

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КРЕМНИСТОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Н.И. Мороз, Н.Г. Валько, С.В. Васильев

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы

MODIFICATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRICAL STEEL BY LASER RADIATION

N.I. Moroz, N.G. Valko, S.V. Vasilyev

Yanka Kupala State University of Grodno

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и свойств электротехнических сталей, модифицированных лазерным излучением. В качестве объекта исследования использовались стали с содержанием кремния 6,67% и 3,32%. Стали облучались лазерным излучением, генерируемым рубиновым лазером ГОР-100М, с плотностями потока лазерного излучения 10^4 Вт/см² и 10^5 Вт/см². Методом рентгеновского структурного анализа обнаружено, что облучение изучаемых кремнистых электротехнических сталей лазерным излучением с выбранными плотностями потока не приводит к изменению их структурно-фазового состояния. По методу первичной экстинкции были рассчитаны размеры областей когерентного рассеяния и плотность дислокаций сталей. Показано, что размеры областей когерентного рассеяния после облучения лазерным излучением увеличиваются, а плотность дислокаций уменьшается, что приводит к соответствующему снижению микротвердости.

Ключевые слова: электротехническая сталь, лазерное излучение, структура, твердость, рентгеновский фазовый анализ, коррозионная стойкость.

Для цитирования: Мороз, Н.И. Модификация структуры и свойств кремнистой электротехнической стали лазерным излучением / Н.И. Мороз, Н.Г. Валько, С.В. Васильев // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 2 (59). – С. 27–31. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_27. – EDN: UVGFQC

Abstract. The results of studying the structure and properties of electrical steels modified by laser radiation are presented. The steels with silicon content of 6.67% and 3.32% were used as the object of the study. The steels were irradiated with laser radiation generated by a GOR-100M ruby laser with a flux density of 10^4 W/cm² and 10^5 W/cm². By the method of XRD analysis, it was found that the laser irradiation with selected flux densities of the silicon electrical steels did not lead to a change in the structural-phase state. The coherent crystalline domain sizes and the dislocation density of steels were calculated. It is shown that the coherent crystalline domain sizes increase after laser irradiation and dislocation density decreases. The data obtained by XRD analysis correlate with decreasing in microhardness.

Keywords: electrical steel, laser radiation, structure, hardness, X-ray phase analysis, corrosion resistance.

For citation: Moroz, N.I. Modification of the structure and properties of electrical steel by laser radiation / N.I. Moroz, N.G. Valko, S.V. Vasilyev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 2 (59). – P. 27–31. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_27 (in Russian). – EDN: UVGFQC

Введение

В настоящее время исследования в области улучшения свойств электротехнических сталей являются наиболее интересными в сфере промышленных и прикладных научных разработок. В ряду широкого спектра электротехнических сталей наиболее востребованными являются анизотропные кремнистые стали, свойства которых определяются содержанием кремния и кристаллической структурой [1], [2]. Поэтому актуальным является разработка методов, позволяющих модифицировать структуру кремнистых электротехнических сталей с целью придания им требуемых эксплуатационных свойств.

В последнее время для модифицирования поверхности материалов применяются технологии с использованием концентрированных потоков

энергии и, в частности, лазерные технологии, связанные с обработкой лазерным излучением [3]. Лазерные технологии имеют свою специфику и особенности, в ряде случаев вытесняют традиционные технологии модифицирования приповерхностных слоев вследствие более высокой эффективности и уникальности получаемых результатов. Модифицирующее действие лазерного излучения осуществляется за счет целого ряда физических процессов на поверхности мишени, в том числе быстрого нагрева, плазмообразования и охлаждения [4], [5]. При этом, формирующиеся при воздействии лазерного излучения на поверхности различных материалов, микро- и наноструктуры в значительной мере определяют их физические свойства и представляют большой интерес для физики конденсированного состояния [6], [7].

