

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.155-169>

EDN: <https://elibrary.ru/njawtg>

УДК 621.785:631.312.021.3

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа

И. Н. Кравченко^{1,2✉}, С. А. Феськов³, П. В. Сенин⁴,
П. В. Чумаков⁴, А. А. Гуцан³

¹ *Институт машиноведения имени А. А. Благодирова
Российской академии наук
(г. Москва, Российская Федерация)*

² *Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К. А. Тимирязева
(г. Москва, Российская Федерация)*

³ *Брянский государственный аграрный университет
(г. Брянск, Российская Федерация)*

⁴ *Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)*

✉ kravchenko-in71@yandex.ru

Аннотация

Введение. Стойкость деталей почвообрабатывающей техники к абразивному износу является важнейшей эксплуатационной характеристикой. Применение различных способов упрочнения поверхностей деталей почвообрабатывающей техники является важной задачей сельскохозяйственного машиностроения. Статья посвящена исследованию эффективности применения эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов, работающих в условиях повышенного абразивного износа.

Цель исследования. Обосновать практическое применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа.

Материалы и методы. В рамках исследования для восстановления изношенных лемехов оборотного плуга производства компании «Квернеланд Групп», агрегированного с трактором «Кировец К-744», использовались покрытия на основе эпоксидного композита с гравийной крошкой различных фракций, в которых соотношение эпоксидного компаунда к гравийному наполнителю составляло 50:50. В процессе эксплуатации машинотракторного агрегата осуществлялся контроль динамики износа восстановленных лемехов. Исследуемые лемехи различались между собой фракцией гравийной крошки в эпоксидном композите. Для каждого лемеха строились зависимости динамики износа от наработки.

© Кравченко И. Н., Феськов С. А., Сенин П. В., Чумаков П. В., Гуцан А. А., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Применение гравийной крошки с дисперсностью гравийных частиц 1,75 мм в эпоксидной смоле показало наилучшую стойкость к абразивному износу. Оптимальные эксплуатационные характеристики композита обусловлены высокой адгезией частиц к эпоксидной основе, что предотвращает их расслоение и обеспечивает устойчивость покрытия при механических и ударных нагрузках. Это доказывает эффективность применения эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения рабочих поверхностей лемехов, что в условиях абразивного изнашивания приводит к снижению вероятности образования лучевого износа. *Обсуждение и заключение.* Проведенные исследования подтверждают, что применение эпоксидно-гравийных композитов позволяет повысить износостойкость покрытий в 2,8 раза по сравнению с деталями заводского изготовления. Это приведет к увеличению ресурса лемехов, работающих в условиях интенсивного абразивного трения. Применение эпоксидно-гравийных композитов при упрочнении лемехов актуально для сельскохозяйственных предприятий ввиду высокого ресурса упрочненных поверхностей в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: эпоксидно-гравийный композит, составные лемехи, абразивный износ, адгезионная прочность, упрочняющее покрытие, эксплуатационный ресурс, лучевидный износ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

Для цитирования: Кравченко И.Н., Феськов С.А., Сенин П.В., Чумаков П.В., Гуцан А.А. Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):155–169. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.155-169>

The use of Epoxy-Gravel Composites to Harden Composite Ploughshares with the Possibility of Restoring the Components Having Radial Wear

I. N. Kravchenko^{a,b✉}, S. A. Feskov^c, P. V. Senin^d,
P. V. Chumakov^d, A. A. Gutsan^c

^a *Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)*

^b *Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)*

^c *Bryansk State Agrarian University (Bryansk, Russian Federation)*

^d *National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

✉ kravchenko-in71@yandex.ru

Abstract

Introduction. The resistance of soil cultivation equipment components to abrasive wear is an important operational characteristic. Employing various methods to harden the surfaces of these components is an important task for agricultural machinery manufacturing. This article focuses on studying the effectiveness of using epoxy-gravel composites to harden composite ploughshares operating under conditions causing increased abrasive wear.

Aim of the Study. The study is aimed at substantiating the practical application of epoxy-gravel composites to harden composite ploughshares with the ability to restore the components having radial wear.

Materials and Methods. Within the framework of the study on restoring worn ploughshares of the reversible plough produced by “Kverneland Group” company and aggregated with the tractor “Kirovets K-744”, there were used coatings based on epoxy composite with gravel crumbs of different fractions, in which the ratio of epoxy compound to gravel filler was 50:50. During the machine-tractor unit operation, there was monitored the wear dynamics of the restored ploughshares. The ploughshares under study differed among themselves by the fraction of gravel crumbs in the epoxy composite. For each ploughshare under study, there were plotted the dependence of wear dynamics on operating time.

Results. The use of gravel chips with a dispersion of gravel particles of 1.75 mm in epoxy resin has shown the best resistance to abrasive wear. The optimal operational characteristics of the composite derive from the high adhesion of the particles to the epoxy base that prevents their delamination and provides the stability of the coating under mechanical and shock loads. This proves the effectiveness of using epoxy-gravel composites to harden the working surfaces of ploughshares that in the conditions of abrasive wear reduce the probability of radial wear.

