

# Совершенствование технологии модифицирования для обеспечения заданной структуры и свойств изделий из чугуна с вермикулярным графитом

Э. С. Закиров, А. Г. Панов

Приведен краткий обзор результатов исследований, направленных на совершенствование технологий модифицирования чугуна на вермикулярный графит для повышения стабильности структуры и свойств ответственных деталей машиностроения, а также предпосылок, явившихся первопричиной для проведения названных исследований.

**Ключевые слова:**

чугун, структура, свойства, модифицирование, лигатура

УДК 620.17, 620.18, 621.74 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.33.4.42.51

## Актуальность, цели и задачи работы

Чугун является одним из древнейших материалов, но до сих пор остается основным литейным материалом для заготовок машиностроения, в том числе станкостроения. При этом постоянно растущие требования повышения эксплуатационной надежности деталей машин, наряду со снижением их себестоимости, требуют постоянного развития потребительских свойств чугуна. Наибольший интерес в плане развития представляют высокопрочные чугуны с шаровидным (ЧШГ) и особенно с вермикулярным (ЧВГ) графитом, которые обладают уникальным сочетанием физико-механических и литейных свойств [1, 2].

Одним из главных инструментов управления структурой чугунов, а соответственно физико-механическими и потребительскими свойствами, является модифицирование расплава специальными добавками – модификаторами, которые, воздействуя на расплав, создают центры кристаллизации, либо влияют на механизмы и скорости

роста различных граней кристаллов, что, в частности, изменяет форму графитовых включений чугунных деталей. Так, для получения чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом используют сфероидизирующие модификаторы, основными действующими элементами которых являются магний и редкоземельные металлы (РЗМ) [2].

Традиционный отечественный подход к выбору и разработке магнийсодержащих лигатур-модификаторов для технологического процесса заключается в выборе наиболее дешевого элементного состава, а также оптимизации фракционного и элементного состава по степени усвоения ведущих элементов. Такой подход не вызывает трудностей в изготовлении отливок из ЧШГ, при использовании чугунов относительно невысоких по прочностным и пластическим свойствам марок, допускающих большие размахи по соотношению феррит/перлит металлической матрицы, а также форме, размерам и распределению графита. Однако при изготовлении отливок с повышенными требованиями

к пластичности, прочности, со специальными характеристиками, когда ограничивается, или не допускается наличие в микроструктуре матрицы чугуна «посторонних» фаз, такой подход оказывается недостаточным [2]. Требуется дополнительно учитывать влияние микроструктуры и фазового состава модификаторов, что в производственных условиях, как правило, не встречается. В результате изготовление указанной продукции сопровождается повышенным браком и дополнительными затратами, что, по всей видимости, и явилось основной причиной низкой освоенности отечественной промышленностью изделий из высококачественных высокопрочных чугунов с шаровидным и, особенно, вермикулярным графитом, который на сегодняшний день проходит стадию практического освоения в РФ [2].

Описанная проблематика предопределила актуальность настоящих исследований, целью которых является обеспечение стабильности структуры и свойств литых заготовок станкостроения из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом на этапе модифицирующей обработки путем применения сфероидизирующих лигатур-модификаторов со специально разработанными составами и структурой.

В связи с поставленной целью в комплексной работе были решены следующие задачи:

- исследование влияния состава лигатур на основе системы Fe-Ni-Mg-Si на активность магния при различных температурах чугунного расплава [3];
- исследование влияния технологических факторов изготовления сфероидизирующих модификаторов на железоникелевой и железокремниевой основах на их микроструктуру и потребительские свойства [3, 4];
- разработка оптимальных составов и структур сфероидизирующих модификаторов на железоникелевой основе для литых заготовок автомобильного и нефтяного машиностроения из чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом [3], апробация и внедрение результатов исследований в производство.

## Методы исследования

Выплавка опытных образцов лигатур производилась в индукционных тигельных печах ИСТ-0,16 с графитовым тиглем. По заданному химическому составу определялась рецептура шихтовки, а также порядок закладки компонентов металлозавалки. Магний и никель использовались в чистом виде и закладывались в первую очередь с целью образования химического соединения  $MgNi_2$  и минимизации выгорания чистого магния. Дополнительно для уменьшения выгорания магния плавки проводили с использованием покрывного флюса.

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

Для обеспечения полного растворения компонентов металлозавалки температура выпуска расплава была задана в пределах 1380–1390 °С. Плавку разливали одним ковшом

в форму для центробежного литья (ЦБЛ) на различную толщину, остатки расплава сливали в изложницу.

Для получения мелкозернистой структуры приготовленный расплав разливали в кокиль центробежной машины. Дополнительно при выпуске в разливочный ковш расплав модификатора модифицировали поверхностно-активными элементами (0,005%–0,015 массы жидкого металла) для измельчения зерна кристаллизующихся фаз.