Технология воздействия лазерного излучения (ЛИ) на электротехнические стали имеет свои особенности, определяемые взаимодействием лазерного излучения с металлами, и в первую очередь это касается механизмов передачи энергии и характера энерговыделения по глубине мишени, а также последующем распределении температуры и термонапряжений в металлах. Следует учитывать, что в зависимости от временных, энергетических и пространственных характеристик излучения может иметь место испарение или плавление участков поверхности, нагрев с изменением структуры кристаллитов, в том числе с формированием остаточных напряжений в зоне воздействия лазерного излучения и ее окрестности.

Несмотря на обширный экспериментальный материал по воздействию лазерного излучения на структуру и свойства электротехнических сталей, до сих пор отсутствует ясное представление о механизме направленной модификации структурных параметров и свойств, а также их взаимосвязи с параметрами лазерного излучения.

Поэтому важным является установление функциональных связей между режимами обработки ЛИ и физико-химическими процессами, определяющими формирование структуры и свойств электротехнических сталей [8]–[10].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния ЛИ на структуру и свойства анизотропных кремнистых электротехнических сталей, а также выявление зависимостей структурных параметров и свойств от плотности потока лазерного излучения.

1 Методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовались тонколистовые холоднокатаные анизотропные кремнистые стали. Исследовались стали с концентрациями Si, равными 6,67% (образец № 1) и 3,32% (образец № 2) соответственно [11]. Толщина образца № 1 составляла 0,23 мм, для образца № 2 – 0,3 мм.

Стали модифицировались лазерным излучением, генерируемым рубиновым лазером ГОР-100М, с длиной волны $\lambda = 0,694$ мкм, работающим в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс). Образцы облучались в двух режимах: с плотностью потока ЛИ, равной 10^5 Вт/см² и 10^4 Вт/см². При этом в фокусирующей системе использовались как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, что позволяло строить изображение диафрагмы на поверхности образца в виде пятна с резкими краями (диаметр варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм), что, в свою очередь, обеспечивало получение заданных плотностей потока излучения. Часть (~ 4%) лазерного излучения направлялась передней гранью стеклянного клина в измеритель энергии ИМО-2Н, входной зрачок которого был

расположен в фокальной плоскости линзы. Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Отраженное задней гранью клина излучение направлялось на коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14, сигнал с которого подавался на вход осциллографа и использовался для регистрации временной формы лазерного импульса. Схема использовавшейся в работе экспериментальной установки для ЛИ облучения приведена на рисунке 1.1.

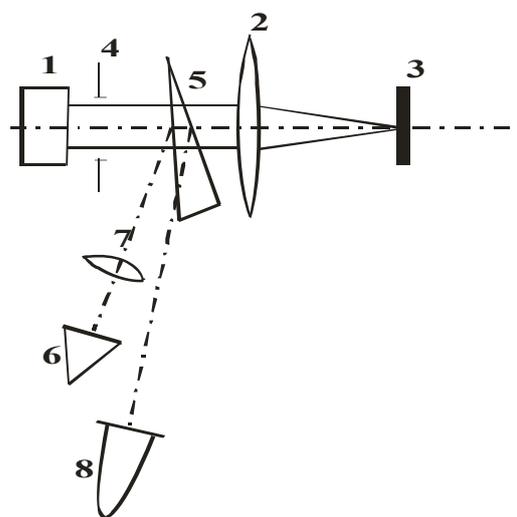


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки для облучения ЛИ

- 1 – рубиновый лазер ГОР-100 М;
- 2 – фокусирующая система;
- 3 – образец;
- 4 – диафрагма;
- 5 – стеклянный клин;
- 6 – измеритель энергии ИМО-2Н;
- 7 – линза;
- 8 – коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14.

Для оценки влияния рентгеновского излучения на структурно-фазовое состояние и тонкую структуру сталей методом рентгеноструктурного анализа были проведены исследования на дифрактометре ДРОН ЗМ (АО «ИЦ «Буревестник», г. Санкт-Петербург, Россия) в $\text{CuK}\alpha$ излучении с фокусировкой по Брегу – Бретано. Атомное строение облученных ЛИ сталей определялось по основному закону рентгеноструктурного анализа – уравнению Вульфа – Брэгга. Фазовый состав определялся при помощи карточки JCPDS-ASTM.

