



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК: 620.17, 620.18, 621.74

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.012



## РАЗРАБОТКА ТЯЖЕЛОГО МОДИФИКАТОРА ЧУГУНА НА ВЕРМИКУЛЯРНЫЙ ГРАФИТ

Эрнст Сергеевич Закиров <sup>1</sup>, Алексей Геннадьевич Панов <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «ЯГТУ», Ярославль, Россия

<sup>1</sup> maybenixon@yandex.ru, ORCID0000-0002-8827-967X

<sup>2</sup> panov.ag@mail.ru, ORCID 0000-0002-3357-8824

**Аннотация.** В работе представлены результаты разработки, исследования структуры и опытных испытаний тяжёлого модификатора чугуна на вермикулярный графит.

Новый модификатор имеет железо–никель–кремниевую основу, в своём составе содержит классические модифицирующие элементы магний и редкоземельные металлы.

При изготовлении модификатора применяется модифицирование расплава поверхностно-активными металлами для увеличения жидкотекучести расплава, а также измельчения, повышения однородности и инверсии структуры модификатора. Модификатор разливается центробежным способом в чугунные изложницы толщиной стенки отливки от 5 мм до 20 мм, что обеспечивает чистоту, а также однородность структуры и свойств модификатора.

Плотность нового модификатора составляет 7,0 г/см<sup>3</sup>, что более чем на 10 % превышает плотность чугуна. Магний и РЗМ в модификаторе связаны в устойчивые соединения с никелем и кремнием. Такие плотность и стойкость соединений магния позволяют расширить технологическое окно операции модифицирования и обеспечить повышение производительности структуры и свойств ответственных литых чугунных деталей.

Обработка новым модификатором чугуна в 100 кг ковшах с кислой футеровкой без его покрытия при расходе модификатора 0,38–0,47 % и исходном содержании серы в чугунном расплаве в диапазоне 0,015–0,017 % позволили получить в структуре отливок не менее 80 % вермикулярного графита (остальное – шаровидный графит), при этом при содержании перлита 20 % чугун имел прочность в диапазоне 345–385 МПа при относительном удлинении 3,5 %.

**Ключевые слова:** чугун, структура, свойства, модифицирование на вермикулярный графит.

---

**Для цитирования:** Закиров Э. С., Панов А. Г. Разработка тяжёлого модификатора чугуна на вермикулярный графит // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т.2. С. 93–98. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.012. EDN: <https://elibrary.ru/SBFXGF>.

---

## DEVELOPMENT OF THE HEAVY MASTER-ALLOY FOR COMPACTED GRAPHITE IRON

Ernest S. Zakirov <sup>1</sup>, Alexey G. Panov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

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

<sup>2</sup> YAGTU, Yaroslavl, Russia

<sup>1</sup> maybenixon@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8827-967X

<sup>2</sup> panov.ag@mail.ru, ORCID 0000-0002-3357-8824

**Abstract.** *This paper covers the results of development, study of structure and experimental trials with regard to heavy cast iron modifier to obtain compacted graphite shape.*

*The new modifier is based on iron-nickel-silicon alloy having in its content the conventional modifying elements such as magnesium and rare-earth metals (REM).*

*To produce modifier the melt is modified by means of surfactant metals. This is used to improve fluidity of the melt as well as to refine the grain structure and increase homogeneity of the modifier structure. The modifier is poured out into cast iron moulds with a section thickness of 5 to 20 mm by centrifugal way, thus providing purity and homogeneity of the modifier structure and properties.*

*The density of the new master-alloy is 7.0 g/cm<sup>3</sup> which is more than 10% higher than that of the iron melt. Magnesium and REM in the modifier are bonded to nickel and silicon in a stable manner. Such densities and strengths of magnesium compounds make it possible to enlarge the technological window of modifying operations and to ensure increased reproducibility of structure and properties of critical cast iron parts.*

*Processing with the new modifier of cast iron in 100 kg ladles with acid lining without its coating at the consumption of the modifier 0,38-0,47 % and the initial sulphur content in the iron melt in the range 0,015-0,017 % allowed to obtain in the castings structure not less than 80% compact graphite (the rest is spheroidal graphite), in this case with 20 % perlite content the strength of iron was in the range 345-385 MPa with relative elongation of 3,5 %.*

**Keywords:** cast iron, structure, properties, modification to vermicular graphite.

---

**For citation:** Zakirov, E. S. & Panov, A. G. (2022). Development of the heavy master-alloy for compacted graphite iron. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 93-98. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.012. EDN: <https://elibrary.ru/SBFXGF>.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) является перспективным конструкционным материалом для деталей машиностроения, а также других отраслей народного хозяйства.

