# МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КРЕМНИСТОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Н.И. Мороз
*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,*
*ул. Элизы Ожешко 22, Гродно 230023, Беларусь, natali84@tut.by*

Представлены результаты исследования влияния обработки ускоренными электронами с энергией 16 Дж/см$^2$ на структуру и свойства анизотропной кремнистой электротехнической стали с содержанием Si – 3.32 %. Длительность воздействия электронного пучка электронов составляла 100 мкс. Методом рентгеновского структурного анализа, обнаружено, что облучение ускоренными электронами электротехнической стали не приводит к изменению ее структурно-фазового состояния, однако после облучения наблюдается незначительно (5 %) уменьшение степени кристалличности. Показано, что вследствие обработки ускоренными электронами поверхности электротехнической стали микротвердость увеличивается на 65 %, что связано с увеличением плотности дислокаций на 50 %.

***Ключевые слова:*** электротехническая сталь; структура; ускоренные электроны; рентгеновский фазовый анализ; микротвердость.

# MODIFICATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRICAL STEEL BY ACCELERATED ELECTRONS

N.I. Moroz
*Yanka Kupala State University of Grodno,*
*22 Eliza Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, natali84@tut.by*

The results of studying the effect of flow of accelerated electrons with the energy of 16 J/cm$^2$ on the structure and properties of anisotropic silicon electrical steel with a content of Fe - 96.58% and Si – 3.32% are presented. The duration of the effect of the flow of electron was 100 μs. By the method of X-rays analysis it was found that irradiation of electrical steel with accelerated electrons does not leads to the changes in its structural-phase state, however, after irradiation the decrease in the degree of crystallinity and an increase in the degree of amorphism of steels are observed. It is shown that, due to the treatment with the flow of accelerated electrons, the density of dislocation of the steels increases almost on the 50 %, which is associated with the diffusion of accelerated electrons in the near-surface layer of the steel and the formation of a dispersed structure. It is observed, that microhardness of irradiated with accelerated electrons steel increases up to 65 %.

***Keywords:*** electrical steel; structure; accelerated electrons; X-ray diffraction; microhardness.

## Введение

Обеспечение надежности и безопасности работы металлических деталей и изделий на основе кремнистых электротехнических сталей неразрывно связано с технологиями их получения [1]. При этом, предъявляемые требования к сталям не позволяют решать поставленные задачи с использованием только традиционных технологий. В настоящее время наиболее перспективным методом целенаправленной модификации структуры поверхностных слоев металлов и сплавов является их обработка высокоэнергетическими потоками и ионизирующим излучением, в том числе на стадии изготовления [2-5]. В последнее время для модифицирования поверхности металлов применяются электронно-пучковая обработка [7]. Технологии, связанные с обработкой ускоренными электронами, имеют свою специфику и особенности, в ряде случаев вытесняют традиционные технологии модифицирования приповерхностных слоев вследствие более высокой эффективности и уникальности получаемых результатов.

Целью настоящей работы является исследование процессов модификации

структуры и свойств электротехнической стали при облучении ускоренными электронами.

## Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использовалась тонколистовая холоднокатаная анизотропная сталь на основе железа (Fe) и кремния (Si), концентрация которых регламентируется ГОСТ 21427.1 [7]. Исследуемая сталь представляет собой металлический сплав, основу которого составляет Fe, концентрация которого равна 96.58 % и Si, в количестве 3.32 %.

Образцы стали подвергалась воздействию ускоренными электронами. Энергия электронов составляла 16 Дж/см$^2$. Длительность воздействия электронного пучка электронов была равна 100 мкс. Рентгеновский фазовый анализ проводили с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН- 3 М. Микротвердость измерялась на микротвердомере KASON 59-HV.

## Результаты и их обсуждение

На рисунке представлены участки дифрактограмм кремнистой электротехнической стали и стали, обработанной ускоренными электронами. Анализ дифрактограмм показывает, что у стали подвергнутой обработке ускоренными электронами положение основных рефлексов соответствует положению рефлексов от контрольных образцов. Обнаруженная закономерность указывает на то, что обработка ускоренными электронами электротехнической стали не приводит к изменению структурно-фазового состояния, который представляет собой твердый раствор $Fe_3Si$.

Однако видно, что после облучения стали на дифрактограммах наблюдается уменьшение интенсивности рефлексов и уширение рефлексов, что говорит об изменении плотности дислокаций и степени кристалличности в стали.