Размер областей когерентного рассеяния и плотность дислокаций рассчитывалась по эффекту первичной экстинкции. Относительная погрешность в определении межплоскостного расстояния не превышала 1%.

Измерения микротвердости образцов выполняли с помощью твердомера KASON 59-HV (Китай) по методу Виккерса (HV) при нагрузке 0,1 г. Время выдержки составляло 10 с.

2 Результаты эксперимента

Методом рентгеновского структурного анализа обнаружено, что исследуемые стали состоят из рентгеноаморфной фазы и твердого раствора Fe_3Si . Наличие рентгеноаморфной фазы в кремнистых электротехнических сталях вполне закономерно. Во-первых, Si в сталях выполняет роль аморфизатора, и в исследуемых сталях он присутствует в достаточном количестве. Во-вторых, данный вид стали, как правило, получают при высоких скоростях охлаждения жидкого металла.

На рисунке 2.1 приведены участки дифрактограмм от образца № 1 (рисунок 2.1, а) и от образца № 2 (рисунок 2.1, б), модифицированных лазерным излучением с плотностями потока 10^5 Вт/см² и 10^4 Вт/см². Сравнивая дифрактограммы, можно констатировать, что стали с содержанием кремния 6,67% и 3,32% имеют одинаковый фазовый состав, а после облучения ЛИ их вид не изменяется. Видно, что у сталей, облученных ЛИ, положение основных рефлексов соответствует положению рефлексов от контрольных, не облученных лазерным излучением образцов.

Указанная закономерность указывает на то, что облучение ЛИ электротехнических сталей с содержанием кремния 6,67% и 3,32% при выбранных плотностях потока ЛИ не приводит к изменению их структурно-фазового состояния. Однако на рисунке 2.1 видно, что после облучения лазерным излучением сталей интенсивность гало в малоугловой области дифрактограмм, которые свидетельствуют о наличии рентгеноаморфной фазы в сталях, больше. Увеличение гало указывает на рост степени аморфности стали. Так, в частности, степень аморфности у стали с содержанием Si 6,67% равна 9,6%, после облучения лазерным излучением с плотностью потока

10^4 Вт/см² степень аморфности увеличилась до 11,7%, а при плотности потока ЛИ, равным 10^5 Вт/см² – до 14,3%.

Аналогичные закономерности обнаружены и для стали с содержанием Si, равным 3,32%. Для контрольного образца № 2 степень аморфности равна 6,7%, после облучения с плотностью потока 10^4 Вт/см² степень аморфности увеличивается до 9,3%, а при 10^5 Вт/см² – до 12,3%. Таким образом, установлено, что с увеличением плотности потока лазерного излучения степень аморфности облученных сталей увеличивается, что обусловлено быстрым локальным нагревом поверхности вследствие облучения лазерным излучением. Так, в частности, степень аморфности стали с содержанием Si 6,67% после облучения ЛИ с плотностью потока 10^5 Вт/см² возрастает в 1,5 раза, при облучении стали с плотностью потока, равной 10^4 Вт/см² в 1,2 раза в сравнении с контрольным образцом. Для стали с содержанием кремния 3,32% после облучения лазерным излучением с плотностью потока 10^5 Вт/см² возрастает в 1,8 раза в сравнении с контрольным образцом, при облучении стали с плотностью потока, равной 10^4 Вт/см² в 1,3 раза.

На рентгенограммах видно, что после обработки ЛИ кристаллические рефлексы от фазы Fe_3Si становятся уже, что указывает на уменьшение их физического уширения и соответствующего уменьшения плотности дислокаций. Методом первичной экстинкции для образцов № 1 и образцов № 2, обработанных лазерным излучением, были рассчитаны области когерентного рассеяния (ОКР) и плотность дислокаций. Обнаружено, что после обработки ЛИ величина ОКР в сталях увеличивается, а плотность дислокаций уменьшается, что указывает на соответствующее уменьшение микротвердости.