ЧВГ сочетает в себе высокие прочностные характеристики, с высокими показателями теплопроводности, пределом текучести, демпфирующей способностью и низким коэффициентом теплового расширения, а также хорошей обрабатываемостью, и вместе с тем имеет хорошие литейные свойства: низкий коэффициент усадки и высокий показатель жидкотекучести.

Указанные преимущества обусловлены своеобразной морфологией графитовых включений, имеющих вермикулярную форму. При

этом наилучшие характеристики ЧВГ достигаются при содержании в его структуре вермикулярного графита не менее 80 % [1].

Традиционно для получения ЧВГ используются железо-кремний-магниевого модификаторы (ФСМг), дополнительно содержащие кальций (Ca) и РЗМ (чаще La + Ce). Однако ввиду невысокой плотности ФСМг (порядка 2,0–2,5 см<sup>3</sup>) существует проблема повышенного и нестабильного угара магния на этапе модифицирующей обработки расплава, которая наиболее критична при изготовлении ответственных литых заготовок ЧВГ с жёстким регламентом структуры, особенно получаемых с помощью метода ковшевого модифицирования в ковшах малой емкости до 40 кг, таких деталей, как гильзы блока цилиндра

двигателей внутреннего сгорания, рабочие органы погружных насосов и другие.

Указанное также является одним из главных сдерживающих факторов для развития применения ЧВГ, т.к. для стабильного получения доли вермикулярного графита в заданном количестве, требуется обеспечить воспроизводимый уровень остаточного магния, который ограничен достаточно узкими пределами: 0,08–0,014 %, достичь который при указанном выше недостатке сложно.

Вместе с тем существует целый ряд отливок специального назначения, требования конструкторской документации, для которых определено содержание дополнительных элементов, в том числе и никеля.

Описанная проблематика предопределила актуальность настоящих исследований, которая заключается в необходимости разработки надежного модификатора для получения отливок специального назначения из ЧВГ в ковшах малой емкости, что предлагается достичь за счет применения тяжелых лигатур, содержащих никель.

В рамках данной работы также решается проблема дробимости лигатур [2] системы железо–никель–магний за счет специальной обработки модификатора при выплавке и ускоренного охлаждения при заливке центробежным способом литья.

### МЕТОДЫ

Выплавку опытных образцов лигатур производили на предприятии ООО «НЭК» (г. Елабуга) в индукционных тигельных печах ИСТ-0,16 с графитовым тиглем.

На основании проведенных ранее исследований [3] был разработан состав лигатуры, в соответствии с которым была определена рецептура шихтовки, а также порядок закладки компонентов металлизавалки. Магний и никель использовались в чистом виде и закладывались в плавильную печь, в первую очередь, для создания химического соединения  $MgNi_2$  с целью минимизации выгорания чистого магния.

При расчете количества вводимого магния делали запас на потери по угару 20 %, по РЗМ/ЩЗМ – 10 %.

Дополнительно для уменьшения выгорания магния плавка проводилась с использованием покрывного флюса.

Для обеспечения полного растворения компонентов металлизавалки температура выпуска расплава была задана в пределах 1300–1350 °С.

Для получения мелкозернистой структуры приготовленный расплав разливали в кокиль центробежной машины. Дополнительно, со-

гласно ранее проведенным работам и установленным закономерностям по разработке структуры ФСМг модификаторов [4], при выпуске расплава модификатора в разливочный ковш применили модифицирование в струе металла поверхностно-активными элементами (0,005 % от массы жидкого металла) для измельчения зерна кристаллизующихся фаз.

Производственные испытания полученной лигатуры проводили на литейном заводе ПАО «КАМАЗ» в цехе точного стального литья при модифицировании чугуна на вермикулярный графит.

