



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Влияние комплексного модифицирования на структуру и свойства серого чугуна триботехнического назначения

Денис Габец<sup>1, a</sup>, Андрей Марков<sup>1, b</sup>, Михаил Гурьев<sup>1, c</sup>, Евгений Письменный<sup>2, d</sup>,  
Алина Насырова<sup>3, e, \*</sup>

<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия

<sup>2</sup> АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», ул. 3-я Мытищинская, 10, г. Москва, 129851, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0304-4407>,  [gabets22@mail.ru](mailto:gabets22@mail.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>,  [andmarkov@inbox.ru](mailto:andmarkov@inbox.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>,  [gurievma@mail.ru](mailto:gurievma@mail.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7454-0830>,  [pysmennyi.eug@gmail.com](mailto:pysmennyi.eug@gmail.com),

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2551-3657>,  [nasyrova.alina98@mail.ru](mailto:nasyrova.alina98@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.15-196.55

#### История статьи:

Поступила: 15 сентября 2022

Рецензирование: 29 сентября 2022

Принята к печати: 17 октября 2022

Доступно онлайн: 15 декабря 2022

#### Ключевые слова:

Легирование чугуна

Модифицирование

Износостойкость

Ударный изгиб

Износостойкий чугун

Графитовые включения

#### Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Подход, основанный на комплексном модифицировании чугунов, позволяет добиться существенного улучшения их механических свойств за счет изменения структуры металлической матрицы, а также формы графита и его распределения. **Целью работы** является изучение влияния легирующих элементов на структуру и механические свойства серого чугуна, предназначенного для эксплуатации в условиях фрикционного изнашивания. **Методы исследования.** В статье описан процесс получения комплексно-модифицированного чугуна, изучены его механические свойства и микроструктура. Проведены фрактографические исследования динамически разрушенных образцов. Изучены детали строения структурных составляющих чугунов СЧ35, ЧМН-35М и СЧКМ-45. Проведены триботехнические испытания серых чугунов по схеме трения скольжения. **Результаты и их обсуждение.** Установлено что комплексное модифицирование серого чугуна марки СЧ35 молибденом, никелем и ванадием позволяет повысить уровень его твердости до 295 НВ и предел прочности при растяжении до 470...505 МПа. Введение в состав серого чугуна никеля (0,4...0,7 масс. %), молибдена (0,4...0,7 масс. %) и ванадия (0,2...0,4 масс. %) приводит к двукратному уменьшению межпластинчатого расстояния в перлите, а также к измельчению зерна металлической матрицы. Длина графитных пластин в результате модифицирования чугуна уменьшается в 3–5 раз. Дополнительное влияние на предел прочности чугуна обусловлено легированием молибденом и ванадием феррита, выделяющегося по границам графитных включений. Легирование феррита молибденом и ванадием повышает уровень его микротвердости в 1,4 раза по сравнению с  $\alpha$ -фазой серийного чугуна СЧ35. Представлены результаты триботехнических испытаний разработанного материала. **Заключение.** Установлено, что износ образцов из чугуна СЧКМ-45 примерно на 20...30 % ниже по сравнению с чугуном СЧ35 и на 10...15 % ниже по сравнению с чугуном ЧМН-35М. Фрактографические исследования свидетельствуют о том, что комплексное легирование молибденом, ванадием и никелем способствует измельчению колоний перлита, что приводит к уменьшению размеров фасеток скола.

**Для цитирования:** 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.

## Введение

Опыт эксплуатации различных типов оборудования позволяет сделать вывод о возможности применения низколегированных серых чугунов

для изготовления конструкций ответственного назначения [1–4]. К ним относятся, в частности, корпусные изделия, детали тормозных систем, рабочие части горнодобывающих машин, детали тележек железнодорожных вагонов. К чугунам, из которых они изготовлены, помимо высоких прочностных показателей предъявляются требования по обеспечению коррозионной стойкости, триботехнических свойств в условиях трения скольжения, ударно-фрикционного изнашивания

#### \*Адрес для переписки

Насырова Алина Камильевна, м.н.с.

Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +79059376536, e-mail: [nasyrova.alina98@mail.ru](mailto:nasyrova.alina98@mail.ru)

ния. Учитывая роль структуры в формировании комплекса механических свойств чугунов, необходимо контролировать характерные для них особенности строения, в том числе неравномерность распределения графитных включений в объеме материала, присутствие зон отбела, являющихся причиной охрупчивания чугуна, и др. Улучшению структуры чугунов, снижению в них количества дефектов, а также повышению комплекса механических свойств способствует введение в сплавы различных легирующих добавок, в число которых входят никель, молибден, фосфор, ванадий, алюминий, бор и др. Роль легирующих элементов и модифицирующих добавок в формировании структуры и комплекса свойств чугунов отражена в работах [1–10].

Важнейшими структурными факторами, определяющими уровень механических свойств серых чугунов, являются форма, размеры и объемная доля графитных включений, а также характер их распределения в объеме материала [2, 9, 10]. Графитные пластины, распределенные в чугуне, могут, с одной стороны, рассматриваться в качестве естественных концентраторов механических напряжений, способствующих образованию трещин и разрушению материала, а с другой – в качестве «карманов», внутри которых сосредоточены микрообъемы твердой смазки, способствующей уменьшению коэффициента трения и, как следствие, увеличению срока службы пар трения. Распределенный в сером чугуне графит препятствует схватыванию поверхностей, входящих в узлы сухого трения скольжения [9–14].

Одно из основных требований, предъявляемых к чугунам, используемым для изготовления деталей железнодорожного транспорта, согласно ведомственным нормам РЖД связано с обеспечением предела прочности  $\sigma_B$  при деформации по схеме растяжения на уровне не менее 350 МПа при твердости в диапазоне 250...350 НВ. Типичные детали, изготовленные из этих материалов, должны обеспечивать не менее 160 тыс. км пробега железнодорожного транспорта. Поиск технических решений, обеспечивающих возможность повышения механических свойств чугунов, представляет собой актуальную задачу, имеющую прикладное значение. Одно из таких решений связано с легированием сплавов. Проведенные ранее исследования [1–14] свиде-

тельствуют о существенном влиянии на физико-механические свойства серых чугунов таких элементов, как никель, молибден и ванадий.

Разработанный ранее чугун марки ЧМН-35М [12], производство которого соответствует ТУ 0812-001-10036140–2014, не в полной мере обеспечивает требования, предъявляемые к деталям, работающим в условиях фрикционного воздействия. В первую очередь речь идет о жестких режимах эксплуатации оборудования (сухое трение скольжения с высоким уровнем контактных нагрузок). Экспериментально установлено, что в таких условиях на поверхностях деталей из чугуна ЧМН-35М возникают очаги схватывания, результатом развития которых является рост интенсивности изнашивания.

Цель настоящей работы связана с изучением влияния легирующих элементов (никель, молибден, ванадий) на структуру и механические свойства серого чугуна, предназначенного для изготовления элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях сухого трения скольжения.

В качестве основного параметра, контролируемого при выполнении исследования, выступал уровень временного сопротивления разрушению. Его величина составляла не менее 450 МПа (при твердости в диапазоне 250...350 НВ). Ограничивающим требованием являлась стоимость материала при условии гарантированного соблюдения минимального требуемого уровня предела прочности.

### Методика исследований

В качестве базового материала для проведения исследований был выбран серый чугун марки СЧ35 ГОСТ 1412–85. Выплавку осуществляли в индукционной плавильной печи объемом 150 кг. В качестве шихты использовали лом 4А ГОСТ 2787–75 массой 100 кг. После расплава шихты и науглероживания материала производился отбор проб для оценки химического состава. С целью повышения прочностных свойств чугунов легировали никелем, молибденом и ванадием, концентрацию которых изменяли в пределах от 0,1 до 0,8 масс. %. Легирование выполняли путем внесения расчетного количества ферросплавов никеля, ванадия и молибдена непосредственно в расплав чугуна СЧ35. Темпера-

тура расплава перед сливом из печи составляла 1425...1440 °С. Время заливки форм не превышало пяти минут [11].

Для определения химического состава исследуемых материалов был использован оптико-эмиссионный спектрометр GNR Solaris CCD Plus.

