

## УЛУЧШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОПРОВОДОВ ЛОКАЛЬНЫМИ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.  
[pudov@imp.uran.ru](mailto:pudov@imp.uran.ru); [drago@imp.uran.ru](mailto:drago@imp.uran.ru)

### Введение

Улучшить физические свойства в лентах АЭС и изделиях можно только при реализации современных комплексных способов воздействия на их кристаллическую и магнитную структуру, что обеспечивает существенное превышение суммарного результата, достигаемого на отдельных этапах их обработки. В частности, улучшения можно достигнуть в результате воздействия на П-образные элементы магнитопровода механического или лазерного скрайбирования [1-4], нанесения магнитоактивного (растягивающего металл) электроизоляционного покрытия и термомагнитной обработки [5,6].

### Материалы и методика эксперимента

Для исследований использовали стержневые трансформаторы типа Пн. Магнитопровод трансформатора собирали внахлест из отдельных пластинчатых ярем и П-образной формы элементов. В качестве материала элементов использовалась тонколистовая электротехническая сталь (сплав Fe-3%Si с ребровой кристаллографической текстурой (110)[001]) марки 3407 [ГОСТ 21427.1–83].

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 шириной зон поперёк оси текстуры с промежутками 3 мм, 4 мм, между зонами скрайбирующего воздействия (рис. 1), меньшими размерами зерен.

Магнитные потери  $P_{Вf}$  – при индукции  $B$  (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  $\pm 2\%$ , для удельных магнитных потерь  $\pm 4\%$

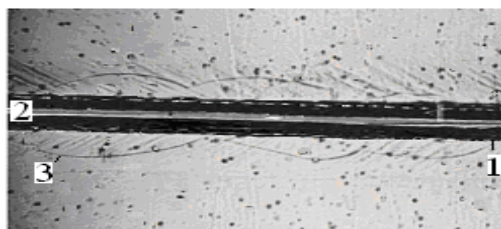


Рисунок 1 - Боковые напряженные участки (1) фрагмента полосы механического скрайбирования (2), цепочки новых зёрен (3) в исходном зерне стали, возникшие вблизи напряженной зоны магнитопровода. х50.

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

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2а,б рассмотрены варианты для определения оптимального формирования деформационных зон скрайбирования в пластинчатых отдельных ярах и П-образных элементах шихтованного стержневого магнитопровода. Конструкция магнитопровода не позволяет полностью использовать магнитоодноосные свойства текстурованной стали при сборке магнитопровода из отдельных пластин сложной формы, содержащие не только продольные (участки 2 и в ярах), но и поперечные (участки 3) относительно текстуры. Кроме того, это обуславливается и несовпадением направлений потока и текстуры в углах магнитопровода при изгибе магнитной линии (рис. 2а.). Как показывает опыт, потери в собранном сердечнике из холоднокатаной стали превышают потери материала на 30–50% [7, 8]. Для ослабления этого явления целесообразно делать торцовые края пластин скошенными под углом 45°, а не 90° (рис. 2а,б).

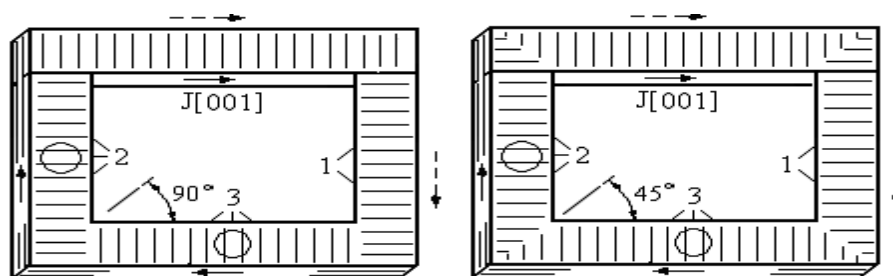


Рисунок 2 - Не оптимальная (а) и оптимальная (б) схемы скрайбирования ярем и стержневых П-образных элементов шихтованного магнитопровода.

→направление прокатки [001] стали; 1-деформационные зоны;

2-участки элемента с ориентацией вдоль (2) прокатки и поперек (3) прокатки

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

Таблица – 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 марки 3407.

Снижение вихретоковых потерь за счёт 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.

Эти результаты скрайбирования и термомагнитной обработки существенно дополняют эффект магнитоактивных (растягивающих металл) электроизоляционных покрытий, определённый ранее на магнитомягких лентах электротехнических анизотропных сплавов и изделиях из них [9-10].

### **Заключение**

Таким образом, результаты экспериментальных исследований влияния комбинированного воздействия скрайбирования и термомагнитной обработки элементов трансформаторных магнитопроводов показывают возможность эффективно оптимизировать прохождение магнитного потока в замкнутой магнитной цепи многослойного шихтованного магнитопровода. Снижение магнитных потерь в магнитопроводе составляет 9-10% за счёт 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.

*Работа выполнена в рамках ГЗ по темам «Магнит» №АААА-А18-118020290129-5, «Диагностика» №АААА-А18-118020690196-3 и проекта УрО РАН. 2019.*

### Список литературы

1. Стародубцев, Ю. Магнитомягкие материалы. Энциклопедический справочник. – М.: Техносфера, 2011, – 659 с.
2. 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.
3. Пудов, В.И., Драгошанский. Перспективность применения аморфнокристаллических покрытий для магнитомягких сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия – 2013. – № 8. – С. 44–48.
4. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Доменная структура и оптимизация функциональных свойств магнитомягких материалов. Тезисы докладов. LVII Международная конф. «Актуальные проблемы прочности». Севастополь, 2016. – С. 40.
5. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И., Каренина Л.С. Оптимизация доменов и снижение магнитных потерь электротехнической стали активным покрытием и лазерной обработкой // Известия РАН. Серия: физич. – 2013. – Т. 77, № 10. – С. 1496–1498.
6. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Доменная структура и магнитные потери шихтованных магнитопроводов при лазерной обработке // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т.116, № 6. - С. 571–576.
7. Багаев К.И. Оценка влияния индукции на потери в магнитопроводе трансформатора при различных системах шихтовки магнитопровода // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 4–11.
8. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Магнитная доменная структура и термостабилизация зон лазерного воздействия в магнитомягких материалах // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, №2. – С. 252–258.
9. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Лазерное деформирование и термомагнитная обработка магнитомягких сплавов. Сборник трудов. 53-ей Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности». Витебск, 2012. - Ч.1. - С. 228–230.
10. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Влияние локальных деформаций на функциональные свойства Fe-Si материалов. Сб. материалов. 60-ой Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности». В и т е б с к , 2 0 1 8 . - С. 445–447.