

# ЛАЗЕРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ТЕРМОМАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ

Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н.

Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Росси.  
[pudov@imp.uran.ru](mailto:pudov@imp.uran.ru)

## Введение

В современных анизотропных электротехнических сталях (АЭС) создание острой кристаллографической и магнитной текстуры обеспечивает повышение магнитной индукции. Для этого использованы обычные металлургические методы прокатки и рекристаллизационных отжигов, создающие ребровую  $(110)[001]$  кристаллографическую текстуру при оптимальных химическом составе, пластичности, толщине ленты, наименьшем содержании вредных примесей и неоднородных напряжений. Это соответствует минимуму магнитных потерь при перемагничивании. Однако при этом формируются крупные кристаллиты (до 50 мм), широкие полосовые магнитные домены, проходящие из зерна в зерно и, как следствие этого, при перемагничивании возрастают скорости движения доменных границ и вихрековые ( $P_v$ ) магнитные потери (до 85% от полных). Для решения этой проблемы требуется оптимизация магнитной доменной структуры, путем изменения соотношения объемов магнитных фаз, ориентации и размеров доменов, создания дополнительных зародышей перемагничивания и увеличения активности движения доменных границ [1,2].

Целью данной работы является дальнейшие исследования физических механизмов влияния деформационно-текстурирующих воздействий на атомную и магнитную структуру АЭС и магнитомягких сплавов для разработки перспективных методов максимального снижения их магнитных потерь за счет активных поверхностных воздействий – локальной лазерной и термоманитной обработок (ЛЛО и ТМО).

## Материалы и методика эксперимента

Исследования проводили на анизотропных электротехнических сталях Fe-3 мас. % Si, с ребровой кристаллографической текстурой  $(110)[001]$  различных марок 3406–3410 (ГОСТ 21427.1–83.). Размеры образцов составляли  $280 \times 30 \times 0,08–0,35$  мм. Аморфные ленты  $Fe_{78}Ni_1Si_9B_{12}$  (2НСП),  $Fe_{81}Si_7B_{12}$  и  $Fe_{81}Si_4B_{13}C_2$  имели ширину 5 мм и толщину 0,02 мм. Магнитные потери  $P_{в/г}$  – при индукции  $B$  (Тл) и частоте перемагничивания  $f$  (Гц) и индукции  $B_{100}$  и  $B_{800}$  (при поле  $H = 100$  и  $800$  А/м) измеряли на магнитоизмерительной установке МК-4Э. Относительная погрешность измерений для доверительной вероятности 0,95 не превышала для индукции  $\pm 2\%$ , для магнитных потерь  $\pm 4\%$ .

Локальное лазерное облучение участков поверхности стали и аморфных лент с одноосной магнитной анизотропией, проводили импульсно-периодическим  $CO_2$ -лазером ( $\lambda = 0,6$  мкм), в виде зон шириной 0,2 мм поперёк оси текстуры с промежутками между зонами, меньшими размера зерен.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Одно из перспективных направлений обработки анизотропной электротехнической стали связано с ЛЛО, т.е. с формированием поперечно ориентированных магнитных барьеров (узких зон), отличающихся по структуре от основного материала, и даёт результат, аналогичный получаемому при растяжении. Такие барьеры могут создаваться скрайбированием, локальным изгибом и локальной лазерной обработкой. ЛЛО изменяет исходное распределение намагниченности. На барьерах сосредоточиваются магнитные заряды, приводящие к ограничению размеров полосовых (т.е. основных)  $180^\circ$  – градусных доменов, уменьшению объёма поперечных  $90^\circ$  – градусных замыкающих областей и к появлению клиновидных  $180^\circ$  – градусных замыкающих областей – динамических зародышей перемагничивания [3]. Для получения максимального эффекта снижения магнитных потерь

исследовали влияние изменения интервала между зонами лазерного воздействия. Было установлено, что при снижении расстояния между зонами ЛЛО от 10 до оптимального 5 мм, возрастал уровень напряжений от 0,05-0,10 кг/мм<sup>2</sup> до 0,20-0,25 кг/мм<sup>2</sup> и в 2–3 раза уменьшалась ширина полосовых доменов. Это снижало магнитные потери за счет их вихретоковой составляющей.

