

УДК 538.91

Воздействие компрессионных плазменных потоков на структуру, механические и коррозионные свойства кремнистой электротехнической стали

Н. Г. Валько¹, С. В. Злоцкий², В. М. Анищик², Н. А. Павлова¹, Н. И. Мороз¹

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
230023 Гродно, Республика Беларусь, ул. Ожешко, 22
E-mail: N.Valko@grsu.by; pavlova_na_19@mail.ru; natali84@tut.by
Белорусский государственный университет,
220030 Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 4
E-mail: Zlotski@bsu.by; Anishchik@bsu.by

Поступила в редакцию 7 августа 2024 г., окончательный вариант — 14 сентября 2024 г., принята к публикации 26 ноября 2024 г.

Исследовано влияние компрессионных плазменных потоков на структуру, механические и коррозионные свойства кремнистой анизотропной электротехнической стали с содержанием кремния 6,67 ат. %. Обработку образцов осуществляли при давлении 400 Па в атмосфере азота 1, 3 и 6 последовательными плазменными импульсами, обеспечивающих плотность поглощенной энергии 35 Дж/см². С помощью методов растровой электронной микроскопии на модифицированной поверхности мишени зафиксировано наличие кратеров, обогащенных углеродом, размер которых зависит от количества импульсов. Методом рентгеновского структурного анализа показано, что высокоскоростное остывание модифицированного слоя стали приводит к незначительному увеличению параметра решетки, плотности дислокаций и микротвердости. Установлено, что вследствие формирования неоднородной оплавленной поверхности на обработанных компрессионными плазменными потоками образцах коэффициент трения увеличивается, а также повышается их коррозионная стойкость и микротвердость вследствие формирования однородного переплавленного слоя.

Ключевые слова: электротехническая сталь, компрессионные плазменные потоки, структура, микротвердость, коэффициент трения, коррозионная стойкость.

DOI: 10.30791/0015-3214-2025-2-5-13

Введение

В сфере промышленных и прикладных научных разработок исследования, нацеленные на улучшение свойств электротехнических сталей, представляются особенно интересными. В широком спектре электротехнических сталей наи-

более востребованы анизотропные кремнистые стали, свойства которых определяются содержанием кремния и кристаллической структурой [1 – 3].

Для придания сталим требуемых эксплуатационных свойств интенсивно разрабатываются методы и технологии, использующие концентрированные потоки энергии и позволяющие модифици-

ровать поверхностные и приповерхностные слои: воздействие лазерным излучением и ускоренными электронами, а также обработка компрессионными плазменными потоками (КПП) [4 – 6]. В первую очередь, эффект воздействия концентрированных потоков энергии на металлы определяется механизмами передачи энергии и характером энерговыделения по глубине мишени, а также последующими распределениями температурных полей и вызываемых ими напряжений.

Технологии, связанные с обработкой КПП, занимают особое место и в ряде случаев вытесняют традиционные технологии модификации приповерхностных слоев благодаря формированию уникальных микро- и наноструктур в тонких приповерхностных слоях [7 – 10]. В отличие от облучения лазером и электронов, где передача энергии осуществляется электронам, а также электронам и ядрам мишени, при воздействии плазмы энергия импульса передается атомам, электронам и ядрам, вследствие чего эффективность метода повышается.

Однако следует учитывать, что в зависимости от режимов обработки КПП (от временных, энергетических и пространственных характеристик излучения) возможно испарение или плавление участков поверхности, изменение структуры кристаллитов металлов и сплавов и, в том числе, формирование остаточных напряжений в зоне высокоэнергетического воздействия и ее окрестности [10 – 12].

Несмотря на обширный экспериментальный материал по воздействию КПП на структуру и свойства различных металлов, до сих пор отсутствует чёткое представление о механизме направленной модификации поверхности и взаимосвязи структурных параметров материала с характеристиками КПП. Поэтому установление функциональных связей между режимами обработки КПП и физико-химическими процессами, определяющими формирование структуры и свойств электротехнических сталей, является важным моментом.

Цель работы — исследование влияния компрессионных плазменных потоков, обеспечивающих плотность поглощенной энергии 35 Дж/см², на структурно-фазовое состояние, механические свойства и коррозионную стойкость кремнистой электротехнической стали.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовали тонколистовую холоднокатаную анизотропную

кремнистую сталь с концентрацией Si, равной 6,67 ат. % [13].

Обработку образцов, размером 1 × 1 см и толщиной 0,23 мм, осуществляли в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии, работающего по принципу квазистационарного плазменного ускорителя, в режиме “остаточного газа” при давлении рабочего газа (азота) 400 Па. Напряжение на системе конденсаторов составляло 4,0 кВ, плотность поглощенной энергии за один импульс — 35 Дж/см². Воздействие КПП осуществляли 1, 3 и 6 последовательными импульсами, следовавшими друг за другом с интервалом 10 – 15 с.

Оценку влияния КПП на структуру сталей проводили методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ULTIMA-IV (Rigaku, Япония) в геометрии параллельного пучка с использованием Cu K_α-излучения ($\lambda = 0,15418$ нм), а также при скользящем падении пучка под углом 5°, что соответствует глубине проникновения рентгеновского излучения 0,9 мкм. Размер областей когерентного рассеяния (OKР) и плотность дислокаций рассчитывали по эффекту первичной экстинкции, а микронапряжения — аппроксимацией.