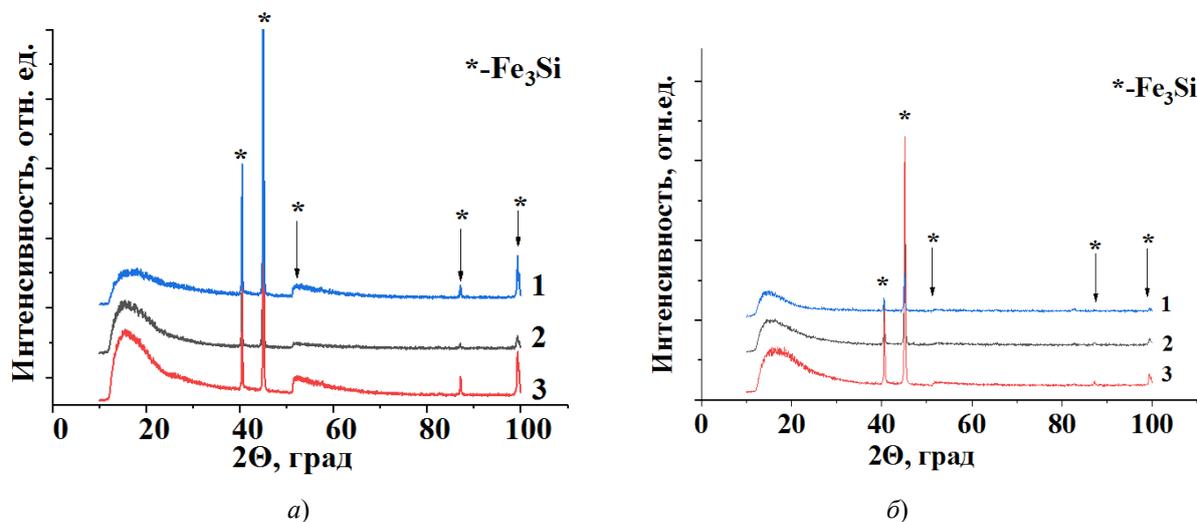


Рисунок 2.1 – Участки дифрактограмм сталей с содержанием кремния 6,67% (а) и 3,32% (б), облученных ЛИ с различными плотностями потока (1 – к.о.; 2 – 10^4 Вт/см²; 3 – 10^5 Вт/см²)

На рисунке 2.2 приведены зависимости плотности дислокаций и микротвердости для образца № 1 и образца № 2 от плотности потока лазерного излучения. Видно, что с увеличением плотности потока излучения плотность дислокаций сталей монотонно снижается. Так, плотность дислокаций для стали с содержанием 6,67% равна $7 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2}$. После облучения ЛИ с плотностью потока 10^4 Вт/см^2 плотность дислокаций уменьшается в 3,5 раза, а при облучении ЛИ с плотностью потока излучения 10^5 Вт/см^2 – на порядок. Для образца № 2 плотность дислокаций равна $3 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2}$, при облучении ЛИ с плотностью потока 10^4 Вт/см^2 плотность дислокаций уменьшается в 2 раза, а при облучении ЛИ с плотностью потока излучения 10^5 Вт/см^2 снижается на порядок.