Испытания образцов на растяжение осуществляли на универсальной электромеханической машине Instron 3360 согласно ГОСТ 27208–87. Отбор проб и изготовление образцов проводили в соответствии с ГОСТ 24648–90. Твердость чугунов определяли по ГОСТ 24648–90 на твердомере марки ИТРБ-3000. Исследования микроструктуры (ГОСТ 3443–87) проводили на металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m с использованием программного обеспечения «Thixomet Pro» [15–26].

Микротвердость образцов оценивали согласно ГОСТ Р ИСО 6507–1–2007 на микротвердомере МН-6 при нагрузке 0,2452 Н. На поверхность каждого из слабопротравленных шлифов наносили массив отпечатков алмазной пирамиды в количестве 15x15 штук. Отпечатки, попавшие на границы феррит/перлит, феррит/графит, а также на пластины графита, при выполнении анализа не учитывались.

Оценку триботехнических свойств в условиях сухого трения выполняли по схеме «вал – колодка» на машине трения модели 2168 УМТ. Иссле-

дованию подвергались пары трения «исследуемый материал – сталь 30ХГСА/20ГЛ/09Г2С». Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре Metrosom в соответствии с ГОСТ 9454–78. Для проведения испытаний использовали образцы с концентратором напряжений U-образной формы глубиной 2 мм, нанесенным на проволочном электроискровом станке Sodick AG400L.

В качестве материала сравнения при проведении механических характеристик использовали чугун СЧ35 и его ближайший аналог чугун ЧМН-35М [12].

### Результаты и их обсуждение

Для разработки химического состава чугуна СЧКМ-45, обладающего повышенным комплексом механических свойств, были проведены эксперименты, позволившие выбрать оптимальную концентрацию легирующих добавок. В соответствии с результатами проведенных исследований содержание никеля, обеспечивающее требуемый уровень твердости (не менее 250 НВ) составляет 0,4...0,7 масс. %. При этом величина предела прочности превышает 450 МПа (рис. 1) [11, 27]. Аналогичный вывод можно сделать относительно количества молибдена. Введение более 0,7 масс. % молибдена нерационально в связи с существенным ростом уровня твердо-

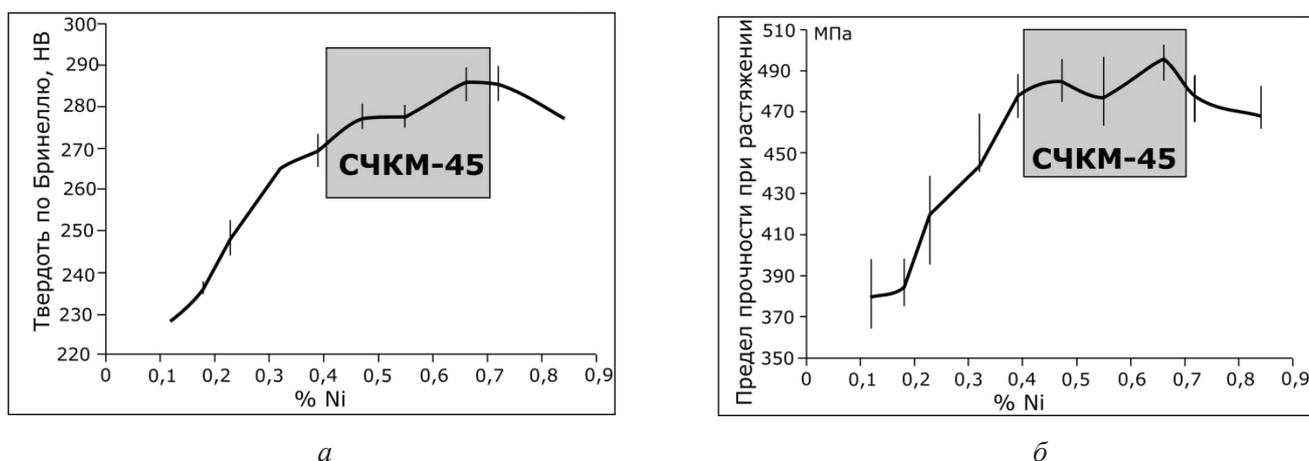


Рис. 1. Влияние концентрации никеля серого чугуна СЧКМ-45, содержащего 0,45 масс. % молибдена и 0,34 масс. % ванадия:

а – на твердость; б – на предел прочности

Fig. 1. Effect of nickel concentration in SChKM-45 gray cast iron containing 0.45 wt.% of molybdenum and 0.34 wt.% of vanadium:

а – on hardness; б – on ultimate strength

сти (более 350 НВ) и охрупчиванием материала. При этом величина предела прочности возрастает в меньшей степени (рис. 2) [11, 27].

Содержание ванадия, обеспечивающее выполнение требований по уровню твердости и предела прочности, находится в диапазоне от 0,2 до 0,4 масс. %. При введении этого элемента в количестве менее 0,2 масс. % уровень предела прочности не достигает 450 МПа. Превышение содержания ванадия более 0,4 мас. % сопрово-

ждается отбелом чугуна и появлением островков скелетной эвтектики. Следует подчеркнуть, что повышение содержания ванадия к росту предела прочности материала не приводит (рис. 3), а стоимость материала увеличивается. Отмеченное обстоятельство является одним из факторов, существенно ограничивающих эффективность легированного сплава [11, 27].

Результатом проведенных экспериментов по определению оптимального химического состава

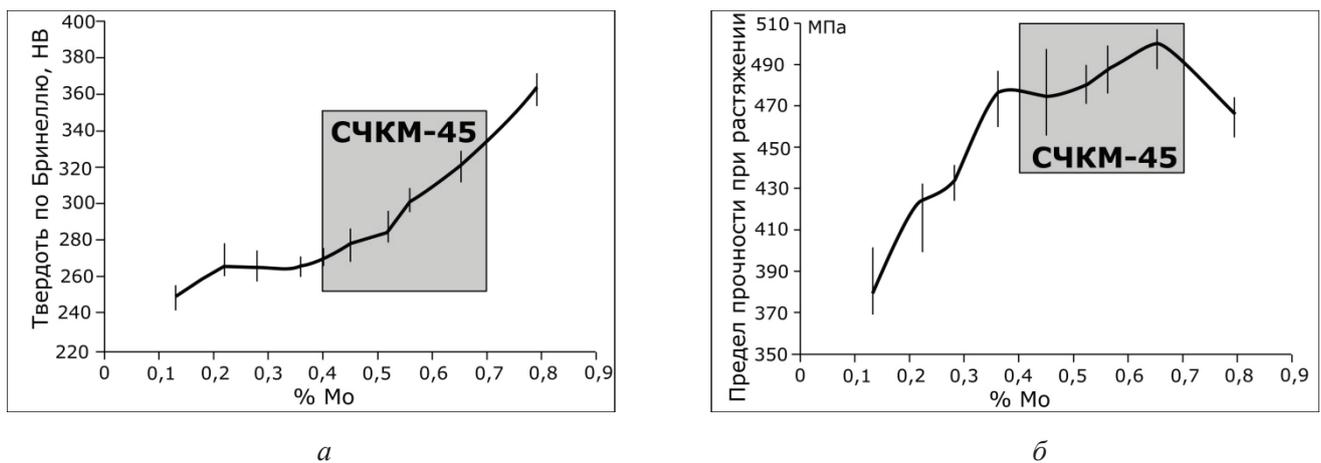


Рис. 2. Влияние концентрации молибдена серого чугуна СЧКМ-45, содержащего 0,52 масс. % никеля и 0,38 масс. % ванадия:

*a* – на твердость; *б* – на предел прочности

Fig. 2. Effect of molybdenum concentration in SChKM-45 gray cast iron containing 0.52 wt.% of nickel and 0.38 wt.% of vanadium:

