

**Материаловедение  
и технологии материалов  
Materials science and materials technology**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 669.131.622: 620.178.15

doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-65-76

**ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ ТВЕРДОСТИ СО СТРУКТУРОЙ  
ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ С ПЛАСТИНЧАТЫМ ГРАФИТОМ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ**

**Вадим Олегович Сазонов<sup>1✉</sup>, Константин Васильевич Макаренко<sup>2</sup>, Александр Викторович Вдовин<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> sazonow.vadick2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7594-8018>

<sup>2</sup> makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

<sup>3</sup> vdovin.alexander.v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6014-0043>

**Аннотация**

Цель исследования: практическое обоснование взаимосвязи твердости и структуры, а именно параметров графитовой фазы, в маслотно-заготовках поршневых колец. Задача, решению которой посвящена статья, состоит в анализе результатов измерения твердости и оценке их взаимосвязи с размерно-геометрическими параметрами графитовой фазы в легированных чугунах, используемых для изготовления маслотно-заготовок поршневых колец. Методы исследования: теоретический анализ литературы, касающейся тематики исследования, практическое определение твердости образцов, полученных в результате экспериментальных плавок, количественный анализ в *ImageJ*, систематизация полученных результатов в Excel, корреляционный анализ, построение графической зависимости

твердости от параметров графитовых включений. Новизна работы: практическое обоснование взаимосвязи твердости от длины графитовых включений в маслотно-заготовках поршневых колец. Результаты исследования: удалось на практике доказать, что твердость напрямую зависит от длины графитовых включений в сером чугуне: при уменьшении длины графитовых включений увеличивается твердость. При этом оптимальные показатели твердости достигаются в чугунах марки СЧМ при длине включений графита 45 мкм, в чугунах марки А-ХМ при 90-180 мкм.

**Ключевые слова:** серый чугун, пластинчатый графит, твердость, количественная металлография, результаты, обрабатываемость, упругость.

Ссылка для цитирования:

Сазонов В.О. Оценка взаимосвязи твердости со структурой легированных чугунов с пластинчатым графитом, применяемых для изготовления поршневых колец / В.О. Сазонов, К.В. Макаренко, А.В. Вдовин // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 2. – С. 65-76. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-65-76.

Original article

Open Access Article

**EVALUATION OF THE CORRELATION BETWEEN HARDNESS  
AND STRUCTURE OF ALLOYED CAST IRON WITH FLAKE GRAPHITE,  
USED FOR MANUFACTURING PISTON RINGS**

**Vadim Olegovich Sazonov<sup>1✉</sup>, Konstantin Vasilyevich Makarenko<sup>2</sup>, Aleksandr Viktorovich Vdovin<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> sazonow.vadick2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7594-8018>

<sup>2</sup> makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

<sup>3</sup> vdovin.alexander.v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6014-0043>

## Abstract

The study objective is to provide practical confirmation to the correlation between hardness and structure, namely, graphite phase parameters, in oil blanks of piston rings.

The task to which the paper is devoted is to analyze the results of hardness measurement and evaluate their interconnection with the dimensional parameters of graphite phase in alloyed cast irons used for manufacturing oil blanks of piston rings.

Research methods: theoretical analysis of references related to the research topic, practical determination of the hardness of samples obtained as a result of experimental melting, quantitative analysis in ImageJ, systematization of the results in Excel, correlation

analysis, construction of a graphical dependence of hardness on the parameters of graphite inclusions.

The novelty of the work: practical substantiation of the correlation between hardness and the length of graphite inclusions in oil blanks of piston rings.

Research results: it is practically proved that hardness directly depends on the length of graphite inclusions in gray cast iron: as the length of graphite inclusions decreases, hardness increases. At the same time, optimal hardness values are achieved in СЧМ cast iron with a graphite inclusion length of 45 microns, and in А-ХМ cast iron with 90-180 microns.

**Keywords:** grey cast iron, flake graphite, hardness, quantitative metallography, results, treatability, elasticity.

## Reference for citing:

Sazonov VO, Makarenko KV, Vdovin AV. Evaluation of the correlation between hardness and structure of alloyed cast iron with flake graphite used for manufacturing piston rings. *Transport Engineering*. 2025;2:65-76. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-65-76.

## Введение

Поршневые кольца представляют собой незамкнутые кольца, изготовленные с небольшим зазором, которые сажаются в канавки на внешних поверхностях поршней двигателей. Различают два основных типа поршневых колец: компрессионные, обеспечивающие герметизацию камеры сгорания (устанавливают не более трех на один поршень) и маслосъемные, которые способствуют снятию излишков моторного масла, используемого в качестве смазки для поверхностей цилиндра, поршня и уплотнительного кольца [1]. При этом если компрессионные кольца делают сплошными, то маслосъемные имеют «ажурную» конструкцию, требовательную к качеству механической обработки. Наиболее распространенным материалом, из которого изготавливают поршневые кольца больших диаметров для компрессоров, судовых и тепловозных дизелей, дизель-генераторов и паровых молотов, является графитизированный чугун.

Работа поршневых колец происходит в тяжелых условиях повторно-переменных нагрузок, при высоких температурах, а также зачастую, при полном или частичном отсутствии смазки, что безусловно сказывается на предъявляемых к ним требованиях.

Согласно ГОСТу 9515-81 «Поршневые кольца для двигателей внутреннего

сгорания» и ТИ 78.008 поршневые кольца должны удовлетворять следующим требованиям: графитовая фаза – равномерно-распределенный пластинчатый графит с длиной включений 45-90 мкм, металлическая матрица–перлит, дисперсностью ПД 0,5-1(сейчас и далее по ГОСТ3443-87), фосфидная эвтектика типа ФЭ1-ФЭ3, твердость – 217-302 НВ (96,5-106 HRB). Обеспечить необходимые показатели по структуре и свойствам можно при использовании технологий модифицирования чугуна и рациональном выборе составов модификаторов.

