

Структура кремнистых электротехнических сталей, модифицированных компрессионными плазменными потоками

Н.Г. Валько^{1,}, С.В. Злоцкий², Н.И. Мороз¹, В.М. Анищук²*

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь,

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

*n.valko@grsu.by

Аннотация. Исследована структура кремнистых электротехнических сталей с содержанием кремния 6.67 ат.% и 3.32 ат.% после обработки компрессионными плазменными потоками с плотностью энергии 35 Дж/см². Обнаружено, что обработка компрессионными плазменными потоками исследуемых сталей не приводит к изменению их фазового состава. Однако вследствие сверхбыстрой закалки образуются слои, параметр решетки которых и плотность дислокаций зависят от числа импульсов. Установлено, что увеличение количества импульсов при обработке компрессионными плазменными потоками приводит к формированию более однородной структуры кремнистых электротехнических сталей, на что указывают близкие к значениям исходной стали значения параметра решетки и размеров областей когерентного рассеяния.

Ключевые слова: электротехническая сталь, компрессионные плазменные потоки, структура, рентгеновский фазовый анализ.

1. Введение

Анизотропные кремнистые электротехнические стали широко используются в отраслях народного хозяйства, связанных с производством электротехнического оборудования: в ленточных сердечниках, силовых и низкочастотных трансформаторах, генераторах, электромагнитах, роторах и статорах электрических машин. Анизотропная сталь имеет высокую магнитную индукцию, удельное сопротивление и низкие удельные магнитные потери вдоль направления прокатки. Наиболее востребованными типами анизотропной кремнистые стали являются стали на основе сплава железа с кремнием (до 6.5 вес.%), магнитные, механические и коррозионные свойства которых определяются структурно-фазовым состоянием и дефектной структурой [1–3]. Поэтому актуальным является разработка новых методов и технологий обработки анизотропных кремнистых электротехнических сталей с целью придания им необходимых эксплуатационных свойств.

В настоящее время для модификации поверхности металлов широко применяются технологии с использованием концентрированных потоков энергии: облучение лазерным излучением, ускоренными электронами, а также обработка компрессионными плазменными потоками (КПП) [4–6]. Благодаря высокой эффективности и уникальности формируемых микро- и наноструктур на поверхности материалов воздействие компрессионными плазменными потоками занимает особое место в сфере модификации материалов. Несмотря на обширный экспериментальный материал по воздействию КПП на структуру и свойства различных металлов, до сих пор отсутствует ясное представление о механизме направленной модификации кремнистых электротехнических сталей и взаимосвязи структурных параметров с характеристиками КПП.

Поэтому важным является установление функциональных связей между режимами обработки КПП и физико-химическими процессами, определяющими формирование структуры и свойств электротехнических сталей. Целью настоящей работы было исследовать влияние КПП на структурно-фазовое состояние анизотропной кремнистой электротехнической стали с различной концентрацией кремния.

2. Методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовались тонколистовые холоднокатаные анизотропные кремнистые стали. Исследовались стали с концентрациями Si, равными 6.67 ат.% (Ст 1) и 3.32 ат.% (Ст 2) [7]. Толщина составляла 0.23 мм для Ст 1, для Ст 2 – 0.3 мм. Обработка сталей осуществлялась в остаточной атмосфере азота, при давлении 400 Па, шестью последовательными импульсами, следовавшими друг за другом с интервалом 10–15 с. Плотность энергии в импульсе составляла 35 Дж/см².

Для оценки влияния КПП на структуру сталей были проведены исследования методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ULTIMA-IV в геометрии параллельного пучка с использованием $\text{CuK}\alpha$ излучения (0.15418 нм), а также в геометрии скользящего падения под углом 5°. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) и плотность дислокаций рассчитывалась по эффекту первичной экстинкции.

3. Результаты и их обсуждение

Рентгеновский фазовый анализ исходных образцов Ст1 и Ст2 показал, что они представляют собой фазу α -Fe с объёмно-центрированной кубической решеткой, параметр которой равен 0.2861 нм. Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) соответственно для Ст1 и Ст2 равны 43 и 41 нм, а уровень микронапряжений соответствует 15 и 72 МПа.