*a* – on hardness; *б* – on ultimate strength

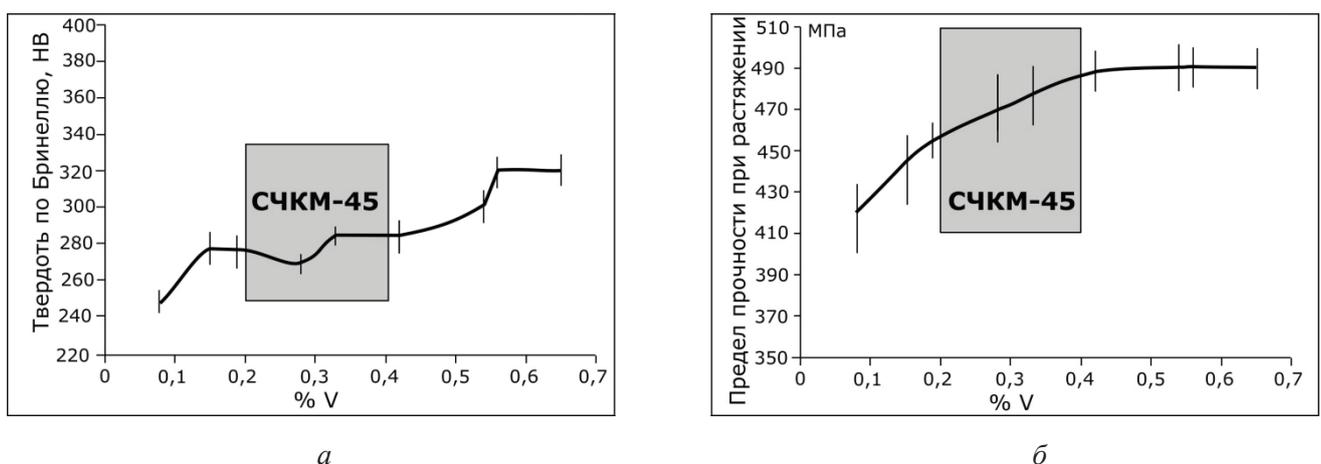


Рис. 3. Влияние концентрации ванадия серого чугуна СЧКМ-45, содержащего 0,6 масс. % молибдена и 0,55 масс. % никеля:

*a* – на твердость; *б* – на предел прочности

Fig. 3. Effect of vanadium concentration in SChKM-45 gray cast iron containing 0.6 wt.% of molybdenum and 0.55 wt.% of nickel:

*a* – on hardness; *б* – on ultimate strength

ва для сплава, обладающего высоким комплексом свойств, является разработка серого чугуна СЧКМ-45, легированного никелем, молибденом и ванадием. Авторство разработки закреплено патентом РФ на изобретение № 2733940 [13].

Химический состав сплавов СЧ35, ЧМН-35М и СЧКМ-45 представлен в табл. 1.

Механические свойства сплава СЧКМ-45 в сравнении со стандартным чугуном СЧ35 и разработанным ранее сплавом ЧМН-35М представлены в табл. 2.

Свойства серых легированных чугунов в значительной степени определяются строением его металлической матрицы, а также формой и характером распределения графитных включений. Результаты сравнительного анализа структуры анализируемых в работе чугунов представлены в табл. 3 [11].

Для чугуна СЧ35 характерно образование пластинчатых включений графита длиной от

~10 до ~200 мкм. Форма графита – пластинчатая, частично завихренная (рис. 4, а) [28, 29]. Чугун ЧМН-35 характеризуется равномерным распределением графитных включений, размеры которых находятся в диапазоне от ~10 до ~150 мкм (рис. 4, б) [11, 27]. Одновременное легирование чугуна такими элементами, как молибден и ванадий, способствует формированию соответствующих твердых растворов преимущественно в α-фазе, что способствует более высокой степени графитизации. Наряду с этим обогащенные молибденом и ванадием объемы расплава характеризуются повышенным количеством центров кристаллизации [28]. По мере повышения степени легирования размер графитных пластин в чугунах уменьшается. Длина графитных включений, наблюдаемых в чугуне СЧКМ-45 (10...110 мкм), примерно в два раза меньше по сравнению с серым чугуном СЧ35. Форма включений пластинчатая, частично завихренная (рис. 4, в).

Таблица 1

Table 1

**Химический состав чугунов СЧ35, ЧМН-35М и СЧКМ-45**  
**Chemical composition of SCh35, ChMN-35M and SChKM-45 cast irons**

Марка чугуна / Cast iron grade	Массовая доля элементов, % Fe – остальное / Mass fraction of elements, % Fe – balance									
	C	Si	Mn	Mo	Ni	V	Cr	Cu	S	P
СЧ35 / SCh35	2,92	1,45	0,88	–	–	–	0,04	0,03	0,04	0,01
ЧМН-35М / ChMN-35M	2,85	1,39	0,86	0,82	0,75	–	0,05	0,03	0,03	0,02
СЧКМ-45/ SChKM-45	2,65	1,35	0,89	0,45	0,52	0,34	0,05	0,03	0,03	0,02

Таблица 2

Table 2

**Механические свойства чугунов СЧ35, ЧМН-35М и СЧКМ-45**  
**Mechanical properties of SCh35, ChMN-35M and SChKM-45 cast irons**

Марка чугуна / Cast iron grade	Временное сопротивление при растяжении, МПа, не менее / Ultimate tensile strength, MPa, at least	Твердость по Бринеллю, НВ / Brinell hardness, HB	
		от / from	до / to
СЧ35 / SCh35	345...365	272	288
ЧМН-35М / ChMN-35M	362...395	277	319
СЧКМ-45/ SChKM-45	470...505	268	321

**Параметры структуры чугунов СЧ35, ЧМН-35М и СЧКМ-45**  
**Structural parameters of SCh35, ChMN-35M and SChKM-45 cast irons**

Характеристика микроструктуры по ГОСТ 3443–87 / Characteristic of microstructure according ISO 945–75	Марка чугуна / Cast iron grade		
	СЧ35 / SCh35	ЧМН-35М / ChMN-35M	СЧКМ-45 / SChKM-45
Форма включений графита, шкала 1А, ×100 / Shape of graphite inclusions, scale 1A, ×100	ПГφ2 / vermicular	ПГφ2 / vermicular	ПГφ2 / vermicular
Длина включений графита, шкала 1Б, ×100 / Length of graphite inclusions, scale 1B, ×100	ПГд90 / 60...120 μm	ПГд45 / 30..60 μm	ПГд45 / 30...60 μm
Распределение включений графита, шкала 1В, ×100 / Distribution of graphite inclusions, scale 1B, ×100	ПГр6 / reticular	ПГр1 / equilibrium	ПГр1 / equilibrium
Вид структуры металлической основы чугуна, шкала 5, ×500 / Type of the structure of the metal base of cast iron, scale 5, ×500	Пт1 / lamellar pearlite	Пт1 / lamellar pearlite	Пт1 / lamellar pearlite
Количество включений графита, шкала 1Г, ×100 / Number of graphite inclusions, scale 1G, ×100	ПГ2 / ≤ 3 %	ПГ4 / 3...5 %	ПГ6 / 5...8 %
Содержание перлита и феррита в структуре чугуна, % шкала 6А, ×100 / The content of pearlite and ferrite in the structure of cast iron, % scale 6A, row 1, ×100	П(Ф0) / perlite ≥ 98 % ferrite ≤ 2 %	П92(Ф8) / perlite 90...94 % ferrite 6...10 %	П86(Ф14) / perlite 80...90 % ferrite 10...20 %
Дисперсность перлита / Perlite dispersion	ПД1,6 / distance between cementite plates ≥ 1.6 μm	ПД1,4 / distance between cementite plates 1.3...1.6 μm	ПД1,0 / distance between cementite plates 0.8...1.3 μm

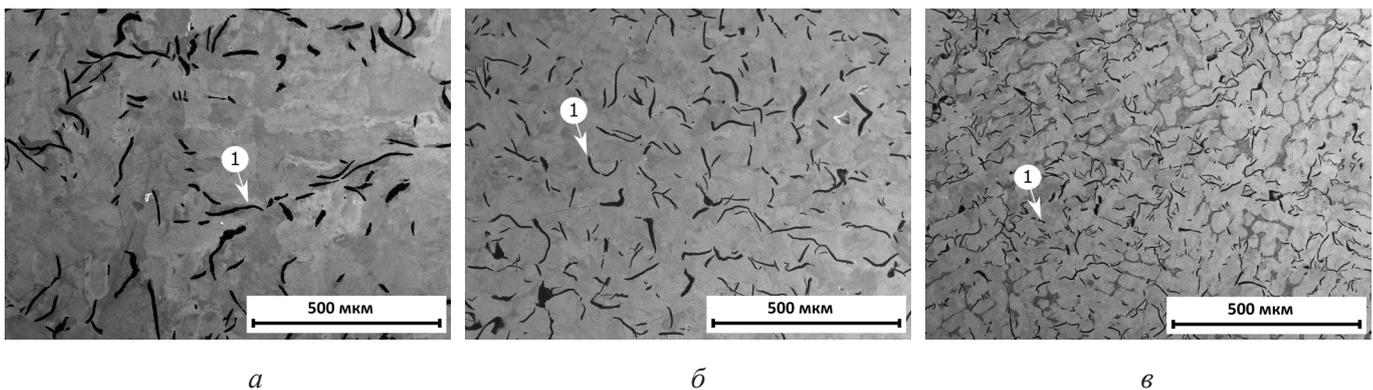


Рис. 4. Распределение графита в чугунах:

