

УДК 621.9.048:621.373.826.038.825

## Влияние лазерного облучения на эксплуатационные характеристики электротехнических сталей анизотропного класса

© 2006 В.Ю.Милосердин, А.Ю.Мищенко, В.Т.Самосадный

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

E-mail: fiteo24@mail.ru; miloserdin@atomic.mephi.ru

Поступила в редакцию 27 марта 2006 г., окончательный вариант — 28 июня 2006 г.

Исследовано влияние лазерного скрайбирования поверхности анизотропных электротехнических сталей на их доменную структуру и магнитные характеристики. Показано, что в зависимости от поглощаемой поверхностью образца энергии, определяемой режимом лазерного облучения, возможно протекание процессов дробления доменной структуры, образования расплава и испарения металла. Определен режим высокопроизводительной лазерной обработки, приводящий к улучшению всех эксплуатационных магнитных характеристик сталей.

Effects of laser scribing on the domain structure and magnetic properties of anisotropic transformer steels have been investigated. Depending on the absorbed energy of laser radiation determined by the irradiation regime, processes of the reduction of domain structure, melt formation, and metal evaporation are possible. High efficient regime of laser treatment has been established which leads to the improving of the all exploitation magnet properties of transformer steels.

### Введение

Работа посвящена поиску методики снижения потерь на перемагничивание в электротехнических сталях анизотропного класса. Из работы [1] известно, что к снижению потерь на перемагничивание приводит дробление доменов при сохранении параметров, характеризующих магнитную текстуру и магнитную неоднородность ферромагнетика с магнитной анизотропией. Это уменьшение связано со снижением потерь на вихревые токи, пропорциональных площади поверхности домена. Однако некоторые типы внешнего воздействия, вызывающие дробление доменов, приводят к эффективному увеличению параметров магнитной неоднородности за счет образования нерегулярных дефектов и возникновения дополнительных напряжений кристаллической решетки ферромагнетика.

Как известно, основными экспериментальными параметрами, характеризующими намагничивание

материалов, являются  $B_{100}$  — индукция во внешнем поле 100 А/м,  $B_{2500}$  — индукция в поле 2500 А/м и  $P_{1,7/50}$  — удельные потери мощности на перемагничивание при индукции 1,7 Тл и промышленной частоте 50 Гц. Возникновение включений и напряжений приводит, прежде всего, к уменьшению параметра  $B_{100}$  из-за влияния дополнительных механических напряжений на кривую намагничивания и  $P_{1,7/50}$  из-за увеличения доли необратимых процессов намагничивания.

Основными методами внешнего воздействия на образцы являются механическое скрайбирование поверхности, электрическая эрозия и лазерная обработка.

Наиболее известной методикой механического скрайбирования является использование алмазной иглы. В работе [2] описана методика, предусматривающая царапание поверхности образцов алмазной иглой диаметром 0,05 мм, что приводило к снижению потерь на перемагничивание примерно на 2%, однако сам процесс скрайбирования техноло-

гически неудобен из-за низкой производительности и поэтому не получил сколько-нибудь широкого распространения.

Метод скрайбирования с помощью электрической дуги также подробно рассмотрен в работе [2]. Недостатком данного метода является чрезвычайно низкая производительность и заметный дрейф параметров в ходе проведения технологического процесса, а улучшение эксплуатационных характеристик оказалось крайне незначительным (3-5% от исходной величины).

От подобных недостатков свободен метод лазерного скрайбирования электротехнических сталей, заключающийся в нанесении на поверхность материала системы кратеров (дорожек несквозных отверстий). Впервые исследование влияния лазерного скрайбирования на эксплуатационные характеристики электротехнических сталей анизотропного класса было проведено в работе [3]. Образцы электротехнической стали состава, содержащие 3% кремния, облучались двумя типами лазеров, и было показано, что максимальное снижение потерь на перемагничивание достигалось при величине параметра  $W/DI=0,25$  Дж/см<sup>2</sup>, где  $W$  — энергия падающего излучения,  $D$  — расстояние между соседними кратерами по направлению, перпендикулярному оси прокатки образца,  $I$  — расстояние между соседними дорожками кратеров. Величина относительного снижения потерь при использовании оптимального режима облучения достигала  $15\pm 1\%$ . В работе [4] была изучена связь между снижением потерь на перемагничивание и скоростью сканирования непрерывного лазера. Там же было показано, что при низких скоростях скрайбирования при использовании CO<sub>2</sub>-лазера наблюдается некоторое снижение потерь на перемагничивание. Однако такой режим облучения не является единственно возможным, так как он недостаточно технологичен и не позволяет достичь значительного выигрыша в изменении эксплуатационных характеристик.