Морфологию поверхности и элементный состав модифицированного слоя изучали на растровом электронном микроскопе LEO 1455VP (Carl Zeiss, Германия) при нормальном падении пучка на поверхность образца и ускоряющем напряжении 20 кВ. Рентгеноспектральный микроанализ проводили на безазотном спектрометре Aztec Energy Advanced X-Max 80 (Oxford Instruments, Англия).

Микротвердость образцов измеряли на цифровом твердомере KASON 59-HV (Jinan Kason Testing Equipment Co., LTD, Китай) при нагрузке 0,09807 Н согласно СТБ ИСО 6507-1 [14]. Коррозионную стойкость стали исследовали методом ускоренных испытаний в насыщенном растворе NaCl при комнатной температуре посредством получения полярографических кривых, которые регистрировали с помощью полярографа ПУ-1 (Гомельский завод измерительных приборов, Беларусь), сопряженного с интерфейсным блоком Графит-2 (Москва, Россия). В качестве электрода сравнения использовали хлорсеребряный электрод сравнения (Х.С.Э) ЭВЛ-4, который помещали в электролитический ключ 1Е5.184.307, заполненный насыщенным раствором хлористого калия и подведенный к обратной стороне рабочего электрода. Плотность тока коррозии определяли по полярографическим кривым, построенным в полулогарифмических координатах.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования микроструктуры стали после обработки КПП различным числом импульсов, обеспечивающих плотность поглощенной энергии $35 \text{ Дж}/\text{см}^2$, представлены на рис. 1. Видно, что рельеф модифицированной поверхности мишени зависит от количества импульсов КПП. Обработка 1-м импульсом КПП (рис. 1a) приводит к частичному оплавлению поверхности образца, но микроструктура поверхности остается гладкой и однородной. С увеличением количества импульсов на поверхности стали возникает гребенчатая структура, образующаяся в процессе кристаллизации расплавленного слоя мишени. На поверхности образцов, обработанных тремя импульсами, обнаружены дефекты в виде кратеров со средним диаметром $0,1 \text{ мкм}$ (рис. 1b), микроструктура которых определенно свидетельствует о протекании процессов плавления и сверхбыстрой кристаллизации в тонком поверхностном слое. Обработка поверхности стали 6-ю импульсами КПП приводит к росту поглощенной энергии (рис. 1c).

Рост поглощенной энергии обуславливает перераспределение энергии пучка в образце, рассеиваемой за счет теплопроводности и расходуемой на дефектообразование и испарение облучаемого материала [15], что приводит к изменению скорости продвижения фронта затвердевания в мишени [16, 17]. В результате на оплавленной поверхности образца образуются кратеры диаметром до 5 мкм (рис. 1c), в которых происходит перераспределение элементов с возникновением областей с высоким содержанием углерода и кислорода, а также пониженным содержанием кремния (рис. 2). Концентрация кислорода в кратере равна 2,32 ат. %, углерода — 21,34 ат. %, а кремния — 2,39 ат. %. В зоне свободной от кратеров углерод отсутствует, а содержания кислорода и кремния составляют 5,93 ат. % и 4,78 ат. % соответственно. Обнаруженное перераспределение элементов можно объяснить существенным отличием микроструктуры кратеров и зон, свободных от них. Необходимо учитывать также, что на распределение химических элементов в модифицированном слое стали оказывает влияние и газовая атмосфера рабочей камеры [18]. Средняя плотность кратеров на поверхности составляет 1 мкм^{-2} .

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что формирование модифицированного слоя анизотропной электротехнической стали при воздействии КПП, обеспечивающих плотность поглощенной энергии $35 \text{ Дж}/\text{см}^2$, с энергией в им-

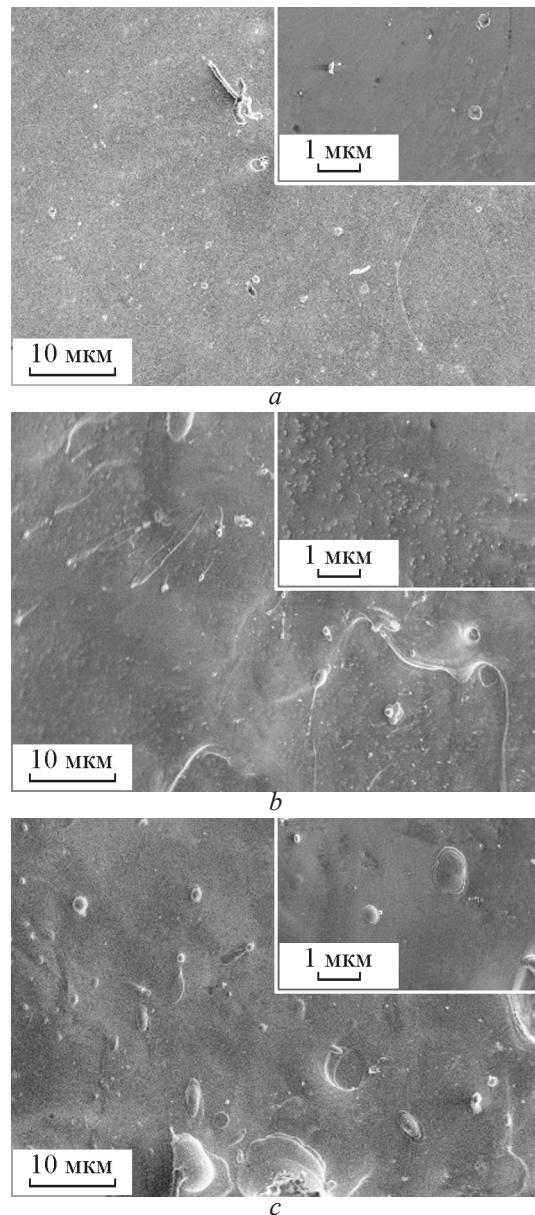


Рис. 1. СЭМ изображения поверхностей образцов стали после обработки КПП: a — 1 импульсом, b — 3 импульсами, c — 6 импульсами.