Discussion and Conclusion. The conducted studies confirm that the use of epoxy-gravel composites makes it possible to increase the wear resistance of coatings by 2.8 times compared with factory-made parts. This allows increasing the service life of ploughshares operating under conditions of intense abrasive friction. The use of epoxy-gravel composites to harden ploughshares is important for agricultural enterprises, because of the high resource of hardened surfaces during their operation.

Keywords: epoxy-gravel composite, composite ploughshares, abrasive wear, adhesive strength, hardening coating, operational life, radial wear

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

For citation: Kravchenko I.N., Feskov S.A., Senin P.V., Chumakov P.V., Gutsan A.A. The use of Epoxy-Gravel Composites to Harden Composite Ploughshares with the Possibility of Restoring the Components Having Radial Wear. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):155–169. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.155-169>

Введение. Ключевую роль в технологических процессах обработки почвы играют эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей деталей почвообрабатывающих машин [1; 2]. Повышение указанных характеристик, особенно в части их стойкости к абразивному износу, является важной задачей сельскохозяйственного машиностроения [3–5]. В работах [6–8] представлен подробный анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик поверхностей, подвергающихся воздействию абразивных сред. Особое внимание уделяется методам нанесения защитных покрытий и созданию материалов, повышающих износостойкость [9–11].

В последние годы в технической литературе все больше внимания уделяется использованию современных материалов с высокими антиабразивными свойствами для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей сельскохозяйственных орудий¹ [12]. При этом особый интерес представляют композиты на основе эпоксидного компаунда с добавлением дисперсного наполнителя природного

¹ Новиков В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин : моногр. М. : ИНФРА-М, 2019. 155 с.

происхождения, например, гравийной крошки [13]. Исследования показывают, что такие материалы имеют высокий потенциал для использования в почвенных условиях. Однако эксперименты проводились на отвалах плужных корпусов, а эти детали испытывают наименьшую нагрузку по сравнению с лемехами [14; 15].

Применимость таких покрытий для деталей, работающих при высоких нагрузках и в условиях значительного абразивного износа, требует дальнейших исследований. Кроме того, возникла необходимость в разработке методов, обеспечивающих более надежную адгезию полимерных покрытий с металлическими подложками, что имеет решающее значение для обеспечения долговечности восстановленных поверхностей в процессе их эксплуатации. При этом важным остается вопрос о размере частиц композитного наполнителя. Такие данные можно получить только путем натурных испытаний в конкретных рабочих органах почвообрабатывающих машин.

Целью исследования является обоснование возможности устранения лучевидного износа и упрочнения лемехов почвообрабатывающих машин нанесением на рабочие поверхности эпоксидно-гравийных композитов.

Обзор литературы. Восстановление изношенных деталей с использованием полимерных покрытий становится все более востребованной технологией в различных отраслях народного хозяйства [16–18]. Полимерные покрытия обладают рядом преимуществ, таких как высокая износостойкость, коррозионная стойкость, устойчивость к агрессивным средам и возможность использования на сложных геометрических поверхностях, что позволяет более эффективно решать вопросы продления срока службы деталей, особенно в условиях повышенных эксплуатационных нагрузок [19; 20].

Влияние размера частиц песка в эпоксидно-песчаных композитах на их стойкость к абразивному износу исследовано в работе [21]. Авторы определяют оптимальные параметры повышения износостойкости композитов. Наибольшая износостойкость достигается при использовании песчаных частиц диаметром 1 мм. С увеличением размера песчаных частиц интенсивность изнашивания уменьшается, однако при использовании более крупных частиц этот эффект нейтрализуется за счет их вырывания из матрицы.

Разработаны и обоснованы критерии оценки эксплуатационной и экономической эффективности применения эпоксидно-песчаных композитов с различным содержанием песчаного наполнителя при упрочнении деталей почвообрабатывающих машин. Такие критерии позволяют определить целесообразность применения износостойких покрытий [22].

Согласно результатам исследований, представленных в источнике [23], качественные характеристики полимерных покрытий (уменьшение размера и снижение концентрации пор, уменьшение площади) достигают наибольших значений при замене операции ручного перемешивания полимерного композиционного материала на ультразвуковую обработку раствора. Это достигается за счет уменьшения размеров (до 2 раз) и концентрации (до 30 %) пор. Также более чем в 1,36 раза происходит снижение площади разрушенного покрытия. В связи с этим, ресурс корпусных деталей повышается в 1,45 раза за счет применения эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки.

В материалах статьи [24] представлена методика расчета точностных характеристик технологического оборудования при восстановлении посадок подшипников качения в узлах транспортных средств адгезивами.

Изучено взаимодействие эластомера Ф-40 с наночастицами меди и алюминия [25]. Наполнение эластомера Ф-40 такими наночастицами обеспечивает повышение модуля упругости, прочности и долговечности материала, а также повышает его термостойкость и теплопроводность. Это позволяет значительно увеличить теплоотвод от деталей восстановленного узла.