Дальнейшее уменьшение промежутка приводило к росту потерь. В оптимальном режиме (плотность энергии воздействия  $U=2$  Дж/см<sup>2</sup>, ширина зоны облучения  $t$  0,2 мм, межзонные промежутки 5 мм, толщина ленты 0,3 мм) при скорости движения ленты 0,5 м/с получено снижение магнитных потерь по характеристике  $P_{1,7/50}$  до 25% (на сталях высших марок без покрытия, с индукцией  $B_{800}$  не менее 1,94 Тл). Однако, при изменении толщины ленты стали, размера зёрен, напряжённого состояния атомной структуры, характеристик покрытия и коэффициента поглощения излучения обрабатываемой поверхностью требуется уже другой подбор оптимальных параметров ЛЛО, в частности, наиболее важных – межзонного интервала, мощности излучения, кроме того, приходится искать пути снижения влияния деформационного изгиба ленты.

Другой вид воздействия связан с влиянием на структуру магнитомягких материалов и сплавов термомагнитной обработки [4, 5]. В этом случае при постоянном магнитном поле индуцируется магнитная одноосность в текстурованной стали и снижаются магнитные потери только до 9 – 10% вдоль оси текстуры, начальная и максимальная магнитная проницаемости увеличиваются в 1,4 раза.

Однако для повышения эффективности ТМО требуется нахождение более перспективного варианта обработки. Как показали дальнейшие исследования, таким вариантом является ТМО в переменном магнитном поле (частота 50 Гц и выше), обеспечивающая за счет дестабилизации доменных границ существенное снижение магнитных потерь по всем направлениям в плоскости ленты. Учет влияния деформационного старения материалов, протекающего при обработке, формирует уже новую концепцию ТМО и позволяет на более высоком уровне прогнозировать её эффективность [6, 7]. В таблице 1 показано снижение магнитных потерь после эффективных обработок, включая комплексную (~ТМО+ЛЛО).

**Таблица 1.** Полные магнитные потери  $P_{1,5/50}$ , их гистерезисные  $P_r$  и вихретоковые  $P_v$  (Вт/кг) составляющие при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц в стали Fe–3%Si, после различных обработок.

| Магнитные<br>потери Вт/кг | Обработки |      |      |          |                 |
|---------------------------|-----------|------|------|----------|-----------------|
|                           | Исх       | ~ТМО | ЛЛО  | ~ТМО+ЛЛО | $\Delta P/P \%$ |
| $P_{1,5/50}$              | 0,68      | 0,58 | 0,54 | 0,50     | -26             |
| $P_r$                     | 0,24      | 0,21 | 0,26 | 0,25     | +4              |
| $P_v$                     | 0,44      | 0,37 | 0,28 | 0,25     | -43             |

Приведенные в таблице абсолютные величины магнитных потерь показывают, что применения комплексной ТМО + ЛЛО обработок на вышеуказанных образцах обеспечивает получение наиболее высоких результатов, в частности, вдоль оси текстуры стали (оси легкого намагничивания), вдоль которой в основном используется её перемагничивание в магнитопроводах, снижение потерь  $P_{1,5/50}$  достигает 22–27% (в исходном состоянии образцы имели характеристику  $B_{2500}$  равную 1,92–1,94 Тл). В этом случае, эффект снижения магнитных потерь обеспечивается исключительно за счет уменьшения вихретоковой составляющей ( $P_v$ ) на 43%. Причем некоторый рост  $P_r$  (на 4 %) связан с искажениями идеальной кристаллической решетки в узких зонах лазерного воздействия. Эффект от применения самой ЛЛО составляет 8–15%.

В образцах аморфной ленты был получен более высокий результат снижения магнитных потерь, составляющий 30–35% (таблица 1), по сравнению со стальными образцами, что обусловлено меньшей толщиной ленты и большей шириной её доменов в исходном состоянии.