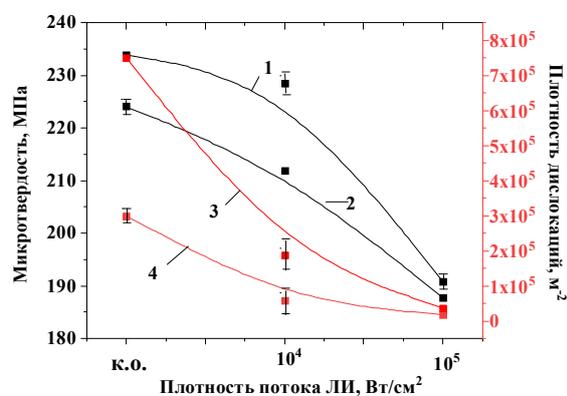


Рисунок 2.2 – Зависимости плотности дислокаций (1, 2) и микротвердости (3, 4) образцов № 1 (1, 3) и образцов № 2 (2, 4) от плотности потока ЛИ

Таким образом, установлено, что в результате воздействия ЛИ на поверхность электротехнических сталей с содержанием кремния 6,67% и 3,32% происходит отжиг дефектов, что в свою очередь должно приводить к снижению микротвердости. Механизм лазерного отжига дефектов в электротехнических сталях основан на тепловом воздействии лазерного излучения, который заключается в том, что энергия лазерного излучения, поглощаемая непосредственно электронной подсистемой металла, практически мгновенно передается в решётку и нагревает её от исходной, комнатной, температуры до температуры отжига, которая в свою очередь изменяется со временем. При этом следует учитывать, что передача энергии осуществляется путём поэтапной электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного рассеяния. При импульсном воздействии энергия лазерного излучения распространяется вглубь на длину, не превышающую длину поглощения. При этом концентрация энергии в приповерхностном слое облучаемых сталей приводит к частичному оплавлению металла. Следует учитывать, что скорость движения расплавленных слоев достаточно высокая

вследствие возникновения значительных градиентов температуры приповерхностных слоев облучаемых сталей в процессе воздействия на них лазерным излучением. Результатом описанного механизма является отжиг преимущественно линейных дефектов и конгломератов точечных дефектов.

На рисунке 2.2 видно, что микротвердость сталей с содержанием кремния 6,67% и 3,32% до воздействия лазерным излучением равна 234 МПа и 224 МПа соответственно. После облучения ЛИ микротвердость исследуемых сталей уменьшается. Так, значение микротвердости для стали с содержанием кремния 6,67% после воздействия ЛИ с плотностью потока 10^4 Вт/см^2 равно 229 МПа, а после воздействия ЛИ с 10^5 Вт/см^2 микротвердость стали уменьшается до 190 МПа. Аналогично для стали с содержанием Si, равным 3,32% после облучения ЛИ с плотностями потока 10^4 Вт/см^2 и 10^5 Вт/см^2 , микротвердость равна 212 и 189 МПа соответственно [12], [13].

Результаты исследования микротвердости сталей коррелируют с данными, полученными при расчете плотности дислокаций, а именно при увеличении плотности потока ЛИ микротвердость облучаемых электротехнических сталей с содержанием кремния 6,67% и 3,32% уменьшается. В частности, после воздействия ЛИ с плотностью потока 10^5 Вт/см^2 на сталь с содержанием кремния 6,67% микротвердость уменьшается на 23%, а для стали с содержанием кремния 3,32% – на 17%.

Заключение

Исследовано влияние локальной лазерной обработки на структуру и свойства анизотропной кремнистой электротехнической стали с содержанием кремния 6,67% и 3,32%. Сталь облучалась лазерным излучением в режиме свободной генерации, генерируемым рубиновым лазером ГОР-100М в двух режимах с плотностями потока лазерного излучения 10^4 Вт/см^2 и 10^5 Вт/см^2 .

Методом рентгеновского структурного анализа обнаружено, что структурно-фазовое состояние исследуемых сталей с содержанием кремния 6,67% и 3,32% после облучения ЛИ при выбранных плотностях потока не изменяется.