*a* – СЧ35; *б* – ЧМН-35М; *в* – СЧКМ-45 (цифрой 1 обозначен графит)

Fig. 4. Distribution of graphite in:

*a* – SCh35; *б* – ChMN-35M; *в* – SChKM-45 (number 1 denotes graphite)

Основной структурной составляющей металлических матриц всех трех марок чугунов является пластинчатый перлит. Его содержание колеблется от 92 об. % в сплаве ЧМН-35 до 100 % в чугуне СЧ35. Доля перлита в сплаве СЧКМ-45

составляет ~ 86 об. %. Таким образом, результатом введения в чугуны легирующих элементов является повышение в структуре доли ферритной составляющей [1, 2, 10, 31]. Влияние молибдена на объемную долю феррита более

существенное, поскольку он в большей степени растворяется в  $\alpha$ -фазе по сравнению с ванадием. Отмечается также, что легирование молибденом и ванадием приводит к повышению термодинамической устойчивости феррита [31, 32].

Особенности строения металлической матрицы анализируемых чугунов, зафиксированные методом световой микроскопии, отражены на рис. 5. Феррит, выделившийся в чугунах

ЧМН-35 и СЧКМ-45, преимущественно локализован вблизи графитных включений. Причина этого явления обусловлена присутствием в сплавах никеля и молибдена, комплексное влияние которых приводит к тому же эффекту, что и снижение скорости охлаждения расплава. Таким образом, по краям графитных включений в указанных чугунах образуется ферритная оторочка [32, 33]. По данным энергодисперсионного анализа,

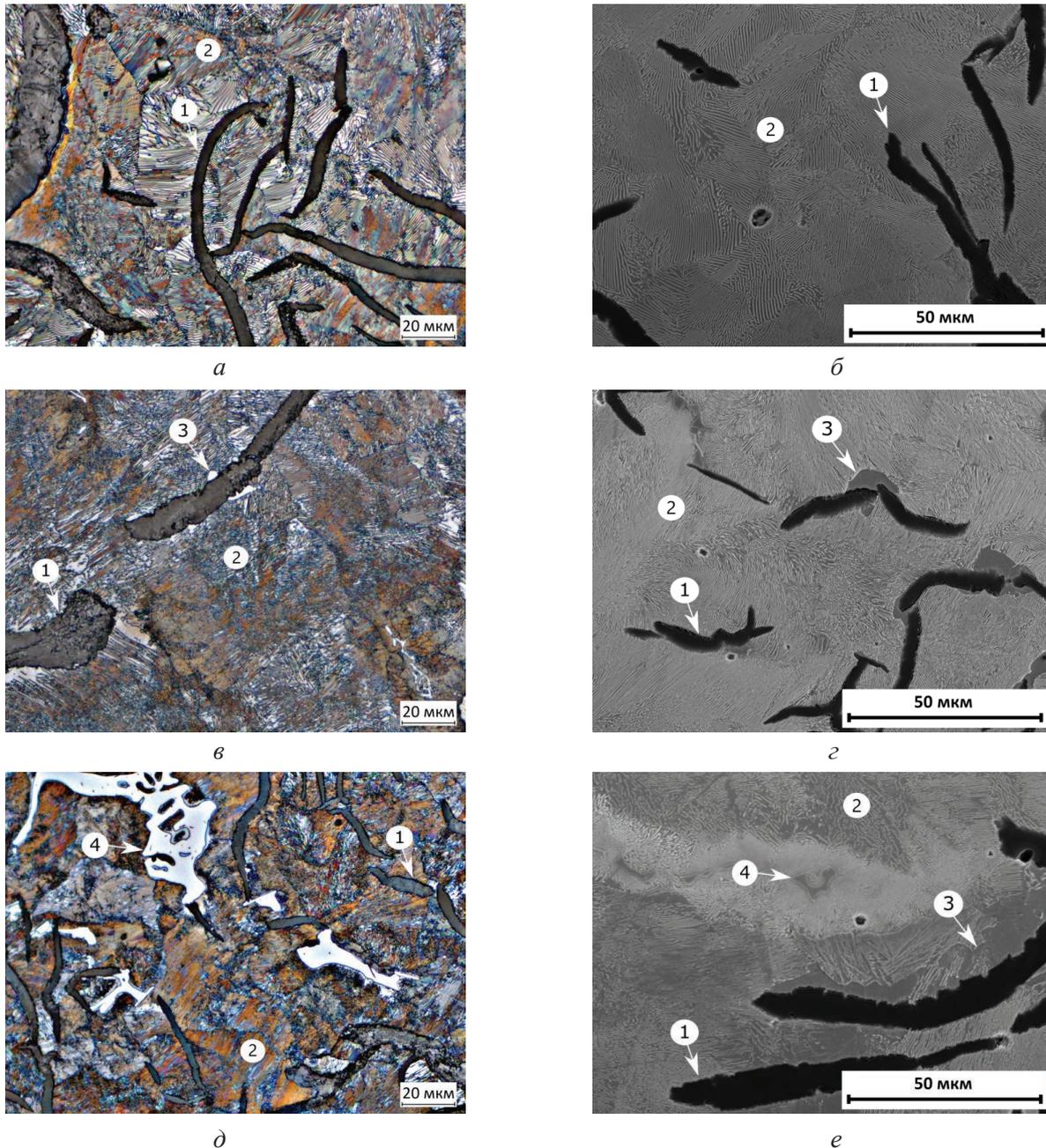


Рис. 5. Строение металлических матриц в чугунах:

*a, б* – СЧ35; *в, з* – ЧМН-35М; *д, е* – СЧКМ-45 (цифрой 1 обозначен графит; 2 – перлит; 3 – феррит; 4 – цементит)

Fig. 5. The structure of metal matrices in cast irons:

*a, б* – SCh35; *в, з* – ChMN-35M; *д, е* – SChKM-45 (number 1 denotes graphite; 2 – pearlite; 3 – ferrite; 4 – cementite)

феррит, наблюдаемый в чугунах ЧМН-35, легирован преимущественно молибденом. В феррите чугуна СЧКМ-45 наряду с молибденом зафиксирован также ванадий. Никель по объему исследуемых материалов распределен равномерно.

Результатом легирования сплавов молибденом и никелем является повышение дисперсности пластинчатого перлита. Причины этого эффекта отражены в работах [31–33]. В соответствии с ГОСТ 3443–87 в чугунах СЧ35 межпластинчатое расстояние соответствует ПД1,6 и составляет 2,2 мкм. Легирование чугуна молибденом и никелем приводит к снижению межпластинчатого расстояния до ~1,4...1,5 мкм (ПД1,4). Для перлита, наблюдаемого в чугунах СЧКМ-45, легированного молибденом и никелем, характерен еще более высокий уровень дисперсности (ПД1,0) [30, 34–36].

Результаты измерения микротвердости объемов структурно свободного феррита и пластинчатого перлита в анализируемых чугунах представлены в табл. 4. Сравнительный анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что с повышением степени легирования микротвердость отдельных структурных составляющих металлической матрицы возрастает [37, 38]. Методами структурного анализа установлено также, что в чугунах СЧКМ-45 в небольших количествах присутствует первичный цементит, размер частиц которого находится в диапазоне от ~ 8 до ~ 35 мкм (см. рис. 5, д). Аналогичный эффект описан в работах [31, 32].

В качестве критериев, характеризующих триботехнические свойства анализируемых материалов, использовали значения коэффициента трения и весовой износ элементов пары трения. Результаты испытаний образцов представлены в табл. 5. Полученные данные свидетельствуют

о высоких триботехнических свойствах чугуна СЧКМ-45. Величина износа образцов из этого сплава примерно в 1,3–1,8 раз ниже по сравнению с чугуном СЧ35 и в 1,1–1,2 раза – по сравнению с чугуном ЧМН-35М. Подтверждена эффективность комплексно легированного чугуна СЧКМ-45 при использовании его в парах трения со сталями 30ХГСА, 20ГЛ и 09Г2С [39, 40–42].

