

**АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES**  
**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА  
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

Научная статья  
УДК 621.793:669.131.6

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ПУТЕМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ НАПЛАВКИ  
БЕЛЫМ ЧУГУНОМ**

**Евгений Николаевич Неверов, Алексей Петрович Черныш,  
Анатолий Леонидович Майтаков**  
ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

**Аннотация.** Современное состояние и требования в изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники определяется прежде всего надежностью функциональных узлов и поверхностей их рабочих органов. Упрочнение является эффективным методом повышения долговечности и ресурса высоконагруженных деталей, работающих в сложных условиях под воздействием агрессивных сред. В работе представлен способ повышения износостойкости рабочих органов измельчающих и перемешивающих механизмов биогазовой установки путём применения электроискровой наплавки белым нелегированным чугуном с введением недорогих легирующих добавок (водород, сера, азот). Проведены исследования химического состава чугуна и его структуры после термических обработок. Установлено, что включение в состав чугуна водорода (0,00025 - 0,00052 %), серы (0,108 - 0,110 %) и азота (0,0039 - 0,0059 %) обеспечивает диспергирование графитовых выделений и формирование повышенного содержания цементита, что способствует росту прочности и износостойкости. Экспериментальные испытания показали увеличение предела прочности материала с 300 - 380 до 410 - 470 МПа, а износостойкость наплавленного слоя возросла в 2 раза по сравнению с аналогичными образцами без упрочнения. Износ составил 43 - 60 % против 100 % у известных чугунов. Лабораторные испытания подтвердили рост долговечности обработанных деталей на 30 %, а также уменьшение времени наплавки на 15 - 20 %. Экономический анализ показал, что себестоимость упрочнённых рабочих органов в 2 - 2,5 раза ниже по сравнению с деталями, изготовленными из дорогостоящих высоколегированных сплавов. Результаты исследования подтверждают эффективность предложенной методики для снижения эксплуатационных затрат и повышения ресурса биогазовых установок.

**Ключевые слова:** биогазовая установка, электроискровая наплавка, белый чугун, упрочнение, износостойкость, водород, сера, азот.

**Для цитирования:** Неверов Е.Н., Черныш А.П., Майтаков А.Л. Повышение износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин путем электроискровой наплавки белым чугуном // Вестник Брянской ГСХА. 2026. № 1 (113). С. 53-59.

**Original article**

**IMPROVING WEAR RESISTANCE OF AGRICULTURAL MACHINE WORKING PARTS BY  
ELECTRO-SPARK DEPOSITION OF WHITE CAST IRON**

**Yevgeny N. Neverov, Alexey P. Chernysh, Anatoly L. Maytakov**  
Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

**Abstract.** The current state and requirements in the manufacture and repair of agricultural machinery are determined primarily by the reliability of the functional components and surfaces of their working parts. Hardening is an effective method of increasing the durability and service life of highly loaded parts operating in difficult conditions under the influence of aggressive environments. This paper presents a method to improve the wear resistance of shredding and mixing mechanisms in biogas plants by applying electrospark surfacing with unalloyed white cast iron alloyed with cost-effective additives such as hydrogen, sulfur, and nitrogen. The researches were conducted on the chemical composition of cast iron and its structure after heat treatments. It has been established that the inclusion of hydrogen (0.00025 - 0.00052%), sulfur (0.108 - 0.110%), and nitrogen (0.0039 - 0.0059%) in cast iron promotes the dispersion of graphite inclusions and the formation of an increased cementite content, which contributes to enhanced strength and wear resistance. Experimental investigations indicated an increase in the material's strength limit from 300-380 MPa to 410-470 MPa, and the wear resistance of the deposited coating doubled when compared to analogous samples

without hardening. The wear was 43-60% compared to 100% for known cast irons. Laboratory tests confirmed a 30% increase in the durability of treated parts, as well as a 15-20% reduction in surfacing time. The laboratory tests showed a 30 % increase in service life of the strengthened parts, as well as a 15 - 20 % reduction in processing time during deposition. Economic analysis indicated that the cost of hardened working parts is 2 - 2,5 times lower than those produced from expensive high-alloyed steels. These findings demonstrate that the proposed technique provides an efficient and low-cost solution for extending the lifetime of biogas plant equipment and reducing operational costs.

