

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №1 (139). С. 3-8.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №1 (139). P. 3-8.

Научная статья  
УДК 669-156.5, 536.2  
doi:10.30987/2223-4608-2023-1-3-8

## О теплопроводности высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом при изотермической закалке

Алексей Геннадьевич Панов<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Ирина Фаридовна Шаехова<sup>2</sup>,  
Дмитрий Андреевич Гуртовой<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1,2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Димитровградский литейный завод, Димитровград, Россия

<sup>1</sup>panov.ag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3357-8824>

<sup>2</sup>irra1603@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3275-3037>

<sup>3</sup>gurtovoyda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлены результаты исследований теплопроводности высокопрочных чугунов с вермикулярным и шаровидным графитом в диапазоне температур 25...950 °С. Установлено, что до 700 °С существенное влияние на распространение теплового потока оказывает тип металлической матрицы, в диапазоне температур 700...950 °С влияние матрицы становится не существенным и в процессе активно подключается графит, в частности форма включения.

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, теплопроводность, технология изотермической закалки, графит

**Для цитирования:** Панов А.Г., Шаехова И.Ф., Гуртовой Д.А. О теплопроводности высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом при изотермической закалке // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – №1 (139). – С. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-3-8.

Original article

## On thermal conductivity of nodular and vermicular graphite cast iron when isothermal quenching

Alexey G. Panov<sup>1</sup>, Dr.Sc.Tech.,

Irina F. Shaekhova<sup>2</sup>,

Dmitriy A. Gurtovoy<sup>3</sup>, Can.Sc.Tech.

<sup>1,2</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Dimitrovgrad Foundry, Dimitrovgrad, Russia

<sup>1</sup>panov.ag@mail.ru, <sup>2</sup>irra1603@yandex.ru, <sup>3</sup>gurtovoyda@mail.ru

**Abstract.** The results of studies of thermal conductivity of nodular and vermicular graphite cast iron in the temperature range of 25...950 °C are presented. It was concluded that up to 700 °C, the type of metal matrix, in the temperature range 700...950 °C the matrix effect becomes insignificant and graphite is actively connected in the process, in particular the inclusion form.

**Keywords:** nodular cast iron, thermal conductivity, isothermal quenching technology, graphite

**For citation:** Panov A.G., Shaekhova I. F., Gurtovoy D.A. On thermal conductivity of nodular and vermicular graphite cast iron when isothermal quenching. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 1 (139), pp. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-3-8.

## Введение

В настоящее время в области технологий машиностроения стремительно развивается направление изотермической закалки высокопрочного чугуна (ИЗ ВЧ). Получаемый при этом материал обладает уникальной микроструктурой в виде аусферрита (высокоуглеродистый остаточный аустенит и бейнитный феррит) с распределенными в нем графитовыми включениями шаровидной и/или вермикулярной формы [1]. Такая особенная микроструктура позволяет обеспечить превосходные свойства: высокую прочность, вязкость, износостойкость, удовлетворительную обрабатываемость и все это при низкой удельной себестоимости [2].

Оптимальное сочетание высокоуглеродистого аустенита, бейнитного феррита и графита различной формы в ИЗ ВЧ позволяет ему конкурировать со сталями и другими инженерными сплавами. Изотермическая закалка требует контролируемого нагрева и изотермической выдержки материала различной длительности в области аустенитизации и бейнитного превращения, что делает данный процесс относительно трудоёмким, однако при этом заготовки для ИЗ ВЧ можно изготавливать по известным технологиям любого другого более низкого класса высокопрочного чугуна, используя все преимущества этого высокотехнологичного литейного материала [3, 4].

К классу высокопрочных чугунов относят чугуны с шаровидным (ЧШГ) и вермикулярным графитом (ЧВГ). Традиционно считается, что производственные процессы получения и термической обработки литых заготовок из ЧШГ и ЧВГ схожи: температуры, время выдержки, скорость нагрева/охлаждения и пр., поэтому при разработке технологии ИЗ ЧВГ можно использовать данные для аналогичных по составу ЧШГ. Однако, как показали первые исследования ИЗ ЧВГ [5, 6], это не соответствует действительности, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований для получения новых знаний. Дополнительно следует отметить, что большинство известных данных по теплофизическим свойствам ЧШГ имеют весьма широкий диапазон значений и/или получены по устаревшим и/или уникальным методикам, что затрудняет оценку объективности необходимой информации для практического применения.

