

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

© 2003 С.В. Каюков¹, Е.Г. Зайчиков¹, И.А. Дудоров¹, С.А. Крысанов², В.Н. Поляков²

¹ Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

² Новолипецкий металлургический комбинат

Рассмотрен способ создания структурных барьеров с целью снижения магнитных потерь в анизотропной электротехнической стали (АЭС) с помощью лазерного излучения. При использовании для обработки АЭС режима с акустооптической модуляцией добротности получено уменьшение индукции B_{100} менее чем на 1% при снижении магнитных потерь на 10...12%. Указаны оптимальные значения параметров лазерной обработки АЭС: частота импульсов f , расстояние между пятнами в полосе d , расстояние между полосами D .

Введение

С увеличением производства электроэнергии быстро возрастает объем производства электротехнической стали. Качество стали этого класса определяется рядом свойств, зависящих от содержания кремния, типа и интенсивности кристаллической текстуры, совершенства кристаллической решетки, величины зерна, количества включений и степени их дисперсности, внутренних напряжений, толщины листа, состояния поверхности листа. Современные холоднокатанные анизотропные электротехнические стали (АЭС) имеют крупное зерно с острой ребровой текстурой (110) [001], при этом ось легкого намагничивания [001] ориентирована вдоль направления прокатки, что обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики стали.

Удельные магнитные потери $P_{1,7/50}$ (при индукции 1,7 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц) и магнитная индукция в слабых B_{100} и средних B_{800} полях (напряженность 100 А/м и 800 А/м) являются основными нормируемыми показателями качества АЭС. Обычно магнитные потери разделяют на две составляющие: гистерезисную и вихретоковую. Технология изготовления современных АЭС позволяет довести первую до минимального значения и доля вихретоковых потерь в них достигает 80%, поэтому дальнейшее повышение качества АЭС в основном связано с уменьшением вихретокового компонента потерь.

В [1] показано, что величина вихретокового компонента магнитных потерь δ пропорциональна E^2/ρ , где: E – напряженность электрического поля, ρ – удельное сопротивление. С другой стороны:

$$E \sim \frac{d\Phi}{dt} \sim v, \quad (1)$$

где v – скорость перемещения доменной стенки. Учитывая, то очевидное обстоятельство, что: $v \sim fN \sim Df$, где: N – количество доменов на единице длины пластины, f – частота перемагничивания, для магнитных потерь, из (1) можно записать:

$$\delta \sim \frac{D^2 f^2}{\rho}. \quad (2)$$

Таким образом, уменьшение ширины основных полосовых доменов должно приводить к заметному снижению магнитных потерь. Известно несколько способов уменьшения ширины основных доменов в АЭС:

- уменьшение среднего размера кристаллитов;
- отклонение направления [001] острой ребровой текстуры от плоскости листа на угол $\beta \approx 2^\circ - 3^\circ$;
- создание растягивающих напряжений вдоль оси [001];
- создание структурных барьеров.

Вопрос о практическом использовании последнего из способов активно обсуждается с начала 70-х годов [2]. Структурные барьеры

еры создаются за счет нанесения поперек направления прокатки канавок, деформации листа АЭС шариками, роликами, прокатки рельефными валками, дробеструйным наклепом. В отдельную группу следует выделить методы создания структурных барьеров с помощью лазерного излучения. Авторами [3, 4] отмечено, что непосредственно на участке термического воздействия возникает сложная лабиринтная структура дополнительных доменов, к которым примыкает зона отдельных призматических и клиновидных доменов.

Применительно к структурным барьерам, созданным под действием мощного лазерного излучения, в [5-7] по примеру [8] вводится комплексный параметр, имеющий размерность плотности энергии:

$$U = P\eta / VD, \quad (3)$$

где: P – мощность лазерного излучения, V – скорость сканирования лазерного пучка, D – расстояние между полосами обработки, η – коэффициент поглощения излучения обрабатываемой поверхностью. Параметр U является плотностью энергии излучения, усредненной по всей обрабатываемой площади листа. Эффект от дополнительной обработки АЭС обычно оценивают по $P_{1,7/50}$ и B_{100} . В соответствии с данными [5-7] с увеличением U эффект снижения магнитных потерь достигает максимума при $U = 2$ Дж/см², а затем уменьшается. При этом B_{100} монотонно падает. Авторы делают вывод, что оптимальному режиму лазерной обработки соответствует $U = 2$ Дж/см², при этом эффект снижения потерь составляет около 10%, а относительное снижение магнитной индукции не превышает 4%.