**Keywords:** biogas plant, spark deposition, white cast iron, hardening, wear resistance, hydrogen, sulfur, nitrogen.

**For citation:** Neverov E.N., Chernysh A.P., Maitakov A.L. Improving wear resistance of agricultural machine working parts by electro-spark deposition of white cast iron // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2026. No. 1 (113). P. 53-59.

**Введение.** Спрос на существующем сегодня рынке иностранных и отечественных изготовителей определяется большим количеством факторов, одним из которых является достижение и поддержание значительной степени надежности рабочих органов и узлов функционального назначения оборудования и машин, использующихся в АПК. Среди наиболее существенных характеристик, воздействующих на ресурс такого рода изделий, особенно выделяется устойчивость к износу поверхностей, подвергающихся при эксплуатации воздействию агрессивных химических веществ и абразивов. Увеличение уровня износостойкости представляется возможным, благодаря производству рабочих элементов, на которые влияют агрессивные внешние условия, из материалов и сплавов, характеризующихся дороговизной. Другое решение подразумевает, что на поверхности они наносятся, благодаря общепринятым, прошедшим практическую апробацию методикам и техникам.

Когда же используется более бюджетный материал (к примеру, чугун нелегированного типа), то при его наплавке определенная доля углерода переходит в свободное состояние, вследствие чего устойчивость слоя к износу и его степень прочности резко сокращаются.

Перед настоящей исследовательской работой стоит главная цель, заключающаяся в подборе наиболее подходящих методик повышения прочности функциональных поверхностей рабочих органов орудий и машин сельскохозяйственного назначения с использованием недорогих покрытий из разряда «износостойкие».

**Материалы и методы.** Износостойкость - одно из важнейших свойств металлических материалов. Чаще всего в практике для получения металлических материалов с высокой износостойкостью обнаруживается недостаточность этого свойства у двойных железо-углеродистых сплавов. Применение различного рода покрытий, всевозможных видов обработки трущихся поверхностей (диффузионные методы насыщения, газопламенные и плазменные приемы и т. д.) недостаточно и технологически неудобно при изготовлении деталей машин. Здесь, как и всегда, предпочтение отдано легированию [1,2].

Интенсивное расширение и эволюция производственной отрасли на непрерывной основе предъявляет все более жесткие требования к разным характеристикам отливок из чугуна. Данные требования в подавляющем большинстве случаев обеспечиваются использованием сопряженного с существенными материальными затратами легирования компонентами, формирующими существенную долю составленной Менделеевым Д.И. периодической системы. Наличествующий на данный момент ГОСТ 7769-82 («Чугун легированный для отливок со специальными свойствами») предполагают определенные марки белых чугунов из разряда «износостойкие». Соответствующая информация представлена в содержании таблицы 1.

Чугуны из групп «высоколегированные» и «низколегированные» характеризуются показателем прочности ( $\sigma_B$ ), который пребывает в спектре от 150 до 350 МПа. Подобные величины фиксируются, когда материал проходит связанную с термообработкой процедуру при соблюдении оптимальных условий. Выделенный фактор дает возможность сделать вывод, согласно которому выбранные в контексте настоящего исследования композиции далеки от совершенства.

В контексте настоящего исследования необходимо привести указание на то, что при совершенствовании составов особый акцент делается на уменьшении доли никеля, марганца и хрома в составе. Одновременно с этим возникают легирующие компоненты, прежде обладавшие лишь косвенным значением (включая азот, фосфор и серу).

Увеличение показателя износоустойчивости при включении азота и фосфора в структуру железоуглеродистого характера отмечается, вследствие роста концентрации устойчивого к термовоздействиям цементита.

В ходе изысканий выявлено, что использование комбинации «азот + фосфор» дает возможность снизить содержание хрома, прежний уровень которого в чугунах достигал 20-30-процентной величины. Чтобы уменьшить уровень элементов, отличающихся дороговизной и имеющих легирующие характеристики, без потери износоустойчивости, нужно задействовать в процессе всякие воздействия на расплав, в результате которых стабилизируется цементит, и устраняются выделения графита [3-8].

