

государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. № 17 (4). С. 1072–1076.

24. Boinet M., Bernard J., Chatenet M., Dalard F., Maximovitch S. Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques. Part II: Acoustic emission study // *Electrochimica Acta*. 2010. V. 55. P. 3454–3463.

25. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.

26. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2019. № 12. С. 80–87.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Оценка вероятности возникновения электрохимической коррозии при формировании микроплазменных оксидных покрытий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 5–15.

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF ELECTROCHEMICAL CORROSION DURING THE FORMATION OF MICROPLASMA OXIDE COATINGS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: vnvkv@yandex.ru

Modification of parts surfaces by forming oxide coatings using the microplasma method is used in industry to improve their tribomechanical and anticorrosive properties. Since the nature of the oxidation process is multifactorial, the probability of damage to the part due to the occurrence of electrochemical corrosion is significant. The article establishes criteria indicating the occurrence of corrosion on the surface of the product at various stages of the oxidation process. It is shown that in the process of violation of the continuity of the coating, the conductivity of the oxide layer changes, which is reflected in the course of the forming voltage curves on the workpiece. A criterion for assessing the probability of corrosion during microplasma oxidation is proposed. The possibility of early detection of the onset of coating destruction under the action of electrochemical corrosion without going through a full cycle of modifying the surface of the part will increase the economic efficiency of microplasma oxidation.

Keywords: microplasma oxidation, microarc oxidation, electrochemical corrosion, damage area, ceramic coatings.

Поступила в редакцию/received: 13.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;
принята/accepted: 19.03.2025

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук,
К.А. САХАРОВ, асп.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., Сахаров К.А., 2025

Описаны результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик (твердости, коэффициента трения, интенсивности изнашивания) быстрорежущей стали после лазерной поверхностной обработки. Проведен анализ влияния энергетического параметра лазерной обработки (энергии лазерного излучения в расчете на единицу площади обрабатываемой поверхности) на триботехнические характеристики поверхности быстрорежущей стали.

Ключевые слова: лазерная обработка, быстрорежущая сталь, твердость, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-16-22

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное упрочнение деталей лазерным лучом широко применяется с целью повышения их эксплуатационных свойств, в том числе триботехнических [1–6]. От других известных технологий модифицирования поверхностей лазерная обработка выгодно отличается производительностью, технологичностью, экономичностью, высокой степенью автоматизации, локальным характером воздействия. Однако реализовать все преимущества лазерной технологии в максимальной степени можно только при использовании оптимальных режимов обработки, к основным из которых относятся мощность лазерного излучения и скорость перемещения лазерного луча.

За счет изменения параметров лазерного излучения удастся в широких пределах регулировать скорости нагрева и охлаждения металла, а также время облучения, благодаря чему становится возможным получить требуемые структуры и свойства сплавов в зоне лазерного воздействия [7]. Один из таких параметров – плотность мощности излучения $q_w = \frac{4W}{\pi d_n^2}$, где W – мощность излучения лазера непрерывного действия; d_n – диаметр лазерного пятна на поверхности образца. В данном выражении предполагается, что энергия излучения равномерно распределена по сечению лазерного пучка. При термоупрочнении величина плотности мощности излучения q_w для большинства металлов и сплавов лежит в диапазоне 10...100 кВт/см² [8].

Близким по смыслу энергетическим параметром лазерной обработки материалов является параметр q , характеризующий энергию лазерного излучения, приходящуюся на единицу площади обрабатываемой поверхности:

$$q = \frac{W}{v d_{\text{л}}},$$

где v – скорость перемещения лазерного луча.

В работе проанализировано влияние данного энергетического параметра лазерной поверхностной обработки стальных образцов на их триботехнические характеристики (твердость, коэффициент трения, интенсивность изнашивания) и определен характер этого влияния.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Лазерной обработке подвергались образцы из быстрорежущей стали Р6М5, которые предварительно прошли закалку и трехкратный отпуск. Режимы лазерной обработки отличались мощностью излучения и скоростью перемещения луча. Поверхность образцов подвергалась упрочнению на трех режимах:

- 1) $W = 2,4$ кВт, $v = 25$ мм/с;
- 2) $W = 2,0$ кВт, $v = 15$ мм/с;
- 3) $W = 2,4$ кВт, $v = 15$ мм/с.