Как следует из анализа опубликованных данных, до сих пор отсутствует ясное представление о механизме формирования структурных барьеров при лазерном облучении и связи параметров, характеризующих изменения в металле, с параметрами излучения. В зависимости от временных, энергетических и пространственных характеристик излучения может иметь место испарение или плавление участков поверхности, нагрев с изменением состояния и структуры кристаллитов

или без такового, с протеканием локальной пластической деформации или без него, формирование остаточных напряжений по-разному распределенных в зоне воздействия и ее окрестности. В связи с этим задачу подбора режимов и условий лазерной обработки АЭС следует рассматривать как многопараметрическую оптимизационную задачу с несколькими критериями, главными из которых являются: максимальное уменьшение магнитных потерь $\delta_p(\%) = \Delta P_{1,7/50} / P_{1,7/50}$ и минимальное снижение индукции $\delta_B(\%) = \Delta B_{100} / B_{100}$.

В рамках настоящей работы принята модель измельчения основных доменов за счет роста тонких клиновидных доменов от границы барьера при перемагничивании. Исходя из этой модели, режимы лазерной обработки следует подбирать так, чтобы получить наибольшую величину градиентов температуры и напряжений в окрестности зоны фокусировки излучения и наибольшую величину скорости нагрева. При этом образования большого количества расплава в зоне воздействия следует избегать, т.к. это приведет к появлению нескомпенсированных растягивающих напряжений, деформации листа и ухудшению магнитных свойств.

Предельная длительность и плотность мощности излучения могут быть получены из простых теплофизических оценок. Приравняв для критического режима скорость перемещения фронта испарения и скорость тепловой волны в модели поверхностного нагрева полубесконечного тела для предельной плотности мощности q^* и длительности τ^* импульсов можно записать:

$$q^* \sim \frac{\rho L_v \chi}{z}, \quad \tau^* \sim \frac{z^2}{\chi}. \quad (4)$$

где: χ , L_v , ρ – температуропроводность, теплота испарения и плотность облучаемого металла, z – глубина лунки. Взяв для стали $\rho L_v = 5 \cdot 10^4$ Дж/см³, $\chi = 0,1$ см²/с при $z = 1 \dots 2$ мкм получим: $q^* \sim 5 \cdot 10^8$ Вт/см², $\tau^* \sim 0,1 \dots 0,4$ мкс.

Для реализации режимов воздействия такого типа целесообразно использовать Nd:YAG лазеры с акустооптической модуляцией добротности [8, 9]. В этом случае при

непрерывном перемещении сфокусированного лазерного пучка по обрабатываемой поверхности зоны воздействия представляют собой отдельные отпечатки округлой формы, расположенные вдоль направления перемещения на расстоянии d , определяемом частотой следования импульсов и скоростью развертки пучка. Совокупность отпечатков в одной строке должна формировать в стали единый структурный барьер. Определить, при каких значениях d это условие выполняется – одна из задач настоящей работы. В задачу работы входит также определение оптимальных значений частоты f следования импульсов, расстояния D между строками и диаметра облучаемого участка.

Описание эксперимента

Схема опытной установки приведена на рис.1. В качестве лазерного излучателя 1 использовался Nd:YAG лазер с непрерывной накачкой, работающий в режиме модуляции добротности. Для перемещения лазерного пучка по обрабатываемой поверхности могут быть использованы дефлекторы различных типов. Поскольку перемещение пучка должно происходить вдоль одной координаты, в настоящей работе использовался дефлектор, представляющий собой вращающееся многогранное зеркало 3 (далее – сканатор).