Теплопроводность материалов подробно изучалась многими исследователями, в частности модель движения тепла в железоуглеродистых сплавах была предложена

Д. Холмгреном [5] (рис. 1).

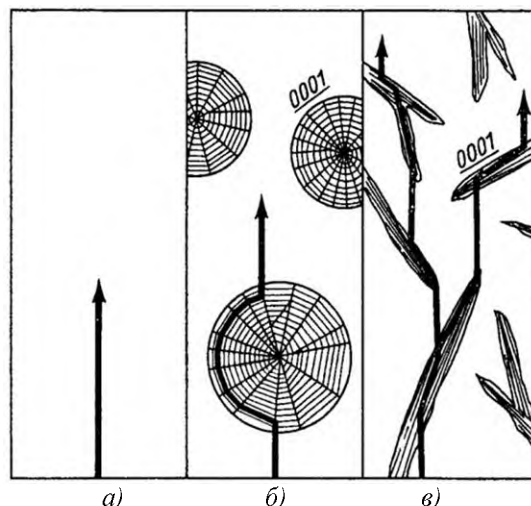


Рис. 1. Схема распространения теплового потока в стали (а), чугуне с шаровидным графитом (б) и сером чугуне (в) [5]

Согласно предложенной модели тепло в чугунах распространяется с большей скоростью по графитовым включениям, причём по их базисным плоскостям, которые в современном понимании представляют собой графены, обладающие уникальными свойствами. На участках без графита (матрицы композитной структуры) скорость прохождения тепла (теплопроводность) чугуна существенно ниже. По этой причине среди чугунов серый чугун обладает максимальной теплопроводностью, а чугун с шаровидным графитом – минимальной. Автором [5] также сделано утверждение, что теплопроводность серого чугуна уменьшается с повышением температуры, а теплопроводность высокопрочных чугунов с ШГ и ВГ меньше зависит от температуры. Также отмечается несколько интересных моментов (все выводы получены в диапазоне температур 0...400 °С):

- различия коэффициента теплопроводности чугунов с разной морфологией графита уменьшается при повышенных температурах;
- теплопроводность чугуна с ферритной металлической основой с вермикулярным графитом может превышать теплопроводность перлитного серого чугуна при тех же температурах;
- более высокий уровень углерода, 3,5–3,7 % мас., улучшает теплопроводность при сопоставимом содержании перлита.

Вместе с тем, в большинстве работ диапазон исследованных температур ограничивается 600 °С, что соответствует верхним температурам эксплуатации наиболее распространённых деталей механизмов и машин, в которых применяется чугун как конструкционный материал.

Целью настоящего исследования было определить и сравнить поведения теплопроводности ЧШГ и ЧВГ при нагреве в диапазоне 25...950 °С, что обусловлено необходимостью получения данных для математического моделирования процесса прогрева и аустенитизации деталей из ЧВГ от комнатной температуры до обычных температур аустенитизации ИЗ ЧШГ (850...950 °С), являющихся первыми этапами технологии изотермической закалки.

### Материалы и методы

Литые заготовки для исследований были предоставлены литейным производством ПАО КАМАЗ в виде клина (ЧШГ) 30x70x210 мм и компанией SinterCast (Швеция) в виде плиты 50x250x250 мм (ЧВГ). Химический состав и исходная микроструктура образцов представлены в табл. 1. ЧШГ-1 и ЧВГ-1 – условно «нелегированные» чугуны, ЧШГ-2 и ЧШГ-2 –

условно «легированные» чугуны. Состав нелегированного ЧШГ является традиционным для производственных условий ПАО КАМАЗ, отличается высоким содержанием углерода и низким содержанием серы. ЧВГ-1 представляет собой «нелегированный перлитный» чугун, традиционный для изготовления деталей типа головка блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания по рекомендациям компании SinterCast, перлитизация которого, однако, достигнута повышенным относительно обычных нелегированных чугунов содержанием меди и дополнительным микролегированием оловом. ЧШГ-2 и ЧВГ-2 – чугуны, имеющие исходные составы, аналогичные чугунам ЧШГ-1 и ЧШГ-2, дополнительно легированные традиционным для изотермически закаливаемых ЧШГ легирующим комплексом никель-медь-молибден.