Таблица 1 - Химический состав износостойких чугунов

Марка	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	
ЧХЗТ	2,6-3,6	0,7-1,5	1,0	2,01-3,0	-	0,3	0,12	
ЧН4Х2	2,8-3,6	0,0-0,10	0,8- 1,13	0,8-2,5	3,5-5,0	0,3	0,5	
ЧГ7Х4	3,0-3,8	1,4-2,0	6,0-8,0	3,0-5,0	-	0,1	0,05	
Марка	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
ЧХ9Н5	2,8-3,6	1,2-2,0	0,5-1,5	8,0-9,5	4,0-6,0	<0,4	0,06	0,1
ИЧХ12М	2,6-3,0	до 0,7	0,5-1,0	11,5-14,0	-	1,4-1,6	0,1	0,06
ЧХ16	1,6-2,4	1,5-2,2	до 1,0	13,0-19,0	-	-	0,1	0,05
ЧХ16М2	2,4-3,6	0,5-1,5	1, 5-2,5	13,0-19,0	-	0,5-2,0	0,1	0,05
ЧХ22	2,4-3,6	0,2-1,0	1,5-2,5	19,0-25,0	-	-	0,1	0,06
ИЧХ28Н2	3,0	1,17	1,0	30,2	2,28	-	0,1	0,06

Такого рода итог обеспечивается применением смесей, в составе которых есть компоненты, характеризующиеся повышенной степенью азотно-водородного сродства.

Чтобы решать подобные задачи, разработан и получен чугунный состав, в котором водород исполняет функции легирующего компонента, входя в группу самых действенных веществ-карбидообразователей. Ниже рассмотрена характеристика разработки с редчайшим случаем использования водорода в целях легирования. Данное изобретение касается металлургии. Известным видится чугун с такими пропорциями элементов (мас. %):

- никель - от 0,30 до 1,0;
- медь - от 0,25 до 0,60;
- сурьма - от 0,005 до 0,08;
- фосфор - от 0,40 до 1,0;
- сера - от 0,22 до 0,50;
- марганец - от 0,64 до 1,80;
- кремний - от 1,70 до 2,60;
- углерод - от 2,50 до 3,50;
- железо - остальное.

Самыми оптимальными к разработке по получаемому результату и сущности технического порядка представляется чугун с таким составом химэлементов (мас. %):

- азот - от 0,006 до 0,012;
- титан - от 0,005 до 0,050;
- бор - от 0,003 до 0,0012;
- никель - от 0,1 до 1,2;
- фосфор - от 0,08 до 0,25;
- хром - от 0,1 до 0,4;
- марганец - от 0,5 до 2,1;
- кремний - от 1,5 до 2,4;
- углерод - от 3,0 до 3,6;
- железо - остальное.

Главным недостатком чугунов из разряда «общественные» представляется слабая стойкость к износу. Перед разработкой поставлен главный целевой ориентир, касающийся наращивания степени износоустойчивости материала. Чтобы его достигнуть, в чугун с названным соотношением элементов необходимо добавить некоторые составляющие для получения таких пропорций (мас. %):

- водород - от 0,00025 до 0,00052;
- сера - от 0,108 до 0,110;
- азот - от 0,0039 до 0,0059;
- фосфор - от 0,0,046 до 0,048;
- марганец - от 0,29 до 0,32;

- кремний - от 0,47 до 0,50;
- углерод - от 3,03 до 3,07;
- железо - остальное.

Одновременное включение комбинации «сера + водород» в структуру материала-чугуна в пропорциях прочих элементов, которые приведены выше, обуславливает диспергирование формирующихся графитовых выделений. Параллельно в составе происходит рост удельного веса цементита.

В процессе термопереработки наличие сочетания «водород+сера» обеспечивает оптимизацию механических свойств и закаляемости.

Подобный положительный эффект обуславливается растворением определенной доли цементита, являющегося первичным, и гораздо более полноценной трансформации мартенситного характера.

Включение указанной комбинации в объемах, которые больше или меньше спектра, который заявлен, объясняет наращение степени пористости и снижение выраженности связанного с закаливанием эффекта соответственно. Указанный состав чугуна дает возможность добиться наиболее подходящего техрезультата, заключающегося в заметном наращении износоустойчивости материала-чугуна.

Технологический цикл при включении шихтовых материалов при выплавке чугуна стандартных значений, а также возврата, выполнялся в индукционных печах с последующей продувкой парами водных растворов серной кислоты, по достижению расплавления и перегрева в диапазоне 1350...1400°C. Последующая термообработка была обеспечена нагревом до 950°C, а также закаливанием в кипящем водном растворе с отпуском. Параметры чугуна в данном случае определились со следующими значениями: предел прочности увеличился с 300...380 МПа (влитое состояние) до 410...470 МПа, химсостав чугуна после технологического цикла показан в таблице 2.