Требование соответствия максимального угла отклонения пучка и апертуры объектива выполняется, если $\alpha_1 = \alpha_0$. Для проведения эксперимента использовался сканатор в виде 18-гранной призмы ($\alpha_0 = 20^\circ$). Фокусировка лазерного пучка осуществлялась при помощи объектива 4 с фокусным расстоянием F . На схеме также обозначены: 2 – оптическая система преобразования пучка, 5 – обрабатываемый лист, перемещающийся со скоростью V_y . Если L – ширина обрабатываемой полосы, $2\alpha_0$ – полный угол отклонения пучка зеркалом 3, T – время прохождения пучком расстояния L , V_x – линейная скорость перемещения сфокусированного пучка поперек листа, то для этих параметров можно записать следующие очевидные соотношения:

$$L = 2\alpha_0 F; \quad T = \frac{\alpha_0}{\omega} \quad V_x = 2\omega F. \quad (5)$$

Расстояние d между пятнами в полосе и расстояние D между соседними полосами можно выразить через другие параметры обработки следующим образом:

$$d = \frac{2\omega F}{f}; \quad D = V_y \frac{\alpha_0}{\omega}, \quad (6)$$

где: f – частота следования импульсов, ω – угловая скорость вращения зеркала.

Производительность W лазерной обра-

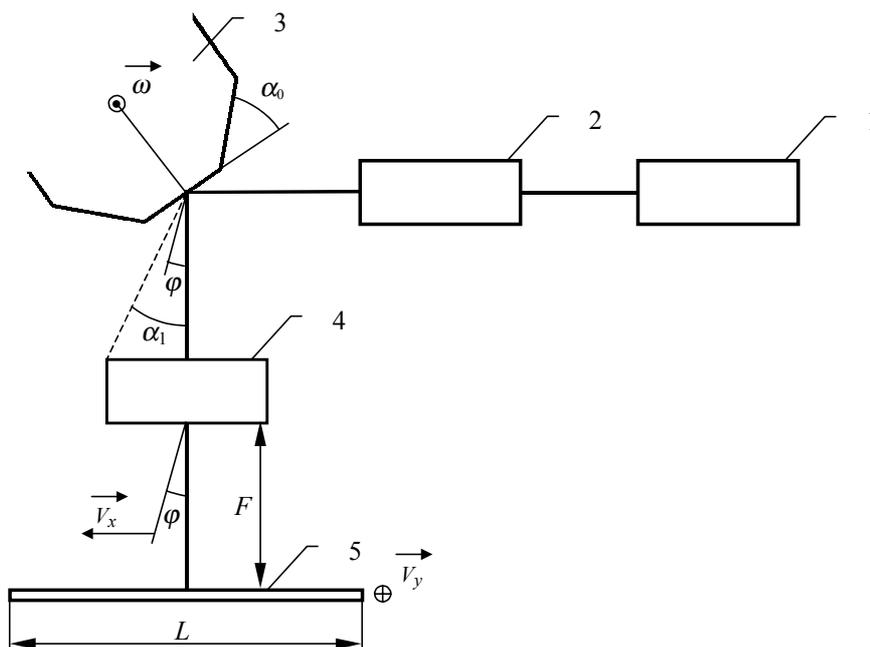


Рис.1. Схема опытной установки лазерной обработки электротехнической стали

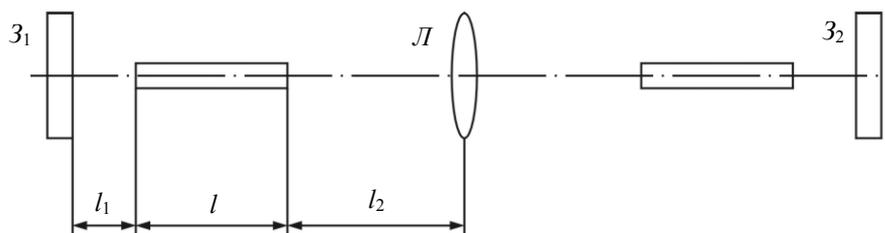


Рис.2. Эквивалентная схема резонатора

ботки естественно определить, как площадь поверхности листа, обрабатываемую за единицу времени:

$$W = V_x D = 2FV_y \alpha_0 = dDf. \quad (7)$$

Эквивалентная схема используемого в лазерном излучателе 1 резонатора показана на рис.2. Она представляет собой симметричный резонатор с двумя активными элементами, плоскими глухим и полупрозрачным зеркалами Z_1 и Z_2 и эквивалентной линзой L , заменяющей поворотное резонаторное зеркало (радиус кривизны поворотного зеркала $R=542$ мм). Длина плеч l_1 и l_2 составляет: $l_1 = 200$ мм, $l_2 = 365$ мм. Ватт-амперная характеристика для этой схемы показана на рис.3. Расходимость излучения при накачке 30 А составляет 6-7 мрад. Внесение в резонатор диафрагм диаметром 2,5 и 2,1 мм позволило уменьшить расходимость излучения до 3 мрад и 2 мрад соответственно. Ватт-амперные характеристики для этих случаев приведены на рис.4 и рис.5. Для модуляции добротности использовался акустооптический затвор МЗ-321.