Диаметр лазерного пятна $d_{\text{л}}$ на поверхности обрабатываемых образцов составлял 6 мм. Такие режимы соответствуют изменению параметра q в интервале $16 \dots 27$ Дж/мм². Величина параметра q_w составляла $7 \dots 8,5$ кВт/см².

Одним из важных триботехнических параметров материала является его твердость. От нее зависят, в частности, контактная жесткость, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики контакта деталей машин. На практике в основном используют три метода измерения твердости: по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу. Их объединяет общий принцип – индентирование исследуемого материала твердым наконечником правильной геометрической формы, а различаются они представлением результата. К сожалению, все эти характеристики не имеют явного физического смысла, а последняя вообще выражается в условных единицах. Явный физический смысл имеет только так называемая твердость индентирования H_{IT} (ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002)), известная также как твердость по Мейеру: она равна среднему нормальному напряжению (контактному давлению) в контакте индентора с отпечатком в материале образца. Поскольку с трибологической точки зрения интерес представляет именно эта величина, для характеристики твердости упрочненной лазерным излучением поверхности использовали величину H_{IT} , которую определяли вдавливанием в поверхность материала алмазных инденторов в виде четырехгранной пирамиды (Виккерса) или конуса с закругленной вершиной (Роквелла). Числовое значение твердости H_{IT} оценивали по нормальной нагрузке N на индентор и площади проекции отпечатка A_p на номинальную поверхность образца:

$$H_{\text{IT}} = \frac{N}{A_p}.$$

Твердость индентирования на микромасштабном уровне (микротвердость) измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на пирамидальный индентор 1,5 и 2 Н. На макромасштабном уровне твердость (макротвердость) измеряли на специально изготовленном твердомере при нагрузке на конический индентор Роквелла 180 и 270 Н.

Коэффициент трения – один из основных триботехнических параметров фрикционного контакта. Измерение коэффициента трения исследуемых образцов проводили на микротрибометре [9] по схеме «шар – плоскость». Плоский образец из исследуемого материала контактировал со сферическим контробразцом из конструкционной подшипниковой стали ШХ15 диаметром 1 мм. Нагрузка на контакт варьировалась в диапазоне 1...5 мН.

Интенсивность изнашивания также относится к основным триботехническим параметрам материала фрикционной пары. Для экспресс-оценки износостойкости материала часто проводят испытания в режиме изнашивания о закрепленный абразив [10–12]. В нашем случае стальные образцы испытывались на изнашивание о закрепленный абразив по схеме «шар – плоскость». В качестве контробразца использовали сферический наконечник с алмазным напылением. Диаметр наконечника равен 1 мм. К контакту прикладывали нагрузку в 0,5 Н. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой 20 Гц. После испытаний записывали профилограммы поверхности образцов перпендикулярно канавке изнашивания (рис. 1), по которым определяли глубину последней.

Затем рассчитывали линейную интенсивность изнашивания I_h и износостойкость II материала – величину, обратную I_h (ГОСТ 27674-88).

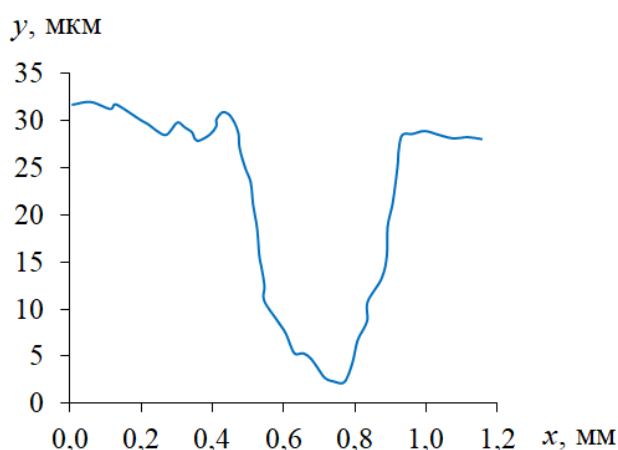


Рис. 1. Типичный пример профилограммы канавки изнашивания

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с целью работы полученные в экспериментах триботехнические характеристики стальной поверхности после лазерной обработки рассматривались в связи с параметром q .