Fig. 1. SEM images of steel sample surfaces after treatment with compression plasma flows (CPFs): a — 1 pulse, b — 3 pulses, c — 6 pulses.

пульсе $35 \text{ Дж}/\text{см}^2$ определяется скоростью кристаллизации расплавленного слоя, зависящего от режимов обработки КПП.

На рис. 3 приведены рентгенограммы образцов, подвергнутых воздействию КПП. Видно, что анизотропная кремнистая сталь с концентрацией Si, равной 6,67 ат. %, представляет собой фазу α -Fe с объемно-центрированной кубической решеткой

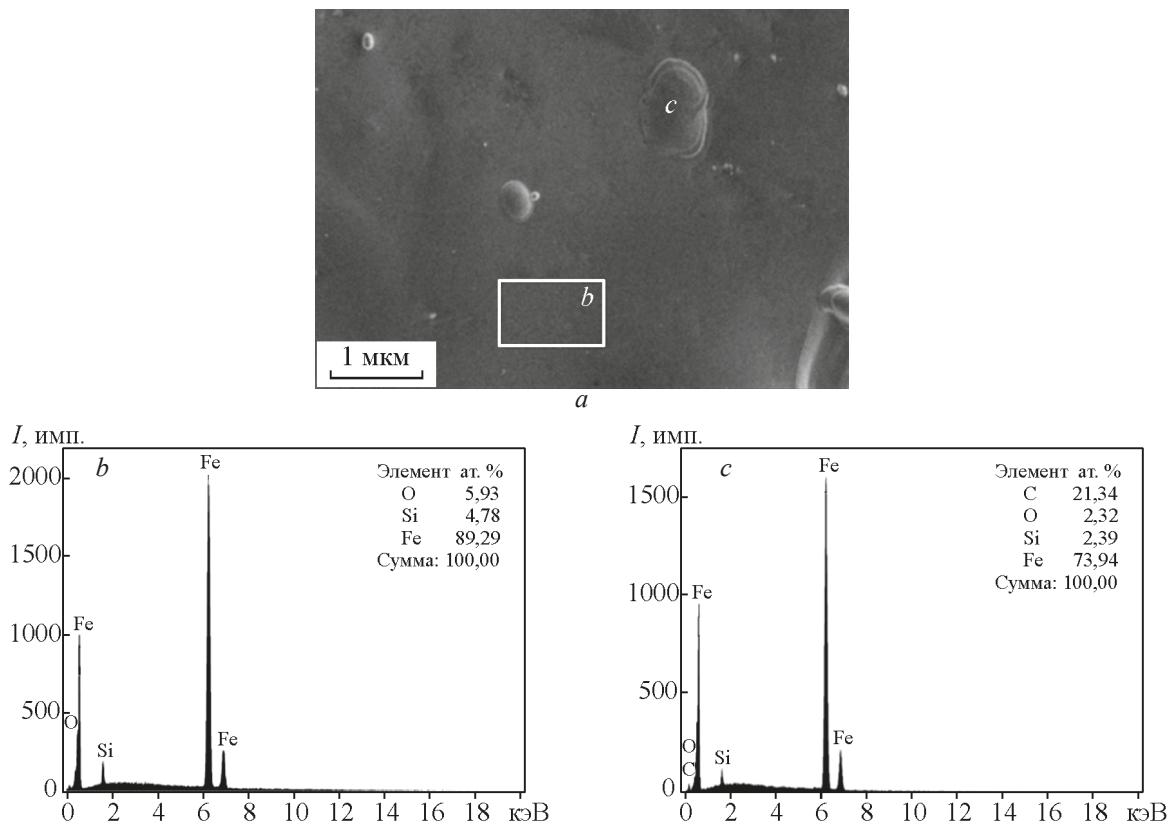


Рис. 2. РЭМ изображение поверхности образца стали, облученной 6-ю импульсами КПП (а) и элементный состав приповерхностного слоя (б, в).

Fig. 2. SEM image of the surface of a steel sample irradiated with 6 pulses of CPFs (a) and the elemental composition of the surface layer (b, c).

(ОЦК), параметром решетки 0,2861 нм, средним размером областей когерентного рассеяния (ОКР) 43 нм и уровнем микронапряжений соответствующим 15 МПа.