В экспериментах использовались стандартные эпштейновские образцы (28 полосок АЭС размером $280 \times 30 \times 0,27$ мм каждая общим весом $\approx 0,5$ кг). Измерения $P_{1,7/50}$ и B_{100} проводились на аппаратах Эпштейна до и после обработки образцов лазерным излучением. Схема аппарата Эпштейна показана на рис.6. Намагничивающая обмотка w_1 образца соединяется последовательно с токовой обмоткой ваттметра, амперметром и источником переменного напряжения. Для контроля частоты переменного тока к источнику напряжения подключен частотомер. К измерительной обмотке w_2 образца параллельно присоединяются обмотка напряжения ваттметра, вольтметры среднего и действующего значений.

При измерениях применяют магнитную цепь в виде квадрата, составленного из пакетов полос при соединении их на углах внахлестку. При таком виде сборки полос в значительной степени снижается магнитное сопротивление на углах пакета и напряженность магнитного поля может быть опреде-

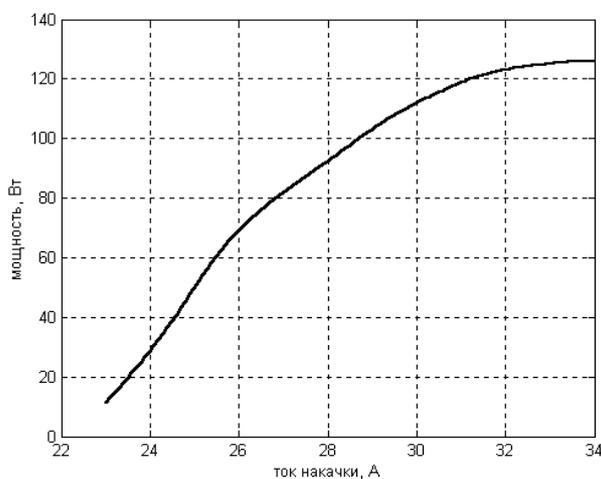


Рис.3. Ватт-амперная характеристика без диафрагмы

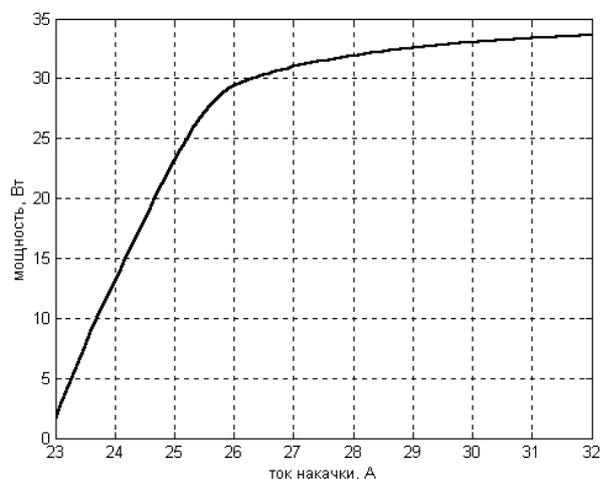


Рис.4. Ватт-амперная характеристика с диафрагмой диаметром 2,5 мм

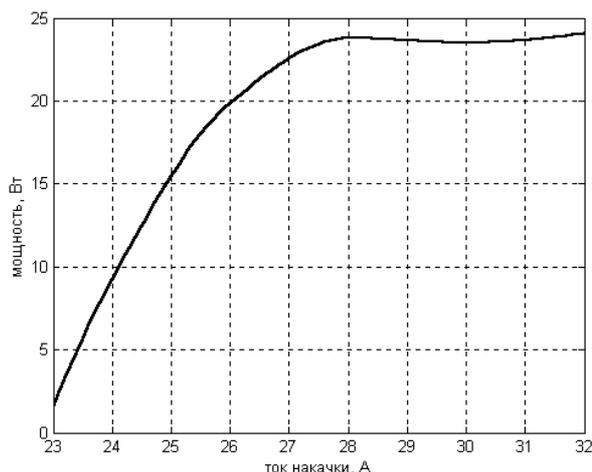


Рис.5. Ватт-амперная характеристика с диафрагмой диаметром 2,1 мм

лена с учетом небольшого изменения длины магнитного пути.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Влияние диаметра отпечатка