Значения твердости исследованных стальных поверхностей после лазерной обработки в зависимости от нагрузки на индентор представлены на рис. 2. При измерении микротвердости глубина отпечатка составляла 2...3 мкм. Видно, что тонкий поверхностный слой материала толщиной $h \approx 3$ мкм существенно упрочнен, при $h \geq 3$ мкм твердость практически постоянна вплоть до нескольких десятков микрометров от поверхности. В наших экспериментах величина линейного износа на порядок превышает глубину внедрения индентора при измерении микротвердости.

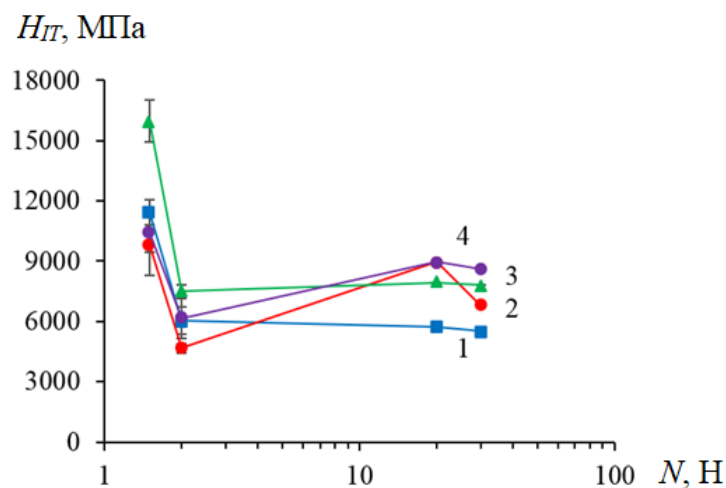


Рис. 2. Зависимость твердости стальных образцов от нагрузки на индентор:

1 – без лазерной обработки; 2 – $q = 16 \text{ Дж/мм}^2$;
3 – $q = 22 \text{ Дж/мм}^2$; 4 – $q = 27 \text{ Дж/мм}^2$

Однозначного влияния параметра q на микротвердость не выявлено (рис. 3(а)).

Что касается макротвердости поверхности после лазерной обработки, то можно отметить явное увеличение этой характеристики с увеличением энергетического параметра q – до полутора раз в исследованном диапазоне величин q (рис. 3(б)).

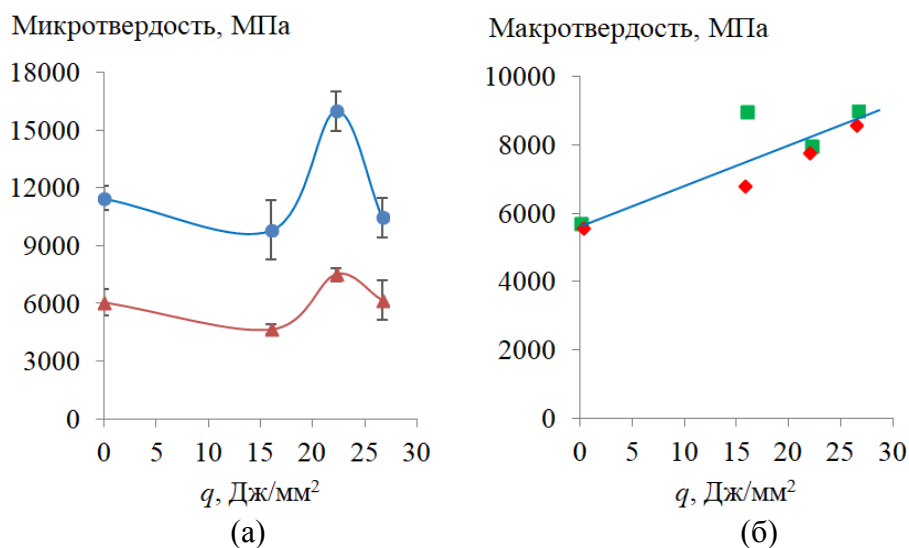


Рис. 3. Микро- (а) и макро- (б) твердость стальных образцов в зависимости от энергетического параметра лазерной обработки q :