Анализ рентгенограмм (рис. 3), а также данных, полученных при исследовании образцов в скользящей геометрии, показывает, что обработка КПП, обеспечивающих плотность поглощенной энергии 35 Дж/см², не приводит к изменению фазового состава поверхностного слоя стали, что можно объяснить испарением азота с поверхности мишени в результате воздействия компрессионных плазменных потоков больших энергий. Однако после воздействия 1-м импульсом КПП наблюдается рост интенсивности дифракционного пика (211) и незначительно увеличивается параметр решетки до 0,2862 нм. После обработки 3-мя импульсами КПП параметр решетки возрастает до значения 0,2863 нм, при этом растет интенсивность пика (110). Увеличение числа импульсов до 6 приводит

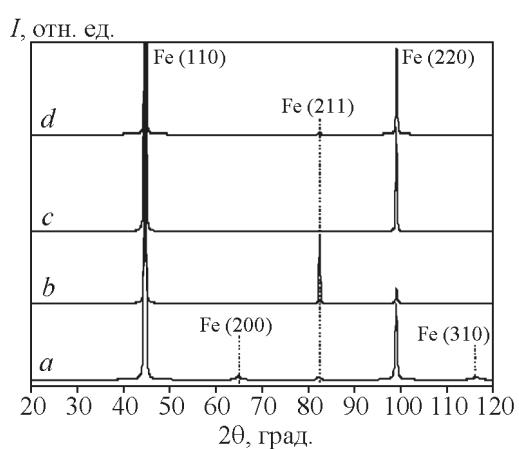


Рис. 3. Рентгенограммы образцов стали, обработанных КПП при числе импульсов: а — 0 (исходный), б — 1, в — 3, г — 6.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of steel samples processed by CPFs with the following number of pulses: a — 0 (initial), b — 1, c — 3, d — 6.

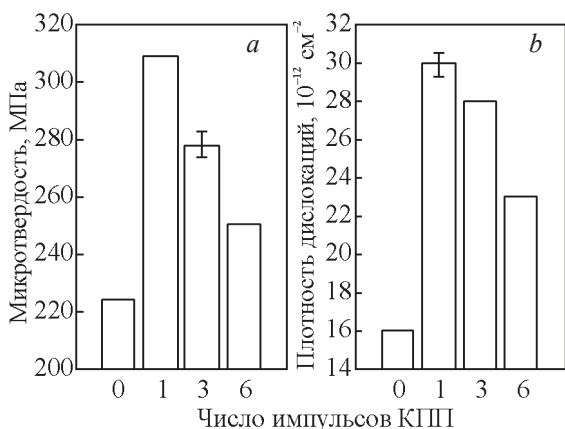


Рис. 4. Зависимости микротвердости (a) и плотности дислокаций (b) образцов стали от числа импульсов КПП.

Fig. 4. Dependences of microhardness (a) and dislocation density (b) of steel samples on the number of CPFs pulses.

к усилению ориентации (110), а параметр решетки в данном случае равен 0,2862 нм. Такое изменение параметра кристаллической решетки образцов, обработанных КПП, связано с повышением концентрации вакансий вследствие сверхбыстрой закалки. При этом, расчет микронапряжений показал, что уровень остаточных напряжений в приповерхностном слое мишени после обработки 1-м импульсом возрастает до 16 МПа, при воздействии 3-х импульсов — до 27 МПа, а при 6 импульсах снижается до 22 МПа вследствие формирования

более однородной структуры на поверхности образца.

Согласно многочисленным исследованиям [15 – 18], тепловое воздействие КПП и высокая скорость остывания расплава поверхностного слоя мишени способствует образованию на затвердевшей поверхности стали высокодисперсного слоя, несомненно приводящего к изменению механических и защитных свойств образцов. Из рис. 4 видно, что обработка образцов стали КПП приводит к резкому росту плотности дислокаций (упрочнению). При воздействии 1-м импульсом плотность дислокаций увеличивается на 38 %, при 3-х — на 24 %, а 6-ти — на 12 %. Несомненно, рост плотности дислокаций в образце происходит в результате сверхбыстрой закалки модифицированного поверхностного слоя, а снижение с увеличением числа импульсов может свидетельствовать о протекании процессов первичной рекристаллизации на поверхности мишени.

Как видно из рис. 4а, воздействие КПП на поверхность мишней приводит к возрастанию микротвердости стали по сравнению с исходным образцом, что хорошо коррелирует ростом плотности дислокаций и уровня микронапряжений. Микротвердость повышается на 40 % при обработке 1-м импульсом, при 3-х — на 24 %, а при 6-ти — на 12 %. Исследование распределения микротвердости по глубине модифицированного слоя не входило в область задач данной работы.

Анализ данных трибологических испытаний исходного образца показал наличие области приработки и установившегося износа на зависимостях

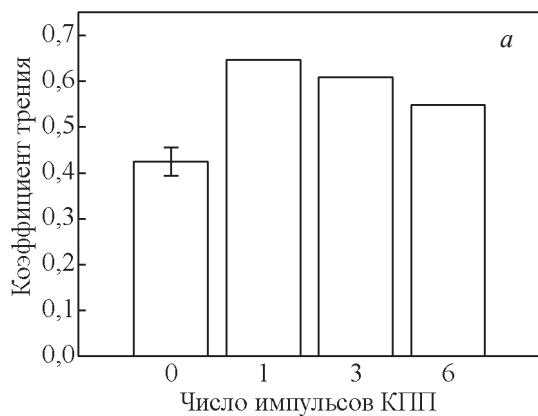
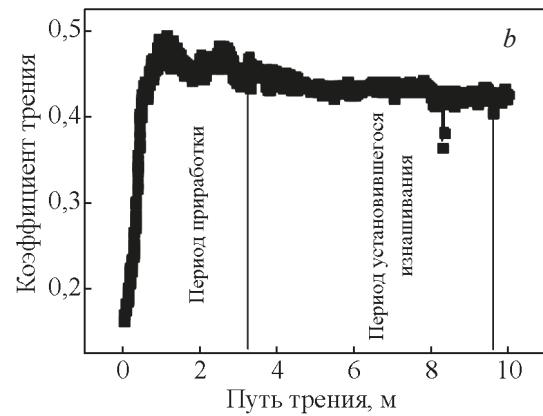


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения стали от числа импульсов КПП (a) и от пути трения для исходного образца (b).