Производственные испытания полученной лигатуры проводили на чугунах индукционных плавков в печах типа ИСТ, а для нивелирования фактора явления структурной наследственности чугунов, связанного с исходной структурой шихтовых материалов, расплав перегревали до температуры 1600 °С и выдерживали 30 мин с последующим охлаждением до рабочей температуры заливки – 1400–1450 °С.

Модифицирование при исследованиях железо-никель-магниевого лигатуры осуществляли вбросом навески модификатора в открытый ковш.

Пробы для определения химического состава и проведения физико-механических исследований заливали через 1 мин после окончания модифицирующей обработки для обеспечения равномерного усвоения элементов лигатуры в чугунном расплаве.

Качественный и количественный анализ микроструктуры опытных лигатур и чугуна осуществляли методом световой микроскопии по ГОСТ 3443-87 на микроскопе 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.

Определение прочностных характеристик чугуна осуществлялось на универсальной испытательной машине Fritz Heckert типа ZD-10/90 по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

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

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

Расчеты активности магния в системе Fe-Ni-Mg-Si при различных концентрациях элементов и температуры проводились термодинамическими методами, описанными в работе [5].

## Результаты исследования

На первом этапе исследовали влияние технологических факторов на структуру и потребительские свойства наиболее распространенных в производстве чугунов с шаровидным графитом с применением магнийсодержащих

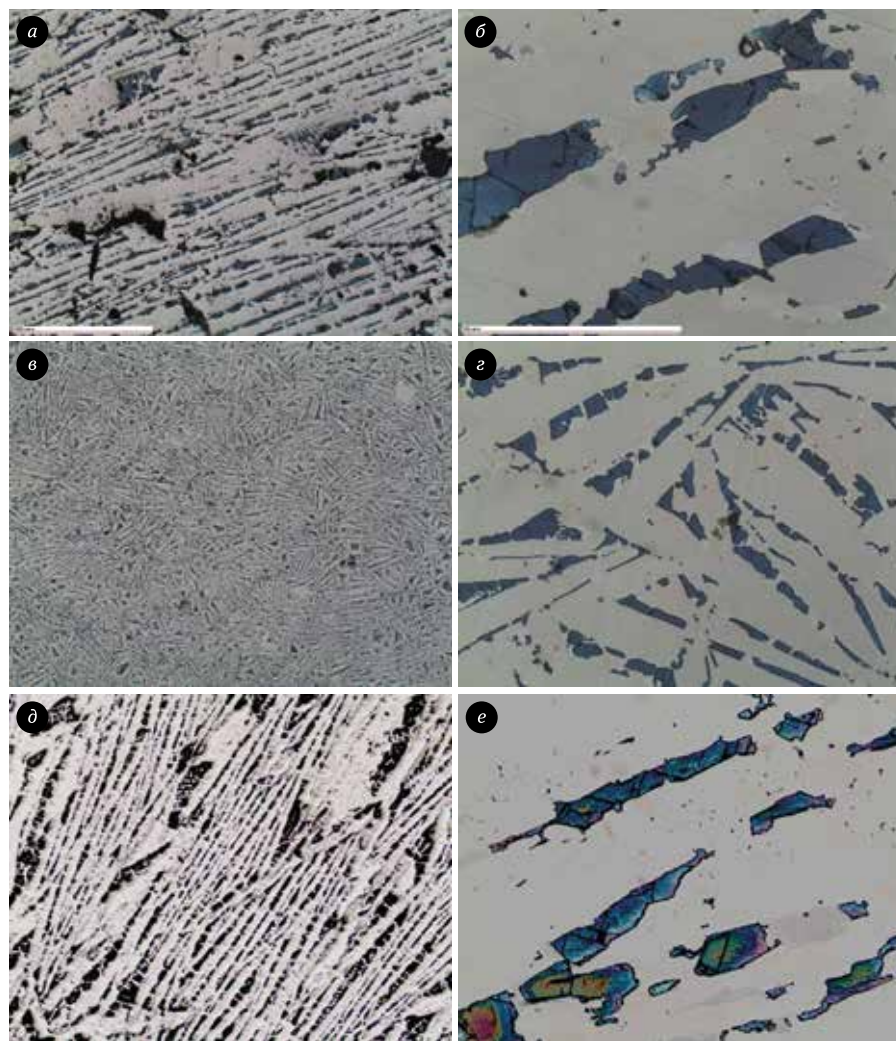


Рис. 1. Микроструктура опытных лигатур:  
 а – М13, ×25; б – М13, ×400; в – М21, ×25; г – М21, ×400; д – М22, ×25; е – М22, ×400

