

## **ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА Fe-Si МАТЕРИАЛОВ**

**Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н.**

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.*

*rudov@imp.uran.ru; drago@imp.uran.ru*

### **Введение**

При производстве электротехнических сталей (ЭТС) формируется острая кристаллографическая и магнитная текстуры, приводящие к появлению крупных кристаллитов (до 50 мм), магнитных доменов и вихретоковым магнитным потерям (до 85% от полных). Новый класс магнитомягких материалов – ленты аморфных и нанокристаллических сплавов на основе Fe и Co также имеют большую ширину магнитных доменов. Улучшить физические свойства этих материалов можно только при реализации перспективных комплексных способов и технологий воздействия на их кристаллическую и магнитную структуру, обеспечивающих существенное превышение суммарного результата, достигаемого на отдельных этапах обработки материала [1,2].

### **Материалы и методика эксперимента**

Исследования проводили на стандартных полосовых образцах ЭТС, содержащих 3 мас.% кремния в железе и имеющих высокую степень совершенства ребровой кристаллографической текстуры (110)[001], при которой индукция в магнитном поле 800 А/м составляла 1,88-1,91 Тл. Образцы заводского производства марок 3408-3409 толщиной 0,27мм имели размеры зёрен 12-22 мм вдоль направления прокатки. В качестве магнитоактивных электроизоляционных покрытий на сталь ионно-плазменным методом осаждали оксиды или нитриды ряда элементов, радиус ионов которых в растворах замещения меньше, чем у железа – бор, алюминий, титан, хром. Они имели коэффициенты теплового линейного расширения от  $(5...8) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ( $\text{SiO}_2$ , AlN,  $\text{Si}_2\text{N}_4$ , CrO) до  $8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiN), существенно меньшие КТЛР= $13 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  железо-кремнистой Fe-3%Si стали. Последующий отжиг стальной ленты с покрытием выполняли при температуре 400-600 °С, с изотермической выдержкой 5-20 минут и охлаждением до комнатной температуры в переменном магнитном поле напряженностью 1-5 кА/м, частотой 30-80 кГц, со скоростью 50-200°С/мин. Локальную лазерную обработку (ЛЛО) поверхности стали с одноосной магнитной анизотропией проводили в виде узких 0,2 мм шириной зон поперёк оси текстуры с промежутками между зонами лазерного воздействия, меньшими размера зерен.

### **Экспериментальные результаты и их обсуждение**

При формировании в ЭТС покрытием плоскостных растяжений преобладает продольная составляющая, её наличие добавляет к одноосной кристаллографической одноосную магнитную анизотропию. Это вызывает уменьшение объёма поперечно намагниченных 90° доменов и ширины продольно намагниченных 180° доменов, следовательно, снижается скорость движения доменных границ и вихретоковая составляющая магнитных потерь при перемагничивании. Высокую эффективность изоляционных покрытий из оксидов и нитридов Ti, Si, Al, Cr обеспечиваем за счет повышения их адгезии к металлу заменой обычного метода растворной керамики, с нанесением, сушкой и спеканием изоляционного раствора, методом ионно-плазменного осаждения покрытий на ленту стали. Новый метод приводит к однородному продольному растяжению металла  $\sim 0,7-1,0 \text{ кг/мм}^2$ , не вызывая появления в нём зон внутреннего окисления [2].

Последующим отжигом стальной ленты с покрытием, выполненным в режиме высокочастотной термомагнитной обработки (ТМО), дестабилизировали магнитную доменную структуру, обычно возникающую в материале, когда при его охлаждении каждый домен испытывает локальную ТМО в магнитном поле собственной намагниченности [3,4]. Дестабилизация доменов повышает подвижность доменных границ и снижает как гистерезисную, так и вихретоковую составляющие магнитных потерь.

Дальнейшее уменьшение ширины продольных доменов осуществляется лазерной обработкой. Формируемые при ЛЛО поперечно ориентированные узкие зоны тепловой деформации сжатия и растягивающие напряжения в межзонных промежутках приводят к уменьшению размеров  $180^\circ$  доменов и к возникновению клиновидных доменов – зародышей перемагничивания. В результате снижается скорость движения доменных границ и магнитные потери при перемагничивании материала. Эффект ЛЛО увеличивается в случае одномоментного нанесения лазерных зон на всю ширину ленты, а также с ростом степени совершенства магнитной и кристаллографической текстуры стали, обеспечивая снижение ширины полосовых  $180^\circ$  доменов в 2-3 раза (рис. 1 а,б,в).



Рисунок 1- Магнитная доменная структура ЭТС до (а), после (б) ЛЛО и в зоне (в) ЛО.  
1– $180^\circ$  полосовые домены; 2–граница между доменами; 3–зона ЛО и измельченные домены;

4–полосы скольжения и примыкающие к ним  $180^\circ$  полосовые (1) и клиновидные домены (5) – зародыши перемагничивания; ↑– направление намагниченности доменов [001]

Результаты применения комбинированной деформационно-текстурирующей обработки лент ЭТС толщиной 0,27 мм марок 3408-3409, приведены в таблице.