Fig. 5. Dependence of the coefficient of friction of steel on the number of pulses of CPFs (a) and from the friction path for the initial sample (b).



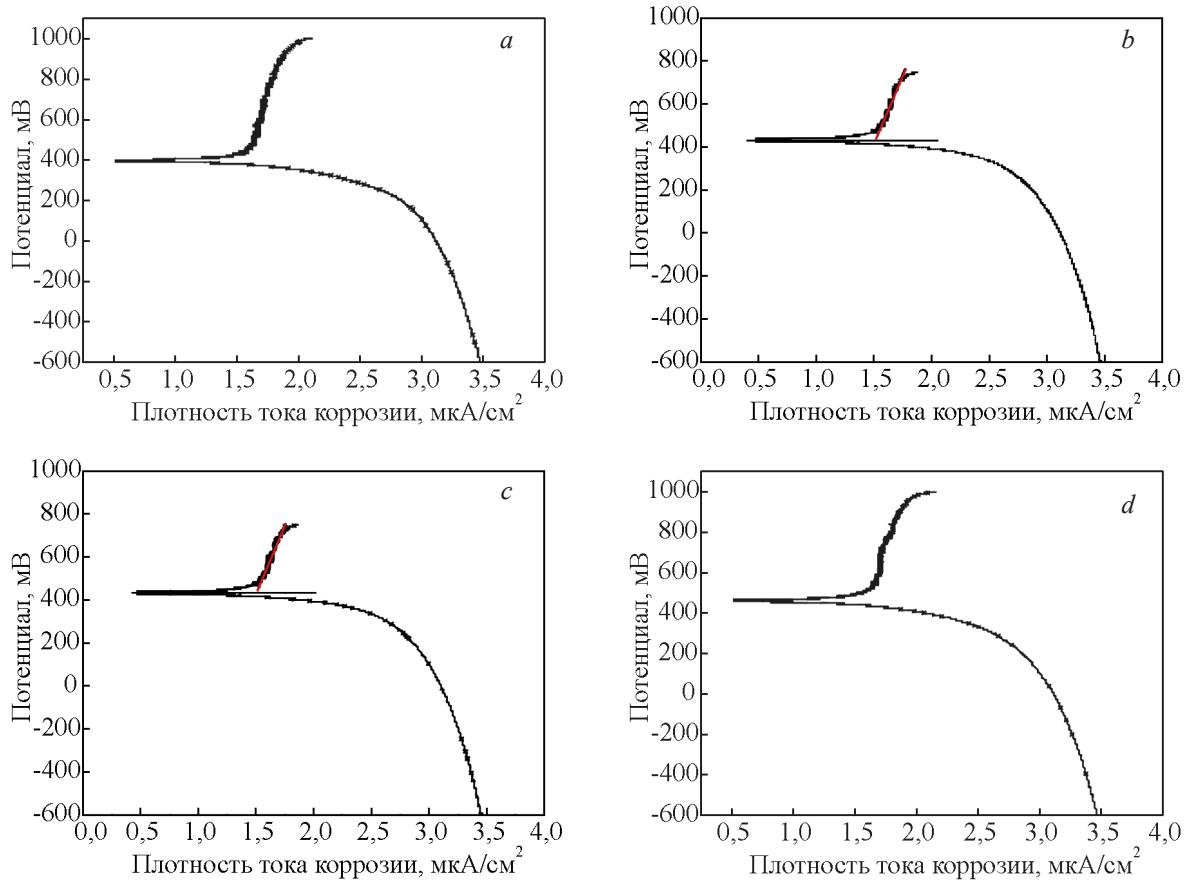


Рис. 6. Полярографические кривые исходного образца (а) и обработанных КПП при числе импульсов: б — 1, с — 3, д — 6.

Fig. 6. Polarographic curves of the initial sample (a) and CPFs treatment with the number of pulses: b — 1, c — 3, d — 6.

коэффициента трения от пути трения (рис. 5б). Для исходного образца в области приработки коэффициент трения равен 0,5, а в области установившегося износа — 0,43. Обработка 1-м импульсом КПП приводит к увеличению коэффициента трения до 0,75, что связано с изменением геометрии поверхности после воздействия КПП вследствие быстрой кристаллизации расплавленного слоя мишени и возникновения гребенчатой структуры. Коэффициент трения в области установившегося износа составляет 0,65.

Необходимо отметить, что увеличение количества импульсов обработки КПП приводит к формированию на образцах поверхностного слоя с меньшим коэффициентом трения по сравнению с одноимпульсным воздействием. По сравнению с обработкой КПП одним импульсом воздействие 3-х импульсов снижает коэффициент трения на 7 %, а 6-ти — на 20 %, что связано с уменьшением

абразивного износа вследствие снижения твердости, и, соответственно, хрупкости поверхности.