1. Состав литых заготовок ЧШГ и ЧВГ

Материал	C	S	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mg	Mo	Sn
ЧШГ-1	3,73	0,007	2,31	0,33	0,05	0,01	0,10	0,061	-	-
	3,71	0,007	2,28	0,33	0,05	0,02	0,10	0,063	-	-
ЧШГ-2	3,60	0,009	2,08	0,35	0,067	1,32	0,75	0,055	0,11	-
ЧВГ-1	3,56	0,01	2,10	0,20	0,035	0,04	0,84	0,011	-	0,07
ЧВГ-2	3,53	0,01	2,09	0,20	0,041	1,12	0,83	0,010	0,22	0,07
	0,038				0,9	0,013		0,20		

Определение теплопроводности выполняли методом лазерной вспышки на приборе Netzsch LFA 457 (Германия) на образцах в форме шайбы диаметром 10±0,5 мм и толщиной 2,5±0,5 мм с предварительным контролем микроструктуры обоих торцов шайб. Коэффициент теплопроводности рассчитывали по формуле

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho. \quad (1)$$

Измерения температуропроводности  $\alpha(T)$  и теплоёмкости  $C_p(T)$  проводили в вакууме с остаточным давлением не более 0,1 МПа сначала при комнатной температуре и затем дискретно при температурах 100, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 850, 950 °С. Образец, установленный на специальный держатель, помещался в карбид-кремневую электропечь с инертной атмосферой. Нагрев образцов проводили со скоростью не более 1,5 К/мин. Изотермическая выдержка составляла не менее 3 мин при каждой температуре измерения.

Для каждой температуры проводили по три измерения, для анализа температурных зависимостей теплопроводности использовали средние значения измеряемых показателей. Нагрев нижней части образца производился лазерным

импульсом длительностью 0,5 мс. Изменение температуры верхней части образца регистрировалось InSb ИК-детектором. Выдержка на температуре измерения между выстрелами составляла 2 мин. Теплоемкость  $C_p$  образца была определена по стандартной методике сравнения с эталонным образцом (калиброванный эталон NIST SRM 864 - Inconel 600).

Плотность  $\rho$  определяли при комнатной температуре стандартным геометрическим гравиметрическим методом с её пересчётом в зависимости от термического расширения, определённого ранее методом дилатометрии. Учитывая совокупные ошибки в определении теплоемкости, плотности и температуропроводности погрешность измерений при 22±5 °С составила 2 % для температуропроводности, 4% для теплоемкости, 1 % для плотности. Погрешность определения теплопроводности составила 4,6 %

Микроструктуру исследовали на световом оптическом микроскопе НЕОРНОТ-32 (ФРГ) с применением программного комплекса SIAMS 800 (Екатеринбург), травление производили 4%-ным раствором азотной кислоты.