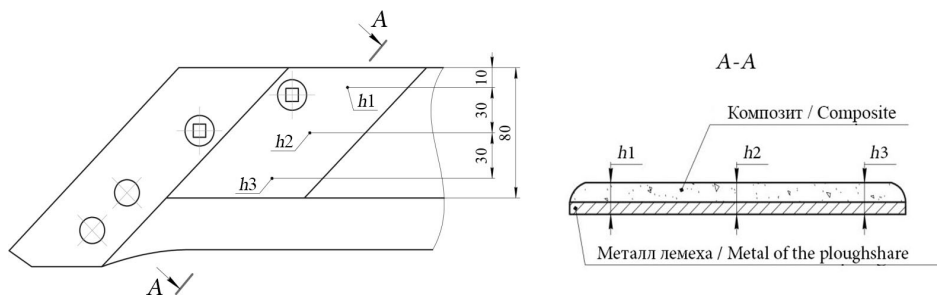
Определен оптимальный состав нанокompозита, при котором материал имеет наиболее высокие механические свойства: эластомер Ф-40 – 100 мас. ч., алюминиевый нанопорошок – 2,0 мас. ч. и медный нанопорошок – 1,6 мас. ч.

Предложенные композиционные покрытия, включающие эпоксидно-песчаные композиты и материалы на основе эластомера Ф-40 с нанонаполнителями, показывают высокую перспективность для восстановления и упрочнения деталей в условиях интенсивного износа. Их применение позволяет существенно повысить износостойкость, ресурс и устойчивость к воздействию агрессивных сред, что делает их эффективным решением для продления срока службы деталей.

Однако необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию состава композитов, анализ адгезионных свойств покрытий, а также изучение их поведения в различных эксплуатационных условиях на конкретных деталях.

Материалы и методы. В ходе проведения полевых испытаний контролю подвергались опытные образцы составных лемехов компании «Квернеланд Групп» с восстановленной режущей-лезвийной частью, применением термо-компенсирующего элемента (ТКЭ) и упрочненной областью наиболее вероятного образования лучевидного износа (рис. 1) эпоксидно-гравийными композитами (ЭГК). Лучевидный износ – один из видов непрофильного износа, который определяется веерной траекторией движения почвенной среды, а глубина и ширина – одновременным изменением движения и абразивности грунта при перемещении от нижней части лемеха к верхней.

Измерения толщин покрытия контролировалось в трех точках h_1 , h_2 , h_3 (рис. 1).



Р и с. 1. Схема измерения лучевидного износа по толщине (арабскими цифрами отмечены точки измерений)

Fig. 1. Diagram of measuring radial wear by thickness (measurement points are marked with Arabic numerals)

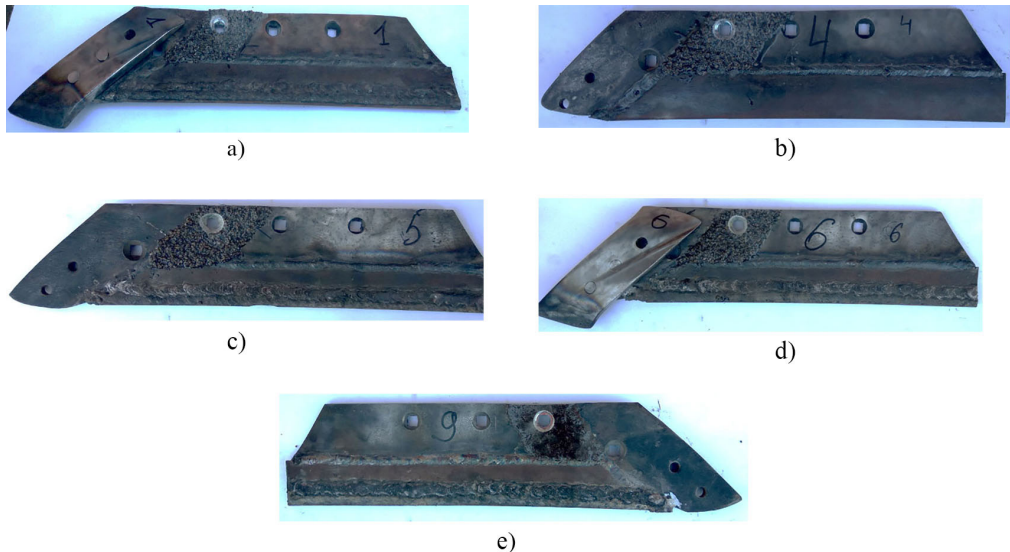
Источник: составлено авторами статьи.

Source: compiled by the authors of the article.

Упрочняющее покрытие представляет собой состав с соотношением эпоксидного компаунда (Э) и гравийного компонента (Г) для всех испытуемых образцов: Э/Г = 50/50. Отличительной особенностью опытных лемехов является применение гравийного наполнителя определенной дисперсностью. Наполнителем выступает гравийная крошка различной фракции: 3–2,5 мм; 2,5–2 мм; 2–1,5 мм; 1,5–1 мм; 1–0,5 мм (рис. 2).

Контроль динамики износа (Δh) осуществлялся в зависимости от наработки детали.

Испытания проводились на супесчаных почвах с использованием восьмикорпусного оборотного плуга производства компании «Квернеланд Групп», агрегированного с трактором «Кировец К-744».