Как видно из рентгенограмм, представленных на рис. 1 и рис. 2, обработка КПП Ст 1 и Ст 2 не приводит к изменению их фазового состава, что можно объяснить испарением азота с поверхностного слоя мишени в результате воздействия КПП больших энергий. Однако, на рис.1 видно, что воздействие 1 импульсом на Ст1 способствует росту интенсивности дифракционного пика (211) и увеличивает параметр решетки до 0.2862 нм (таблица 1). После обработки 3 импульсами параметр решетки возрастает до значения 0.2863 нм, при этом растет интенсивность пика (110). Увеличение числа импульсов до 6 приводит к усилению ориентации (110), а параметр решетки в данном случае равен 0.2862 нм. Обнаруженное увеличение параметра решетки образцов, обработанных КПП связано с повышением концентрации вакансий вследствие сверхбыстрой закалки поверхностного слоя сталей.

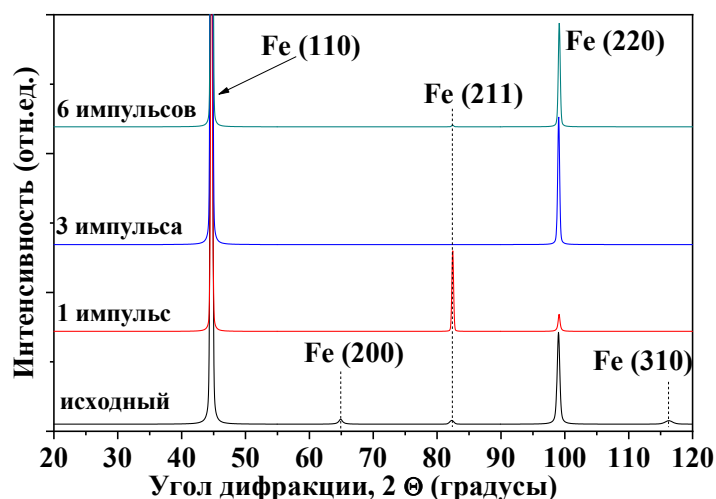


Рис. 1 Рентгенограммы образцов Ст 1, обработанных КПП.

Тепловое воздействие КПП и высокая скорость остывания расплава поверхностного слоя мишени способствует образованию в затвердевшем слое стали высокодисперсного слоя, что, приводит к изменению их механических и защитных свойств. Как видно из таблицы 1 обработка КПП Ст1 приводит к резкому росту ее плотности дислокаций, что указывает на ее

упрочнение. При воздействии 1 импульсом плотность дислокаций увеличивается на 38 %, при обработке 3 импульсами – на 24 %, 6 импульсов –12 %. Рост плотности дислокации в образце Ст 1 происходит благодаря увеличению концентрации вакансий в результате сверхбыстрой закалки модифицированного поверхностного слоя [8–9]. Уменьшение же плотности дислокаций с увеличением количества импульсов по сравнению с воздействием одним импульсом может быть связано с перемешиванием модифицированного слоя и формированием более однородной структуры приповерхностного слоя. Снижение плотности дислокаций с увеличением числа импульсов также свидетельствует о протекании процессов первичной рекристаллизации поверхностного слоя мишени.

В случае Ст 2, как видно из рис. 2, обработка уже 1 импульсом приводит к отсутствию дифракционных пиков, соответствующих ориентациям отличным от (110).

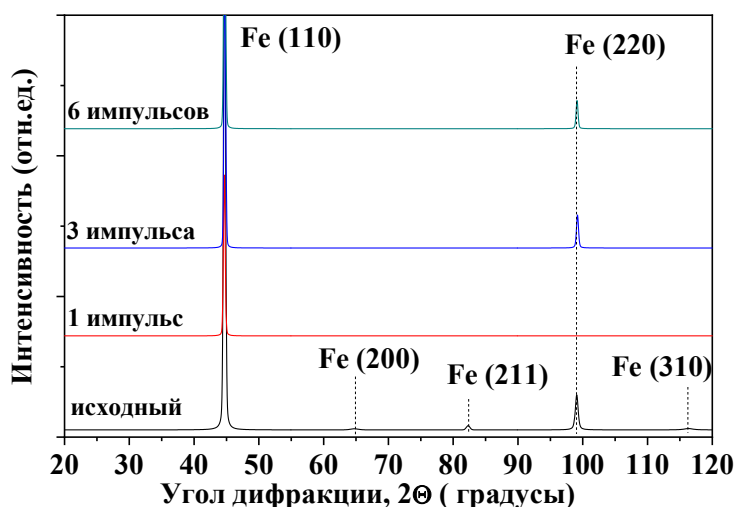


Рис. 2. Рентгенограммы сталей Ст 2, обработанных КПП.