Главный параметр долговечности - износостойкость была изучен методом весового контроля после абразивного воздействия инструментом из инструментальной стали Х6ВФ, параметры которой отображены в таблице 2 и как вывод, после всех термических воздействий в технологическом цикле обработки износостойкость может возрасти в два раза.

Износостойкость чугунов, как известно, определяет либо наличие дисперсного выделения графита, либо его частичная или полная замена на цементит. Для получения такой необходимой структуры вместо дорогостоящих легирующих элементов, таких как никель, хром, марганец, кремний и др. необходимо использовать дешевые водород, азот и кислород.

С целью обеспечения необходимых прочностных, в том числе износостойких, параметров поверхностей деталей сельскохозяйственных машин, устойчивых к абразивному истиранию и противодействию агрессивным условиям работы, авторами предложены технологические циклы термических обработок для придания чугуну высочайших свойств без использования дорогостоящих легирующих редкоземельных элементов с применением водорода, азота и кислорода. Данные воздействия исключают частичное или полное образование графитных включений.

Таблица 2 - Химсостав и параметр износостойкости нового чугуна

Чугун	Содержание элементов, вес. %												Износ %
	C	Si	Mn	Cr	P	Ni	B	Ti	N	S	H	Fe	
1	3,03	0,47	0,29	-	0,040	-	-	-	0,0039	0,108	0,00025	ост.	60
2	3,035	0,49	0,31	-	0,042	-	-	-	0,0048	0,108	0,00035	ост.	52
3	3,07	0,50	0,32	-	0,048	-	-	-	0,0059	0,110	0,00052	ост.	43
известный	3,6	1,5	2,1	0,4	0,25	0,1	0,003	0,005	0,012	-	-	ост.	100

Основным объектом выступила технологическая установка (биогазовая), назначение которой состоит в обработке сырья органического типа [Пат. 2525897 Рос. Федерация, МПК C02F 11/04, B09B 3/00, B01F 7/04. Установка для переработки органического сырья / В.И. Мясенко, О.Н. Бузиян, А.П. Черныш, М.Г. Курбанова, З.В. Гаазе, И.А. Ганиева (RU); заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт. №2012130225; заявл.16.07.2012; опубл. 20.08.2014. Бюл. №23, 2014 4 с.], оснащенная перемешивающими и измельчающими механизмами. Органы данных механизмов, являющиеся рабочими, исполняют свои непосредственные функции при воздействии со стороны значительно агрессивной и абразивной среды, параллельно перенося нагрузки температурного и динамического порядка.

Отбор методики, позволяющий улучшить прочностные параметры рабочих деталей механизмов, применяющихся для перемешивания и измельчения, за основу принял прикладное осуществление технологического ремонтного блока [Afanasyev V.K., Dolgova S.V., Chernysh A.P. Restoration of agricul-

tural machines surfaces by white cast iron with the formation of technological repair units// Materials science forum: Trans Tech Publications Ltd. 2018. Т. 927. Р. 43 47; Пат. 2333088 RU, МПК С2 В23Р 6/00. Способ формирования технологического ремонтного блока / Б.И. Коган, А.П. Черныш, (RU). № 2006129964/02; Заявл. 18.08.2006; Опубл. 27.02.08, Бюл. № 25]. Этот этап разработки подразумевал обобщение и увязку с логикой поиска функциональных модулей поверхностей установки, определение условий ее применения, методов повышения прочностного индикатора, технологических средств и подбор тех их комбинаций, которые представляются наиболее оптимальными.

Непосредственно после осуществленного отбора упрочнительного методологического подхода в целях пролонгации эксплуатационного периода соответствующих рабочих органов предложено использовать наплавку электроискрового типа [Пат. 2538849 Рос. Федерация, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/00. Способ электроискрового нанесения покрытия / А.П. Черныш, О.В. Санкина, Р.Н. Дубоделов, Н.А. Маринов, И.Н. Бадин, А.С. Санкин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт».- 2013117447/02; заявл. 16.04.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл. №1, 2015 5 с.]. Указанный методологический подход предполагает контактную переработку с применением электрода, находящегося во вращающемся состоянии. При нанесении на поверхность покрытия устраняется дефектный слой. В ходе нанесения покрытия, устойчивого к износу, с использованием такой методики длительность обработки уменьшилась на величину от 15% до 20%. Вследствие испытаний, организованных и осуществленных в лабораторных условиях, отмечен 30-процентный рост долговечности обработанных деталей.