Твердость принято считать интегрирующим показателем механических, а также некоторых технологических (обрабатываемость, ковкость) [2-4] и эксплуатационных (износостойкость) [5-8] свойств материалов. Существуют эмпирические соответствия между значением твердости и некоторыми механическими характеристиками [9-10].

При производстве маслостных заготовок поршневых колец, следует большое внимание уделять показателям твердости полученных образцов, так как это в дальнейшем сказывается на других свойствах чугуна, в частности на обрабатываемости.

Твердость связана с обрабатываемостью обратной зависимостью, т.е. при увеличении твердости обрабатываемость

ухудшается, модифицированный чугун хорошо обрабатывается при твердости не выше 300 НВ. При этом нижний предел твердости также следует регулировать, т. к. уменьшение твердости, за счет увеличения длины графитовых включений, ве-

дет к увеличению шероховатости поверхности [11]. При этом обрабатываемость серых чугунов можно оценить по параметрам структуры по следующей эмпирической зависимости, представленной уравнением линейной регрессии [12]:

$$M = 195,5 - 1,26V_{\text{п}} + 11,7V_{\text{Г}} + 1,2S_{\text{Г}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем перлита в металлической матрице чугуна;  $V_{\text{Г}}$  – объем графита в структуре;  $S_{\text{Г}}$  – длина графитовых включений в чугуне. По ГОСТ 3443-87 именно количество и размер включений графитовой фазы может быть оценен численно, в то время как распределение и форма графита имеют качественное описание.

В англоязычной литературе для оценки взаимосвязи структуры и твердости серого чугуна предложено использовать правило аддитивности. Например, в справочном руководстве *ASM* для определения твердости чугуна по известной его структуре можно применять следующую зависимость [13]:

$$HB = HB_{\text{Ф}}f_{\text{Ф}} + HB_{\text{п}}f_{\text{п}} + HB_{\text{Г}}f_{\text{Г}} + HB_{\text{Ц}}f_{\text{Ц}}, \quad (2)$$

где

$$HB_{\text{Ф}} = HB_{\text{Fe}} + \sum_i C_i \cdot \%X_i, \quad (3)$$

и

$$HB_{\text{п}} = C_1 + \sum_i C_i \cdot \%X_i + C_2 \lambda_{\text{п}}^{-n}. \quad (4)$$

Здесь  $HB_{\text{Ф}}$ ,  $HB_{\text{п}}$ ,  $HB_{\text{Г}}$ ,  $HB_{\text{Ц}}$  и  $HB_{\text{Fe}}$  – соответственно твердости феррита, перлита, графита, цементита и чистого железа;  $\lambda_{\text{п}}$  – степень дисперсности перлита, определяемая величиной межпластинчатого расстояния феррита и цементита;  $C_i$  и  $n$  – константы, которые определяются эксперимен-

тально. В соответствии с предложенной методикой предполагается, что в расчете твердости чугуна необходимо использовать твердости структурных составляющих, например, представленные в табл. 1 [14-15].

Таблица 1

Твердость структурных составляющих серого чугуна [14–15]

Table 1

*Hardness of structural components of grey cast iron [14-15]*

Структурная составляющая	Твердость	
	HB	HV
Графит [14]	2 – 5	
Железо	70	
Феррит, легированный кремнием (0,82 % Si)	88	
Феррит, легированный кремнием (2,28 % Si)	124	
Феррит, легированный кремнием (3,4 % Si)	150	
Перлит зернистый	130 – 180	
Перлит пластинчатый (феррит, легированный кремнием + цементит) в зависимости от степени дисперсности ( $\lambda_{\text{п}}$ )	175 – 330	
Аустенит		239 – 450
Цементит		800 – 1080
Легированный цементит (при концентрации < 10 % Cr) (Fe, Cr) <sub>3</sub> C		830 – 1370
Карбид хрома (при концентрации > 13 % Cr) (Fe, Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>		1227 – 1475
Фосфидная эвтектика	Псевдодвойная (ФЭ1 – ФЭ2 по ГОСТ 3443)	420 – 740
	Тройная с иглами цементита (ФЭ4)	720 – 820
	Тройная с пластинами цементита (ФЭ5)	810 – 835

Однако еще в работе В.К. Григоровича было доказано, что правило аддитив-

ности не может быть использовано для расчета твердости, так как на это свойство

помимо объемного содержания структурных составляющих оказывают влияние морфологические особенности строения различных фаз и их дисперсность [14]. Согласно данным, указанным в справочнике Н.Г. Гиршовича [11], считается, что твердость напрямую зависит от размера графитовых включений (чем меньше размер графитовых включений, тем выше твердость), при этом практического доказательства данного утверждения нет, в частности для серых чугунов, работающих в узлах трения, которые считаются наиболее чувствительными к структуре материалами.

В свою очередь, размер и количество графитовых включений, как же, как и при определении обрабатываемости по зависимости (1), оказывает существенное воздействие на упругие свойства чугуна. В

#### Материалы, модели, эксперименты и методы

Методики определения твердости для серых чугунов весьма разнообразны. Наиболее широко используемыми для чугунов являются два метода определения твердости:

1) Определения твердости по Бригеллю (индентор – металлический шарик, нагрузка  $P = 750$  кгс,  $d_{ш} = 5$  мм,  $t = 10$  сек);

2) Определение твердости по Роквеллу (индентор – стальной шарик нагрузка  $P = 100$  кгс, шкала В) [6].

Определение твердости методами Роквелла, Шора, Виккерса и др. является менее эффективным, т. к. при большом размере графитовых включений возможны большие расхождения в показателях твер-

сером чугуне модуль упругости в значительной мере зависит от размеров графитовых включений, причем это влияние превышает даже влияние количества графита [16]. Уменьшение длины графитовых включений ведет к увеличению модуля упругости. Таким образом, тема взаимосвязи между количественными параметрами графитовой фазы серых чугунов с механическими, эксплуатационными и технологическими структурнозависимыми свойствами является, безусловно, актуальной.