В табл.1 представлены режимы лазерной обработки трех образцов эпштейновских пластин и результаты измерений $P_{1,7/50}$ и B_{100} до и после обработки. В данном случае обработка проводилась с использованием в излучателе двухквантронного симметричного резонатора с $l_1 = 135$ мм и $l_2 = 365$ мм. Как видно из данных таблицы, на первом из образцов получено снижение магнитных потерь на 9,4%, однако при этом индукция упала на 1,7%. На втором образце относительное уменьшение потерь составило 11,0% при зна-

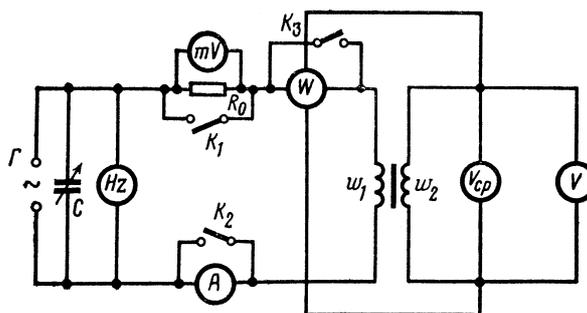


Рис.6. Принципиальная схема аппарата Эпштейна

чительно меньшем снижении индукции – 0,6%. В последнем случае была повышена частота следования импульсов с 10,1 кГц до 18,4 кГц. В связи с этим расстояние между пятнами уменьшилось с 0,6 мм до 0,46 мм, а расстояние между полосами – с 7,3 мм до 6,5 мм. Важно, что вследствие некоторого уменьшения пиковой мощности излучения уменьшился видимый диаметр пятна фокусировки с 0,25 мм до 0,2 мм. Для выявления причины наблюдаемых положительных изменений был обработан третий образец по режимам второго за исключением того, что почти вдвое была снижена расходимость излучения (с 11 мрад до 6 мрад), в результате чего видимый диаметр пятна уменьшился до 0,12 мм. Уменьшение расходимости было достигнуто за счет введения в резонатор диафрагмы диаметром 3 мм, что повлекло за собой снижение средней мощности с 150 Вт до 55 Вт при токе накачки 30 А, при этом плотность мощности в зоне фокусировки практически не изменилась. Как видно из табл.1, относительное уменьшение потерь практически не пре-

Таблица 1. Режимы лазерной обработки трех образцов эпштейновских пластин и результаты измерений $P_{1,7/50}$ и B_{100} до и после обработки

$P_{ср}$, Вт	$f_{АОЗ}$, кГц	2θ , мрад	D , мм	d , мм	d_0 , мм	$P_{1,7/50}$		B_{100}	
						до / после	δ , %	до / после	δ , %
1.									
150	10,1	11	7,3	0,6	0,25	1,06 / 0,96	9,4	1,76 / 1,73	1,7
2.									
150	18,4	11	6,5	0,46	0,2	1,09 / 0,97	11	1,75 / 1,74	0,6
3.									
55	18,4	6	6,5	0,46	0,12	1,08 / 0,976	9,63	1,76 / 1,755	0,28

Таблица 2. Результаты второй серия экспериментов, проведенных для другой конфигурации резонатора: $l_1 = 200$ мм и $l_2 = 365$ мм

1.

$P_{\text{ср}}$, Вт	$f_{\text{АОЗ}}$, кГц	2θ , мрад	D , мм	d , мм	d_0 , мм	$P_{1,7/50}$		B_{100}	
						до / после	δ_p , %	до / после	δ_b , %
112	12,4	6	6,2	0,48	0,22	1,10 / 0,97	11,8	1,75 / 1,73	1,14

2.

$P_{\text{ср}}$, Вт	$f_{\text{АОЗ}}$, кГц	2θ , мрад	D , мм	d , мм	d_0 , мм	$P_{1,7/50}$		B_{100}	
						до / после	δ_p , %	до / после	δ_b , %
92	12,4	6	7,1	0,42	0,2	1,10 / 0,98	10,9	1,74 / 1,73	0,57

3.