модификаторов на железокремниевой основе (модификатор имел следующий основной состав: 47,2% Si, 5,6% Mg, 0,7% PЗМ). Исследованы следующие варианты исполнения модификаторов:

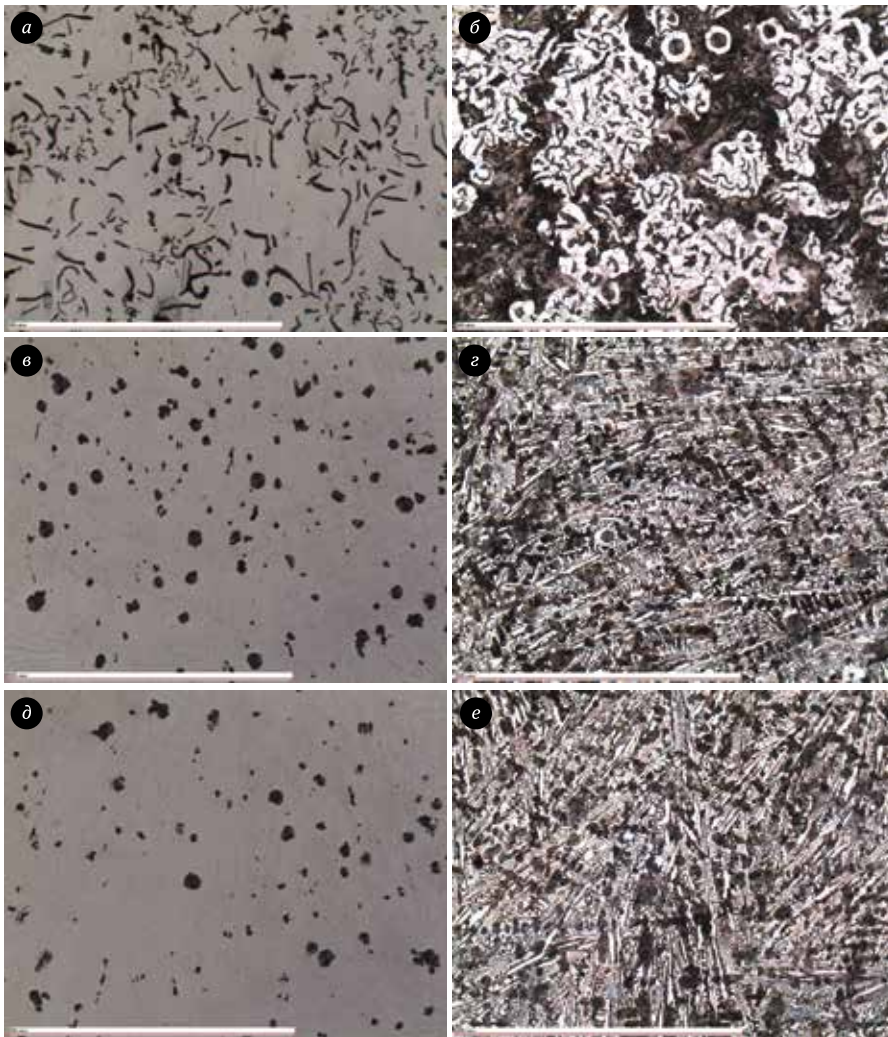
- М13 – без модифицирования расплава модификатора, разливка в изложницу, толщина слитка 100 мм;
- М21 – с модифицированием расплава модификатора поверхностно-активными элементами ( $\leq 0,005\% \Sigma(\text{Bi}+\text{Te})$ ), разливка методом центробежного литья в чугунную изложницу, толщина стенки отливки 3 мм;
- М22 – с модифицированием, ЦБЛ, толщина стенки отливки 20 мм. Микроструктуры опытных лигатур (рис. 1) имеют принципиальные различия, а именно: в ряду М13 → М22 → М21 происходит существенное последовательное измельчение основных фаз  $\alpha\text{-FeSi}_2$ , FeSi, Mg<sub>2</sub>Si.

Для испытаний выбранные модификаторы были подроблены и просеяны до традиционной для литейных производств фракции 0,8–5,6 мм. Исследование модифицирующей способности модификаторов при ковшевой обработке чугуна на шаровидный графит производили при фактическом расходе модификаторов и основных модифицирующих элементов, представленных в табл. 1. Химический состав чугунов до и после модифицирования представлен в табл. 2, а микроструктуры чугуна – на рис. 2.