Выплавку чугуна осуществляли в индукционных тигельных печах ИСТ-0,25. С учетом явления структурной наследственности чугунов, связанного с исходной структурой шихтовых материалов, расплав перегревали до температуры 1600 °С [5], с выдержкой 30 мин и последующим охлаждением до рабочей температуры заливки 1400...1450 °С.

Модифицирование осуществляли вбросом навески лигатуры на дно ковша, при этом опробовали три варианта расхода лигатуры.

Таблица 1 – Расход лигатур

Table 1 - Master-alloy consumption

№ ковша	Вес металла в ковше, кг	Навеска лигатуры, %
1	89,4	0,27
2	83,5	0,38
3	84,4	0,47

Отбор проб для физико-механических исследований производили через 1 минуту после наполнения ковша металлом для обеспечения полного растворения элементов лигатуры в чугунном расплаве.

С каждого из трех ковшей для определения механических свойств заливали по три стандартные клиновидные пробы в соответствии с ГОСТ 7293-85 [6]. Таким образом, для каждого ковша проводили исследования 6 образцов (по два образца с одной клиновидной пробы), с этих же образцов проводили исследование микроструктуры металла.

Качественный и количественный анализ микроструктуры опытных лигатур и чугуна осуществляли методом световой микроскопии по ГОСТ 3443-87 [7] на микроскопе ф. Meiji Techno с использованием пакета прикладных программ Thixomet для получения цифрового изображения микроструктуры.

Определение твердости производилось на твердомере типа ТШ-2М в соответствии с ГОСТ 9012-59 [8].

Определение прочностных характеристик чугуна осуществлялось на универсальной ис-

пытательной машине типа ZD-10/90 ф. «Fritz Heckert» по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Определение химического состава отбеленных проб чугуна толщиной 3 мм производилось на спектрометре оптическом эмиссионном Spectrolab M8 ф. Spectro по ГОСТ 27611-88 [9].

Локальный и интегральный химический состав образцов лигатур исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа OxfordInstruments INCA Energy 250/X-max 20.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчетный и фактически полученный химический состав лигатуры по основным элементам представлен в таблице 2. Фото микроструктуры полученной лигатуры представлено на рисунке 1. Химический состав до (0) и после (1, 2, 3) модифицирования тремя разными навесками лигатуры представлен в таблице 3.

Таблица 2 – Химический состав лигатуры

Table 2 - Master-alloy chemical composition

	Mg	Si	Fe	Ni	La	Ce
<i>Расчет</i>	4,0-4,5	4,0-6,0	–	40-45		$\Sigma=$ 5,5-6,5
<i>Факт</i>	4,15	4,8	37,7	43,3	1,9	3,85

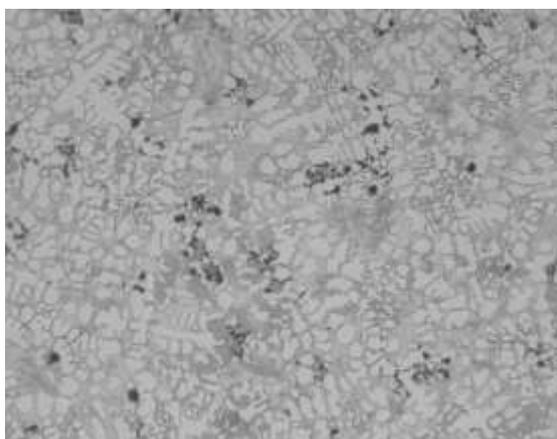


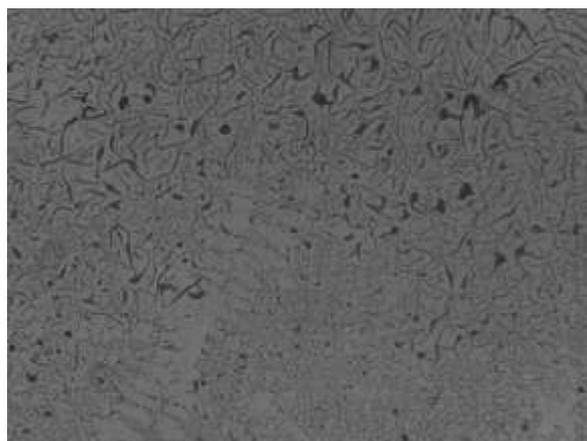
Рисунок 1 – Микроструктура лигатуры, x100, травлено 4%-ным раствором азотной кислоты