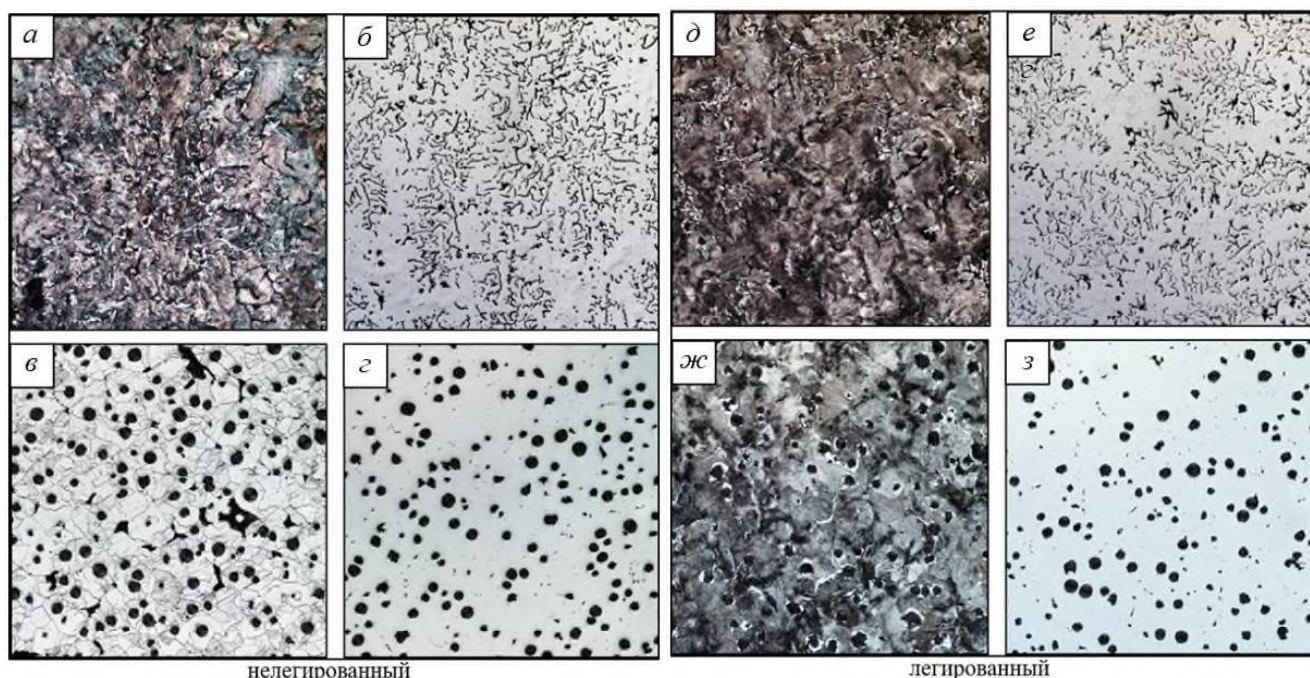
### Результаты

Исследовали исходную микроструктуру образцов. Изображения характерных микроструктур экспериментальных образцов представлено на рис. 2, качественное описание согласно ГОСТ 3443-87 представлено в табл. 2. Фазовый состав ЧВГ по графиту и типу металлической матрицы в обоих случаях идентичен. Матрицы композитных микроструктур ЧШГ

отличаются достаточно сильно. В ЧШГ-1 большая часть металлической основы представлена в виде феррита с единичными включениями перлита, в ЧШГ-2 ситуация обратная – перлит с единичными включениями феррита преимущественно вокруг графита. По распределению, форме и размеру графитных включений ЧШГ-1 и ЧШГ-2 схожи, количество графита в ЧШГ-1 несколько превышает количество графита в ЧШГ-2.

### 2. Исходная микроструктура образцов ЧШГ и ЧВГ

Материал	Микроструктура
ЧШГ-1	ШГф4,5; ШГр1,2; ШГд25,45; ШГ12; П6
ЧШГ-2	ШГф4,5; ШГр1,2; ШГд25,45; ШГ10; П85, микро_усадочная пористость
ЧВГ-1	П95, ВГ>95%, ШГф5
ЧВГ-2	П95, ВГ>95%, ШГф5



**Рис. 2.** Микроструктуры экспериментальных образцов, x100 (ЧВГ-1, ЧВГ-2, ЧШГ-1, ЧШГ-2):  
*a, в, д, ж* – травлено (4 %-ный раствор HNO<sub>3</sub>); *б, г, е, з* – не травлено

Результаты расчета коэффициента теплопроводности представлены в таб.3.