Чугун, модифицированный лигатурой М13, имеет самое низкое содержание серы и магния. Такой результат можно объяснить наличием в микроструктуре модификатора крупных магнийсодержащих фаз (Mg<sub>2</sub>Si), образующих при взаимодействии с чугунным расплавом крупные пузырьки и сульфиды магния, которые легко и быстро совместно всплывают. При этом расплавом усваивается минимальное количество магния. Чугун имеет в своей микроструктуре ~12% графита преимущественно вермикулярной формы с отдельными включениями шаровидной формы (рис. 2 а, б). Металлическая матрица феррито-перлитная с долей феррита ~30%, без свободного цементита.

Таблица 1. Расход модификаторов и основных модифицирующих элементов

Ковш	Модификатор	Расход лигатуры, %	Расход элементов, %		
			Mg	Si	PЗМ
1	М21 (модифицированный, ЦБЛ 3 мм)	1,2	0,054	0,55	0,005
2	М13 (не модифицированный, чушка)	1,0	0,054	0,45	0,005
3	М22 (модифицированный, ЦБЛ 20 мм)	1,2	0,054	0,55	0,005



**Рис. 2.** Микроструктуры модифицированных чугунов,  $\times 100$ :  
*a* – M13, не травлено; *б* – M13, травлено; *в* – M21, не травлено; *г* – M21, травлено;  
*д* – M22, не травлено; *е* – M22, травлено

Максимальное содержание серы со средним содержанием магния наблюдается у чугуна, модифицированного лигатурой M21, что объясняется наиболее мелкозернистой структурой и, соответственно, наиболее мелкими пузырьками и сульфидами магния, которые наиболее хорошо усваиваются и наиболее медленно удаляются из расплава. Чугун имеет в своей микроструктуре примерно в два раза меньше (~6%) графита шаровидной формы (рис. 2 *в*, *г*), металлическая матрица состоит в основном из перлита, ледебурита распавшегося и первичного цементита, общее содержание цементита первичного и ледебурита ~25%. Также наблюдается небольшое (менее 5%)

количество феррита в виде оторочки вокруг некоторых включений шаровидного графита (несформировавшийся «бычий глаз»).

Максимальное количество магния и близкое к минимальному содержание серы после модифицирующей обработки в чугуном расплаве наблюдается для лигатуры M22. Микроструктура чугуна, модифицированного лигатурой M22 (рис. 2 *д*, *е*), схожа с микроструктурой чугуна, модифицированного лигатурой M21, при этом количество графита уменьшается до ~3%, несколько увеличивается количество цементита ледебурита, распавшегося и первичного (до ~30%), количество феррита уменьшается до ~2%.

Таким образом, все структурные составляющие модификатора ( $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, FeSi, Mg<sub>2</sub>Si) активно влияют на протекание процессов первичной кристаллизации высокопрочного чугуна, что проявляется в существенном изменении морфологии, а также количестве графита и матрицы в структуре чугунных отливок.

Наследуемые чугуном расплавом от модификатора структуры FeSi и  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub> взаимодействуют с элементами структуры расплава, имеющими ближний порядок цементита, в результате чего перераспределяются химические связи между атомами Fe, Si и C, образуются новые обедненные углеродом Fe-C-Si-структуры, являющиеся

при последующем охлаждении расплава предзародышами и зародышами феррита и аустенита; поэтому в чугунах, обработанных крупнокристаллическими модификаторами, активнее протекает первичная кристаллизация

**Таблица 2.** Химический состав чугунов до и после модифицирования

Проба	C	Si	Mn	Cr	P	S	Mg	Усвоение, %
Исходный	3,86	1,28	0,70	0,20	0,014	0,017	–	–
ВЧ_M13	3,79	1,77	0,69	0,19	0,014	0,011	0,017	31
ВЧ_M21	3,76	1,88	0,69	0,19	0,014	0,014	0,027	50
ВЧ_M22	3,79	1,89	0,68	0,19	0,016	0,019	0,046	85

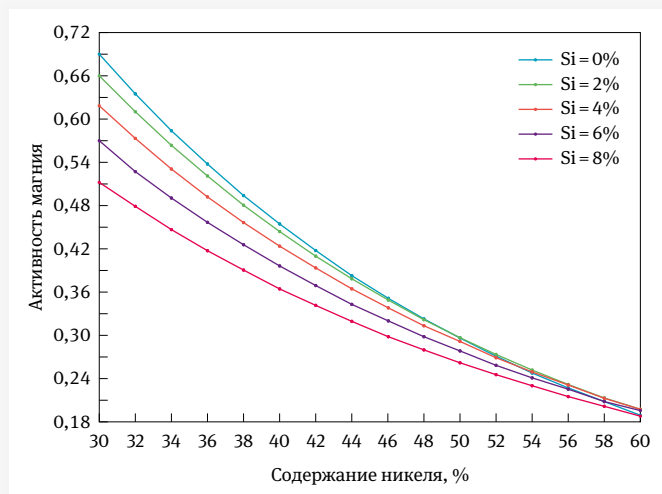


Рис. 3. Зависимость активности магния при различной концентрации элементов Si и Ni при  $T=1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Mg}=5\%$

графита, аустенита и феррита, а в чугунах, обработанных мелкокристаллическими модификаторами, первичная кристаллизация графита, феррита и аустенита подавляется и кристаллизуется цементит и ледебурит.