Целью данной работы является подбор оптимальных режимов лазерного облучения анизотропных сталей, приводящего к максимальному снижению потерь на перемагничивание без ухудшения индукционных характеристик  $B_{100}$  и  $B_{2500}$ , и анализ протекающих при этом процессов.

### Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на нескольких сериях образцов. Первая серия экспериментов проводилась с использованием лазера, работающего в режиме свободной генерации на

длине волны  $\lambda=1,06$  мкм при длительности импульса  $3,7\cdot 10^{-3}$  с, частоте следования импульсов  $\sim 3$  Гц и мощности одного импульса 20 Вт. Образцы представляли собой полосы Эпштейна ( $270\times 30\times 0,3$  мм), пучок излучения фокусировался в пятно размером  $3\cdot 10^{-2}$  см. Воздействием импульсами лазерного излучения на образец наносилась система кратеров диаметром  $3\cdot 10^{-3}$ - $10^{-2}$  см и глубиной не более 0,04 мм, причем в одну и ту же точку подавались по 2 импульса. Расстояние между соседними дорожками кратеров составляло 3-6 мм. После нанесения дорожек образцы подвергались термическому отжигу при  $T=850^\circ\text{C}$  в течение  $\sim 1$  ч в вакууме.

Во второй серии экспериментов использовался лазер, работающий в режиме модулированной добротности. Длительность импульса составляла от  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  с, частота следования импульсов 15 Гц, мощность в импульсе —  $\sim 10$  кВт. Облучение проводилось по той же схеме, что и в первой серии.

В третьей серии экспериментов применялся наносекундный импульсный лазер ЛТИ-502, работающий в режиме с длительностью импульса  $20\pm 5$  нс, частотой следования импульсов 3,7 кГц при токе — 34 А. Облучение образцов электротехнических сталей производилось по той же методике, как и в первых двух сериях, однако из-за отсутствия области плавления отжиг облученных образцов не проводился.

Магнитные измерения проводились в три этапа. Сначала измерялись стандартные характеристики исходных образцов, затем проводились измерения характеристик образцов, прошедших лазерную обработку, а на третьем этапе — характеристики образцов, прошедших лазерную обработку с последующим отжигом (кроме образцов, облученных лазером ЛТИ-502). Следует отметить, что для исследования полос Эпштейна, облученных лазерами в режимах модулированной добротности и свободной генерации, отбирались образцы электротехнических сталей анизотропного класса марки 3407, изготовленные по так называемой “медной” технологии. Для точной систематизации полученных данных отобранные образцы имели близкие по значению потери на перемагничивание, составляющие  $P_{1,7/50}=1,15\pm 0,03$  Вт/кг, и величины магнитной индукции  $B_{100}=1,658\pm 0,07$  Тл. Образцы для третьей серии экспериментов (облучение лазером ЛТИ-502) изготавливались по медной технологии (№11-14) и по сульфонитридной (№15-18).

### Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты по измерению эксплуатационных характеристик образцов для I

Таблица 1

Магнитные характеристики исходных образцов для I серии экспериментов			
Магнитные характеристики	№ образца		
	1	2	3
$B_{100}$ , Тл	1,663	1,652	1,665
$B_{2500}$ , Тл	1,932	1,928	1,937
$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	1,14	1,15	1,14

серии экспериментов (облучение лазером в режиме свободной генерации) приведены в табл.1 (исходные образцы) и табл.2 (образцы после облучения). Из сравнения приведенных в них данных видно, что лазерное облучение приводит к уменьшению величин магнитной индукции  $B_{100}$ ,  $B_{2500}$  и увеличение  $P_{1,7/50}$ . Это связано с тем, что вследствие появления расплава в процессе лазерной обработки по сечению образца, перпендикулярному плоскости листа, возникают неоднородные изгибные механические напряжения. При проведении рекристаллизационного отжига эти напряжения должны исчезать, а дробление доменов должно оставаться таким же, как после обработки. Из результатов по изменению магнитных характеристик после лазерного облучения в режиме свободной генерации и

Таблица 3

Магнитные характеристики образцов после облучения лазером в режиме свободной генерации и отжига при 850°C в течение 1 ч			
Магнитные характеристики	№ образца		
	1	2	3
$B_{100}$ , Тл	1,701	1,693	1,706
$B_{2500}$ , Тл	2,023	1,981	1,994
$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	1,02	1,03	1,03

отжига (табл.3) следует, что такая обработки приводит к улучшению всех параметров по сравнению с исходными значениями, связанному с релаксацией исходных механических напряжений в процессе отжига. Медленное охлаждение после отжига не позволяет проявиться закалочным эффектам, что исключает появление термических напряжений, способных разрушить образовавшуюся доменную структуру. Неоднородные поля напряжений внутри доменов практически не возникают, а рост доменов также не происходит.