Р и с. 2. Восстановленные остовы лемехов компании «Квернеланд Групп» с использованием эпоксидно-гравийных композитов состава 50/50:

а) 3–2,5 мм; б) 2,5–2 мм; в) 2–1,5 мм; г) 1,5–1 мм; е) 1–0,5 мм

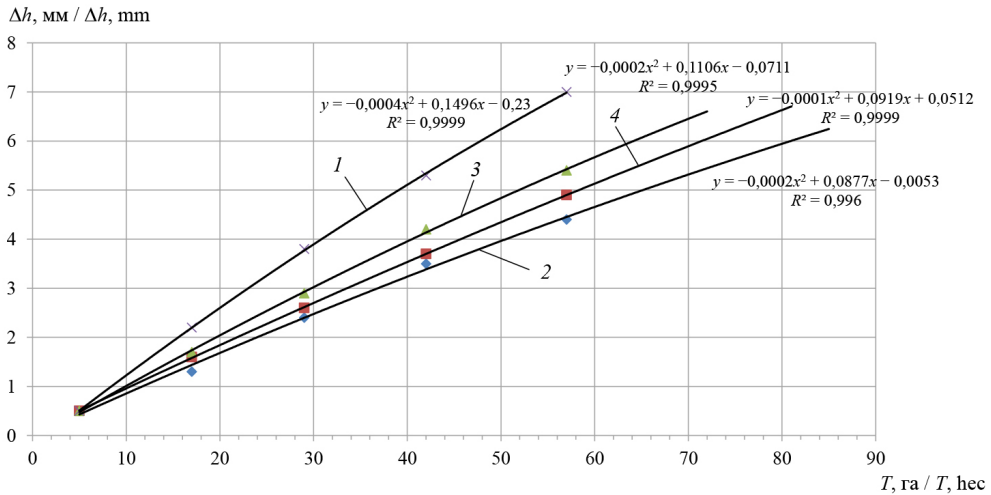
F i g. 2. The restored frames of the ploughshares of the “Kverneland Group company” using epoxy-gravel composites of composition 50/50:

а) 3–2,5 mm; б) 2,5–2 mm; в) 2–1,5 mm; г) 1,5–1 mm; е) 1–0,5 mm

Источник: фотографии сделаны П. В. Чумаковым после нанесения эпоксидно-гравийных композитов перед проведением полевых испытаний в 2024 году.

Source: the photos were taken by P. V. Chumakov after applying epoxy-gravel composites before conducting field tests in 2024.

Результаты исследования. Результаты испытаний, представленные на рисунке 3, показали прямо пропорциональное увеличение износа Δh от наработки T . Это связано с однородностью механизма абразивного изнашивания независимо от способа упрочнения [15; 26].



Р и с. 3. Изменение толщины упроченной области ЭГК от наработки:

1 – $d_e = 1,25$ мм; 2 – $d_e = 1,75$ мм; 3 – $d_e = 2,25$ мм; 4 – $d_e = 2,75$ мм

Fig. 3. Change in the thickness of the hardened area of the EGC from operating time:

1 – $d_e = 1,25$ mm; 2 – $d_e = 1,75$ mm; 3 – $d_e = 2,25$ mm; 4 – $d_e = 2,75$ mm

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи по результатам полевых испытаний и измерения лучевидного износа по толщине.

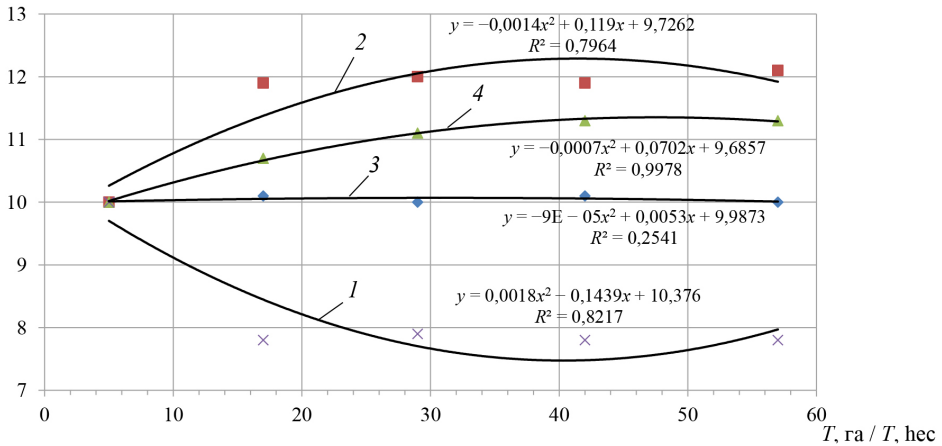
Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article based on the results of field tests and measurements of radial wear by thickness.

Исследования показывают, что максимальное значение износа Δh достигается при дисперсности частиц d_e , равной 1,25 мм. На этом уровне наработка материала составляет чуть менее 60 га. Это свидетельствует о том, что при оптимальной дисперсности частиц материал способен выдерживать значительные нагрузки и демонстрировать высокую износостойкость.