Исследование влияния количества импульсов КПП на коррозионную стойкость стали представлены на рис. 6. Сравнительный анализ полярографических кривых, построенных в полулогарифмических координатах, позволяет заключить, что обработка стали КПП приводит к увеличению ее коррозионной стойкости. Так, ток коррозии исходного образца составляет 44,66 мА, а обработанной 1 импульсом КПП мишени снижается до 40,90 мА, 3-мя — 38,69 мА, 6-ю — 33,67 мА. А поскольку величина тока коррозии пропорциональна скорости коррозии, то выявленная закономерность указывает на улучшение коррозионных свойств обработанных КПП сталей. Повышение коррозионной стойкости, механизм которой обусловлен в первую очередь формированием сплошного однородного слоя вследствие оплавления

поверхности и который в свою очередь препятствует диффузии ионов Cl^- вглубь модифицированного слоя и последующему возникновению межкристаллитной коррозии.

Отметим, что на поверхности исходного образца после коррозионных испытаний образовались тёмные пятна диаметром от 2 до 6 мкм. Образцы, подвергнутые воздействию КПП, после коррозионных испытаний покрели, но видимых очагов разрушения поверхностного слоя обнаружено не было.

Выводы

Изучение влияния компрессионных плазменных потоков, обеспечивающих плотность поглощенной энергии $35 \text{ Дж}/\text{см}^2$, на структуру и свойства анизотропной кремнистой электротехнической стали с содержанием кремния 6,67 ат. % позволило установить увеличение параметра решетки обработанных КПП образцов, рост плотности дислокаций, обусловленных сверхбыстрой закалкой модифицированного слоя.

Обработка образцов стали КПП, обеспечивающих плотность поглощенной энергии $35 \text{ Дж}/\text{см}^2$, не приводит к изменению ее фазового состава.

Модифицированный КПП поверхностный слой стали отличается повышенной твердостью и увеличенным коэффициентом трения. Коррозионная стойкость обработанных сталей значительно выше относительно исходных образцов.

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

Литература

1. Мороз Н.И., Валько Н.Г. 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 [Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление], 2022, т. 12, № 3, с. 108 – 115.
2. 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 2020), 1 – 14 September 2020, Pilsen, Czech Republic. Pilsen: University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering, 2020, art. 9214664. DOI: 10.1109/Diagnostika49114.2020.9214664
3. Gutten M., Janura R., Sebok M., Korenciak D., Kucera M. Measurement of short-circuit effects on transformer winding with SFRA method and impact test. Metrology and Measurement Systems, 2016, v. 23, iss. 4, pp. 521 – 529. DOI: 10.1515/mms-2016-0044
4. Черенда Н.Н., Ласковнев А.П., Басалай А.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Легирование поверхностного слоя меди с помощью квазистационарного плазменного ускорителя. Известия ВУЗов. Физика, 2014, т. 57, № 10-3, с. 293 – 297.
5. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shymanski V.I., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M., Laskovnev A.P., Remnev G.E. Modification of Ti-6Al-4V alloy element and phase composition by compression plasma flows impact. Surface and Coatings Technology, 2018, v. 355, pp. 148 – 154. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.048
6. Шиманский В.И., Черенда Н.Н., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Термическая стабильность структурно-фазового состава титана, обработанного компрессионными плазменными потоками. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2018, № 7, с. 84 – 91. DOI: 10.7868/S0207352818070132
7. Углов В.В., Черенда Н.Н., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. Конвективный массоперенос в поверхностных слоях титана, подвергнутого воздействию компрессионными плазменными потоками. Физика и химия обработки материалов, 2012, № 6, с. 31 – 39.
8. Углов В.В., Шиманский В.И., Черенда Н.Н., Люшкевич В.А., Асташинский В.М., Асташинская М.В., Рева О.В. Формирование поверхностного сплава никелида титана воздействием компрессионными плазменными потоками на систему никель–титан. Перспективные материалы, 2013, № 4, с. 72 – 79.
9. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Structure and phase composition of Nb/Ti system subjected to compression plasma flows impact. Surface and Coatings Technology, 2015, v. 278, pp. 183 – 189. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.08.014
10. Шиманский В.И., Черенда Н.Н., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Изменение элементного состава и структуры титана, легированного молибденом, хромом и цирконием под воздействием компрессионных плазменных потоков. Известия ВУЗов. Физика, 2014, т. 57, № 10-3, с. 317 – 321.
11. Vasil'ev S.V., Val'ko N.G., Ivanov A.Y., Sitkevich A.L. Changes in the crystal structure of metals in the course of their laser processing. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2022, v. 95, no. 3, pp. 821 – 829. DOI: 10.1007/s10891-022-02540-9
12. Черенда Н.Н., Бибик Н.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Термическая стабильность структурно-фазового состояния алюминия и сплавов си-