Данные фрактографических исследований, приведенные на рис. 6, позволяют сделать вывод о хрупком характере разрушения всех образцов. Хрупкость исследуемых сплавов, обусловленная присутствием графитных включений, резко снижает чувствительность серых чугунов к концентраторам напряжений. Изломы образцов из чугунов СЧ35 (рис. 6, а) и ЧМН-35М (рис. 6, б) одинаковы как в зонах зарождения, так и в зонах распространения трещин. Разрушение преимущественно происходит по транскристаллитному механизму с незначительной долей интеркристаллитной составляющей [11, 27, 39].

Изломы, представленные на рис. 6, имеют характерное фасеточное строение. Анализ их морфологии позволяет сделать вывод о том, что в зарождении и развитии трещин существенную роль сыграли графитные включения. В местах выхода на поверхность пластин графита зафиксированы микротрещины, уходящие в глубь материала. На образцах из легированного сплава ЧМН-35М строение поверхностей разрушения более однородное. Размер фасеток скола примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с чугуном СЧ35, что объясняется более дисперсным строением металлической основы чугуна [11]. На рис. 6, в стрелками выделены зоны разрушения, характерные для транскристаллитного механизма материала. Формирование участков

Таблица 4

Table 4

**Средние значения микротвердости структурных составляющих в сплавах СЧ35, ЧМН-35М и СЧКМ-45**

**Average values of microhardness of structural components in SCh35, ChMN-35M and SChKM-45 alloys**

Микротвердость / Microhardness	Марка чугуна / Cast iron grade		
	СЧ35 / SCh35	ЧМН-35М / ChMN-35M	СЧКМ-45 / SChKM-45
Феррит / Ferrite	195	235	270
Перлит / Perlite	290	315	370

**Результаты триботехнических испытаний материалов**  
**Results of tribotechnical tests**

№ п/п	Пара трения (колодка – вал) / Friction pair (hob – shaft)	Коэффициент трения / Friction coefficient	Весовой износ, г / Weight wear, g		Суммарный износ, г / Total wear, g
			Колодка / Hob	Вал / Shaft	
1	СЧ35–30ХГСА / SCh35 – 0.3C-Cr-Mn-Si <sub>(high quality)</sub>	0,11...0,13	0,11	0,84	0,95
2	ЧМН-35М–30ХГСА / ChMN-35M – 0.3C-Cr-Mn-Si <sub>(high quality)</sub>	0,10...0,12	0,15	0,45	0,60
3	СЧКМ-45–30ХГСА / SChKM-45 – 0.3C-Cr-Mn-Si <sub>(high quality)</sub>	0,10...0,12	0,10	0,43	0,53
4	СЧ35–20ГЛ / SCh35 – 0.2C-Mn <sub>(cast)</sub>	0,11...0,13	0,24	0,86	1,10
5	ЧМН-35М–20ГЛ / ChMN-35 – 0.2C-Mn <sub>(cast)</sub>	0,11...0,12	0,23	0,60	0,83
6	СЧКМ-45–20ГЛ / SChKM-45 – 0.2C-Mn <sub>(cast)</sub>	0,12...0,12	0,22	0,58	0,80
7	СЧ35–09Г2С / SCh35 – 0.09C-2Mn-Si	0,13...0,14	0,40	0,45	0,95
8	ЧМН-35М–09Г2С / ChMN-35M – 0.09C-2Mn-Si	0,11...0,12	0,24	0,66	0,90
9	СЧКМ-45–09Г2С / SChKM-45 – 0.09C-2Mn-Si	0,11...0,12	0,20	0,55	0,75

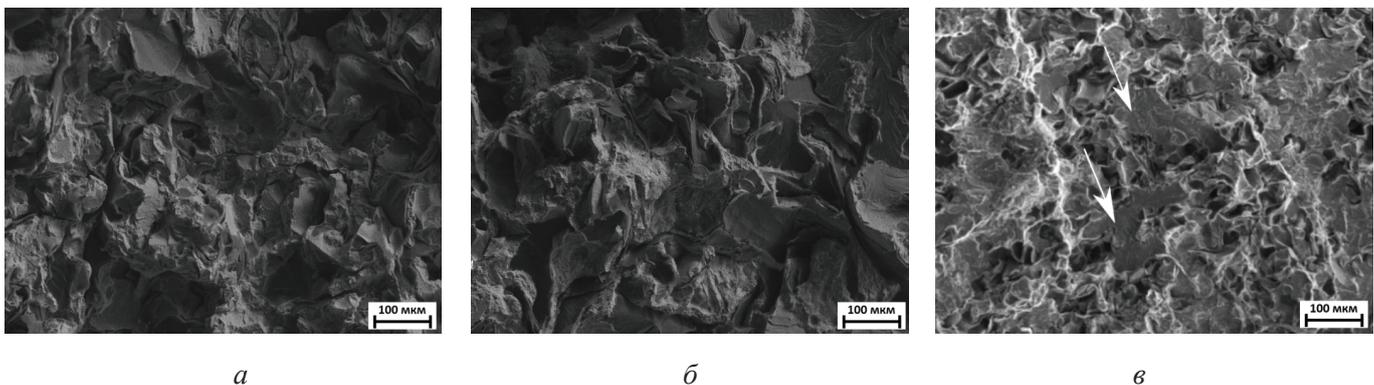


Рис. 6. Структура изломов образцов после испытаний на ударный изгиб:

*a* – СЧ35; *б* – ЧМН-35М; *в* – СЧКМ-45

Fig. 6. Structure of fractures of cast irons after impact bending tests:

*a* – SCh35; *б* – ChMN-35M; *в* – SChKM-45

излома такого типа может объясняться прочностными свойствами металлической матрицы чугуна ЧМН-35М, а также повышенным уровнем релаксационных свойств материала, легированного молибденом и никелем. Однако на общую картину разрушения в целом легирование

чугуна молибденом и никелем существенного влияния не оказывает.

Комплексное легирование чугуна СЧКМ-45 молибденом, никелем и ванадием, сопровождающееся повышением дисперсности структуры перлита, приводит к существенному измельче-

нию фасеток скола (рис. 6, в). Примерно 30 % поверхности излома сформировано по механизму интеркристаллитного разрушения. Чувствительность чугуна СЧКМ-45 к наличию концентраторов напряжений также менее заметна, что свидетельствует об определяющей роли графитных включений пластинчатой морфологии в проявлении механизмов зарождения и развития трещин [11, 27, 39].

### Выводы

1. Комплексное легирование молибденом, никелем и ванадием обеспечивает твердость серого чугуна СЧКМ-45 на уровне 295 НВ, а предел прочности при испытаниях по схеме растяжения на уровне 470...505 МПа, что превышает значения, соответствующие серому чугуну СЧ35 (290 НВ и 365 МПа соответственно).

2. Введение в серый чугун никеля (0,4...0,7 масс. %), молибдена (0,4...0,7 масс. %) и ванадия (0,2...0,4 масс. %) приводит к двукратному уменьшению межпластинчатого расстояния в перлите и уменьшению длины графитных включений. Указанные изменения являются факторами, объясняющими рост прочностных свойств легированного чугуна по сравнению со сплавом СЧ35.

3. Легирование серого чугуна молибденом и ванадием обеспечивает повышение микротвердости ферритных зерен, декорирующих графитные включения, примерно в 1,4 раза. Этот фактор оказывает дополнительное влияние на уровень прочностных свойств исследуемых материалов.

4. Легированный никелем, молибденом и ванадием чугун характеризуется более высоким комплексом триботехнических свойств по сравнению с серийным серым чугуном. Суммарный износ валов из чугуна СЧКМ-45 примерно в 1,3–1,8 раз ниже по сравнению с чугуном СЧ35, и в 1,1–1,2 раза – по сравнению с чугуном ЧМН-35М. Анализ результатов исследований свидетельствуют об эффективности использования чугуна СЧКМ-45 в парах трения с контртелами из сталей 30ХГСА, 20ГЛ и 09Г2С.