Аналитическая работа с металлографическим уклоном, произведенная относительно наплавленного слоя образцов после применения электроискрового методологического подхода, по своим результатам позволяет отметить полное отсутствие графитовых выделений в структуре белого нелегированного чугуна. Также отмечается отсутствие перегрева с минимальной толщиной сцепления, что исключает полностью разрушение и наличие повреждений. Были выполнены поиски самых оптимальных режимов наплавки для разработанных электродов из нового нелегированного белого чугуна [3].

В ходе детального исследования микроструктур отмечается присутствие 3-х обособленных зон: наплавленного металла, переходная и структура стали 55. В ходе обработки с использованием режима  $U=20В$  141 об/мин отмечается крайне малая область сцепления. Анализируя микроструктурное устройство металла, являющегося основным, можно отметить отсутствие увеличения зерна (см. рисунок 1).

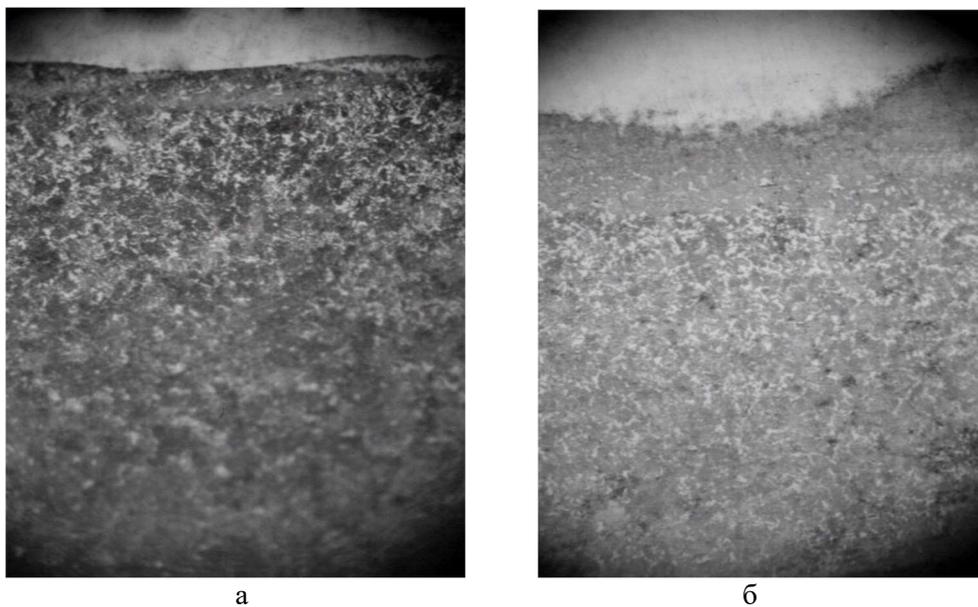


Рисунок 1 - Микроструктура образцов, вырезанных из наплавленного электроискровым способом рабочих органов установки (сталь 55),  $\times 300$ : а - режим наплавки:  $U=20В$ ,  $I=45 А$ , 141 об/мин<sup>-1</sup>; б - режим наплавки:  $U=30В$ ,  $I=50А$ , 141 об/мин<sup>-1</sup>.

Нагрев наплавленного слоя по глубине и площади представляется неравномерным. Ввиду несущественной длительности связанного с наплавкой процесса, наплавленный слой в короткие сроки подвергается охлаждению, несмотря на то, что в его структуре изменения еще не произошли в должной мере.

По итогу формируется равномерное тепловое поле на участке наплавленного слоя и на поверхности основного металла детали с дальнейшим постепенным охлаждением.

Особенной значимостью обладает вопрос, касающийся механических характеристик, появляющихся после осуществленных методов повышения прочности. Выполнено измерение твердости после наплавки рабочих органов деталей-механизмов перемешивания и измельчения. В результате сформулированы следующие выводы:

- в случае роста количества оборотов отмечается рост степени твердости наплавленного слоя. При этом, отмечается существенное сокращение уровня твердости в структуре слоя, являющегося переходным;

- в условиях повышенных скоростей вращения электрода наплавленный слой выходит приблизительно соответствующим значению 0,8 мм;

- в условиях роста количества переходов отмечается рост толщины участка сцепления и области наплавленного металла.