Расчет степени кристалличности показал, что степень кристалличности в стали

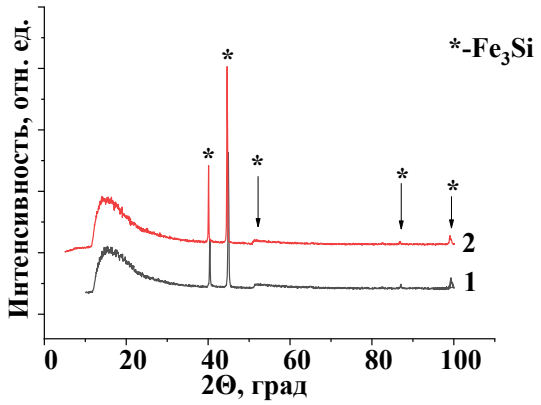


Рис. 1. Участки дифрактограмм электротехнической анизотропной стали с содержанием Si, равным 3.32 %, облученные ускоренными электронами: 1 – к.о.; 2 – после электронной обработки

после обработки ускоренными электронами незначительно уменьшается на 5 %. Расчет плотности дислокаций по методу первичной экстинкции показал, что плотность дислокаций у контрольного образца составляет $3.8 \cdot 10^{10}$см$^{-2}$, а облучаемых образцов на 50 % выше. Увеличение степени аморфности и плотности дислокаций электротехнической стали при облучении их ускоренными электронами связано с диффузией ускоренных электронов в приповерхностном слое стали и образованием вследствие этого дисперсной структуры. Стоит отметить, что следствием формирования микропустот, дислокационных петель и других дефектов при облучении стали ускоренными электронами является упрочнение материалов [8].

Результаты испытаний микротвердости приведены на рисунке 2.

Результаты исследования микротвердости стали показали, что микротвердость образцов стали до обработки ускоренными электронами составляет 234 МПа. У облученных ускоренными электронами образцов микротвердость увеличивается до 378 МПа, т. е. на 65% увеличивается.

## Заключение

Обнаружено, что обработка ускоренными электронами электротехнической стали не приводит к изменению структурно-фазового состояния.

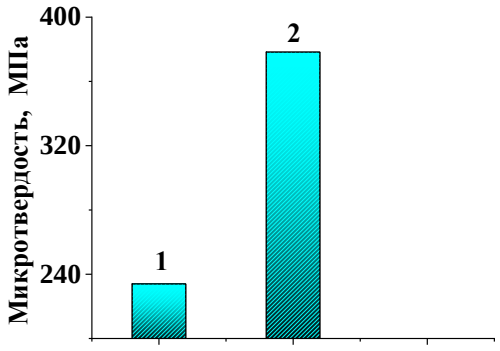


Рис. 2. Микротвердость электротехнической анизотропной стали с содержанием кремния 3,32 %: 1 – к.о; 2 – после электронной обработки

Показано, что степень кристалличности в облученной ускоренными электронами стали незначительно (5 %) уменьшается, а плотность дислокаций увеличивается на 50 %, что связано с диффузией ускоренных электронов в приповерхностном слое стали и образованием дисперсной структуры.

Обнаружено, что после обработки ускоренными электронами микротвердость электротехнической стали увеличивается на 65 %.

## Библиографические ссылки

1. Korenciak D., Gutten M., Cefer V., Sebok M., Valko N. 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; 2020. P. 9214664.
2. Ananiashvili K., Okrosashvili M., Loladze T., Valko N. G., Koltunowicz T.N. Structure and Properties of Tantalum Coatings Obtained by Electron Beam Technology on Aluminum Substrates. *Applied Sciences* 2020; 10(11): 1-8.
3. Valko N., Kasperovich A., Koltunowicz T. Forming a structure of the CoNiFe alloys by X-ray irradiation. *Functional Materials Letters* 2018; 11(2): 1850044-1–1850044-4.
4. Valko N.G., Anishchik V.M., Šebok M., Evstigneeva V.P. Study of the structure and properties of Ni/Au Composite coatings formed in an X-rays and ultraviolet radiation field. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* 2021; 15(1): S25-S29.
5. Valko N., Evstigneeva W., Anishchik V., Okal P., Koltunowicz T.N. The application of x-rays for an electrodeposition of composite coatings with modified structures and properties. *Energies* 2021; 1414(4913): 1-11.
6. Ivanov A., Sitkevich A., Valko N., Vasiliev S. Structure changes in metals during their laser treating. Proceedings - 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE (14-16 September 2020), Tomsk. Tomsk: Institute of High Current Electronics; 2020. pp. 464-467.
7. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия: ГОСТ 21427.1-83. Москва: Изд-во стандартов; 1992. 13 с.
8. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. *Ползуновский вестник* 2021; 1(4): 129-139.