В табл.4 приведены магнитные характеристики исходных образцов для экспериментов II серии, в табл.5 — характеристики образцов, прошедших лазерное облучение в режиме модулированной добротности и параметры этого облучения, а в табл.6

Таблица 2

Магнитные характеристики образцов, облученных лазером в режиме свободной генерации, и параметры облучения

№ образца	$B_{100}$ , Тл	$B_{2500}$ , Тл	$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	Шаг, мм	Расстояние между дорожками, мм	Диаметр кратера, мм	Глубина кратера, мкм
1	1,112	1,718	1,55	0,1±0,02	3±0,1	0,05±0,01	60±30
2	1,151	1,724	1,53	0,1±0,02	5±0,1	0,07±0,01	60±25
3	1,138	1,740	1,58	0,1±0,02	5±0,1	0,03±0,01	150±40

Таблица 4

Магнитные характеристики исходных образцов для II серии экспериментов

Магнитные характеристики	№ образца							
	4	5	6	7	8	9	10	
$B_{100}$ , Тл	1,661	1,656	1,653	1,662	1,664	1,659	1,660	
$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	1,17	1,16	1,13	1,15	1,14	1,15	1,15	

Таблица 5

Магнитные характеристики образцов, облученных лазером в режиме модулированной добротности, и параметры облучения

Магнитные характеристики	№ образца							
	4	5	6	7	8	9	10	
$B_{100}$ , Тл	1,096	1,087	1,670	0,930	1,070	0,525	0,740	
$P_{1,7/50}$ , Вт/кг	1,37	1,35	1,29	1,44	1,29	1,72	1,12	
Глубина кратера, мкм	20±5	20±5	70±20	70±20	100±30	100±30	200±40	
Шаг, мм	0,05±0,01	0,1±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,5±0,01	
Расстояние между дорожками, мм	2±0,1	6±0,1	3±0,1	2±0,1	6±0,1	3±0,1	6±0,1	
Энергия излучения, Дж/имп.	0,045±0,005	0,045±0,005	0,055±0,005	0,055±0,005	0,15±0,01	0,20±0,02	0,39±0,04	

Таблица 6

Магнитные характеристики образцов после облучения лазером в режиме модулированной добротности и отжига при 850°C в течение 1 ч

Магнитные характеристики	№ образца						
	4	5	6	7	8	9	10
$B_{100}$ Тл	1,680	1,650	1,620	1,654	1,620	1,531	1,586
$P_{1,7/50}$ Вт/кг	1,16	1,16	1,19	1,12	1,19	1,18	1,05

Таблица 7

Магнитные характеристики исходных образцов для III серии экспериментов

Магнитные характеристики	№ образца							
	11	12	13	14	15	16	17	18
$B_{100}$ Тл	1,893	1,885	1,848	1,886	1,904	1,947	1,930	1,896
$P_{1,7/50}$ Вт/кг	1,06	1,05	1,18	1,06	1,16	1,13	1,17	1,26

Таблица 8

Магнитные характеристики образцов, облученных лазером ЛТИ-502, и параметры облучения. Длительность импульса 20±5 нс

Магнитные характеристики	№ образца							
	11	12	13	14	15	16	17	18
$B_{100}$ Тл	1,895	1,886	1,872	1,879	1,927	1,95	1,934	1,929
$P_{1,7/50}$ Вт/кг	0,96	0,97	1,05	0,99	1,01	0,95	0,98	1,00
Частота, кГц	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Количество импульсов	1	2	4	10	1	10	4	2
Глубина кратера, мкм	1±1	5±1	11±1	17±1	1±1	17±1	11±1	5±1
Расстояние между дорожками, мм	3±0,1	3±0,1	3±0,1	3±0,1	3±0,1	3±0,1	3±0,1	3±0,1
Шаг, мкм	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5
Ток, А	34	34	34	34	34	34	34	34

— данные по изменению магнитных характеристик после облучения и рекристаллизационного отжига при температуре 850°C. Из представленных данных следует, что для всех образцов (кроме образца №10) потери на перемагничивание заметно возрастают после облучения, а величина  $B_{100}$  уменьшается для всех без исключения образцов. Причины этого, по-видимому, такие же, как и в случае лазерного облучения в режиме свободной генерации. Однако для образца №10, где наблюдается снижение потерь на перемагничивание, величина  $E=0,39±0,04$  Дж/имп. очень велика и происходит сильное испарение металла, что приводит к практически полной перестройке доменной структуры ферромагнетика. Образец настолько быстро нагревается до температуры испарения, что размер области испарения становится соизмеримым с эффективным размером области магнитной неоднородности.