Figure 1 - Master-alloy microstructure, x100, etched with 4% nitric acid solution

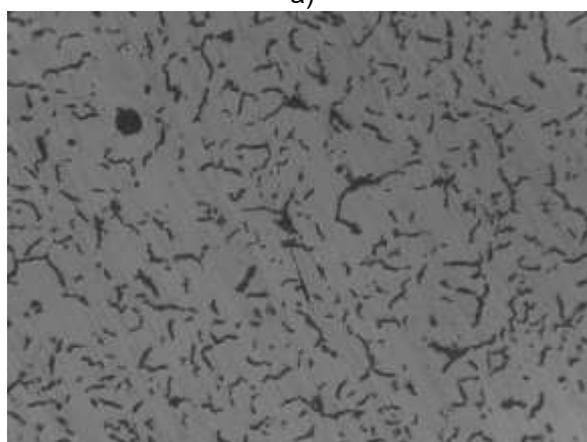
Таблица 3 – Химический состав чугуна

Table 3 - Cast iron chemical composition

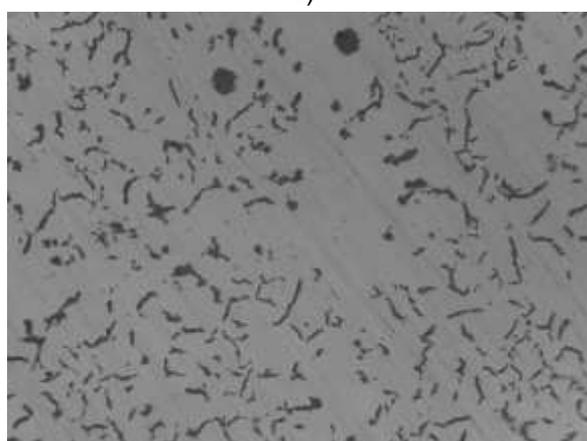
№	S	Si	Ni	Mg	Ce	La
0	0,013	2,17	0,02	–	–	–
1	0,012	2,13	0,14	0,008	0,009	0,004
2	0,012	2,16	0,19	0,011	0,014	0,006
3	0,011	2,16	0,24	0,013	0,017	0,008



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Микроструктура чугуна, x100  
а) ковш № 1, 0,27 %, б) ковш № 2, 0,38 %, в) ковш № 3, 0,47 %

Figure 2 - Cast iron microstructure, x100  
а) ladle № 1, 0,27%, б) ladle № 2, 0,38%, в) ladle № 3, 0,47%

Усредненные результаты испытания механических свойств модифицированного чугуна для каждого из трех ковшей представлены в таблице 4, микроструктура модифицированного чугуна – на рисунке 2 и в таблице 5.

## РАЗРАБОТКА ТЯЖЕЛОГО МОДИФИКАТОРА ДЛЯ ЧУГУНА НА ВЕРМИКУЛЯРНЫЙ ГРАФИТ

Как видно из представленных фотографий, для ковша № 1 расхода лигатуры 0,27 %, который существенно ниже (примерно на 30 %) традиционного минимального расхода (0,40 %) аналогичных по содержанию магния и РЗМ основных модифицирующих элементов, но на железокремниевой основе лёгких модификаторов, оказалось недостаточно для формирования вермикулярного графита. Микроструктура представляет собой графит преимущественно пластинчатой формы с сильным разбросом по размеру и неравномерным распределением графитовых включений. Встречаются отдельные включения шаровидной и вермикулярной формы. Металлическая основа практически полностью состоит из феррита, механические характеристики не удовлетворяют марке ЧВГ35.