Таблица -Магнитные потери при различных режимах ТМО и ЛЛО в ЭТС

№	Параметры обработки	Исходные свойства	Конечные свойства	Эффект обработки
	T, °C-Н, кА/м-W/V, Дж/мм	$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	$\Delta P_{1,7/50}$ , %
1	400 – 1,8 – <0,01	1,12	1,04	7,1
2	420 – 1,8 – <0,01	0,99	0,87	12,1
3	430 – 1,8 – <0,01	1,05	0,89	15,2
4	440 – 1,8 – <0,01	1,05	0,92	12,4
5	460 – 1,8 – <0,01	0,97	0,89	8,2

$P_{1,7/50}$  – магнитные потери при индукции 1,7 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц.

Таблица показывает, что применение комплекса деформационных воздействий – продольного растяжения, дестабилизации и дробления доменов, создаваемых магнитоактивным электроизоляционным покрытием, термообработкой в высокочастотном магнитном поле и ЛЛО приводит при оптимальном подборе режимов обработки к 12-15 % снижению магнитных потерь в анизотропных ЭТС.

Однако в зонах ЛЛО формируются напряженные состояния (рис.1 в), что требует проведения отжига материала. В результате эффект от лазерной обработки стали снижается в 2 раза (при 600-650 °C) и полностью исчезает (при 800-850°C) [5,6].

Перспективное решение этой проблемы связано с введением в зоны ЛЛО стали мелкодисперсных примесных дефектов из слабомагнитных веществ [6].

Термостабилизацию зон ЛЛО проводили на стали марки 3407 ( $B_{800}=1,89$  Тл, толщина 0,27 мм). В качестве дефектов применяли веществ с намагниченностью насыщения 100-300 Гс, в частности, бор содержащий магний-фосфат в виде порошка, насыпаемого на поверхность листов или в составе покрытия. Отжиг проводили при 500-800°C. Эффект от ЛЛО и частичного расплава примесных дефектов составляет 13 % при 700 °C, а от обычной ЛЛО в два раза меньше (7 %). При 800 °C результаты

обычной ЛЛО практически исчезают, а в условиях применения примесных дефектов снижение магнитных потерь составляет 11%.

Однако наибольший эффект снижения магнитных потерь АЭС (до 17 % по  $P_{1,7/50}$ ) можно достичь, применяя на заключительной стадии обработки термомагнитный отжиг [7]. Отжиг в продольном магнитном поле повышает одноосную магнитную анизотропию элемента магнитопровода, усиливая действие растягивающих напряжений, возникающих между зонами сжатия от ЛЛО.

### Заключение

Как показывают результаты исследований, в процессе ЛЛО введение частиц слабомагнитных веществ в зоны её воздействия обеспечивает термостабильность эффекта этих зон, тем самым, позволяя сохранять сниженный уровень магнитных потерь сталей и элементов магнитопровода, подвергаемых высокотемпературному отжигу для снятия краевого наклёпа, возникающего при их вырезке.

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

### Список литературы

1. Iuchi T., Yamaguchi S., Ichiyama T. et al. Laser irradiation of sheet electrical steel. – J. Iron and Steel Inst. Japan. -1982. -V.68, №5. – P. 224.
2. Драгошанский, Ю.Н. Оптимизация доменов и снижение магнитных потерь электротехнической стали активным покрытием и лазерной обработкой / Ю.Н. Драгошанский, В.И.Пудов, Л.С. Каренина // Известия РАН. Серия: физическая. – 2013.– Т. 77, № 10. – С. 1496–1498.
3. Пудов, В.И. Перспективность применения аморфнокристаллических покрытий для магнитомягких сплавов / В.И.Пудов, Ю.Н. Драгошанский // Упрочняющие технологии и покрытия. –2013. – № 8. – С. 44–48.
4. Драгошанский, Ю.Н. Улучшение магнитной структуры и свойств магнитомягких сплавов при модификации их поверхности / Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов // Физика и химия обработки материалов,. – 2013. – №3. – С. 48–52.
5. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Способ улучшения магнитных свойств анизотропной электротехнической стали лазерной обработкой / Патент РФ №2501866. Бюл. изобр. 2013. №35.
6. Пудов, В.И. Эффект примесной термостабилизации зон лазерного воздействия на анизотропные магнитомягкие материалы / В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский // Доклады академии наук. Серия: техническая физика. – 2013. – Т. 453, № 2. – С. 159–161.
7. Драгошанский, Ю.Н. Магнитные свойства электротехнической стали при эффективных деформационно-текстурирующих воздействиях / Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов // Вестник ТГУ. Серия: Естеств. и тех. науки.– 2016. – Т.21, В.3. – С. 974–977.