Наследуемые чугуном расплавом от модификатора структуры  $\text{Mg}_2\text{Si}$  модификаторов участвуют в формировании разупорядоченных областей чугуна расплава, их размеры влияют на интенсивность удаления магния и неметаллических включений из расплава, что, в свою очередь, влияет на количественные характеристики и морфологию графита. Измельчение магнийсодержащих фаз приводит к повышению сфероидизирующего и графитизирующего эффектов.

Выявленные закономерности использовали для совершенствования технологий модифицирования чугуна с вермикулярным графитом для ответственных деталей машиностроения, к которым предъявляются повышенные требования по стабильности структуры и свойств. Ключевыми факторами для достижения этой цели являются плотность модификатора не ниже плотности чугуна расплава и минимальная активность магния в расплавленном модификаторе при рабочих температурах модифицирования чугуна расплава.

Термодинамические расчеты активности магния в расплавах системы Fe–Ni–Mg–Si в зависимости от состава и температуры проводили по методике, описанной в работе [5]. Зависимость активности магния оценивалась при трех температурах: 1450, 1475, 1500 °C, а также различной концентрации основных элементов лигатуры: Si = 0–8%; Mg = 4–8%; Ni = 30–60% (рис. 3, 4).

Анализ результатов расчетов показал, что в рассматриваемом диапазоне температур не наблюдается существенного влияния на активность магния. При повышении температуры с 1450 до 1500 °C изменение активности магния

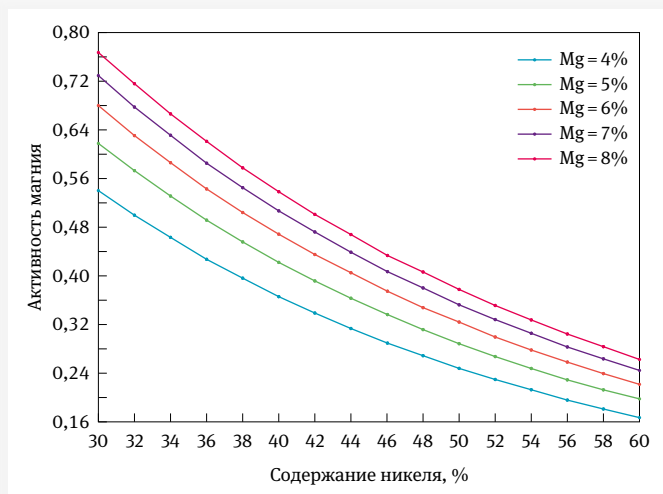


Рис. 4. Зависимость активности магния при различной концентрации элементов Mg и Ni при  $T=1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Si}=4\%$

составило менее 1%. Поэтому дальнейший анализ продолжили при температуре 1450 °C, как наиболее распространенной в производственных условиях, при этом с максимальной активностью магния в рассматриваемой системе.

На рис. 3 показано влияние концентрации никеля (от 30 до 60%) и кремния (от 0 до 8%) на активность магния при его содержании 5%. На рис. 4 показано влияние концентрации никеля (от 30 до 60%) и магния (от 2 до 10%) на активность магния при содержании кремния 4%.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- при повышении концентрации никеля с 30 до 40% активность магния снижается на 31,5%, а с 30 до 60% – на 67,9% (для случая Si = 4%, Mg = 5%);
- изменение концентрации кремния слабее влияет на активность магния, однако это хороший инструмент для снижения стоимости лигатуры, при повышении концентрации кремния с 0 до 4% активность магния снижается на 6,8%, а с 0 до 8% – на 19,6% (для случая Ni = 40%, Mg = 5%).

На основании проведенных исследований был разработан состав лигатуры (табл. 3), при определении которого главными критериями являлись:

- минимальная активность магния в лигатуре;
- минимальное содержание никеля, необходимое для обеспечения плотности лигатуры не менее 7 кг / см<sup>3</sup>, по причине дороговизны чистого никеля;
- возможность уменьшения активности магния за счет повышения концентрации более дешевых элементов;
- содержание магния в лигатуре в диапазоне 4,0–6,0% как оптимальное для ковшевого модифицирования по опыту применения сфероидизирующих модификаторов.