### 3. Теплопроводность ( $\lambda$ , Вт/м/К) в диапазоне температур 25...950 °С

Материал	Температура, °С										
	25	100	200	300	400	500	600	700	750	850	950
ЧШГ-1	35,78	46,31	45,50	43,50	41,70	37,60	36,27	33,45	28,76	25,13	26,61
ЧШГ-2	32,68	34,53	36,56	37,92	37,51	34,26	35,51	33,21	28,79	23,91	28,69
ЧВГ-1	48,38	42,37	40,05	37,34	36,91	35,81	36,23	34,05	28,85	28,22	24,02
ЧВГ-2	40,00	37,71	35,5	35,14	34,02	32,70	34,50	32,50	28,60	26,90	23,70

### Обсуждение результатов

Результаты определения теплопроводности

всех рассматриваемых образцов в виде её зависимости от температуры объединены на графике рис. 3.

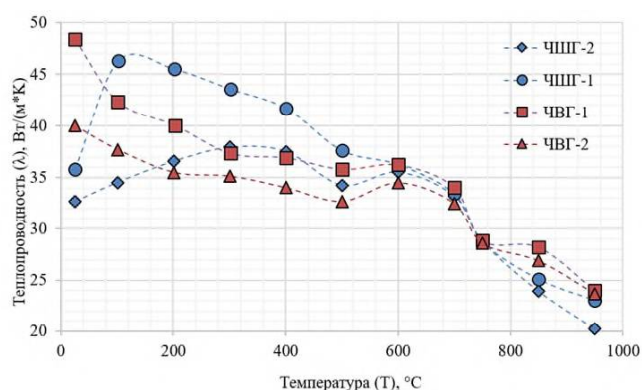


Рис. 3. Зависимость влияния температуры на коэффициент теплопроводности высокопрочного чугуна с разной формой графита и матрицы

На графике прослеживаются следующие закономерности: при комнатной температуре вновь, как и в большинстве известных случаев, наблюдается очевидное превосходство теплопроводности ЧВГ с минимальной долей шаровидного графита над теплопроводностью ЧШГ с полностью шаровидным графитом независимо от типа матрицы композитного материала. При одинаковой матрице и доле шаровидного графита в ЧВГ большей теплопроводностью обладает менее легированный чугун. Обратное влияние легирования стабилизирующими аустенит и снижающими активность диффузии углерода элементами никель-медь-молибден повторяется при комнатной температуре и для ЧШГ, хотя и в меньшей степени. Теплопроводность условно нелегированного ЧВГ-1 больше теплопроводности легированного ЧШГ-2 более, чем на 40 %.

Однако уже относительно небольшой нагрев образцов выше комнатной температуры и связанная с этим активация диффузионных процессов существенно меняют картину. Теплопроводность обоих образцов ЧВГ при нагреве от комнатной температуры сразу начинает монотонно экспоненциально падать вплоть до температур ферритизации матрицы в диапазоне 500...700 °C. В отличие от ЧВГ, теплопроводность обоих образцов ЧШГ при нагреве от комнатной температуры сначала растёт, а затем падает, причём темпы и температуры роста теплопроводности в одинаковых термодинамических неравновесных условиях эксперимента оказались разными.

Теплопроводность нелегированного ферритного ЧШГ-1 сразу при нагреве образца до 100 °C показала резкое увеличение почти на 30 % до значений, даже превышающих теплопроводности обоих ЧВГ, а затем монотонно падала до температур порядка 700 °C – области температур превращения феррит-аустенит.

Скачок коэффициента теплопроводности от 25 °C к 100 °C для ЧШГ-1 выглядит слишком резким, что пока не нашло объяснения и требует повторной проверки, однако общая тенденция существенного роста и последующего падения теплопроводности в рассматриваемом диапазоне температур не вызывает сомнений и, очевидно, связано с увеличением теплопроводности металлической матрицы – феррита.

Теплопроводность легированного перлитного ЧШГ-2 росла до температур порядка 300 °C и, уже начиная с температуры 200 °C, превышала теплопроводность дополнительно по отношению к нему легированного оловом ЧВГ-2, а, начиная с 300 °C, совпадала с теплопроводностью условно нелегированного перлитного ЧВГ-1.

Вместе с тем стоит отметить, что легированные образцы в обоих типах высокопрочного чугуна ЧШГ и ЧВГ при примерно одинаковых характеристиках графита закономерно обладают меньшим показателем  $\lambda$ .