Однако при увеличении размера частиц до 1,75 мм наблюдается максимальное значение абразивной износостойкости. Это говорит о том, что более крупные частицы могут обеспечивать лучшую защиту от абразивного износа, что делает их предпочтительными для определенных условий эксплуатации. Частицы диаметром 2,75 мм имеют близкие к частицам размером 1,75 мм свойства, несмотря на их большую дисперсность. Это может быть связано с тем, что они обладают высокими показателями адгезионной прочности и износостойкости, что делает их эффективными в сложных условиях.

Графики (рис. 4) демонстрируют, что поведение композитов с различной дисперсностью частиц неодинаково. Это может быть объяснено тем, что трибологические свойства материалов зависят не только от размера частиц, но и от их распределения, формы и взаимодействия между собой. Например, более мелкие частицы могут создавать более плотную структуру, что снижает вероятность образования трещин и других дефектов, в то время как крупные частицы способствуют образованию более прочных связей между компонентами композита.

с, га/мм / с, гес/мм



Р и с. 4. Изменение стойкости к абразивному изнашиванию от наработки (цифровые обозначения соответствуют цифровой информации, представленной на рисунке 3)

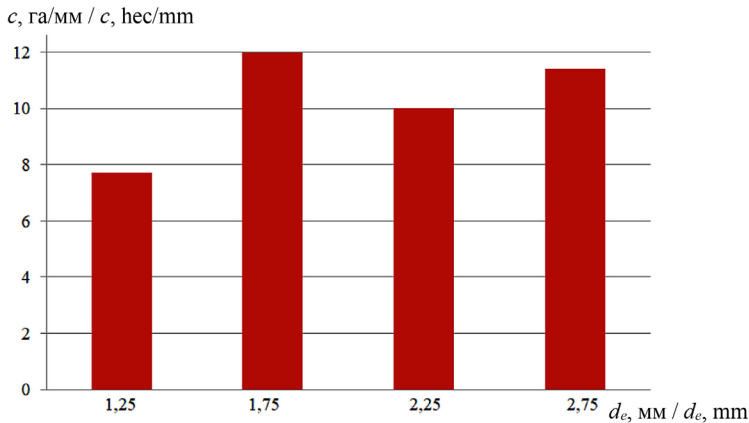
F i g. 4. Change in abrasive wear resistance with operating time (digital symbols correspond to the digital information presented in Figure 3)

Согласно данным, представленным в виде диаграмм на рисунке 5, лемеха с покрытиями, содержащими частицы диаметром 1,75 мм, демонстрируют максимальную стойкость к абразивному изнашиванию, достигающую 12 га/мм. Это говорит о том, что такие покрытия способны эффективно противостоять износу, что является критически важным для работы в условиях интенсивной эксплуатации.

С другой стороны, лемеха с покрытиями, имеющими дисперсность частиц $d_e = 1,25$ мм, показывают минимальные значения стойкости к абразивному изнашиванию. Это подчеркивает важность выбора правильного размера частиц для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик. Более крупные частицы, как правило, обеспечивают лучшую защиту от износа, что делает их предпочтительными для использования в тех условиях, где лемеха подвергаются значительным механическим нагрузкам.

Одним из наиболее впечатляющих результатов исследований является то, что применение композитов любого состава позволяет увеличить срок службы лемеха до потери им работоспособности по причине утраты толщины остова в области образования лучевидного износа в пределах 55–85 га. Это значительно превышает показатели, характерные для лемехов отечественного производства (цельнометаллические лемеха), которые, как правило, служат только до 5 смен.

Возможность использования предлагаемого лемеха позволит достичь наработки в пределах 55–85 га в расчете на одну деталь, тем самым продлив не только срок службы изделия, но и количество рабочих смен. Это позволит снизить затраты на замену и обслуживание, а также даст возможность аграриям планировать свою работу более эффективно.



Р и с. 5. Диаграммы износов соответственно средним размерам частиц наполнителя d_e
 F i g. 5. Wear diagrams according to the average particle sizes of the filler d_e

Результаты исследования наработки упрочненной области лемеха в зависимости от дисперсности наполнителя эпоксидно-гравийных композитов представлены в таблице.

Т а б л и ц а
 T a b l e

Наработка упрочненной области лемеха в зависимости от дисперсности наполнителя
Development of the hardened area of the ploughshare depending on the dispersion of the filler

Дисперсность d_e / Dispersion d_e	T , га / T , hec
В заводском исполнении / In the factory version	42
$d_e = 1-1,5$ мм / $d_e = 1-1.5$ mm	55
$d_e = 1,5-2$ мм / $d_e = 1.5-2$ mm	85
$d_e = 2-2,5$ мм / $d_e = 2-2.5$ mm	72
$d_e = 2,25-3$ мм / $d_e = 2.25-3$ mm	81

Выявленные закономерности влияния наработки на величину износа в зависимости от размера гравийной составляющей отражают комплексное влияние физических свойств композита на износостойкость и устойчивость покрытия (табл.), что подчеркивает важность тщательного подбора состава и структуры материала в зависимости от условий эксплуатации.