**Таблица 3.** Химический состав разработанного магнийсодержащего модификатора (%) на Fe–Ni–Si-основе

Mg	Ni	Si	La	Ce	Al	Ca	Sr+Ba	Fe
4,0–5,0	42,0–44,0	4,0–6,0	1,5–2,5	3,0–4,0	≤0,5	≤0,5	≤0,5	ост.

**Таблица 4.** Механические свойства и микроструктура чугунов, модифицированных магнийсодержащим модификатором на Fe–Ni–Si-основе

Ковш	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	Микроструктура	
				Графит	Мет. основа
1	135	–	<140	ПГф1,2 – ПГд15-350 – ПГр 1, 2, 3, 4, 8	П6(Ф94)
2	354	3,6	164	ВГ70-80 – ШГф 4, 5	П20(Ф80)
3	372	3,4	183	ВГ70-80 – ШГф 4, 5	П20(Ф80)

Помимо уже описанного выше измельчения кристаллизующихся фаз в структуре традиционных модификаторов на железокремниевой основе, при изготовлении экспериментальных образцов разрабатываемого модификатора по аналогичным методам модифицирования и кристаллизации удалось еще более сильно изменить его структуру (рис. 5). Металлическая матрица немодифицированного варианта магнийсодержащего модификатора на Fe–Ni–Si-основе (рис. 5 а) представляет аустенит, составляющий единый дендритный каркас, что, кроме прочего, имеет сильное упрочняющее действие, затрудняющее дробление модификатора.

Благодаря модифицированию расплава, а также высоким скоростям охлаждения при заливке в центробежную чугунную форму толщиной отливки 3 мм происходит раздробление сплошного дендритного каркаса аустенита таким образом, что являющаяся основой металлической матрицы аустенитная фаза окружается эвтектикой, состоящей из твердой карбидной фазы, в которой дендриты аустенита содержатся в виде отдельных изолированных включений. В результате сильно снижается ударная вязкость модификатора и решается проблема по одному из главных недостатков сфероидизирующих модификаторов на железоникелевой основе – низкая дробимость, необходимая для получения относительно мелкой фракции лигатуры для использования в ковшах малой емкости.

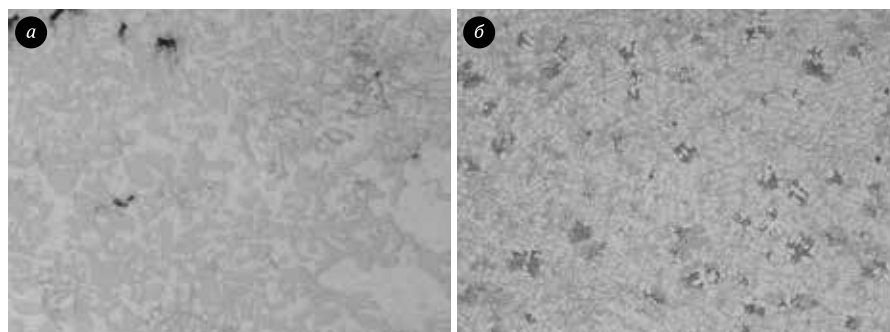
Экспериментальные образцы магнийсодержащего модификатора на Fe–Ni–Si-основе испытывали при модифицировании чугуна на вермикулярный графит в цехе точного стального литья литейного завода ПАО «КАМАЗ». Были апробированы три варианта навесок лигатуры с расходом 0,27% от массы жидкого металла (м. ж. м.) – ковш № 1, 0,38% – ковш № 2 и 0,47% – ковш № 3.

При испытаниях оценивалась микроструктура графитовых включений и металлической матрицы модифицированных чугунов, размеры, доля и распределение структурных составляющих, а также содержание, степень усвоения и воспроизводимость усвоения магния, что в первую очередь характеризует работоспособность и эффективность предлагаемого модификатора.

Усредненные результаты механических испытаний, а также исследования микроструктуры чугуна представлены в табл. 4, примеры микроструктуры чугуна – на рис. 6.

Как показано на рис. 6 а, б, расхода лигатуры 0,27% оказалось недостаточно для получения вермикулярного графита, микроструктура представляет собой графит пластинчатой формы с сильным разбросом по размеру и неоднородным распределением графитовых включений. Металлическая основа практически полностью состоит из феррита, механические свойства не удовлетворяют требованиям марки ЧВГ35 ГОСТ28394-89.

По ковшу № 2 с расходом 0,38% (рис. 6 в, г) получен вермикулярный графит узелковой и извилистой формы с практически равномерным распределением, металлическая матрица феррито-перлитная (П20/Ф80), доля вермикулярного



**Рис. 5.** Микроструктура разработанного магнийсодержащего модификатора на Fe–Ni–Si-основе, травлено, ×100: а – немодифицированный, чушка, 40 мм; б – модифицированный, ЦБЛ, 3 мм

графита составляет 70–80%, что свидетельствует о высокой эффективности модифицирующей лигатуры. По механическим характеристикам полученный металл соответствует требованиям марки ЧВГ35 согласно ГОСТ 28394-89.