- стемы Al – Si, легированных атомами циркония при воздействии компрессионных плазменных потоков. Физика и химия обработки материалов, 2023, № 5, с. 5 – 17. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-5-5-17
13. ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1992, 13 с.
14. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. М.: Стандартинформ, 2008, 19 с.
15. Жидков М.В., Лигачев А.Е., Потемкин Г.В., Манохин С.С., Ремнев Г.Е., Колобов Ю.Р. Структура кратера, образовавшегося на поверхности стали после воздействия мощного импульсного потока ионов. Физика и химия обработки материалов, 2017, № 6, с. 18 – 21.
16. Жидков М.В., Колобов Ю.Р., Лигачев А.Е., Ремнев Г.Е., Смолякова М.Ю., Божко С.А. Изменение рельефа поверхности магния под действием мощного импульсного ионного пучка. Известия ВУЗов. Физика, 2014, т. 57, № 10-3, с. 220 – 225.
17. Потемкин Г.В., Лигачев А.Е., Жидков М.В., Колобов Ю.Р., Ремнев Г.Е., Газизова М.Ю., Божко С.А., Буреев О.А. Изменение рельефа поверхности магния под действием мощного импульсного ионного пучка. Физика и химия обработки материалов, 2015, № 4, с. 5 – 9.
18. Anishchik V.M., Uglov V.V., Astashynski V.M., Astashynski V.M. Compressive plasma flows interaction with steel surface: Structure and mechanical properties of modified layer. Vacuum, 2003, v. 70, iss. 2 – 3, pp. 269 – 274. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00654-1
- test. Metrology and Measurement Systems, 2016, v. 23, iss. 4, pp. 521 – 529. DOI: 10.1515/mms-2016-0044
4. Cherenda N.N., Laskovnev A.P., Basalai A.V., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M., Legirovaniye poverkhnostnogo sloya medi s pomoshchyu kvazistatsionarnogo plazmennogo uskoritelya [Alloying of a copper surface layer using a quasi-stationary plasma accelerator]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika [Russian Physics Journal], 2014, v. 57, no. 10-3, pp. 293 – 297. (In Russ.).
5. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shymanski V.I., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M., Laskovnev A.P., Remnev G.E. Modification of Ti-6Al-4V alloy element and phase composition by compression plasma flows impact. Surface and Coatings Technology, 2018, v. 355, pp. 148 – 154. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.048
6. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, v. 12, no. 4, pp. 710 – 716. DOI: 10.1134/S102745101804016X
7. Uglov V.V., Cherenda N.N., Astashynski V.M., Kvasov N.T. Konvektivny massoperenos v poverkhnostnykh sloyakh titana, podvergnutogo vozdeystviyu kompressionnymi plazmennymi potokami [Convective mass transfer in the surface Ti layers after the action of compression plasma fluxes]. Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2012, no. 6, pp. 31 – 39. (In Russ.).
8. Uglov V.V., Shymanski V.I., Cherenda N.N., Lyushkevich V.A., Astashynski V.M., Astashynskaya M.V., Reva O.V. Formation of titanium nickelide surface alloy under impact of compressive plasma flows on the nickel-titanium system. Inorganic Materials: Applied Research, 2013, v. 4, no. 5, pp. 475 – 480. DOI: 10.1134/S2075113313050183
9. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Structure and phase composition of Nb/Ti system subjected to compression plasma flows impact. Surface and Coatings Technology, 2015, v. 278, pp. 183 – 189. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.08.014
10. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Izmeneniye elementnogo sostava i struktury titana, legirovannogo molibdenom, khromom i tsirkoniem pod vozdeystviem kompressionnykh plazmennykh potokov [Changes in the elemental composition and structure of titanium alloyed with molybdenum, chromium and zirconium under the influence of compression plasma flows]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika [Russian Physics Journal], 2014, v. 57, no. 10-3, pp. 317 – 321. (In Russ.).
11. Vasil'ev S.V., Val'ko N.G., Ivanov A.Y., Sitkevich A.L. Changes in the crystal structure of metals in the course of their laser processing. Journal of Engineering Physics

References

1. Moroz N.I., Valko N.G. Vliyaniye otzhiga na korrozionnuyu stoykost transformatornoy stali, legirovannoy kremniyem [Effect of annealing on the corrosion resistance of silicon-alloyed transformer steel]. Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaýnaga ýniversiteta imya Yanki Kupaly. Ser. 2, Matematyka. Fizika. Informatyka, Vylichalnaya Tekhnika i Kiravanne [Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Ser. 2, Mathematics. Physics. Informatics, Computing and Management], 2022, v. 12, no. 3, pp. 108 – 115. (In Russ.).
2. Koreciak 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 2020), 1 – 14 September 2020, Pilsen, Czech Republic. Pilsen: University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering, 2020, art. 9214664. DOI: 10.1109/Diagnostika49114.2020.9214664
3. Gutten M., Janura R., Sebok M., Koreciak D., Kucera M. Measurement of short-circuit effects on transformer winding with SFRA method and impact
4. Cherenda N.N., Laskovnev A.P., Basalai A.V., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M., Legirovaniye poverkhnostnogo sloya medi s pomoshchyu kvazistatsionarnogo plazmennogo uskoritelya [Alloying of a copper surface layer using a quasi-stationary plasma accelerator]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika [Russian Physics Journal], 2014, v. 57, no. 10-3, pp. 293 – 297. (In Russ.).
5. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shymanski V.I., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M., Laskovnev A.P., Remnev G.E. Modification of Ti-6Al-4V alloy element and phase composition by compression plasma flows impact. Surface and Coatings Technology, 2018, v. 355, pp. 148 – 154. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.048
6. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, v. 12, no. 4, pp. 710 – 716. DOI: 10.1134/S102745101804016X
7. Uglov V.V., Cherenda N.N., Astashynski V.M., Kvasov N.T. Konvektivny massoperenos v poverkhnostnykh sloyakh titana, podvergnutogo vozdeystviyu kompressionnymi plazmennymi potokami [Convective mass transfer in the surface Ti layers after the action of compression plasma fluxes]. Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2012, no. 6, pp. 31 – 39. (In Russ.).
8. Uglov V.V., Shymanski V.I., Cherenda N.N., Lyushkevich V.A., Astashynski V.M., Astashynskaya M.V., Reva O.V. Formation of titanium nickelide surface alloy under impact of compressive plasma flows on the nickel-titanium system. Inorganic Materials: Applied Research, 2013, v. 4, no. 5, pp. 475 – 480. DOI: 10.1134/S2075113313050183
9. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Structure and phase composition of Nb/Ti system subjected to compression plasma flows impact. Surface and Coatings Technology, 2015, v. 278, pp. 183 – 189. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.08.014
10. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Izmeneniye elementnogo sostava i struktury titana, legirovannogo molibdenom, khromom i tsirkoniem pod vozdeystviem kompressionnykh plazmennykh potokov [Changes in the elemental composition and structure of titanium alloyed with molybdenum, chromium and zirconium under the influence of compression plasma flows]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika [Russian Physics Journal], 2014, v. 57, no. 10-3, pp. 317 – 321. (In Russ.).
11. Vasil'ev S.V., Val'ko N.G., Ivanov A.Y., Sitkevich A.L. Changes in the crystal structure of metals in the course of their laser processing. Journal of Engineering Physics