Таблица 4 – Механические свойства чугуна

Table 4 - Cast iron mechanical properties

№	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
1	135	–	< 140
2	354	3,6	164
3	372	3,4	183

Таблица 5 – Микроструктура чугуна

Table 5 - Cast iron microstructure

Графит	Матрица
ПГф1,2; ПГд15-350; ПГр 1,2,3,4,8	П6(Ф94)
ВГ80 +ШГф 4,5	П20(Ф80)
ВГ80 +ШГф 4,5	П20(Ф80)

Чугун ковша № 2 с расходом 0,38 % опытного модификатора, несколько меньшим (на 5 %), чем традиционный расход аналогичных лёгких модификаторов, имел в своей структуре вермикулярный графит узелковой и извилистой формы и шаровидный графит правильной формы с равномерным распределением, металлическая матрица перлитно-ферритная (П20/Ф80), доля вермикулярного графита составляет не менее 80 %, что свидетельствует о высокой эффективности модифицирующей лигатуры. По механическим характеристикам полученный металл соответствует марке ЧВГ35 согласно ГОСТ 28394-89.

При расходе 0,47 % (примерно на 18 % больше традиционного минимального расхода лёгкого аналогичного модификатора) на ковше № 3 также была получена структура с долей вермикулярного графита не менее 80 %, металлическая основа перлитно-ферритная (П20/Ф80). При этом по сравнению с чугуном ковша № 2 несколько возросли предел прочности на растяжение и твёрдость – до 370 МПа и 188 НВ соответственно, относи-

тельное удлинение осталось на том же уровне. Также следует отметить, что на некоторых исследованных образцах был обнаружен цементит до 10 %, что наряду с высокими механическими свойствами выглядит логично и объясняется большей навеской лигатуры.

Помимо исследованных микроструктуры и механических свойств полученного металла проведена оценка усвоения основных элементов лигатуры чугуном расплавом, соответствующая диаграмма приведена на рисунке 3.

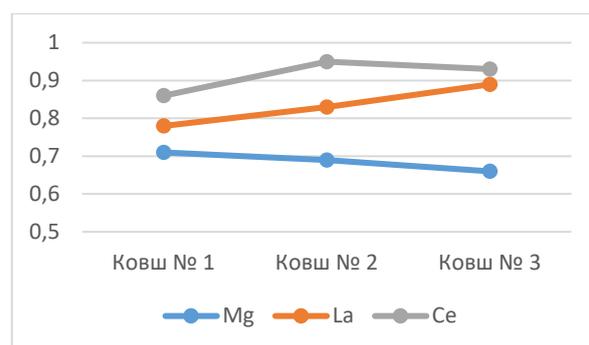


Рисунок 3 – Усвоение элементов лигатуры

Figure 3 - Master-alloy elements recovery

Как следует из диаграммы, усвоение магния чугуном расплавом составило порядка 70 %, элементов РЗМ – свыше 80 %, что обеспечивает более высокую воспроизводимость процесса модифицирования и стабильность структуры, физико-механических и потребительских свойств ЧВГ по сравнению с аналогичным лёгким модификатором.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью проведенных работ являлось повышение стабильности структуры и свойств машиностроительных отливок из чугуна с вермикулярным графитом особоответственного назначения на этапе модифицирующей обработки путем применения специальных сфероидизирующих лигатур с заданной структурой и составом, в результате чего сделаны следующие выводы:

- разработанная технология выплавки и заливки модификатора с дополнительным модифицированием ПАЭ пригодна для получения требуемых состава и структуры модификатора;

- разработанные состав и структура модификатора позволяют получать требуемые механические свойства и структуру чугуна, с содержанием вермикулярного графита 80 %;

- достигнуто усвоение магния чугуном расплавом 70 %, элементов РЗМ – свыше 80 %;