Обсуждение и заключение. Лемехи, восстановленные методом ТКЭ, имеют меньшую износостойкость и, соответственно, меньший ресурс по сравнению с новыми. Одним из ключевых преимуществ данной конструкции является ее способность предотвращать образование лучевидного износа, что повышает эффективность работы лемеха при вспашке абразивных почв, таких как супесь. Хотя повышение твердости до 53 HRC существенно повышает износостойкость [27; 28], широкое внедрение этой технологии ограничено из-за дополнительных затрат, необходимых для реализации термической обработки. Нельзя также не упомянуть

о возможности разрушения детали под воздействием ударных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации.

В производственных условиях для изготовления ТКЭ часто используют выбракованные рессорные листы, утратившие эксплуатационные свойства, но сохранившие твердость не менее 45 HRC. В связи со сложностью проведения дополнительной термообработки представляется целесообразным включение технологической операции нанесения абразивостойкого покрытия на основе эпоксидно-гравийного композита. Данное покрытие позволяет эффективно компенсировать недостаточную твердость восстановленных участков, повышая их износостойкость в условиях интенсивного абразивного воздействия. Износостойкость деталей с экспериментальными покрытиями оказалась в 1,4–1,9 раза выше по сравнению с изделиями без покрытия.

Ключевым фактором повышения износостойкости системы «частица – эпоксидный состав» является прочная адгезия между частицами и полимерной матрицей. Высокая степень смачивания частиц эпоксидной композицией способствует их надежному закреплению в матрице, что значительно повышает стойкость материала к абразивному износу. Такой подход позволяет удерживать абразивные частицы на рабочей поверхности в течение длительного времени, обеспечивая стабильную защиту от износа в условиях интенсивного трения. Хорошие адгезионные свойства также снижают вероятность отделения гравийных частиц под действием контактного напряжения и ударных нагрузок. Однако эффективность увеличения площади сцепления ограничивается размером частиц, что приводит к выравниванию адгезии и, соответственно, износостойкости композита.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Доказана эффективность использования эпоксидно-гравийных композитов в качестве упрочняющих покрытий для лемехов, работающих в условиях интенсивного абразивного воздействия почвенной среды.

2. Наибольшая стойкость к абразивному износу зафиксирована при применении состава эпоксидной смолы и гравийного наполнителя в соотношении 50:50, с дисперсностью гравийных частиц около 1,75 мм, позволяющая увеличить срок службы лемехов в 1,8 раза по сравнению с заводскими изделиями. Применение такого покрытия снижает вероятность образования лучевого износа, что продлевает срок службы деталей.

3. Внедрение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов представляется перспективным направлением, обеспечивающим экономическую и технологическую целесообразность. Результаты исследований являются основой для дальнейшего развития технологии и ее адаптации к другим типам почвообрабатывающих орудий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сидоров С.А., Зволинский В.Н. Повышение прочностных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин путем защиты определенных зон от интенсивного абразивного изнашивания. *Технический сервис машин*. 2019;(1):179–193. EDN: EPBXHL

- Sidorov S.A., Zvolinsky V.N. Improving the Strength Characteristics of the Working Bodies of Tillage Machines by Protecting Certain Areas from Intense Abrasive Wears. *Technical Service of Machines*. 2019;(1):179–193. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EPBXHL
2. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Миронова А.В., Рябов В.В. Повышение износостойкости и других ресурсных характеристик материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Металлург*. 2021;(5):93–99. https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_93
Sidorov S.A., Mironov D.A., Mironova A.V., Ryabov V.V. Improving Wear Resistance and other Resource Characteristics of Materials of Working Bodies of Tillage Machines. *Metallurg*. 2021;(5):93–99. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_93
 3. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(1):41–50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the Operating Lifetime of Wearable Working Bodies of Agricultural Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
 4. Величко С.А., Чумаков П.В., Коломейченко А.В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(3):396–413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>
Velichko S.A., Chumakov P.V., Kolomeychenko A.V. Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(3):396–413. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>
 5. Чумаков П.В., Мартынов А.В., Коломейченко А.В., Хасан И.Х., Коломейченко А.С. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(3):426–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., Hasan I.H., Kolomeychenko A.S. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractors Mounted Hydraulic Systems. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):426–447. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
 6. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Виноградов В.В. Анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Техника и оборудование для села*. 2013;(10):33–36. EDN: REMCWH
Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Vinogradov V.V. Analysis of Promising Techniques of Hardening Working Bodies of Tillage Machines. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2013;(10):33–36. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: REMCWH
 7. Добрин Д.А. Актуальные технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Технический сервис машин*. 2022;(4):111–117. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117>
Dobrin D.A. Relevant Hardening Technologies for Tillage Machines Work Tools. *Technical Service of Machines*. 2022;(4):111–117. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117>
 8. Колосовский А.М., Рожков А.С., Ожегов Н.М., Черкасов В.Е. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2023;6(362):43–51. <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2023-362-6-43-51>
Kolosovskii A.M., Rozhkov A.S., Ozhegov N.M., Cherkasov V.E. The Hardening of Agricultural Machines Working Bodies. *Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii*. 2023;6(362):43–51. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2023-362-6-43-51>