- and Thermophysics, 2022, v. 95, no. 3, pp. 821 – 829. DOI: 10.1007/s10891-022-02540-9
12. Cherenda N.N., Bibik N.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structural and phase state of aluminum and alloys of the Al–Si system doped with zirconium atoms under the influence of compression plasma flows. Inorganic Materials: Applied Research, 2024, v. 15, no. 3, pp. 626 – 635. DOI: 10.1134/S2075113324700059.
13. GOST 21427.1-83. Stal' elekrotekhnicheskaya kholodnokatanaya anizotropnaya tonkolistovaya. Tekhnicheskiye usloviya [Electrical steel, cold-rolled, anisotropic, thin sheet. Technical conditions]. Moscow, Publishing House of Standards, 1992, 13 p. (In Russ.).
14. GOST R ISO 6507-1-2007. Metally i splavy. Izmerenie tverdosti po Vikkersu. Chast' 1. Metod izmereniya [ISO 6507-1:2005 Metallic materials. Vickers hardness test. Part 1: Test method (IDT)]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 19 p. (In Russ.).
15. Zhidkov M.V., Ligachev A.E., Potemkin G.V., Manokhin S.S., Remnev G.E., Kolobov Yu.R. Study of the structure of crater at the surface of 12Cr18Ni10Ti steel irradiated by high-power pulsed ion beam. Inorganic Materials: Applied Research, 2018, v. 9, no. 3, pp. 376 – 378. DOI: 10.1134/S2075113318030322
16. Zhidkov M.V., Kolobov Yu.R., Ligachev A.E., Remnev G.E., Smolyakova M.Yu., Bozhko S.A. Izmenenie rel'efa poverhnosti magniya pod dejstviem moshchnogo impul'snogo ionnogo puchka [Changes in the surface relief of magnesium under the influence of a powerful pulsed ion beam]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika [Russian Physics Journal], 2014, v. 57, no. 10-3, pp. 220 – 225. (In Russ.).
17. Potemkin G.V., Ligachev A.E., Zhidkov M.V., Kolobov Yu.R., Remnev G.E., Gazizova M., Bozhko S.A., Bureev O.A. Izmenenie rel'efa poverhnosti magniya pod dejstviem moshchnogo impul'snogo ionnogo puchka [The change in the surface topography of magnesium under high-flux C⁺ ion irradiation]. Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2015, no. 4, pp. 5 – 9 (In Russ.).
18. Anishchik V.M., Uglov V.V., Astashynski V.M., Astashynski V.M. Compressive plasma flows interaction with steel surface: Structure and mechanical properties of modified layer. Vacuum, 2003, v. 70, iss. 2 – 3, pp. 269 – 274. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00654-1

The effect of compression plasma fluxes on the structure, mechanical and corrosion properties of silicon electrical steel

N. G. Valko¹, S. V. Zlotski², V. M. Anishchik², N. A. Paulova¹, N. I. Moroz¹

¹ Yanka Kupala State University of Grodno, 22, str. Ozheshko, 230023 Grodno, Belarus

E-mail: N.Valko@grsu.by; pavlova_na_19@mail.ru; natali84@tut.by

² Belarusian State University, 4, av. Nezavisimisty, 220030 Minsk, Belarus

E-mail: Zlotski@bsu.by; Anishchik@bsu.by

The work presents the results of a study the effect of treatment with compression plasma fluxes with pulse energy density of 35 J/cm² on the structure, mechanical and protective properties of silicon electrical steels with silicon content of 6.67 %. Samples were modified with 1, 2, 3 pulses of compression plasma flows in the N-atmosphere at pressure of 400 Pa. By the method of scanning electron microscope it observed that surface of morphology characterizes with craters depending on number of pulses. By the method of X-ray diffraction was established that the lattice parameter increases. Density of dislocations and microhardness increases due high-speed cooling of the modified layer. It was established that the friction coefficient and corrosion resistance increase, due to the formation of a non-uniform melted surface in the CPFs-treated samples and due to formatting a homogeneous remelted layer.

Keywords: electrical steel, compression plasma flows, structure, microhardness, friction coefficient, corrosion resistance.