● – $N = 1,5 \text{ Н}$; ▲ – $N = 2 \text{ Н}$; ■ – $N = 180 \text{ Н}$; ◆ – $N = 270 \text{ Н}$

Результаты измерений коэффициента трения f по описанной выше методике в двух направлениях – параллельно и перпендикулярно движению лазерного луча по поверхности образца – представлены на рис. 4 с доверительным интервалом при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

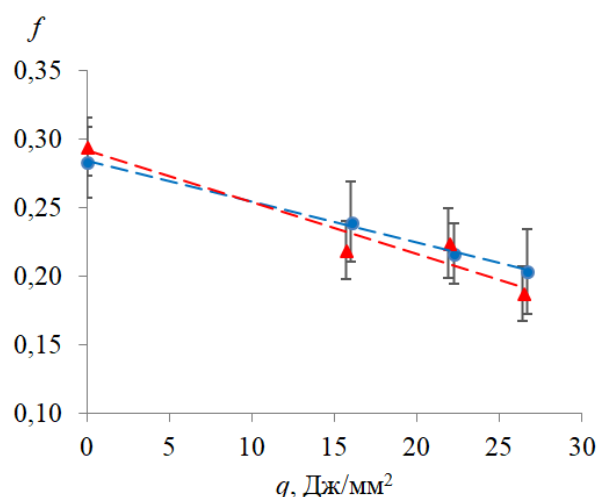


Рис. 4. Коэффициент трения
в зависимости от параметра лазерной обработки q

Наблюдается отчетливо выраженная убывающая зависимость коэффициента трения от параметра q , характер которой практически линейный с высокой степенью корреляции (коэффициент корреляции 0,99).

Характеристики изнашивания, полученные при испытании на абразивную износостойкость поверхностей после лазерной обработки, приведены на рис. 5. Экспериментальные значения коэффициента изнашивания K [13] исследуемых образцов сравнимы по порядку величины с известными значениями для упрочненных инструментальных сталей [13] и примерно на порядок меньше соответствующих значений для абразивного изнашивания сталей о закрепленный абразив [14].

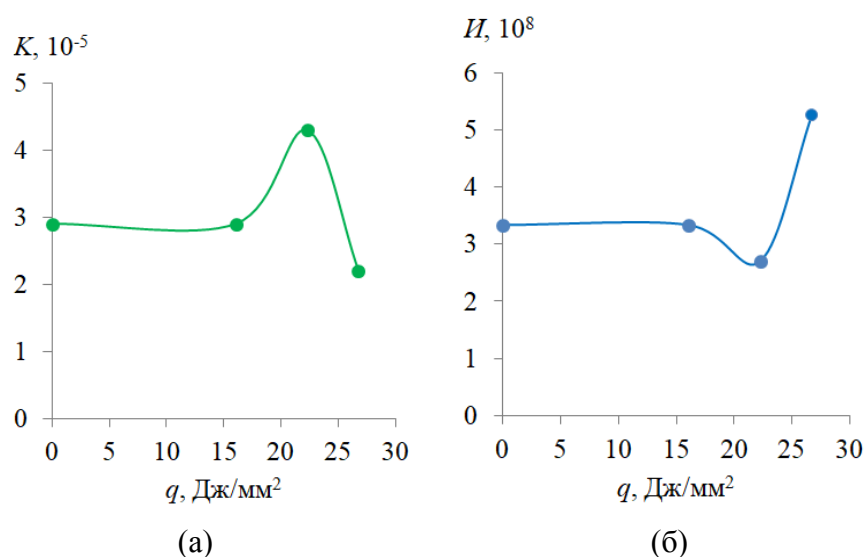


Рис. 5. Характеристики изнашивания стальных поверхностей, обработанных лазерным излучением с различным значением параметра q : коэффициент изнашивания (а); износостойкость (б)

Однозначного влияния параметра q на абразивную износостойкость обработанной поверхности не выявлено: лазерная обработка может как повысить, так и понизить износостойкость по сравнению с необработанной поверхностью. Тем не