- предложенная тяжелая лигатура может быть использована при изготовлении специальных отливок из чугуна с вермикулярным графитом, имеющих дополнительные требования по содержанию никеля в химическом составе, что обосновывает технико-экономическую целесообразность использования тяжелой лигатуры, содержащую никель, которая также реализуется в части снижения брака микроструктуры при модифицировании чугуна на вермикулярный графит в ковшах малой емкости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шерман, А.Д. Чугун : справочник. – Москва : Metallurgy, 1991. – 316 с.
2. Панов, А.Г., Давыдов, С.В. Исследование изменения микроструктуры литых Fe–Mg–Ni лигатур в зависимости от технологии их модифицирования и скорости охлаждения. – М. : Metallurgy машиностроения. 2022. – № 1. – С. 2–8.
3. Закиров, Э.С., Панов, А.Г. Исследование зависимостей различных концентраций элементов на активность магния в лигатуре системы Fe–Mg–Ni–Si // Прогрессивные литейные технологии : Труды X МНПК НИТУ МИСиС 8–11 ноября 2022 г. / Под ред. проф. В.Д. Белова. – М. : Лаборатория рекламы и печати, 2022. – С. 237–240.
4. Панов, А.Г., Закиров, Э.С. Влияние микроструктуры сфероидизирующих модификаторов FSMg5 на их потребительские свойства // Труды IX Международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра». – Санкт-Петербург, 2012. – С. 201–206.
5. Исследование структурообразования расплавов чугунов. Влияние наследственности на свойства отливок из ЧВГ / А.Г. Панов [и др.] // Литейщик России. – 2010. – № 4. – С. 17–20.
6. ГОСТ 7293-85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок». Дата введения 01.01.1987. Официальный сайт: Профессиональные справочные системы «Техэксперт/Кодекс». (дата обращения 10.09.2022).
7. ГОСТ 3443-87. «Отливки из чугуна с различной формой графита». Дата введения 01.07.88. Официальный сайт: Профессиональные справочные системы «Техэксперт/Кодекс». (Дата обращения 10.09.2022).
8. ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод определения твердости по Бринеллю». Дата введения 01.01.60. Официальный сайт: Профессиональные справочные системы «Техэксперт/Кодекс». (Дата обращения 10.09.2022).
9. ГОСТ 27611-88 «Чугун. Метод фотоэлектрического спектрального анализа». Дата введения 01.01.1989. Официальный сайт: Профессиональные справочные системы «Техэксперт/Кодекс». (Дата обращения 10.09.2022).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.*

*The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.*

### Информация об авторах

*Э. С. Закиров – и.о. главного металлурга ПАО «КАМАЗ».*

*А. Г. Панов – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФGAOU BO KFУ, профессор кафедры технологий материалов, стандартизации и метрологии ФГБОУ ВО ЯГТУ.*

### REFERENCES

1. Sherman, A.D. (1991). Cast Iron: Handbook. Moscow: Metallurgy. (In Russ.).
2. Panov, A.G. & Davydov, S.V. (2022). Investigation of change in microstructure of cast Fe-Mg-Ni ligatures depending on technology of their modification and cooling rate. M. : Metallurgy of Mechanical Engineering. (1). 2-8. (In Russ.).
3. Zakirov, E.S. & Panov, A.G. (2022). The study of dependences of various concentrations of elements on the activity of magnesium in the ligature system Fe-Mg-Ni-Si. Advanced Casting Technologies: Proceedings of X ISPC NITU MISiS 8-11 November 2022. M. : Laboratory of Advertising and Press, 237-240. (In Russ.).
4. Panov, A.G. & Zakirov, E.S. (2012). Influence of microstructure of spheroidizing modifiers FSMg5 on their consumer properties. Proceedings of IX International Scientific and Practical Conference "Foundry Production today and tomorrow". St. Petersburg. 201-206. (In Russ.).
5. Panov, A.G. [etc.] (2010). Study of structure formation of cast iron melts. Influence of heredity on properties of castings from CGI. Foundryman of Russia. (4). 17-20. (In Russ.).
6. Cast Iron with spheroidal. graphite for castings. (1987). HOST 7293-85 from 1 Jan 1987. Retrieved from <https://docs.cntd.ru/>. (In Russ.).
7. Castings from cast iron with different forms of graphite. (1988). HOST 3443-87 from 1 July 1987. Retrieved from [https://docs.cntd.ru](https://docs.cntd.ru/). (In Russ.).
8. Metals. Method for determination of Brinell hardness. HOST 9012-59 from 1 Jan 1960. Retrieved from [https://docs.cntd.ru](https://docs.cntd.ru/). (In Russ.).
9. Cast Iron. Method of photoelectric spectral analysis. HOST 27611-88 from 1 Jan 1989. Retrieved from [https://docs.cntd.ru](https://docs.cntd.ru/). (In Russ.).

### Information about the authors

*E. S. Zakirov - Acting Chief Metallurgist of KAMAZ.*

*A. G. Panov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials, Technologies and Quality" of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the FGAOU IN KFУ, Professor of the Department of Materials Technologies, Standardization and Metrology of the FGBOU in YAGTU.*