$P_{\text{ср}}$, Вт	$f_{\text{АОЗ}}$, кГц	2θ , мрад	D , мм	d , мм	d_0 , мм	$P_{1,7/50}$		B_{100}	
						до / после	δ_p , %	до / после	δ_b , %
29	12,4	3	7,2	0,44	0,16	1,10 / 0,98	10,9	1,75 / 1,74	0,57

терпело изменений, но эффект снижения индукции заметно уменьшился. Отсюда был сделан вывод о том, что из соображений минимизации снижения B_{100} целесообразно уменьшать размер зоны фокусировки излучения при сохранении пиковой плотности мощности на уровне 50 кВт.

Аналогичные тенденции наблюдаются во второй серии экспериментов, проведенных для другой конфигурации резонатора: $l_1 = 200$ мм и $l_2 = 365$ мм, результаты которых представлены в табл.2. Весьма показательным является второй режим из табл.2, поскольку он обеспечивает более 10% уменьшение потерь и менее, чем 1% снижение индукции при токе накачки 28 А и мощности излучения немногим более 90 Вт.

На рис.7 представлены результаты экспериментов с резонатором, собранным по основной схеме: $l_1 = 200$ мм, $l_2 = 365$ мм с диафрагмой 2,1 мм. Значения D и d были заданы следующими: $D = 7$ мм, $d = 0,44$ мм. Поскольку диаметр d_0 зоны фокусировки излучения в фокальной плоскости объектива пропорционален расходимости θ , фокусному расстоянию объектива F и величине Δ расстройки телескопа, измеренной как расстояние между фокальными плоскостями обоих компонентов последнего: $d_0 \sim \theta F \Delta$, то в данном эксперименте диаметр отпечатков менялся за счет изменения величины Δ . Видно, что наибольшая величина δ_p достигается при наиболее острой фокусировке. Снижение индукции при этом не превышает 1%.

Влияние частоты следования импульсов

Средняя и пиковая мощность зависит от f , поэтому для выявления этой зависимости проведены измерения δ_p и δ_b при различных f . Согласно (6) ω и V изменялись при изменении f так, чтобы сохранить постоянными значения d и D . Параметры работы излучателя соответствовали режиму: $P_{\text{ср}} = 92$ Вт, без диафрагмы. Зависимости от частоты относительного уменьшения потерь $\delta_p(\%)$ и снижения индукции $\delta_b(\%)$ приведены на рис.8.

Из данных рис.8 видно, что при увеличении частоты импульсов от 8 кГц эффект уменьшения магнитных потерь сохраняется на уровне более 10% до $f = 24$ кГц. При этом

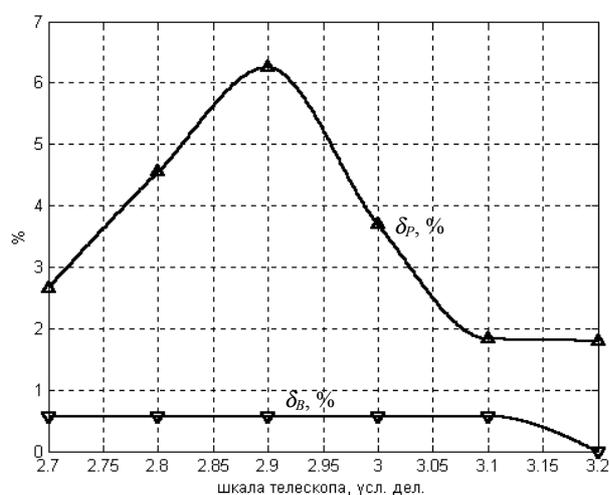


Рис.7. Зависимость δ_p , % и δ_b , % от фокусного расстояния, выставленному в условных делениях по откалиброванному телескопу