5. Зафиксированное методом фрактографических исследований комплексно легированного чугуна СЧКМ-45 существенное измельчение фасеток скола на изломах динамически разрушен-

ных образцов свидетельствует о повышенном уровне энергетических затрат на процесс разрушения материала по сравнению с нелегированным чугуном.

6. Химический состав чугуна, обеспечивающий требуемые параметры механических свойств (предел прочности при растяжении 450...505 МПа, твердость 265...330 НВ), включает: 2,3...2,8 % С, 1,3...1,5 % Si, 0,6...1,0 % Mn, 0,4...0,7 % Mo, 0,2...0,4 % V, 0,4...0,7 % Ni. В составе чугуна допустимо содержание не более 0,3 % Cr, 0,3 % Cu, 0,2 % P, 0,1 % S.

### Список литературы

1. Bagesh B., Rahul K., Anil K.S. Effect on the mechanical properties of gray cast iron with variation of copper and molybdenum as alloying elements // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2014. – Vol. 3 (5). – P. 81–84.

2. Effect on the mechanical properties of grey cast iron with variation of molybdenum and as – cast alloying elements / B. Sujith, S.R. Mukkollu, B.B. Harish, Z. Leman // Universal Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 8 (6). – P. 298–304. – DOI: 10.13189/ujme.2020.080602.

3. Effect of alloying elements W, Ti, Sn on microstructure and mechanical properties of gray iron 220 / A. Razaq, J. Zhou, T. Hussain, Z. Tu, Y. Yin, X. Ji, G. Xiao, X. Sen // China Foundry. – 2019. – Vol. 16. – P. 393–398. – DOI: 10.1007/s41230-019-9035-4.

4. Ankamma K. Effect of trace elements (boron and lead) on the properties of gray cast iron // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2014. – Vol. 95. – P. 19–26. – DOI: 10.1007/s40033-013-0031-3.

5. Effect of Ti-V-Nb-Mo addition on microstructure of high chromium cast iron / Y. Ma, X. Li, Y. Liu, S. Zhou // China Foundry. – 2012. – Vol. 9 (2). – P. 148–153.

6. Vadiraj A., Tiwari S. Effect of silicon on mechanical and wear properties of aluminium-alloyed gray cast iron // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol. 23. – P. 3001–3006. – DOI: 10.1007/s11665-014-1040-6.

7. Hassani A., Habibolahzadeh A., Sadeghinejad S. Comparison of microstructural and tribological effects of low vanadium-low titanium additions to a gray cast iron // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 22. – P. 267–282. – DOI: 10.1007/s11665-012-0229-9.

8. Hassani A., Habibolahzadeh A., Sadeghinejad S. Influence of vanadium and chromium additions on the wear resistance of a gray cast iron // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. – 2012. –



Vol. 19. – P. 602–607. – DOI: 10.1007/s12613-012-0601-7.

9. *Rana R.* High-performance ferrous alloys. – Switzerland: Springer, 2021. – 624 p. – ISBN 978-3-030-53824-8. – DOI: 10.1007/978-3-030-53825-5-5.

10. *Pero-Sanz Elorz J.A., Fernandez Gonzalez D., Verdeja L.F.* Physical metallurgy of cast irons. – Switzerland: Springer, 2018. – 343 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-97313-5-5.

11. *Габец Д.А., Марков А.М.* Исследование влияния легирующих элементов на структуру и свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 70–81. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81.

12. Патент № 2562554 Российская Федерация. Чугун: № 2014118635: заявл. 08.05.2014: опубл. 12.08.2015, Бюл. № 25 / А.В. Габец, Д.А. Габец. – 5 с.

13. Патент № 2733940 Российская Федерация. Чугун: № 2020109253: заявл. 02.03.2020: опубл. 08.10.2020, Бюл. № 28 / Д.А. Габец, А.М. Марков. – 8 с.

14. Оценка влияния легирующих добавок на структуру и механические свойства серых чугунов / Д.А. Габец, А.М. Марков, А.В. Габец, Е.О. Чертовских // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4 – С. 189–195.

15. *Vander Voort G.F.* Color metallography // ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and Microstructures. – ASM International, 2004. – P. 493–512. – DOI: 10.1361/asmhba0003752.

16. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis / А.А. Kazakov, S. Ryaboshuk, D. Lyubochko, L. Chigintsev // Microscopy and Microanalysis. – 2015. – Vol. 21 (3). – P. 1755. – DOI: 10.1017/s1431927615009551.

17. *Kazakov A., Kovalev P., Ryaboshuk S.* Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products // CIS Iron and Steel Review. – 2007. – N 1–2. – P. 7–13.

18. *Kazakov A., Kiselev D.* Industrial application of Thixomet // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2016. – Vol. 5. – P. 294–301. – DOI: 10.1007/s13632-016-0289-6.

19. *Vander Voort G.F.* Computer-aided microstructural analysis of specialty steels // Materials Characterization. – 1991. – Vol. 27 (4). – P. 241–260. – DOI: 10.1016/1044-5803(91)90040-B.

20. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали Х12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса «Thixomet PRO» / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, С.А. Земляков, М.А. Гурьев, В.В. Романенко // Ползуновский вестник. – 2020. –

№ 2. – С. 165–168. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031.

21. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений / А.А. Казаков, Д.В. Киселев, С.В. Андреева, Л.С. Чигинцев, С.В. Головин, В.А. Егоров, С.И. Марков // Черные металлы. – 2007. – № 7–8. – С. 31–37.

22. *Kazakov A.A., Kiselev D.* Industrial application of Thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure // Microscopy and Microanalysis. – 2015. – Vol. 21 (3). – P. 457. – DOI: 10.13140/RG.2.1.2204.0720.

23. Исследование природы неметаллических включений в стали с помощью автоматического анализатора частиц / А.А. Казаков, Д.А. Любочко, С.В. Рябшук, Л.С. Чигинцев // Черные металлы. – 2014. – № 4 (988). – С. 37–42.

24. Разработка методики количественной оценки загрязненности низколегированных трубных сталей неметаллическими включениями с помощью автоматического анализа изображений / А.А. Казаков, Д.В. Киселев, С.В. Андреева, А.А. Мясников, С.В. Головин, В.А. Егоров // Черные металлы. – 2007. – № 7–8. – С. 24–31.

25. *Vander Voort G.F., Pakhomova O., Kazakov A.* Evaluation of normal versus non-normal grain size distributions // Materials Performance and Characterization. – 2016. – Vol. 5 (5). – P. 521–534. – DOI: 10.1520/MPC20160001.

26. *Казаков А.А., Казакова Е.И., Геллер Г.В.* Оценка качества микроструктуры тиксотропных материалов // Цветные металлы. – 2007. – № 10. – С. 110–118.

27. *Габец Д.А., Марков А.М., Габец А.В.* Исследование влияния химического состава и структуры на механические свойства чугуна ЧМН-35М // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 100–107.

28. *Гиринович Н.Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.

29. *Чigareв В.В., Рассохин Д.А., Лоза А.В.* Изменение структуры и свойств литого металла легированием в отливках из чугуна и стали // Вестник Приазовского державного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – Т. 21. – С. 61–66.

30. *Семенов В.И., Чайкин А.В.* Фазовые и структурные изменения в чугуне после модифицирования // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 14–18.

31. ASM Handbook. Vol 22B. Metals process simulation / ed. by D.U. Furrer, S.L. Semiatin. – ASM International, 2010. – 695 p. – DOI: 10.31399/asm.hb.v22b.9781627081979.

32. ASM Handbook. Vol. 4. Heat Treating. – ASM International, 1991. – 2173 p. – DOI: 10.31399/asm.hb.v4.0871703793.

33. ASM Handbook. Vol. 15. Casting / ed. by S. Viswanathan, D. Apelian, R.J. Donahue, B. DasGupta, M. Gywn, J.L. Jorstad. – ASM International, 1998. – 2002 p. – DOI: 10.31399/asm.hb.v15.9781627081870.

34. Комаров О.С., Розенберг Е.В., Урбанович Н.И. Особенности модифицирования различных типов железоуглеродистых сплавов // Литье и металлургия. – 2015. – Т. 79, № 2. – С. 24–28.

35. Boulifaa M.I., Hadji A. Effect of alloying elements on the mechanical behavior and wear of austempered ductile iron // Mechanics and Industry. – 2015. – Vol. 16 (3). – P. 304. – DOI: 10.1051/meca/2015002.