Установлено, что с увеличением плотности потока ЛИ степень аморфности облученных сталей увеличивается, что обусловлено быстрым локальным нагревом поверхности вследствие облучения лазерным излучением. Так, в частности, степень аморфности стали с содержанием Si 6,67% после облучения ЛИ с плотностью потока 10^5 Вт/см^2 возрастает в 1,5 раза, при облучении стали с плотностью потока, равной 10^4 Вт/см^2 , – в 1,2 раза. Для стали с содержанием кремния 3,32% после облучения ЛИ с плотностью потока 10^5 Вт/см^2 степень аморфности возрастает в 1,8

раза, а после облучения с плотностью потока ЛИ 10^4 Вт/см² – в 1,3 раза.

Показано, что вследствие лазерного отжига дефектов плотность дислокаций сталей после лазерного воздействия уменьшается. В частности, плотность дислокаций для стали с содержанием 6,67% равна $7 \cdot 10^5$ м⁻². После облучения ЛИ с плотностью потока 10^4 Вт/см² плотность дислокаций уменьшается в 3,5 раза, а при облучении ЛИ с плотностью потока излучения 10^5 Вт/см² – на порядок.

Обнаружено, что микротвердость после локальной лазерной обработки с плотностью потока излучения 10^5 Вт/см² образцов стали с содержанием кремния 3,32% ниже практически в 1,3 раза по сравнению с контрольными образцами, а для стали с содержанием кремния 6,67% – в 1,2 раза, что связано с отжигом дефектов сталей и соответствующим уменьшением плотности дислокаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Thermal Processes in Materials of Oil Transformers* / R. Janura, M. Gutten, D. Korenciak, M. Sebok // Proceedings of 2016 International Conference On Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DE-MISEE 2016). – 2016. – P. 81–84.
2. *Measurement of short-circuit effects on transformer winding with SFRA method and impact test* / M. Gutten, R. Janura, M. Sebok, D. Korenciak, M. Kucera // Metrology and measurement systems. – 2016. – Vol. 23, iss. 4. – P. 521–529.
3. *Hecht, J. A short history of laser development* / J. Hecht // Appl. Opt. – 2010. – Vol. 49, iss. 25. – P. F99–F122.
4. *Макаров, Г.Н.* Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии / Г.Н. Макаров // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183, № 7. – С. 673–718.
5. *Завестовская, И.Н.* Лазерное наноструктурирование поверхности материалов / И.Н. Завестовская // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 11. – С. 942–954.
6. *Kovalenko, V.* Laser Micro- and Nanoprocessing / V. Kovalenko // International Journal of Nanomanufacturing. – 2006. – Vol. 1, № 2. – P. 173–180.
7. *Laser machining by short and ultrashort pulses: state of the art and new opportunities in the age of photons* / J. Meijer, K. Du, A. Gilner, D. Hoffmann, V. Kovalenko, T. Masuzawa, A. Ostendorf, R. Poprawe, W. Shulz // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 51, № 2. – P. 531–550.
8. *Рыкалин, Н.Н.* Лазерная обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Кокора – Москва: Машиностроение, 1975. – 295 с.
9. *Ivanov, A.* Structure changes in metals during their laser treating / A. Ivanov, A. Sitkevich, N. Valko, S. Vasiliev // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online): Abstracts. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020. – P. 464–467, 9241929.
10. *Changes in the Crystal Structure of Metals in the Course of Their Laser Processing* / S.V. Vasil'ev, N.G. Val'ko, A.Y. Ivanov, A.L. Sitkevich // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, № 3. – P. 821–829.
11. *ГОСТ 21427.1-83.* Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1992. – 13 с.
12. *Мороз, Н.И.* Влияние отжига на коррозионную стойкость трансформаторной стали, легированной кремнием / Н.И. Мороз, Н.Г. Валько // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 108–115.
13. *Мороз, Н.И.* Влияние термической обработки на твердость, структуру и свойства электротехнической стали / Н.И. Мороз, Н.Г. Валько // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 83–91.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № T23-086).

Поступила в редакцию 29.01.2024.

Информация об авторах

Мороз Наталья Ивановна – аспирант
Валько Наталья Георгиевна – к.ф.-м.н., доцент
Васильев Сергей Валерьевич – к.ф.-м.н., доцент