Целью работы является практическое обоснование взаимосвязи твердости со структурой графитовой фазы маслотно-заготовок поршневых колец, изготовленных из легированного чугуна с пластинчатым графитом специализированных марок СЧМ и АХМ.

Эти показатели, согласно Н.Г. Гиршовичу [16], тем больше, чем меньше площадь измерения по тому или иному способу определения твердости и чем крупнее графит.

Анализ производили более чем на 50 маслотно-заготовках поршневых колец, полученных в результате экспериментальных плавов, на ОАО «Клинцовский завод поршневых колец». Маслоты представляют собой втулочные заготовки, которые на предприятии получают литьем в песчаноглинистые формы [17]. Работы проводились с двумя марками серых чугунов – СЧМ и А-ХМ, химический состав данных чугунов указан в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав серых чугунов марок СЧМ и А-ХМ

Table 2

*Chemical composition of СЧМ and А-ХМ grey cast iron grades*

Марка чугуна	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
А-ХМ	3,0-3,3	1,9-2,4	0,6-1,0	0,2-0,4	<0,10	0,5-0,7	-	0,5-0,8
СЧМ	2,9-3,2	1,5-1,8	1,2-1,5	0,3-0,6	<0,12	0,2-0,4	0,3-0,6	-

Определяли твердость методом Бригелля, по средней линии на трех участках маслотно-заготовки, как указано на рис.1.

Число твердости определяли как среднее арифметическое трех полученных результатов [1].

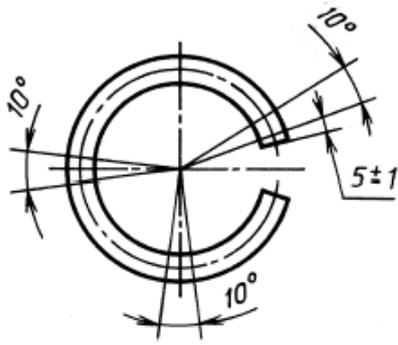


Рис. 1. Схема измерения твердости поршневого кольца по средней линии на 3 участках заготовки  
*Fig. 1. The scheme of measuring the hardness of the piston ring along the middle line in 3 sections of the workpiece*

В качестве экспериментальной установки для измерения твердости использовали стационарный твердомер по Бринеллю ТБ 5004. Далее из готовых маслост отбирались образцы для микроструктурных исследований. Производилось дополнительное механическое шлифование и по-

лирование торцевой поверхности образцов для подготовки шлифов.

Изучали размерно-топологические параметры графитовой фазы на нетравленных шлифах. Структура оценивалась по результатам исследований образцов не менее чем в 3-х полях зрения. Исследование и фотофиксацию изображений микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе ММР-2.

Микроструктура образцов была исследована согласно ГОСТу 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры», оценивались 4 основных показателя графитовой фазы: форма, длина, распределение и количество, далее для уточнения данных был проведен дополнительный количественный анализ длинны и количества графитовых включений в программе *ImageJ* [18]. Основные стадии анализа в программе *ImageJ* показаны на рис. 2.