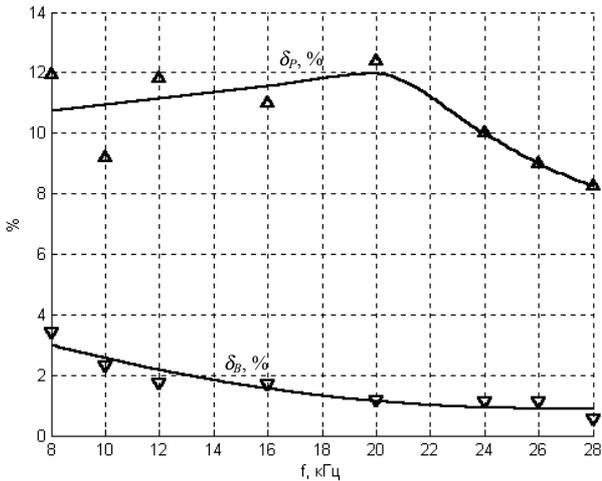


Рис.8. Зависимость δ_p , % и δ_B , % от частоты АОЗ

он слабо растет до $f = 20$ кГц и затем падает до 8% при $f = 28$ кГц. Величина δ_B имеет вид монотонно убывающей функции на всем интервале изменения f . Из приведенных данных следует, что оптимальные значения частоты импульсов находятся в интервале $f = 18 \dots 22$ кГц, т.к. при этом δ_p сохраняется на уровне 10...12%, а значение δ_B становится близким к 1%. Производительность лазерной обработки при $f = 20$ кГц превышает 3 м²/мин.

Влияние расстояния между пятнами в полосе

Как следует из (6), пропорционально изменяя V и ω , можно менять расстояние d , сохраняя все остальные параметры неизменными. В эксперименте был использован режим с внутрирезонаторной диафрагмой диаметром 2,5 мм, при этом средняя мощность излучения составила 32 Вт, расходимость – 3 мрад. Зависимости относительного уменьшения потерь δ_p (%) и снижения индукции δ_B (%) приведены на рис.9.

Как видно из данных рис.9, эффект уменьшения потерь при малых значениях d сохраняется на уровне не менее 10% и становится меньше этого значения при $d > 0,5$ мм. В интервале $0,4 \text{ мм} < d < 0,5$ мм имеется слабо выраженный максимум δ_p . Величина δ_B медленно уменьшается при возрастании d . Для определения эффекта от сплошного барьера дополнительно был проведен эксперимент с обработкой образца в режиме $P_{cp} = 92$ Вт, без диафрагмы с 5% перекрытием пятен.

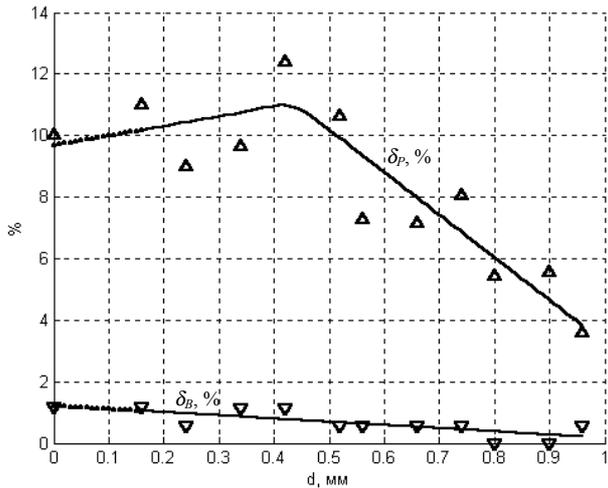


Рис.9. Зависимость δ_p , % и δ_B , % от расстояния между пятнами в строке

Магнитные измерения дали следующий результат: $\delta_p = 10\%$, $\delta_B = 1,15\%$. Отсюда можно сделать вывод о том, что положительное воздействие структурных барьеров, созданных импульсным лазерным излучением, сохраняется при $d < 0,5 \dots 0,6$ мм, при этом выбор d в указанном интервале следует делать исходя скорее из соображений повышения производительности и снижения энергозатрат. В соответствии с приведенным результатом оптимальным следует считать режим с $0,4 \text{ мм} < d < 0,5$ мм, т.к. в этом интервале δ_p максимально, а значение δ_B близко к 1%.

Влияние расстояния между полосами

В соответствии с (6) для изменения D при сохранении остальных параметров постоянными достаточно менять V . Эксперименты по облучению образцов проводились в режиме с внутрирезонаторной диафрагмой диаметром 2,5 мм как и в предыдущем случае. Соответствующие зависимости относительного уменьшения потерь δ_p (%) и снижения индукции δ_B (%) приведены на рис.10.

Из приведенных данных видно, что $\delta_p > 10\%$ при $D < 6$ мм, слабо выраженный максимум наблюдается при $D = 5$ мм. Однако при малых расстояниях между полосами становится недопустимо большим снижение индукции. Приемлемые значения $\delta_B \leq 1\%$ имеют место при $D > 5$ мм. Таким образом, оптимальным следует считать расстояние между полосами 5 мм.