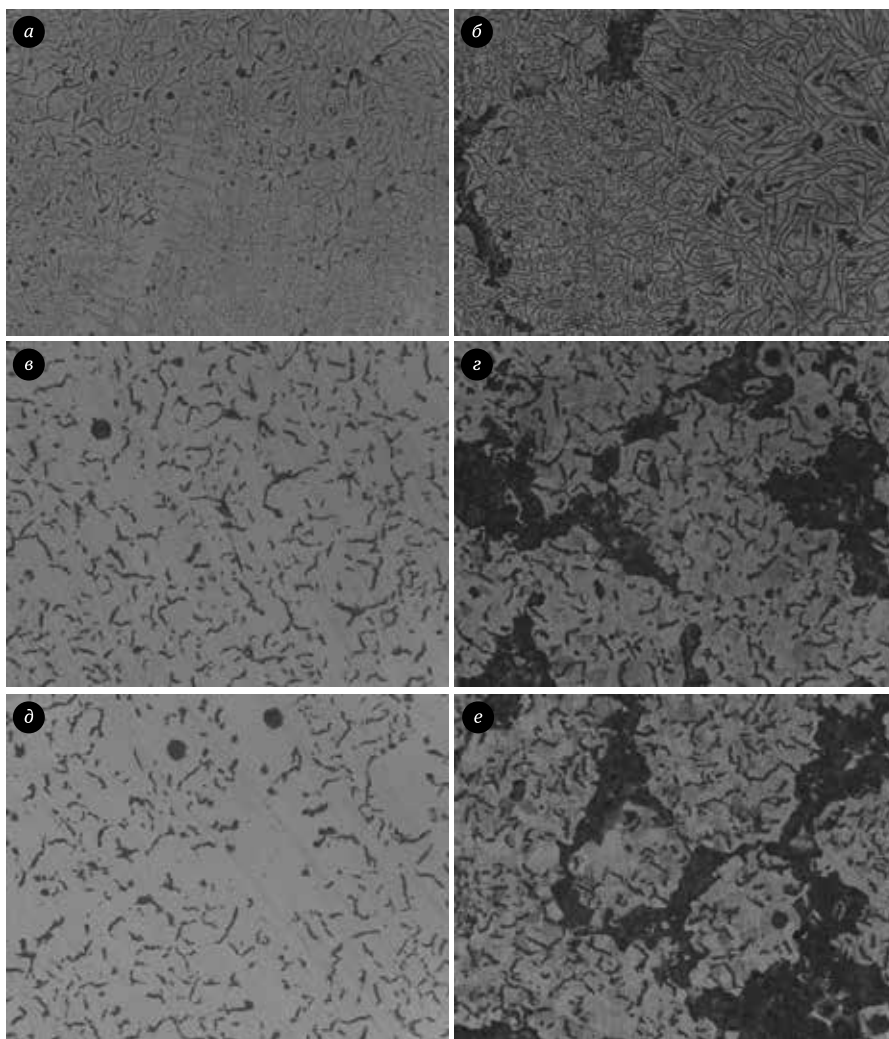
При расходе 0,47% (рис. 6 д, е) была получена структура с долей вермикулярного графита 70–80%, металлическая основа, так же как и у ковша № 2, согласно ГОСТ 3443-87 феррито-перлитная П20/Ф80, но визуально она содержит несколько больше перлита, что, по сравнению с металлом ковша № 2, привело к несколько большей прочности и твердости – 370 МПа и 188 НВ соответственно – при сохранении относительного удлинения на том же уровне. Следует также отметить, что на некоторых исследованных образцах был обнаружен цементит до 10%, что наряду с высокими механическими свойствами выглядит логично и объясняется большей навеской сфероидизирующей лигатуры.

Усвоение основных рабочих элементов лигатуры чугуном расплавом составило: магния – не менее 70%, элементов РЗМ – не менее 80%, что обеспечивает более стабильный результат модифицирования и воспроизводимость заданной структуры и потребительских свойств ЧВГ в сравнении с аналогичными известными ФСМг модификаторами, для которых усвоение магния и РЗМ составляет, как правило, порядка 50%.

Экспериментальные образцы магнийсодержащего модификатора на Fe–Ni–Si-основе испытывали также при модифицировании чугуна на шаровидный графит при изготовлении гильз цилиндров в производственных условиях АО «Костромской завод автокомпонентов». Особенностью производства была необходимость проводить модифицирование в ковшах емкостью 20 кг при обработке расплава порядка 11 кг для заливки штучных отливок методом центробежного литья.