Из табл.6 следует, что величина потерь для образцов, подвергавшихся лазерному облучению и отжигу, близка к потерям в исходных образцах (±5%).

При невысоких энергиях импульса (до 0,15 Дж/имп.) в результате отжига механические напряжения исчезают, и происходит возврат величины  $B_{100}$  до исходного значения с точностью до 2-3%. При больших энергиях импульса возврат  $B_{100}$  протекает не полностью, так как возникающие при испарении образца внутренние напряжения не полностью релаксируют в процессе отжига. В образце №10 потери на перемагничивание уменьшаются на 8%, что связано с формированием новой доменной структуры, характеризующейся существенно меньшим эффективным размером домена.

Эксплуатационные магнитные характеристики исходных и облученных лазером ЛТИ-502 образцов приведены в табл.7, 8, относительные изменения эксплуатационных магнитных характеристик этих образцов приведены в табл.9.

Из представленных данных видно, что скрайбирование с применением лазера ЛТИ-502 приводит к существенному снижению потерь на перемагничивание для всех без исключения образцов. Это

Таблица 9

Относительное изменение магнитных характеристик исходных и облученных лазером ЛТИ-502 образцов

Относительное изменение магнитных характеристик	№ образца							
	11	12	13	14	15	16	17	18
$(\Delta B_{100\text{обл}}/\Delta B_{100\text{необл}})\cdot 100\%$	+0,1%	+0,05%	+1%	+1%	+1%	-0,1%	+0,2%	+2%
$(\Delta P_{1,7/50\text{необл}}/\Delta P_{1,7/50\text{обл}})\cdot 100\%$	9,7%	7,6%	11%	6,6%	13%	16%	16,8%	20,7%

происходит вследствие того, что при таком режиме облучения магнитная текстура не разрушается, а новая доменная структура характеризуется меньшим эффективным размером доменов, так как из-за малой длительности импульса в этом случае в образцах не успевает формироваться более крупная (по сравнению с образцами, облученными в первых двух сериях экспериментов) область магнитной неоднородности. Оценки показывают, что эффективный размер домена уменьшается примерно на 40%, а

размер магнитной неоднородности  $\sqrt{\langle I_m^2 \rangle}$  не изменяется. Кроме того, из табл. 7-9 видно, что для образцов, приготовленных по сульфонитридной технологии, лазерная обработка приводит к более существенному улучшению эксплуатационных магнитных свойств, что, по-видимому, связано с благоприятной исходной доменной структурой. Анализ данных табл. 9 показывает, что для электротехнических сталей, изготовленных по сульфонитридной технологии, оптимальным режимом облучения лазером ЛТИ-502 является режим обработки образца №18, а для сталей, изготовленных по медной технологии, — режим обработки образца №13.

## Выводы

1. Экспериментально изучены физические процессы, происходящие на поверхности образца под воздействием лазерного излучения. Показано, что наряду с эффектом дробления доменов может происходить образование расплава и испарение металла.

2. Установлено, что при обработке образца излучением лазера, работающего в режиме свободной генерации, на поверхности образуется

расплав, что приводит к появлению в образце изгибных напряжений. Однако из-за того, что при таком режиме облучения не происходит испарения расплава, последующий отжиг вызывает снятие этих напряжений и не влияет на вызванное лазерным облучением дробление доменов, что в итоге приводит к снижению потерь материала на перемагничивание.

3. При обработке материала излучением лазера, работающего в режиме модулированной добротности, при котором поглощаемая материалом энергия существенно возрастает, возможно не только образование расплава, но и испарение части материала. Это приводит к сохранению в образце напряжений, не релаксирующих при температуре рекристаллизационного отжига, и необратимому ухудшению величин, характеризующих индукцию в различных внешних полях.

4. Обработка образца излучением импульсного наносекундного лазера приводит только к эффекту дробления доменов при небольшом увеличении числа дефектов.

5. Определен режим высокопроизводительной лазерной обработки, при котором происходит улучшение абсолютно всех эксплуатационных характеристик. Например, потери на перемагничивание уменьшаются до 21%.

## Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971, 173 с.
2. Sato T., Nozawa T. Decreasing of magnetization losses in anisotropic magnetic steels. IEEE Trans.Magnet., 1978, v.14, p.350-356.
3. Nozawa T., Sato T. The decreasing of magnetic losses in silicon after laser scribing. IEEE Trans.Magnet., 1979, v.15, p.942-946.
4. Iuchi T., Yamaguchi S., Ichiyama T. Laser proceeding for reducing core loss of grain oriented silicon steel. J.Appl.Phys., 1982, v.53, No.3, p.2410-2414.