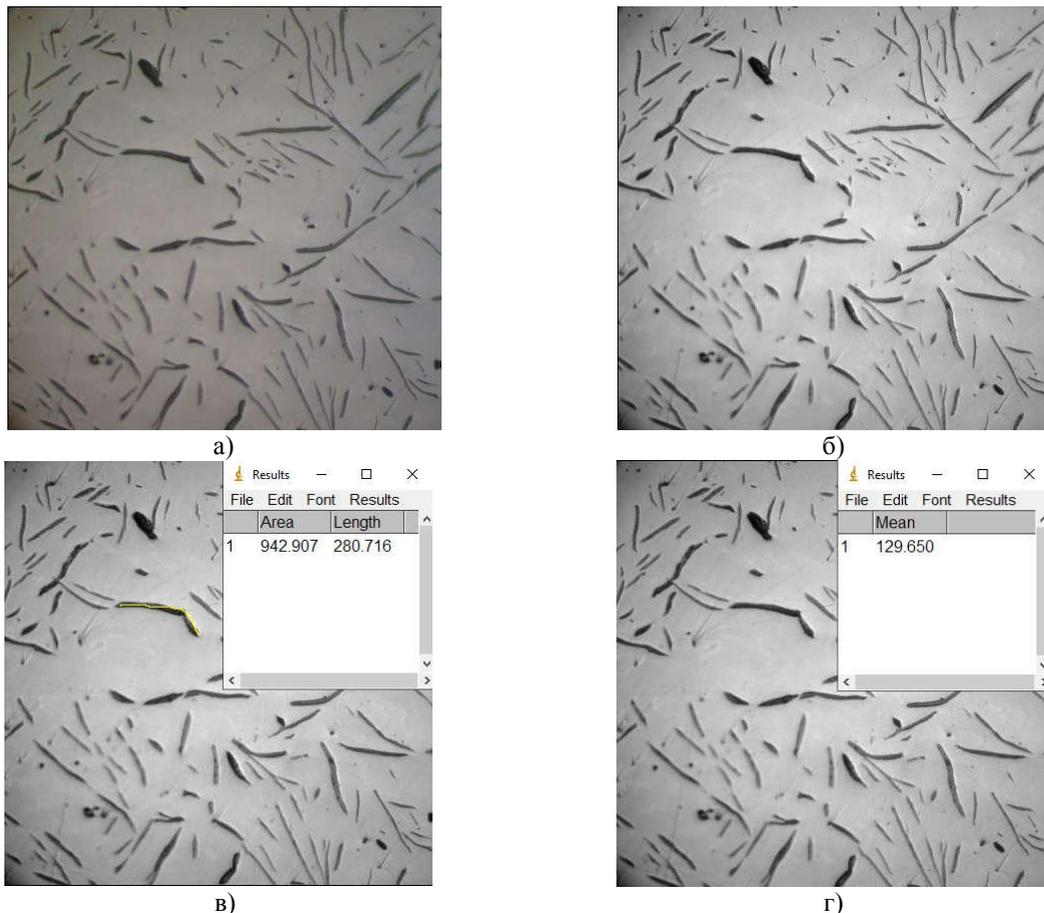


Рис. 2. Анализ изображений в программе *ImageJ*: а – исходное изображение; б – бинарное изображение; в – определение длины графитовых включений; г – определение количества графитовых включений  
*Fig. 2. Image analysis in ImageJ program: a – initial image; b – binary image; c – determination of the length of graphite inclusions; d – determination of the number of graphite inclusions*

## Результаты

Полученные данные измерения твердости и микроструктурного анализа образцов были систематизированы в программе Excel. Был посчитан коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2\sum(y-\bar{y})^2}}, \quad (5)$$

где  $x, y$  – значения исследуемых признаков,  $\bar{x}, \bar{y}$  – средние значения исследуемых признаков.

Проводили оценку корреляции для следующих взаимосвязей твердости со следующими показателями размерно-геометрических параметров графитовой фазы: твердость (НВ)–форма включений графита, твердость–длина включений графита, твердость–распределение включений графита, твердость–количество включений графита. Результаты оценки коэффициентов корреляции представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции ( $r$ ) для оценки взаимосвязей твердость (НВ) – размерно-геометрический параметр графитовой фазы

Table 3

*Values of correlation coefficients ( $r$ ) for evaluating the interconnection of hardness (НВ) – a dimensional parameter of the graphite phase*

Размерно-геометрический параметр графитовой фазы	Марка легированного чугуна с пластинчатым графитом	
	СЧМ	А-ХМ
Форма включений	0,18	0
Длина включений	– 0,87	– 0,88
Распределение включений	– 0,28	0,04
Количество включений	– 0,06	0,71

Проанализировав полученные результаты математического моделирования, можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствуют сильные корреляционные зависимости во взаимосвязях твердости маслостных заготовок, полученных из чугуна марки СЧМ - форма, распределение и количество графитовых включений, из чугуна марки А-ХМ форма и распределение, т.к. значение коэффициента корреляции близкое к нулю говорит о слабой взаимосвязи между переменными;

2. Для чугуна марки А-ХМ прослеживается прямая зависимость твердости от количества графитовых включений, о чем говорит положительное значение коэффициента корреляции  $r = 0,71$ . Фактически по результатам наших исследований твердость повышается при увеличении количества графитовых включений (рис. 3а).

При этом выявлено существенное противоречие, ведь согласно данным работ [11– 12, 14, 16, 19, 20], твердость напротив должна повышаться при уменьшении количества графитовых включений. Обосновать полученную зависимость в чугуне

марки А-ХМ можно следующим образом: данный тип чугунов дополнительно легируют сильными карбидообразующими элементами (Cr и Mo), кроме того, данный чугун имеет большую степень насыщенности за счет более высокой концентрации кремния. Степень насыщенности рассчитывается по формуле [11]:

$$S_c = \frac{\%C}{4,3 - \frac{1}{3}(\%Si + \%P)}, \quad (6)$$

где  $\%C$ ,  $\%Si$  и  $\%P$  – концентрации углерода, кремния и фосфора в чугуне соответственно. Чем ближе степень насыщенности к 1, тем более эвтектическая будет кристаллизация. На основании расчета степень насыщенности чугуна А-ХМ находится в диапазоне [0,83; 0,98], а для чугуна марки СЧМ [0,78; 0,9]. Таким образом на основании проведенного расчета можно утверждать, что чугун марки А-ХМ склонен к формированию стабильной графитно-аустенитной эвтектики, а в доэвтектическом чугуне марки СЧМ на первой стадии формирования структуры происходит выделение дендритов аустенита из расплава.

