshanskii, M. N. Solomein, V. A. Barkhatov, S. M. Zadvorkin // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2005. – Vol. 41. – No. 4. – P. 207–217. – DOI: 10.1007/s11181-005-0152-3.
9. Пудов В. И., Драгошанский Ю. Н. Перспективность применения аморфнокристаллических покрытий для магнитомягких сплавов // *Упрочняющие технологии и покрытия* – 2013. – № 8. – С. 44–48.
10. Pudov V. I., Dragoshanskii Y. N. Domain structure and magnetic losses in laminated magnetic circuits upon laser treatment // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2015. – Vol. 116, no. 6. – P. 538–543. – DOI: 10.1134/S0031918X15060083.
11. Способ обработки шихтованного магнитопровода стержневого трансформатора : пат. 2565239 Рос. Федерация / Пудов В. И., Драгошанский Ю. Н. – № 2014120595/07 ; заявл. 21.05.2014 ; опубл. 20.10. 2015, Бюл. № 29(II ч.). – 7 с.
12. Pudov V. I., Dragoshanskii Yu. N. Magnetic Domain Structure and Thermal Stabilization of Laser Treatment Zones in Soft Magnetic Materials // *Physics of the Solid State*. – 2016. – Vol. 58, no. 2. – P. 258–265. – DOI: 10.1134/S1063783416020232.