менее результаты испытаний, представленные на рис. 5, свидетельствуют о возможности существенного повышения износостойкости быстрорежущей стали при оптимальных режимах лазерной обработки поверхности. Окончательное обоснование и конкретные характеристики таких оптимальных режимов станут предметом дальнейшего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показали, что энергетический параметр q , который характеризует энергию лазерного излучения, приходящуюся на единицу площади обрабатываемой поверхности, влияет на макротвердость поверхностного слоя обрабатываемой быстрорежущей стали, повышая ее до 1,5 раз в исследованном диапазоне мощности и скорости перемещения луча. Выявлено и влияние данного параметра на коэффициент трения плоской заготовки из быстрорежущей стали в паре со сферическим индентором из высокоуглеродистой стали. В исследованном диапазоне режимов лазерного излучения зафиксировано снижение коэффициента трения (также практически в 1,5 раза) с ростом величины параметра q . Менее однозначное влияние в описанных экспериментах данный параметр оказал на интенсивность изнашивания. Однако при определенных величинах параметра q эксперименты также показали возможность существенного повышения износостойкости быстрорежущей стали. Необходимо проведение дополнительных исследований для уточнения характера влияния параметра q на интенсивность изнашивания обработанной поверхности и обоснования диапазона оптимальных значений данного параметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Пешкун Ю.Н., Девойно О.Г., Калинин А.С. К вопросу влияния режимов термической и лазерной обработки на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // *Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: Материалы научно-практической конференции*. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2016. С. 105–107.
2. Бирюков В.П. Анализ влияния режимов лазерного упрочнения на механические и триботехнические свойства поверхностей трения сталей // *Журнал передовых исследований в области естествознания*. 2022. № 17. С. 8–12.
3. Сидашов А.В., Козаков А.Т., Ярьско С.И., Каковкина Н.Г., Мантуров Д.С. Фазовый состав и трибологические характеристики поверхностных слоев углеродистых инструментальных сталей после лазерной обработки на воздухе // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 4. С. 47–58.
4. Юдина А.В., Гаврилов Г.Н. Анализ изменения микротвердости быстрорежущих сталей после лазерной обработки // *European Student Scientific Journal*. 2014. № 1. URL: <https://sjes.esrae.ru/ru/article/view?id=199> (дата обращения: 22.02.2025).
5. Гаврилов Д.И., Жданов А.В., Беляев И.В. Влияние лазерной модификации поверхности на физико-механические и трибологические свойства штамповой стали // *Ползуновский вестник*. 2022. Т. 2. № 4. С. 14–18.
6. Токарев Д.И., Дроздов А.А., Морозов Е.А., Абляз Т.Р., Иванова Ю.С., Полежаев И.С. Влияние лазерного воздействия на состояние закаленной быстрорежущей стали Р6М5 // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21. № 4. С. 34–41.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.

8. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник: в 3 т. / под ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. Т. 1. 647 с.

9. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова. Заявл. 25.12.1998. Опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.

10. Сизова О.В. Структурные изменения и физико-механические свойства инструментальных сталей и твердых покрытий при термическом воздействии и трении: дис. ... докт. техн. наук. Томск, 1998. 324 с.

11. Филиппов М.А., Буров С.В., Легчило В.В., Фивейский А.М., Антонов С.В., Мухаметярова Е.Н. Оценка износостойкости при абразивном изнашивании сталей со структурой метастабильного аустенита // *Инновации в материаловедении и металлургии: Материалы I Международной интерактивной научно-практической конференции*. 2012. Екатеринбург: Уральский ун-т, 2012. Ч. 1. С. 21–29.

12. Степанкин И.Н., Верещагина Л.С., Поздняков Е.П., Девойно О.Г., Веремей П.В. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2015. № 1 (60). С. 19–26.

13. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

14. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В., Сахаров К.А. Влияние режимов лазерной обработки на триботехнические характеристики поверхности быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 16–22.

THE EFFECT OF LASER TREATMENT CONDITIONS ON TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED STEEL SURFACE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.
K.A. SAKHAROV, Postgraduate

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The article describes the results of experimental studies of the tribological characteristics (hardness, friction coefficient, wear intensity) of high-speed steel after laser surface treatment. The analysis of the influence of the energy parameter of laser treatment (laser radiation energy per unit area of the treated surface) on the tribological characteristics of the high-speed steel surface is carried out.

Keywords: laser treatment, high-speed steel, hardness, friction coefficient, wear intensity.

Поступила в редакцию/received: 21.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;
принята/accepted: 19.03.2025