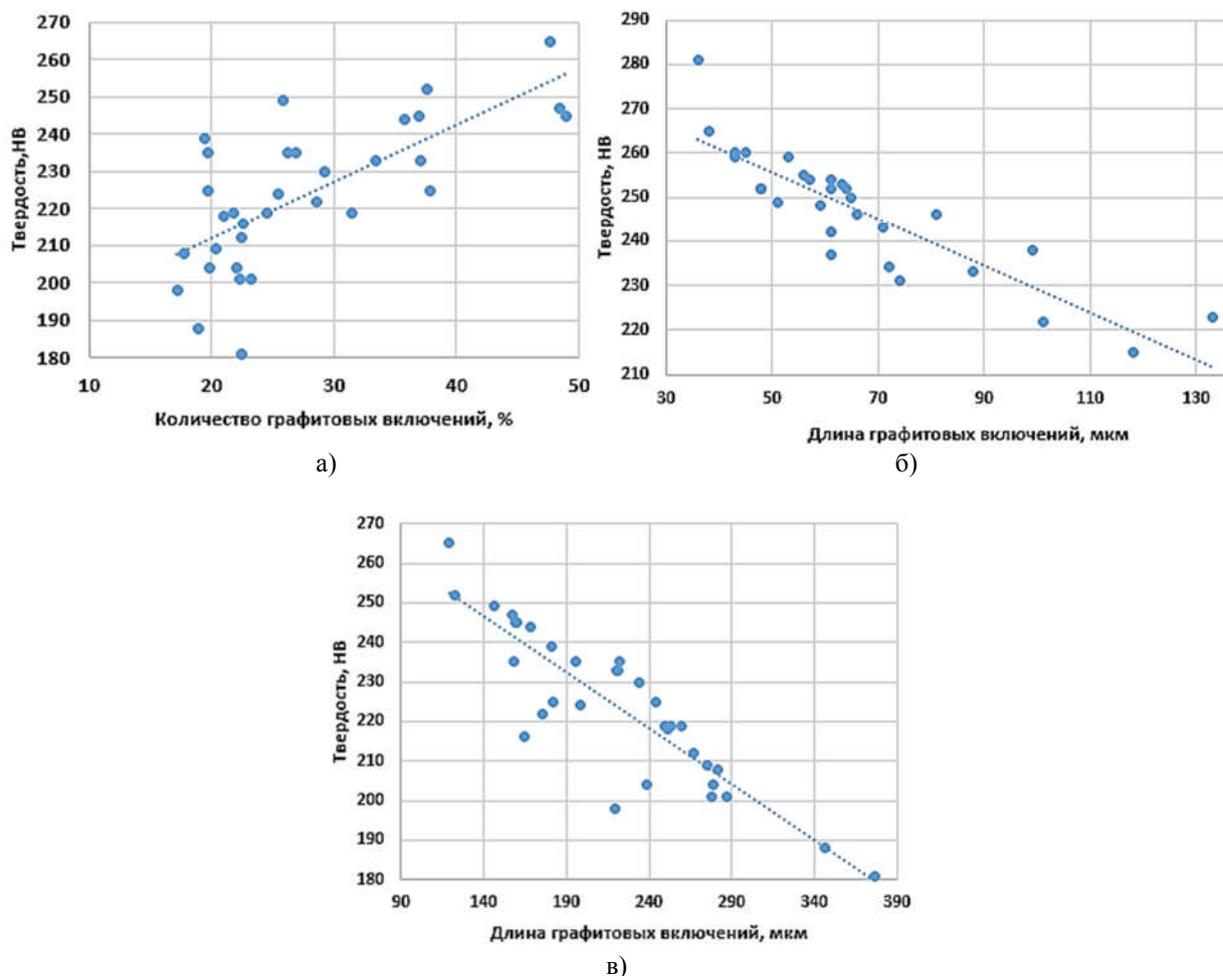


Рис. 3. Зависимость твердости от: а – количества включений графита в АХМ; б – длины включений графита в СЧМ; в – длины включений графита в А-ХМ  
 Fig. 3. The dependence of hardness on: a – the number of graphite inclusions in A-CrMo; b – the length of graphite inclusions in CIM; c – the length of graphite inclusions in A-CrMo

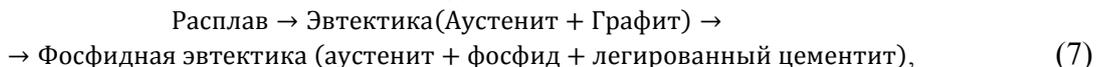
При этом необходимо учесть, что в процессе формирования структуры протекает конкуренция между отдельными фазами за углерод, растворенный в чугуне. На первой стадии формирование структуры чугуна А-ХМ происходит преимущественно путем эвтектической кристаллизации, в которой ведущую роль играет графит, а не аустенит. Эвтектический аустенит обогащен легирующими элементами: карбидообразующими (Mn, Cr, Mo) и ферритизирующим (Si). Карбидообразующие элементы понижают термодинамическую активность углерода в чугуне, а кремний напротив повышает ее, в этих условиях аустенит оказывается обогащен углеродом. Фосфидная эвтектика формируется на заключительном этапе стадии затвердевания, при этом количество ее будет также напрямую зависеть от количества графитовой фазы. Так как чугун

марки А-ХМ склонен к эвтектической кристаллизации, то количество графитовой фазы в нем больше, чем в СЧМ. В чугунах фосфидная эвтектика выделяется из маточного расплава в периферийной области между эвтектическими зернами, которые в структуре чугуна могут быть определены по окончаниям графитовых пластин. То есть для данного легированного чугуна характерна взаимосвязь, в соответствии с которой эвтектические зерна определяют графитовую фазу, а та, в свою очередь, оказывает влияние на формирование тройной фосфидной эвтектики. На второй стадии из эвтектического аустенита, а также аустенита, входящего в состав тройной фосфидной эвтектики, выделяется перлит, состоящий из легированного цементита  $(Fe, Cr, Mo)_3C$  и феррита, легированного кремнием (силикоферрита). Легированный цементит и феррит, леги-

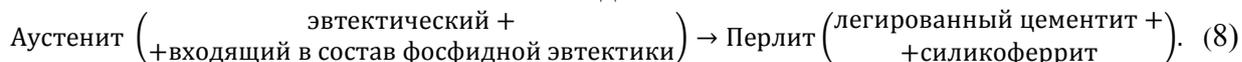
рованный кремнием, имеет большую твердость чем нелегированный ( $Fe_3C$ ) и нелегированный феррит (см. табл. 1).

Схематично описанные процессы можно представить в следующем виде:

I стадия:



II стадия:



Таким образом, рост количества графита в структуре чугуна компенсируется выделением более твердых структурных составляющих перлита (легированного цементита и силикоферрита), что объясняет рост твердости с увеличением количества графита в чугунах марки А-ХМ. При большем количестве графита, которое, как правило, проявляется в увеличении длины и толщины его пластин возрастает насыщение аустенита углеродом, что способствует увеличению легированного цементита в составе перлита и фосфидной эвтектики. При этом количество выделившегося графита определяется его общей концентрацией в чугуне и оказывает влияние на формирование эвтектических ячеек и объем тройной фосфидной эвтектики. В чугуне марки СЧМ данное явление менее ярко выражено, по причине меньшей степени насыщенности (6) данного чугуна он классифицируется как доэвтектический, поэтому на первой стадии (7) из расплава происходит выделение дендритов первичного аустенита. Легирующие элементы (Mn, Cr, Ni), используемые для перлитизации металлической матрицы чугуна марки СЧМ не могут обеспечить повышение микротвердости легированного цементита сопоставимой с эффектом, наблюдаемым в чугуне А-ХМ. Кроме того, в чугуне СЧМ меньше содержание кремния чем в А-ХМ, и как следствие меньше твердость феррита, входящего в состав эвтектоида.