В области температур 500-600 °C для образцов ЧВГ-1, ЧВГ-2 и ЧШГ-2 наблюдается рост значений  $\lambda$ , что объясняется полным растворением цементита перлита и формированием ферритной матрицы. Дальнейшее снижение теплопроводности очевидно происходит за счет диффузионного перехода части углерода из графита в матрицу при постепенном превращении феррит-аустенит.

При температуре 700 °C коэффициент теплопроводности ЧШГ-1 и ЧШГ-2 имеет практически одинаковое значение, что может быть связано с фазовым переходом и формированием аустенита. Для ЧВГ данное значение находится на отметке в 750 °C.

В диапазоне температур 100...600 °C очевидно существенное влияние на  $\lambda$  оказывает тип металлической основы и ее легирование. Из этого следует, что традиционное представление о превосходстве теплопроводности ЧВГ над ЧШГ требует уточнений и получения большего количества статистических данных для формирования объективной информации.

В диапазоне температур 700...950 °C теплопроводность ЧВГ выше, чем у ЧШГ, что при одинаковом фазовом составе металлической основы, очевидно, связано с преимущественным влиянием графитных включений на распределение теплового потока.

### Заключение

Анализ поведения теплопроводности высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом в широком диапазоне темпе-

ратур технологического процесса изотермической закалки показывает, что в области температур аустенитизации влияние на неё легирования и формы графита высокопрочного чугуна становится не таким сильным, как при комнатной температуре, особенно в области температур ферритизации перлита и феррито-аустенитного превращения.

Разница теплопроводности всех образцов не превысила погрешности измерения в диапазоне температур по крайней мере 600...700 °С, при этом разница теплопроводности легированного и условно нелегированного ЧВГ не превышала погрешности измерения во всём диапазоне температур эксперимента не ниже 600 °С, а разница теплопроводности ЧВГ и очевидно более низкой теплопроводности ЧШГ в критически значимой для изотермической закалки аустенитной области температур составила не более 20 %.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Peet, M. Bainitic steels and alloys for power plants. Structural Alloys for Power Plants: Operational Challenges and High-Temperature Materials, 2014, P. 153-187.
2. Benam, A. Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process: Review. China Foundry, 2015, №12, P. 54-70.
3. Gregorutti, R., Grau, J. Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures. International Journal of Cast Metals Research, 2014, №27, P. 275-281.
4. Delia, M., Alaalam, M., Grech, M. Effect of

Austenitizing Conditions on the Impact Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Ferritic Matrix Structure. Journal of Materials Engineering and Performance, 1998, №7, P. 265-272.

5. Holmgren, D. Review of thermal conductivity of cast iron. International Journal of Cast Metals Research, 2005, №18, P. 331-345.

6. Панов, А.Г., Гуртовой, Д.А., Шаехова, И.Ф. Об уникальности теплофизических свойств и перспективах чугуна с вермикулярным графитом для двигателей внутреннего сгорания // Черные металлы. – 2021 – № 4. – С. 51-56.

### REFERENCES

1. Peet, M. Bainitic steels and alloys for power plants. Structural Alloys for Power Plants: Operational Challenges and High-Temperature Materials, 2014, P. 153-187.
2. Benam, A. Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process: Review. China Foundry, 2015, №12, P. 54-70.
3. Gregorutti, R., Grau, J. Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures. International Journal of Cast Metals Research, 2014, №27, P. 275-281.
4. Delia, M., Alaalam, M., Grech, M. Effect of Austenitizing Conditions on the Impact Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Ferritic Matrix Structure. Journal of Materials Engineering and Performance, 1998, №7, P. 265-272.
5. Holmgren, D. Review of thermal conductivity of cast iron. International Journal of Cast Metals Research, 2005, №18, P. 331-345.
6. Panov, A.G., Gurtovoy, D.A., Shaekhova, I.F. On uniqueness of thermophysical properties and prospects of cast iron with vermicular graphite for internal combustion engines. / Ferrous Metals, 2021, No. 4, pp. 51-56.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 06.12.2022.

The article was submitted 16.11.2022; approved after reviewing 28.11.2022; assepted for publication 06.12.2022.