**Таблица 2.** Магнитные свойства сплава  $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$  после различных обработок

| Обработки     | $\mu_0$    | $\mu_{\text{max}}$ | $H_c$ , А/м | $B_r$ , Тл  | $P_{1,0/400}$ , Вт/кг |
|---------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| Отжиг без $H$ | 3500       | 65000              | 5           | 0,77        | 2,1                   |
| ТМО в $H=$    | 4600 (30%) | 150000 (130%)      | 4(-20%)     | 0,91 (18%)  | 1,7(-17%)             |
| ТМО в $H\sim$ | 6000 (70%) | 280000 (330%)      | 2 (-60%)    | 0,85(10%)   | 1,5(-29%)             |
| ТМО + ЛЛЮ     | 4800 (37%) | 180000 (177%)      | 3 (-40%)    | 0,56 (-17%) | 1,35(-36%)            |

В скобках показаны изменения магнитных свойств материала от их исходных величин.

Таким образом, экспериментально обнаружен эффект значительного снижения магнитных потерь при комплексной обработке ( $\sim$ ТМО+ЛЛЮ) сплава Fe-3%Si и аморфных материалов в переменном магнитном поле. Эффект связан с наведением одноосной магнитной анизотропии ближнего порядка, увеличивающей объём магнитных доменов, а также со снижением их ширины и с дестабилизацией их границ.

### Заключение

В результате исследования влияния комплексной терромагнитной и локальной лазерной обработок на электротехнические Fe-Si стали и аморфные ленты, изготавливаемые из сплавов  $\text{Fe}_{81}\text{Si}_7\text{B}_{12}$ ,  $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$ , развиты представления о процессах их перемагничивания, механизмах изменения доменной структуры и магнитных свойств.

Предложена новая концепция терромагнитной обработки, включающая процессы деформационного старения, протекающие при обработке, и позволяющая прогнозировать её эффективность. Определены оптимальные режимы комплексной обработки магнитомягких материалов ТМО $\sim$  и ЛЛЮ. Они обеспечивают оптимизацию магнитной доменной структуры, 2–3 разовое повышение магнитной проницаемости, существенное снижение магнитных потерь (25–30%) и коэрцитивной силы (30–40%) магнитомягких анизотропных материалов.

*Работа поддержана проектом РФФИ № 11-02-00931 и УрО РАН №12-У-2-1018.*

### Список литературы

1. Драгошанский Ю.Н. Физические механизмы динамического измельчения доменной структуры электротехнических материалов. // ФММ. 1994. Т. 77. №1. С. 95-113.
2. Nozawa T., Mizogami M., Mogi H., Matsuo Y. Magnetic properties and dynamic domain behavior in grain-oriented 3% Si-Fe. // IEEE Trans. Magn. 1996. V 32. No 2. P.572–589.
3. Соколов Б.К., Драгошанский Ю.Н. Структурные барьеры и снижение магнитных потерь в анизотропных электротехнических сталях. // ФММ. 1991. №1. С. 92-102.
4. Зусман А.И., Арцишевский М.А. Терромагнитная обработка железоникелевых сплавов. – М.: Металлургия. 1984. 93с.
5. Драгошанский Ю.Н., Потапов А.П., Пудов В.И., Шулика В.В. Аморфные покрытия электротехнических материалов. // Материалы 46 междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности». Витебск. 2007. 2 ч. С. 236–239.
6. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И., Губернаторов В.В. Комплексные терромагнитная и лазерная обработки магнитных материалов. // ФММ, 2011, Т.111. № 5. С. 486-492.
7. Gubernatorov V.V., Dragoshanskii Yu.N., Sycheva T.S. et al. Formation of structure and properties during thermomagnetic and ion-beam treatments of soft magnetic materials. // Solid State Phenomena. 2011. V.168-169. No 4. P. 223–226.
8. УДК 669.1.782:537.623