3. Длина включений графита напрямую влияет на показатели твердости маслот, полученных из обоих марок чугуна.

Значение величины, приближенное к единице, показывает, что данные величины находятся в сильной корреляционной зависимости, при этом знак минус указывает на характер связи: твердость находится в обратной зависимости от длины графитовых включений (как показано на рис. 3б, в), т.е. наилучшие показатели твердости будут достигнуты при наименьшей величине графитовых включений:

- для чугунов марки СЧМ – наилучшими показателями твердости 260–280 НВ обладают образцы с длиной графитовых включений 45 мкм (рис.4а), а при длине включений графита 90 мкм (рис.4б) наблюдается значительное снижение твердости – минимальный показатель 215 НВ, уравнение регрессии имеют следующий вид:

$$HB = -0,53S_r + 282,06 \quad (9)$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,76$ , значение данного коэффициента означает, что расчетные параметры модели на 76 % объясняют зависимость между изучаемыми параметрами;

- для чугунов марки А-ХМ – наилучшими показателями твердости 250-265 НВ обладают образцы с длиной графитовых включений 90 мкм (рис. 5а), при увеличении длины включений графита показатели твердости значительно падают, при длине 180 мкм (рис. 5б) – максимальное значение твердости составляет 249 НВ, а при длине 350 мкм (рис. 5в) – всего 219 НВ, уравнение регрессии имеют следующий вид:

$$HB = -0,23S_r + 0,68V_r + 254,89 \quad (10)$$

коэффициент детерминации  $R^2 = 0,84$ , следовательно расчетные параметры моде-

ли на 84 % объясняют зависимость между изучаемыми параметрами.

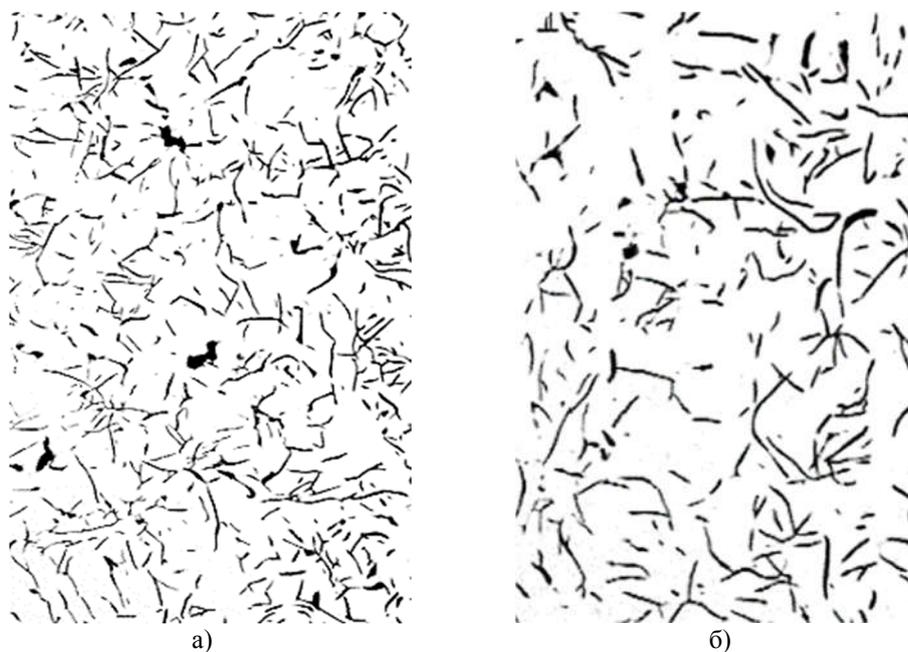


Рис. 4. Микроструктура графитовой фазы в чугунах марки СЧМ (образцы не травлены,  $\times 100$ ):  
а – 45 мкм, б – 90 мкм

*Fig. 4. The microstructure of the graphite phase in cast iron of the CIM brand:  
a - 45 microns, b - 90 microns*