При этом для стали Ст 2 выявлено незначительное монотонное уменьшение параметра решетки Fe с увеличением числа импульсов в пределах 0.1 % (таблица 1). Однако, увеличение числа импульсов до 6 приводит к небольшому росту параметра решетки.

Таблица 1. Параметр решетки, размеры ОКР и плотность дислокаций Ст1 и Ст2.

Образец	Режимы воздействия КПП			
	Параметр решетки (нм)	Размеры ОКР (нм)	Плотность дислокаций (см ⁻²)	
Ст1	Исходный образец	0.2861	43	16
	1 импульс	0.2862	31	30
	3 импульса	0.2863	33	28
	6 импульсов	0.2862	36	23
Ст2	Исходный образец	0.2861	41	17
	1 импульс	0.2860	43	16
	3 импульса	0.28597	45	15
	6 импульсов	0.2861	35	24

Стоит отметить, что для образца Ст 2 воздействие 1 импульсом КПП приводит к уменьшению размеров ОКР, что связано с процессом сверхбыстрого затвердевания модифицированного поверхностного слоя. Дальнейшее увеличение количества импульсов приводит к формированию структур, которые характеризуются размерами ОКР близкими к значению исходного образца.

4. Заключение

Таким образом, результаты рентгеноструктурного анализа кремнистых электротехнических сталей с содержанием кремния 6.67 ат.% и 3.32 ат.%, обработанных компрессионными плазменными потоками, показали, что обработка сталей приводит к модификации приповерхностного слоя, который характеризуется формированием сильной текстуры (110). Воздействие одного импульса компрессионного плазменного потока приводит к резкому изменению параметра решетки Fe и размеров ОКР, что связано с формированием неоднородной структуры в приповерхностном слое. Увеличение количества импульсов приводит к формированию структур со значениями параметра решетки и размеров ОКР близкими к значениям исходных образцов, что свидетельствует о формировании более однородной структуры.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т23-086).

5. Литература

- [1] М.Л. Лобанов, Г.М. Русаков, А.А. Редикульцев, Электротехническая анизотропная сталь. Часть II. Современное состояние, *MuTOM*, **8**, 3, 2011.
- [2] J.Bach, R. Damaschek, E.Geissler, H. W. Bergmann, Laserumwandlungs härten von verschiedenen Stählen, *HTM*, **46**(2), 97, 1991.
- [3] D.Korenciak, M. Gutten, V. Cefer, M. Sebok, N. Valko, Diagnostics of Difference Parameters of Transformer Winding in Time and Frequency Domain. *Proceedings of the 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika (1-14 September 2020)*, Pilsen. Pilsen: University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering, 9214664, 2020.
- [4] Н.И. Мороз, Н.Г. Валько, Влияние отжига на коррозионную стойкость трансформаторной стали, легированной кремнием. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне*, **12**(3), 108, 2022.
- [5] S.V. Vasil'ev, N.G. Val'ko, A.Y. Ivanov, A.L. Sitkevich, Changes in the Crystal Structure of Metals in the Course of Their Laser Processing. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **95**(3), 821, 2022.
- [6] A. Ivanov, A. Sitkevich, N. Valko, S. Vasiliev, Structure changes in metals during their laser treating, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online): Abstracts*. Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, P. 464–467, 2020.
- [7] ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая тонколистовая. М.: Изд-во стандартов, 1992.
- [8] N.N. Cherenda, A.V. Basalai, V.I. Shymanski, V.V. Uglov, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, A.P. Laskovnev, G.E. Remnev, Modification of Ti-6Al-4V alloy element and phase composition by compression plasma flows. *Surface and Coatings Technology*, **355**, 148, 2018.