9. Xie Y.-J., Wang M.-C. Epitaxial MCrAlY Coating on a Ni-Base Superalloy Produced by Electrospark Deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201(6):3564–3570. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>
10. Yao J., Zhang Q., Liu R., Wu G. Laser Surface Hardening. *Laser Applications in Surface Modification*. 2022;65:83–102. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8922-2_4
11. Khan A.U., Chatterjee S., Gopinath M., Madhukar Y.K. Continuous and Pulse TIG Arc Treatment for Surface Hardening of WAAM-MIG Parts. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2024;77:2163–2172. <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03294-z>
12. Крюковская Н.С. Современные методы упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий. *Труды ГОСНИТИ*. 2017;128:118–122. EDN: ZDRLMV
Kryukovskaya N.S. Modern Methods of Hardening of Working Parts Tillage Tools. *Trudi GOSNITI*. 2017;128:118–122. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZDRLMV
13. Бирюлина Я.Ю., Михальченкова М.А. Применение абразивостойких эпоксидных композиций армированных дисперсными частицами из природных песков для восстановления деталей (отвалы и культиваторные лапы для высева семян). *Труды инженерно-технологического факультета Брянского государственного аграрного университета*. 2015;(1):77–93. EDN: YPBLTT
Birulina Ya.Yu., Mikhalkhenkova M.A. Application of Abrasion Resistant Epoxy Compositions Reinforced with Dispersed Particles of Natural Sands for Parts Recovery (Blades and Cultivator Feet for Planting Seeds). *Trudy Inzhenerno-Tekhnologicheskogo Fakul'teta Bryanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2015;(1):77–93. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YPBLTT
14. Мостовой А.С., Панова Л.Г., Курбатова Е.А. Модификация эпоксидных полимеров кремний-содержащим наполнителем с целью повышения эксплуатационных свойств. *Вопросы материаловедения*. 2016;2(86):87–95. EDN: WDCAMP
Mostovoy A.S., Panova L.G., Kurbatova E.A. Modification of Epoxy Polymers with a Silicon-Containing Filler in Order to Increase Operational Properties. *Voprosy Materialovedeniya*. 2016;2(86):87–95. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WDCAMP
15. Михальченков А.М., Лушкина С.А., Михальченкова М.А. Восстановление деталей почвообрабатывающих машин абразивостойким дисперсионно-упрочненным композитом на основе эпоксидной смолы. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015;10(130):43–46. EDN: ULDXQV
Mikhalkhenkov A.M., Lushkina S.A., Mikhalkhenkova M.A. [Restoration of Details of Tillage Machines with an Abrasive-Resistant Dispersion-Hardened Composite Based on Epoxy Resin]. *Hardening Technologies and Coatings*. 2015;10(130):43–46. (In Russ.) EDN: ULDXQV
16. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Гридчин А.М., Мурали Г. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов. *Строительные материалы*. 2021;(9):32–40. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
Lesovik V.S., Fediuk R.S., Gridchin A.M., Murali G. Improving the Operational Characteristics of Protective Composites. *Stroitel'nye Materialy*. 2021;(9):32–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
17. Ямилинец С.Ю., Лозицкая А.В., Кондратов А.П. Физико-химическая стойкость и амортизирующие свойства полимерных композитов с защитной оболочкой. *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2023;3(552):50–55. EDN: IPLIFG
Yamilinets S.Yu., Lozitskaya A.V., Kondratov A.P. Physico-Chemical Resistance and Shock-Absorbing Properties of Polymer Composites with a Protective Shell. *Lakokrasochnie Materialy i Ikh Primenenie*. 2023;3(552):50–55. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: IPLIFG
18. Sharma S.D., Sowntharya L., Kar K.K. Polymer-Based Composite Structures: Processing and Applications. *Composite Materials*. 2017:1–36. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8_1
19. Münstedt H. Melt Strain Hardening of Polymeric Systems Filled with Solid Particles: Review and Supplementary Experimental Results. *Rheologica Acta*. 2024;63:333–343. <https://doi.org/10.1007/s00397-024-01452-0>