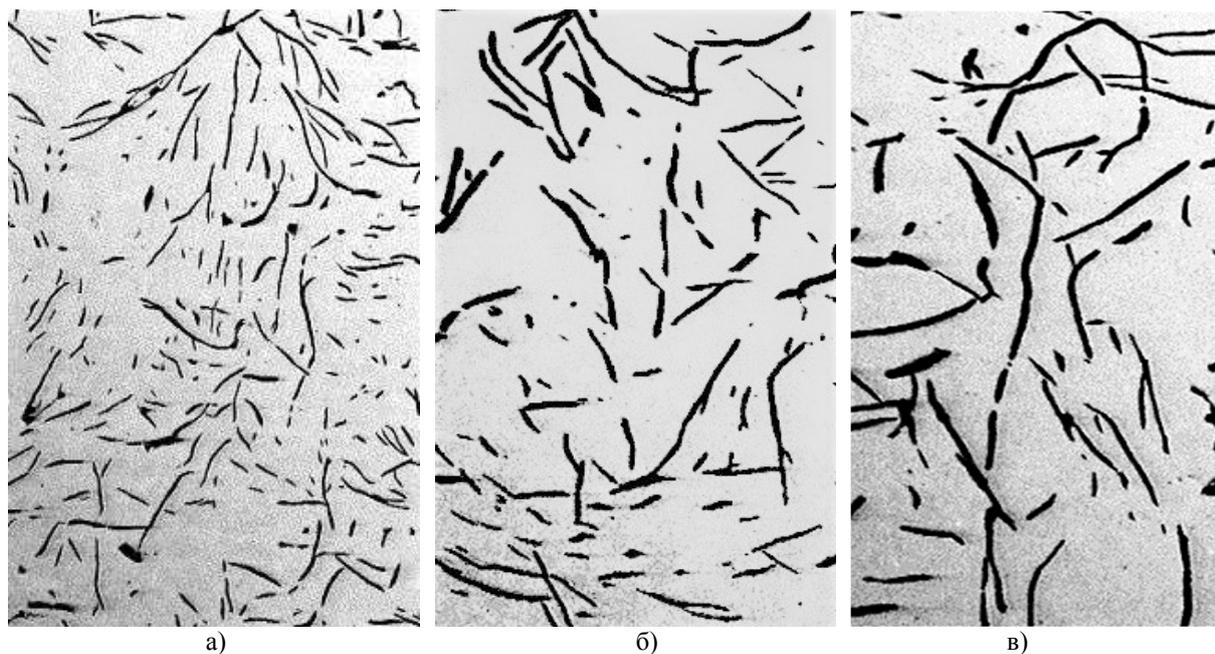


Рис. 5. Микроструктура графитовой фазы в чугунах марки А-ХМ (образцы не травлены,  $\times 100$ ):  
а – 90 мкм, б – 180 мкм; в – 350 мкм.

*Fig. 5. The microstructure of the graphite phase in cast iron of the A-CrMo brand:  
a - 90 microns, b - 180 microns; c - 350 microns.*

### Заклучение

На основании полученных результатов экспериментально доказано, что твердость напрямую зависит от длины графитовых включений в легированном чугуне с пластинчатым графитом: при уменьшении длины графитовых включений увеличивается твердость. При этом оптимальные по-

казатели твердости достигаются в чугунах марки СЧМ при длине включений графита 45 мкм, в чугунах марки А-ХМ при 90-180 мкм, в свою очередь такие показатели графитовой фазы, как форма, распределение и количество в меньшей мере оказывают влияние на твердость.

Для чугуна марки А-ХМ объяснена корреляционная зависимость повышения твердости с увеличением количества графитовой фазы. Причина данного явления объясняется комплексом факторов. Во-первых, морфологическими особенностями строения, как показал расчет степени насыщенности чугунов, марка А-ХМ относится к эвтектическим, а СЧМ к доэвтектическим, что сказывается на различии в строении этих сплавов. Во-вторых, чугуны А-ХМ и СЧМ имеют разные схемы легирования. Легирующие элементы, присутствующих в чугуне марки А-ХМ, которые представлены одновременно сильными карбидообразующими компонентами (Cr, Mo) и относительно высокой концентрацией графитизирующего элемента – кремния. Такое легирование чугуна приводит к формированию в перлите и фосфидной эвтектике структурной составляющей – легированного цементита  $(Fe, Cr, Mo)_3C$ , который превосходит по твердости цементит  $(Fe_3C)$ , и силикоферрита, обладающего большей твердостью чем нелегированный

феррит. При большем количестве графита возрастает насыщение аустенита углеродом, что способствует увеличению легированного цементита и силикоферрита в составе перлита и фосфидной эвтектики и как следствие сказывается на увеличении твердости чугуна А-ХМ.

Получены статистические зависимости влияния количества и длины графитовых включений на твердость легированного чугуна марки А-ХМ. Для чугуна марки СЧМ получена зависимость влияния длины графитовых включений на твердость сплава. Коэффициент корреляции оценки влияния количества графитовой фазы на твердость чугуна марки СЧМ показал низкие значения. Данные зависимости могут быть использованы не только для прогнозирования твердости чугуна на основе параметров структуры графитовой фазы, но и для оценки их влияния на технологические (обрабатываемость) и эксплуатационные (износостойкость) свойства, которые важны при производстве и использовании поршневых колец.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сазонов В.О. Методы исследования и экспериментальные установки для оценки триботехнических характеристик поршневых колец / В.О. Сазонов, Е.А. Памфилов // Новые материалы и технологии в машиностроении, Брянск. 2023. С. 93-96.
2. Grămescu T. Machinability by Milling of Gray Cast Iron / Traian Grămescu, Constantin Cărăușu // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 657. P. 88 - 92.
3. Martin D. R. Effects of Different Inoculants on the Microstructural Characteristics of Gray Cast Iron gg-25, Hardness and Useful Life of Tools / Martin, Diego Ruben; Sartori Moreno, Joao Roberto; de Albuquerque Vicente, André // Acta Scientiarum. Technology. 2015. V. 37, № 4. P. 355-360. – doi: 10.4025/actascitechnol.v37i4.27460
4. Aécio G. de Sousa, J. A review on the machining of cast irons / José Aécio G. de Sousa, Wisley Falco Sales, Alisson R. Machado // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. JrnID 170\_ArtID 1140\_Proof# 1 - 19/09/2017. – Doi: 10.1007/s00170-017-1140-1.
5. Bahari A. , Lewis R, Slatter T. Hardness characterisation of grey cast iron and its tribological performance in a contact lubricated with soybean oil / Adli Bahari, Roger Lewis, Tom Slatter // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018. V. 232(1). P. 190-203. – doi: 10.1177/0954406216675895.
6. Wilson F. Effect of Matrix Structure and Hardness on the Wear Characteristics of an S.G. Cast Iron / F. Wilson, T.S. Eyre // Wear. 1969. V. 14, Issue 2. P. 107-117.
7. Ускенбаева А.М. Влияние нанокремниевых добавок на графитизацию и трибологические свойства серого чугуна / А.М. Ускенбаева, А.Т. Волочко, Н.А. Шамельханова, С.П. Королев, А.А. Шегидевич // Металлург. 2016. № 2. С. 64-69.
8. Габец Д.А. Влияние комплексного модифицирования на структуру и свойства серого чугуна триботехнического назначения / Д.А. Габец, А.М. Марков, М.А. Гурьев, Е.А. Письменный, А.К. Насырова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 4. С. 165-180. – doi: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-165-180.
9. Барон А.А. Исследование соотношения твердости и прочности серых чугунов с учетом параметров структуры / Металлы. 2017. № 6. С. 93-98.
10. Дрозд М.С. Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд. М.: Металлургия. 1965. 171 с.