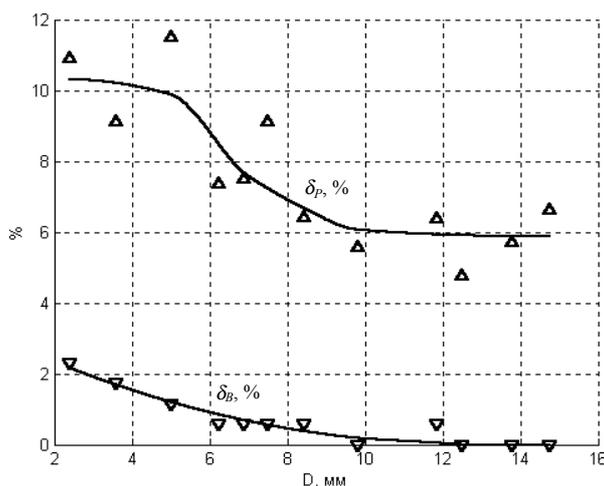


Рис.10. Зависимость δ_p , % и δ_B , % от расстояния между строками

Зная оптимальные значения основных параметров лазерной обработки АЭС ($d=0,5$ мм, $D=5$ мм, $f=20$ кГц), из (7) получим значение производительности, характерное для принятой в настоящей работе схемы с акустооптической модуляцией: $W \approx 3$ м²/мин.

Выводы

1. Использование для обработки АЭС режимов с акустооптической модуляцией добротности и диаметром отпечатка менее 0,2 мм позволило получить при $\delta_p \approx 10...12\%$ уменьшение индукции δ_B менее, чем на 1%, при этом производительность обработки составляет примерно 3 м²/мин.

2. Оптимальными следует считать следующие значения основных параметров лазерной обработки АЭС (при средней мощности излучения около 100 Вт): частота импульсов $f=18...22$ кГц, расстояние между пятна-

ми в полосе $d=0,4...0,5$ мм, расстояние между полосами $D=5$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams H.J., Shockley W., Kittel C. Phys. Rev. 1950. V.80.
2. Fiedler A., Peppergoff W. Method for reducing losses of sheet metal // Pat. USA № 3647575. (1972).
3. Губернаторов В.В., Соколов Б.К., Счастливец И.К. Способ обработки металлических изделий. А.С. № 527922. Бюлл. Изобр. 1976. №33.
4. Соколов Б.К., Губернаторов В.В., Носков М.М., Золотарев А.И. Способ обработки электротехнической стали. А.С. № 652230. Бюлл. Изобр. 1979. №10.
5. Соколов Б.К., Драгошанский Ю.Н., Губернаторов В.В., Чистяков В.К., Ханжина Т.А., Старцева И.Е., Шулика В.В. и др. // ФММ. 1989. Т.68. №3.
6. Соколов Б.К., Драгошанский Ю.Н. // ФММ. 1991. №1.
7. Актуальные вопросы лазерной обработки сталей и сплавов/ Под ред. Б. К. Соколова и Н. Г. Терегулова. Екатеринбург-Курмертау, 1994.
8. Iuchi T., Yamaguchi S., Ichiyama T. et al. Laser processing for reducing core loss of grain oriented silicon steel // J. Appl. Phys. 1982. V.53. №3.
9. Nakamura M., Hirose K., Iuchi T., Yamaguchi S., Ohya Y. IEEE Trans. Magn., V. Mag-18. 1982. №6.

OPTIMIZATION OF LASER PROCESSING CONDITIONS OF ANISOTROPIC ELECTROTECHNICAL STEEL

© 2003 S.V. Kayukov¹, E.G. Zaychikov¹, I.A. Dudorov¹, S.A. Krysanov², V.N. Polyakov²

¹Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

²Novolipetsk Iron & Steel Works

In this paper a way of creation of structural barriers by laser radiation for decreasing of magnetic losses in anisotropic electrotechnical steel (AES) was discussed. In Q-switched mode decreasing of B_{100} less than 1% under decreasing of magnetic losses about 10...12% was received. Optimal values of laser processing parameters of AES: frequency of impulses f , interval between marks in line d , distance between lines D were found.