20. Wen J. Some Mechanical Properties of Typical Polymer-Based Composites. *Physical Properties of Polymers Handbook*. 2007:487–495. https://doi.org/10.1007/978-0-387-69002-5_28
21. Михальченко А.М., Комогорцев В.Ф., Филин Ю.И. Влияние дисперсности песка на абразивную износостойкость композита с эпоксидной основой. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2017;(2):33–36. EDN: **XVSQZL**
Mikhailchenkov A.M., Komogortsev V.F., Filin Yu.I. [The Effect of Sand Dispersion on the Abrasive wear Resistance of a Composite with an Epoxy Base]. *Vse Materialy. Enciklopedicheskij Spravochnik*. 2017;(2):33–36. (In Russ.) EDN: **XVSQZL**
22. Михальченко А.М., Ториков В.Е., Михальченкова М.А., Ульянова Н.Д. Критерии эксплуатационной и экономической оценки эффективности эпоксидно-песчаных композитов различных составов как абразивостойких покрытий деталей почвообрабатывающих орудий. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2023;(1):35–39. EDN: **QODBPM**
Mikhailchenkov A.M., Torikov V.E., Mikhailchenkova M.A., Ulyanova N.D. Criteria for Operational and Economic Evaluation of the Effectiveness of Epoxy-Sand Composites of Various Compositions as Abrasive-Resistant Coatings of Parts of Tillage Tools. *Glues. Sealants. Technologies*. 2023;(1):35–39. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **QODBPM**
23. Ли Р.И., Колесников А.А. Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобильной техники полимерными композитами, обработанными в ультразвуковом поле. *Мир транспорта и технологических машин*. 2017;1(56):16–21. EDN: **YHWVCN**
Li R.I., Kolesnikov A.A. Improving Recovery Body Parts Automotive Engineering Polymer Composite, Processed in an Ultrasonic Field. *Mir Transporta i Tekhnologicheskikh Mashin*. 2017;1(56):16–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **YHWVCN**
24. Ли Р.И., Малюгин В.А. Расчет точностных характеристик технологической оснастки при восстановлении посадок подшипников качения в узлах автомобилей адгезивами. *Наука в центральной России*. 2019;3(39):36–43. EDN: **SPZAHU**
Li R.I., Malyugin V.A. Calculation of Precision Characteristics of the Industrial Equipment at Restoration of Landings of Rolling Bearings in Knots of Cars Adhesives. *Science in the Central Russia*. 2019;3(39):36–43. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **SPZAHU**
25. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Киба М.Р. Эластомерный нанокompозит для восстановления изношенных корпусных деталей автотракторной техники. *Наука в центральной России*. 2021;1(49):69–79. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-69-79>
Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R. Elastomeric Nanocomposite for Restoration Worn-Out Body Parts Vehicles and Tractors. *Science in the Central Russia*. 2021;1(49):69–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-69-79>
26. Егунова Т.Н. Определение износостойкости эпоксидно-песчаных композитов, применяемых при ремонте машин. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2022;(10):35–39. EDN: **PSFAWJ**
Egunova T.N. Determination of Wear Resistance of Epoxy-Sand Composites Used in the Repair of Machines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*. 2022;(10):35–39. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **PSFAWJ**
27. Михальченко А.М., Новиков А.А., Купреенко А.И. Изнашивание термоупрочненной стали 65Г в среде с незакрепленным абразивом. *Материаловедение*. 2017;(8):20–23. EDN: **ZDNMZL**
Mikhailchenkov A.M., Novikov A.A., Kupreenko A.I. 65Г Thermostrengthened Steel Wearing in Medium with Loose Abrasive. *Materialovedenie*. 2017;(8):20–23. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ZDNMZL**
28. Михальченко А.М., Феськов С.А., Козарез И.В. Влияние концентрации и дисперсности наполнителя эпоксидно-гравийного композита на сопротивление контактному деформированию при внедрении твердого сферического тела. *Вестник машиностроения*. 2023;102(6):509–512. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-6-509-512>

Mikhailchenkov A.M., Feskov S.A., Kozarez I.V. Influence of Concentration and Dispersion of Epoxy-Gravel Composite Filler on Resistance to Contact Deformation During the Introduction of a Solid Spherical Body. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(6):509–512. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-6-509-512>

Об авторах:

Кравченко Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, Researcher ID: B-9463-2018, SPIN-код: 8272-6031, kravchenko-in71@yandex.ru

Феськов Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, г. Брянск, с. Кокино, ул. Советская, 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5978-6517>, SPIN-код: 7637-8485, feskovwork@gmail.com

Сенин Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-код: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Чумаков Павел Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, Researcher ID: G-8320-2018, pav-chumakov@yandex.ru

Гуцан Александр Александрович, магистр, ассистент кафедры технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, г. Брянск, с. Кокино, ул. Советская, 2а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1118-7250>, gagauz0326@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

И. Н. Кравченко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

С. А. Феськов – применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; разработка методологии исследования; создание моделей.

П. В. Сенин – формулирование идеи исследования, целей и задач.

П. В. Чумаков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Гуцан – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 25.11.2024; поступила после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 19.12.2024

About the authors:

Igor N. Kravchenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, Researcher ID: B-9463-2018, SPIN-code: 8272-6031, kravchenko-in71@yandex.ru

Sergey A. Feskov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino, Bryansk 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5978-6517>, SPIN-code: 7637-8485, feskovwork@gmail.com

Petr V. Senin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-code: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Pavel V. Chumakov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, Researcher ID: G-8320-2018, pav-chumakov@yandex.ru

Alexander A. Gutsan, Master's Degree, Assistant of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino, Bryansk 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1118-7250>, gagauz0326@gmail.com

Contribution of the authors:

I. N. Kravchenko – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; checking the reproducibility of the results of experiments and study within the framework of the main or additional tasks of the study.

S. A. Feskov – using statistical, mathematical, computational and other formal techniques to analyze the study data; developing the study methodology; creating models.

P. V. Senin – formulating the study idea, goals and objectives.

P. V. Chumakov – conducting the study process including performing the experiments and data collection; preparing a manuscript; visualizing the study results and data obtained.

A. A. Gutsan – conducting the study including performing the experiments and data collection.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 25.11.2024; revised 11.12.2024; accepted 19.12.2024