**Результаты и их обсуждение.** Одним из эффективных свойств повышения долговечности биогазовой установки является высокая износостойкость упрочненных рабочих органов механизмов измельчения и перемешивания. Проверка износостойкости наплавленного слоя производилась лабораторными испытаниями. После определенной наработки механизмов проводился замер геометрических размеров и сравнивался с исходным до обработки. Эксплуатация упрочненных рабочих органов механизмов измельчения и перемешивания показала, что функциональные поверхности работают в абразивно-агрессивной среде значительно дольше, чем изделия без предварительной обработки. В то же время, упрочнение нелегированным белым чугуном экономически выгоднее, так как стоимость упрочненных рабочих органов механизмов измельчения и перемешивания в 2-2,5 раза ниже, чем обработанных дорогостоящими высоколегированными сплавами.

**Выводы.** Результаты осуществленных изысканий дают возможность констатировать, что самым низкокзатратным и подходящим способом увеличения прочности поверхностей деталей биогазовой установки является наплавка электроискрового типа, которая осуществляется с применением белого чугуна, являющегося нелегированным и термоциклированным.

Применение электроискровой наплавки белым нелегированным чугуном позволило увеличить предел прочности материала с 300-380 МПа (литое состояние) до 410 - 470 МПа. Износостойкость наплавленных слоёв возросла в 2 раза: износ составил 43 - 60 % против 100 % у известных аналогов. В результате лабораторных испытаний зафиксирован рост долговечности рабочих органов механизмов измельчения и перемешивания на 30 %. Технологический цикл электроискровой наплавки позволил сократить длительность процесса на 15 - 20 %. Экономический эффект выражается в снижении себестоимости упрочненных деталей в 2 - 2,5 раза по сравнению с аналогами из высоколегированных сплавов.

Данная методика, реализуемая при применении нового материала, позволит создать износостойчивый слой. Этот показатель получится сопоставимым с производством или наплавкой сплавов из группы «высоколегированные», отличающихся дороговизной.

#### Список источников

1. Технологические способы обеспечения качества ремонта ресурсных сборочных единиц двигателей / Н.А. Баганов, Ю.И. Жевора, Е.В. Зубенко и др. // Технический сервис машин. 2025. Т. 63, № 1. С. 28-32.
2. Триботехнические свойства высокопрочной стали в абразивной среде / С.М. Ветрова, А.С. Барчукова, Н.С. Кривых и др. // Технический сервис машин. 2025. Т. 63, № 2. С. 86-91.
3. Afanasyev V. Improving strength of structural steels by preheating in an oxygen-containing medium / V. Afanasyev, M. Popova, I. Zhibinova // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 58-62.
4. Afanasyev V.K., Sagalakova M.M., Tankov E.V. Influence of the melt treatment method on the properties of cast iron // Solid State Phenomena. 2021. Vol. 316. P. 438-442.
5. Afanasyev V.K., Popova M.V. Use of Thermocycling Deformation for Raising the Operating Properties of Low-Carbon Steel // Metal Science and Heat Treatment. 2023. Vol. 64, N 11-12. P. 681-687.
6. Афанасьев В.К., Попова М.В. Применение термоциклической деформации для повышения эксплуатационных свойств низкоуглеродистой стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 12 (810). С. 3-9.
7. О термической обработке инструмента из доменного белого нелегированного чугуна / В.К. Афанасьев, А.П. Черныш, М.В. Попова, и др. // Металлургия машиностроения. 2020. № 3. С. 32-36.
8. Металлография железа. В 3 т. Т. 3. Белый нелегированный чугун / В.К. Афанасьев, Н.В. Королев, М.В. Попова и др.; под ред. проф. В.К. Афанасьева. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 412 с.

**Информация об авторах:**

**Е.Н. Неверов** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет, neverov42@mail.ru.

**А.П. Черныш** - кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет tmrm@mail.ru.

**А.Л. Майтаков** - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления качеством ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет, may585417@mail.ru.

**Information about the authors:**

**Ye.N. Neverov** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, neverov42@mail.ru.

**A.P. Chernysh** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Kemerovo State University, tmrm@mail.ru.

**A.L. Maytakov** - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Quality Management Kemerovo State University, may585417@mail.ru.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

**Статья поступила в редакцию 16.09.2025, одобрена после рецензирования 13.11.2025, принята к публикации 12.01.2026.**

**The article was submitted 16.09.2025, approved after reviewing 13.11.2025, accepted for publication 12.01.2026.**

© Неверов Е.Н., Черныш А.П., Майтаков А.Л.