11. Гиршович Н.Г. Справочник по чугуному литью / Н.Г. Гиршович. Л.: Машиностроение. 1978. 758 с.
12. Moore W.W. Gray Cast Iron Machinability / W.W. Moore, J.O. Lord // AFS Transactions. 1959. V. 67. P. 193-198.
13. ASM Handbook. Vol. 1A. Cast Iron Science and Technology / Vol. Ed.: Doru M. Stefanescu. – ASM International. 2017. 772 p.
14. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. М.: Наука. 1976. 230 с.
15. Angus H.T. Cast Iron: Physical and Engineering Properties / Harold T. Angus. London-Boston: Butterworths. 1978. 542 p.

16. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н.Г. Гиршович. М.: Машиностроение. 1966. 564 с.
17. Макаренко К.В. Повышение эффективности модифицирования низкосернистых серых чугунов / К.В. Макаренко, В.О. Сазонов // Литейное производство. 2023. №2. С. 28-32.
18. Burger W. Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction using Java / Wilhelm Burger, Mark James Burge. Springer. 2008. 564 p.
19. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости / М.П. Марковец. Москва: Машиностроение. 1979. 191 с.
20. Шерман А.Д. Чугун: справочник / А. Д. Шерман, А.А. Жуков. М.: Metallurgy. 1991. 576 с.

## REFERENCES

1. Sazonov VO, Pamfilov EA. Research methods and experimental installations for evaluating tribotechnical characteristics of piston rings. New materials and technologies in mechanical engineering, Bryansk; 2023.
2. Grănescu T, Cărăușu C. Machinability by milling of gray cast iron. Applied Mechanics and Materials. 2014;657:88 - 92.
3. Martin DR, Sartori M, Joao R, de Albuquerque Vicente A. Effects of different inoculants on the microstructural characteristics of gray cast iron gg-25, hardness and useful life of tools. Acta Scientiarum. Technology. 2015;37(4):355-360. doi: 10.4025/actascitechnol.v37i4.27460
4. Aécio G. de Sousa J, Wisley FS, Alisson RM. A review on the machining of cast irons. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Doi: 10.1007/s00170-017-1140-1.
5. Bahari A, Lewis R, Slatter T. Hardness characterization of grey cast iron and its tribological performance in a contact lubricated with soybean oil. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018;232(1):190-203. doi: 10.1177/0954406216675895.
6. Wilson F, Eyre TS. Effect of matrix structure and hardness on the wear characteristics of an S.G. cast iron. Wear. 1969;14(2):107-117.
7. Uskenbayeva AM, Volochko AT, Shamelkhanova NA, Korolev SP, Shegidevich AA. Influence of nanocarbon additives on graphitization and tribological properties of gray cast iron. Metallurg. 2016;2:64-69.
8. Gabets DA, Markov AM, Guryev MA, Pismenny EA, Nasyrova AK. The effect of complex modification on the structure and properties of gray cast

- iron for tribotechnical application. Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science. 2022;24(4):165-180. doi: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-165-180.
9. Baron AA. Study of the ratio of hardness and strength of gray cast iron, taking into account the parameters of the structure. Metally. 2017;6:93-98.
10. Drozd MS. Determination of mechanical properties of metal without destruction. Moscow: Metallurgy; 1965.
11. Girshovich NG. Handbook of cast iron casting. Leningrad: Mashinostroenie; 1978.
12. Moore WW, Lord JO. Gray cast iron machinability. AFS Transactions. 1959;67:193-198.
13. Doru M. Stefanescu. ASM Handbook. Cast Iron Science and Technology. ASM International; 2017.
14. Grigorovich VK. Hardness and microhardness of metals. Moscow: Nauka; 1976.
15. Angus HT. Cast iron: physical and engineering properties. London-Boston: Butterworths; 1978.
16. Girshovich NG. Crystallization and properties of cast iron in castings. Moscow: Mashinostroenie; 1966.
17. Makarenko KV, Sazonov VO. Improving the efficiency of modification of low-sulfur gray cast iron. Liteinoe Proizvodstvo (Foundary. Technologies and Equipment). 2023;2:28-32.
18. Burger W, Burge MJ. Digital image processing: an algorithmic introduction using Java. Springer; 2008.
19. Markovets MP. Determination of mechanical properties of metals by hardness. Moscow: Mashinostroenie; 1979.
20. Sherman AD, Zhukov AA. Cast iron: handbook. Moscow: Metallurgy; 1991.

## Информация об авторах:

**Сазонов Вадим Олегович** – аспирант кафедры «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ

ВО «Брянский государственный технический университет», тел.: (4832) 58-82-23.

**Макаренко Константин Васильевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел.: (4832) 58-82-18.

**Sazonov Vadim Olegovich** – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Material Science, Bryansk State Technical University, phone: (4832) 58-82-23.

**Makarenko Konstantin Vasilyevich** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Material

**Вдовин Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел.: (4832) 58-82-18.

Science, Bryansk State Technical University, phone: (4832) 58-82-18.

**Vdovin Aleksandr Viktorovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science, Bryansk State Technical University, phone: (4832) 58-82-18.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 15.12.2024; одобрена после рецензирования 24.12.2024; принята к публикации 30.01.2025. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 15.12.2024; approved after review on 24.12.2024; accepted for publication on 30.01.2025. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of the Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of RAS, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**