36. Ларин Т.В., Асташкевич Б.М., Транковская Г.Р. Влияние ванадия, меди, алюминия на износостойкость и фрикционные свойства фосфористого чугуна для тормозных колодок // Вестник ВНИИЖТ. – 1986. – № 8. – С. 40–42.

37. Получение чугуна с шаровидным графитом «ЛС процессом» / А.И. Беляков, Л.А. Петров, В.В. Каменский, Т.А. Ахунов, В.П. Ершов // Литейное производство. – 1997. – № 5. – С. 20–21.

38. Корниенко Э.Н., Бикулов Р.А. Тяжелая лигатура для получения высокопрочного чугуна // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 2. – С. 3–5.

39. Габец Д.А., Марков А.М., Габец А.В. Специальный модифицированный чугун марки ЧМН-35М для тяжело нагруженных деталей тележки грузового вагона // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 1–2. – С. 23–26.

40. Vijeesh V., Prabhu K.N. Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2014. – Vol. 67 (1). – P. 1–18. – DOI: 10.1007/s12666-013-0327-x.

41. Effect of fluctuation and modification on microstructure and impact toughness of 20 wt.% Cr hypereutectic white cast iron / X. Zhi, J. Xing, H. Fu, Y. Gao // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2008. – Vol. 39 (6). – P. 391–393. – DOI: 10.1002/mawe.200700219.

42. Повышение износостойкости фрикционных деталей из серого чугуна / Б.В. Борщ, А.В. Габец, А.В. Сухов, Г.А. Филиппов // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 66–68.

## Конфликт интересов

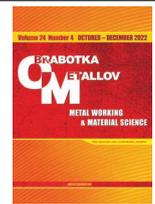
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## The effect of complex modification on the structure and properties of gray cast iron for tribotechnical application

Denis Gabets<sup>1, a</sup>, Andrey Markov<sup>1, b</sup>, Mikhail Guryev<sup>1, c</sup>, Evgeny Pismenny<sup>2, d</sup>,  
Alina Nasyrova<sup>3, e, \*</sup>

<sup>1</sup> I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

<sup>2</sup> Railway Research Institute of JSC Russian Railways, 10, 3<sup>rd</sup> Mytishchinskaya st., Moscow, 129851, Russian Federation

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0304-4407>, [gabets22@mail.ru](mailto:gabets22@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>, [andmarkov@inbox.ru](mailto:andmarkov@inbox.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>, [gurievma@mail.ru](mailto:gurievma@mail.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7454-0830>, [pysmennyi.eug@gmail.com](mailto:pysmennyi.eug@gmail.com),

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2551-3657>, [nasyrova.alina98@mail.ru](mailto:nasyrova.alina98@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 September 2022

Revised: 29 September 2022

Accepted: 17 October 2022

Available online: 15 December 2022

#### Keywords:

Alloying of cast iron

Modification

Wear resistance

Impact bend

Wear resistant cast iron

Graphite inclusions

#### Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

### ABSTRACT

**Introduction.** An approach based on the complex modification of cast irons makes it possible to improve its mechanical properties by changing the structure of the metal matrix, as well as the shape of graphite and its distribution. **The aim of this work** is to study the influence of alloying elements on the structure and mechanical properties of gray cast irons obtained for operation under friction wear conditions. **Research methods.** The paper describes the process of obtaining complex modified gray cast irons. Fractographic investigation of dynamically destroyed samples is carried out. Structure's features of *SCh35*, *ChMN-35M* and *SChKM-45* gray cast irons are studied. Tribological testing under sliding friction conditions is carried out. **Results and its discussion.** It is established that the complex modification of *SCh35* gray cast iron with molybdenum, nickel and vanadium makes it possible to increase its hardness to 295 HB and tensile strength to 470-505 MPa. Alloying with nickel (0.4-0.7 wt.%), molybdenum (0.4-0.7 wt.%) and vanadium (0.2-0.4 wt.%) leads to a decrease in the interlamellar distance of perlite by 2 times, as well as to the metal matrix grain refining. The length of graphite lamellas of modified cast irons is reduced by 3-5 times. An additional effect on the tensile strength of cast iron is due to the alloying of ferrite with molybdenum and vanadium, which is fallen out along the boundaries of graphite inclusions. Alloying of ferrite with molybdenum and vanadium increases the level of its microhardness by 1.4 times in comparison with the  $\alpha$ -phase of *SCh35* serial cast iron. The results of tribotechnical tests of the designed materials are presented. **Conclusions.** It is established that the wear of specimens made of *SChKM-45* cast iron is approximately 20-30% lower compared to cast iron *SCh35* cast iron and 10-15% lower compared to *ChMN-35M* cast iron. Fractographic studies show that complex alloying with molybdenum, vanadium and nickel, contributing to the refining of pearlite colonies, leads to a decrease of the size of the cleavage facets.

**For citation:** Gabets D.A., Markov A.M., Guryev M.A., Pismenny E.A., Nasyrova A.K. The effect of complex modification on the structure and properties of gray cast iron for tribotechnical application. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 165–180. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-165-180. (In Russian).

### References

1. Bagesh B., Rahul K., Anil K.S. Effect on the mechanical properties of gray cast iron with variation of copper and molybdenum as alloying elements. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, vol. 3 (5), pp. 81–84.
2. Sujith B., Mukkollu S.R., Harish B.B., Leman Z. Effect on the mechanical properties of grey cast iron with variation of molybdenum and as – cast alloying elements. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 8 (6), pp. 298–304. DOI: 10.13189/ujme.2020.080602.

#### \* Corresponding author

Alina Nasyrova K., Junior researcher  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: +79059376536, e-mail: [nasyrova.alina98@mail.ru](mailto:nasyrova.alina98@mail.ru)

3. Razaq A., Zhou J., Hussain T., Tu Z., Yin Y., Ji X., Xiao G., Sen X. Effect of alloying elements W, Ti, Sn on microstructure and mechanical properties of gray iron 220. *China Foundry*, 2019, vol. 16, pp. 393–398. DOI: 10.1007/s41230-019-9035-4.
4. Ankamma K. Effect of trace elements (boron and lead) on the properties of gray cast iron. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2014, vol. 95, pp. 19–26. DOI: 10.1007/s40033-013-0031-3.
5. Ma Y., Li X., Liu Y., Zhou S. Effect of Ti-V-Nb-Mo addition on microstructure of high chromium cast iron. *China Foundry*, 2012, vol. 9 (2), pp. 148–153.
6. Vadiraj A., Tiwari S. Effect of silicon on mechanical and wear properties of aluminium-alloyed gray cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, pp. 3001–3006. DOI: 10.1007/s11665-014-1040-6.
7. Hassani A., Habibolahzadeh A., Sadeghinejad S. Comparison of microstructural and tribological effects of low vanadium-low titanium additions to a gray cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, vol. 22, pp. 267–282. DOI: 10.1007/s11665-012-0229-9.
8. Hassani A., Habibolahzadeh A., Sadeghinejad S. Influence of vanadium and chromium additions on the wear resistance of a gray cast iron. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2012, vol. 19, pp. 602–607. DOI: 10.1007/s12613-012-0601-7.
9. Rana R. *High-performance ferrous alloys*. Switzerland, Springer, 2021. 624 p. ISBN 978-3-030-53824-8. DOI: 10.1007/978-3-030-53825-5-5.
10. Pero-Sanz Elorz J.A., Fernandez Gonzalez D., Verdeja L.F. *Physical metallurgy of cast irons*. Switzerland, Springer, 2018. 343 p. DOI: 10.1007/978-3-319-97313-5-5.
11. Gabets D.A., Markov A.M. Issledovanie vliyaniya legiruyushchikh elementov na strukturu i svoistva serykh chugunov, rabotayushchikh v usloviyakh udarno-friktsionnogo iznosa [Study of the influence of alloying elements on the structure and properties of gray cast iron operating under conditions of shock-friction wear]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 70–81. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81.
12. Gabets A.V., Gabets D.A. *Chugun* [Cast iron]. Patent RF, no. 2562554, 2015.
13. Gabets D.A., Markov A.M. *Chugun* [Cast iron]. Patent RF, no. 2733940, 2020.
14. Gabets D.A., Markov A.M., Gabets A.V., Chertovskikh E.O. Otsenka vliyaniya legiruyushchikh dobavok na strukturu i mekhanicheskie svoistva serykh chugunov [Evaluation of the influence of alloying on the structure and mechanical properties of gray cast irons]. *Polzunovskii vestnik = Polzunov Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 189–195.
15. Vander Voort G.F. Color metallography. *ASM Handbook*. Vol. 9. *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004, pp. 493–512. DOI: 10.1361/asmhba0003752.
16. Kazakov A.A., Ryaboshuk S., Lyubochko D., Chigintsev L. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis. *Microscopy and Microanalysis*, 2015, vol. 21 (3), p. 1755. DOI: 10.1017/s1431927615009551.
17. Kazakov A., Kovalev P., Ryaboshuk S. Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products. *CIS Iron and Steel Review*, 2007, no. 1–2, pp. 7–13.
18. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of Thixomet. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2016, vol. 5, pp. 294–301. DOI: 10.1007/s13632-016-0289-6.
19. Vander Voort G.F. Computer-aided microstructural analysis of specialty steels. *Materials Characterization*, 1991, vol. 27 (4), pp. 241–260. DOI: 10.1016/1044-5803(91)90040-B.
20. Ivanov S.G., Guriev A.M., Zemljakov S.A., Guriev M.A., Romanenko V.V. Osobennosti metodiki podgotovki obraztsov dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoi fazy stali Kh12F1 posle tsementatsii v vakuume s primeneniem programmnoogo kompleksa «Thixomet PRO» [Features of the method of preparation of samples for automatic analysis of the carbide phase of steel X12F1 on the program complex “Thixomet PRO” after carbonization in vacuum]. *Polzunovskiy vestnik = Polzunov Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 165–168. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031.
21. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreeva S.V., Chigintsev L.S., Golovin S.V., Egorov V.A., Markov S.I. Razrabotka metodiki kolichestvennoi otsenki mikrostrukturnoi poloschatosti nizkolegirovannykh trubnykh staley s pomoshch'yu avtomaticheskogo analiza izobrazhenii [Development of technique for quantifying microstructural banding of low-alloy pipe steels using automatic image analysis]. *Chernyye metally = Ferrous Metals*, 2007, no. 7–8, pp. 31–37.



22. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of Thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure. *Microscopy and Microanalysis*, 2015, vol. 21 (3), p. 457. DOI: 10.13140/RG.2.1.2204.0720.

23. Kazakov A.A., Lyubochko D.A., Ryaboshuk S.V., Chigintsev L.S. Issledovanie prirody nemetallicheskih vklucheni v stali s pomoshch'yu avtomaticheskogo analizatora chastits [Investigation of the nature of non-metallic inclusions in HSLA steels using an automatic particle analyzer]. *Chernyye metally = Ferrous Metals*, 2014, no. 4 (988), pp. 37–42.

24. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreeva S.V., Myasnikov A.A., Golovin S.V., Egorov V.A. Razrabotka metodiki kolichestvennoi otsenki zagryaznennosti nizkolegirovannykh trubnykh staley nemetallicheskim vklucheniymi s pomoshch'yu avtomaticheskogo analiza izobrazhenii [Development of a method for quantifying the contamination of low-alloy pipe steels with non-metallic inclusions using automatic image analysis]. *Chernyye metally = Ferrous Metals*, 2007, no. 7–8, pp. 24–31.

25. Vander Voort G.F., Pakhomova O., Kazakov A. Evaluation of normal versus non-normal grain size distributions. *Materials Performance and Characterization*, 2016, vol. 5 (5), pp. 521–534. DOI: 10.1520/MPC20160001.

26. Kazakov A.A., Kazakova E.I., Geller G.V. Otsenka kachestva mikrostrukturnykh materialov [Evaluation of the quality of the microstructure of thixotropic materials]. *Tsvetnyye metally*, 2007, no. 10, pp. 110–118. (In Russian).

27. Gabets D.A., Markov A.M., Gabets A.V. Issledovanie vliyaniya khimicheskogo sostava i struktury na mekhanicheskie svoystva chuguna ChMN-35M [Investigation of chemical composition and material structure influence on mechanical properties of special cast iron]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual Problems in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 100–107. (In Russian).

28. Girshovich N.G. *Kristallizatsiya i svoystva chuguna v otlivkakh* [Crystallization and properties of cast iron in castings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 562 p.

29. Chigarev V.V., Rassokhin D.A., Loza A.V. Izmenenie struktury i svoystv litogo metalla legirovaniem v otlivkakh iz chuguna i stali [Modification of the structure and properties of cast metal by means of alloying in castings, made of iron and steel]. *Vestnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki = Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2010, vol. 21, pp. 61–66. (In Russian).

30. Semenov V.I., Chaikin A.V. Fazovye i strukturnye izmeneniya v chugune posle modifitsirovaniya [Phase and structural changes in cast iron upon inoculation]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2006, no. 5, pp. 14–18.

31. Furrer D.U., Semiatin S.L., eds. *ASM Handbook*. Vol 22B. *Metals process simulation*. ASM International, 2010. 695 p. DOI: 10.31399/asm.hb.v22b.9781627081979.

32. *ASM Handbook*. Vol. 4. *Heat Treating*. ASM International, 1991. 2173 p. DOI: 10.31399/asm.hb.v4.0871703793.

33. Viswanathan S., Apelian D., Donahue R.J., DasGupta B., Gywn M., Jorstad J.L., eds. *ASM Handbook*. Vol. 15.  *Casting*. ASM International, 1998. 2002 p. DOI: 10.31399/asm.hb.v15.9781627081870.

34. Komarov O.S., Rozenberg E.V., Urbanovich N.I. Osobennosti modifitsirovaniya razlichnykh tipov zhelezouglerodistykh splavov [Features modifying various types of iron-carbon alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 2015, vol. 79, no. 2, pp. 24–28.

35. Boulifaa M.I., Hadji A. Effect of alloying elements on the mechanical behavior and wear of austempered ductile iron. *Mechanics and Industry*, 2015, vol. 16 (3), p. 304. DOI: 10.1051/meca/2015002.

36. Larin T.V., Astashkevich B.M., Trankovskaya G.R. Vliyanie vanadiya, medi, alyuminiya na iznosostoikost' i friksionnye svoystva fosforistogo chuguna dlya tormoznykh kolodok [Influence of vanadium, copper, aluminum on the wear resistance and frictional properties of phosphorous cast iron for brake pads]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Vestnik of the Railway Research Institute*, 1986, no. 8, pp. 40–42.

37. Belyakov A.I., Petrov L.A., Kaminskij V.V., Akhunov T.A., Ershov V.P. Poluchenie chuguna s sharovidnym grafitom «LS protsessom» [Making spheroidal graphite cast iron by the LS-process]. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1997, no. 5, pp. 20–21.

38. Kornienko E.N., Bikulov R.A. Tyazhelaya ligatura dlya polucheniya vysokoprochnogo chuguna [Heavy master alloy for producing ductile iron]. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii = Blanking productions in mechanical engineering*, 2009, no. 2, pp. 3–5.

39. Gabets D.A., Markov A.M., Gabets A.V. Spetsial'nyi modifitsirovannyi chugun marki ChMN-35M dlya tyazhelo nagruzhennykh detalei teleshki gruzovogo vagona [Special modified ЧМН-35М cast iron for heavily loaded parts of a freight car bogie]. *Tyazheloe mashinostroenie = Russian Journal of Heavy Machinery*, 2016, no. 1–2, pp. 23–26. (In Russian).

40. Vijeesh V., Prabhu K.N. Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2014, vol. 67 (1), pp. 1–18. DOI: 10.1007/s12666-013-0327-x.

41. Zhi X., Xing J., Fu H., Gao Y. Effect of fluctuation and modification on microstructure and impact toughness of 20 wt.% Cr hypereutectic white cast iron. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2008, vol. 39 (6), pp. 391–393. DOI: 10.1002/mawe.200700219.

42. Borshch B.V., Gabets A.V., Sukhov A.V., Filippov G.A. Povyshenie iznosostoikosti friktsionnykh detalei iz serogo chuguna [Increased wear resistance of friction parts made of gray cast iron]. *Stal' = Steel in Translation*, 2014, no. 1, pp. 66–68. (In Russian).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).