Были опробованы также три варианта расхода магнийсодержащего модификатора на Fe–Ni–Si-основе при совместном модифицировании графитизирующим модификатором типа ферросилиция с барием:

- ковш № 1 с расходом 1,2% от м. ж. м.;
- ковш № 2 с расходом 1,6% от м. ж. м.;
- ковш № 3 с расходом 1,4% от м. ж. м.



**Рис. 6.** Микроструктуры чугунов, полученных при различных расходах разработанного магнийсодержащего модификатора на Fe–Ni–Si основе,  $\times 100$ :  
а – ковш № 1, не травлено, б – ковш № 1, травлено, в – ковш № 2, не травлено, г – ковш № 2, травлено, д – ковш № 3, не травлено, е – ковш № 3, травлено

При этом изначально расход модификатора был задан на уровне 1,0% от массы жидкого металла. Однако содержание серы в приготовленном расплаве оказалось избыточным (~0,023–0,025%) относительно рекомендованного содержания не более 0,020%. По этой причине было принято решение увеличить навеску модификатора для связывания избыточной серы. Кроме того, навески модификаторов для ковшей № 1 и № 3 были отобраны специальным образом – без каких-либо инородных включений, навеска для ковша № 2 имела некондиционное качество и содержала до 20% частиц модификатора с дефектами типа окисленности и ошлакованности, что зачастую присутствует в товарных модификаторах до 5% и более.

На первом ковше были получены неудовлетворительные результаты по форме графитовых включений (рис. 7 а), что

При поддержке:



**07-10 НОЯБРЯ 2023**

**МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»**

Место проведения:



Генеральный  
информационный партнер:



Оборудование и технологии  
для металлургии  
и металлообработки  
**МеталлургМаш'2023**



Металлопродукция  
и металлоконструкции  
для строительной отрасли  
**МеталлСтройФорум'2023**



Транспортные  
и логистические услуги  
для предприятий ГМК  
**МеталлТрансЛогистик'2023**

**29-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ПРОМЫШЛЕННАЯ  
ВЫСТАВКА**

# **МЕТАЛЛ ЭКСПО 2023**

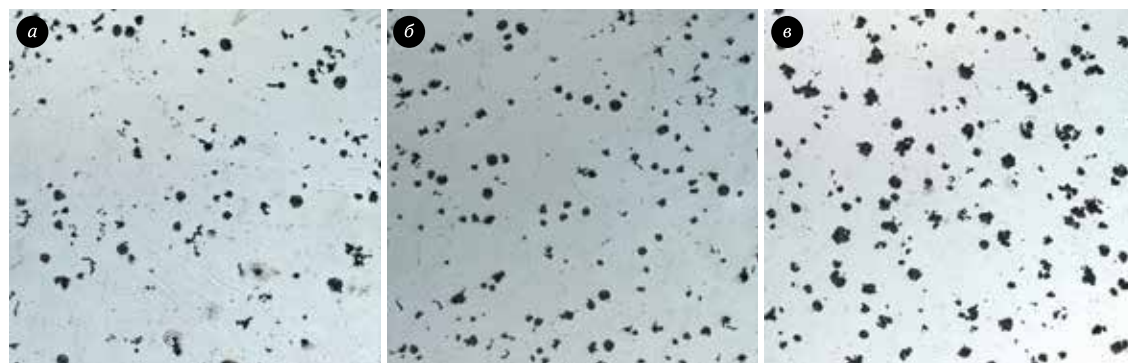


Оргкомитет выставки:  
тел./факс +7 (495) 734-99-66



**[www.metal-expo.ru](http://www.metal-expo.ru)**





**Рис. 7.**  
Микроструктура  
опытных чугунов,  
не травлено,  $\times 100$ :  
а – ковш № 1,  
б – ковш № 2,  
в – ковш № 3

объясняется высоким уровнем серы и содержанием магния на нижнем пределе.

На втором (рис. 7 б) и третьем (рис. 7 в) ковшах получен удовлетворительный результат, усвоение магния расплавом составило 70%. Таким образом, опыт показал, что наличие в модификаторе разработанного состава некондиционной фракции в относительно большом количестве не является критичным для получения заданной структуры и свойств. В то же время при разбраковке отливок, залитых по второму варианту, в нескольких гильзах были обнаружены шлаковые включения в небольшом количестве, которые образовались от попадания некондиционной фракции модификатора.

В целом, по результатам проведенных работ получили шаровидный графит неправильной формы, что связано как с высоким содержанием серы в исходном расплаве, так и относительно большим содержанием в структуре чугуна первичного цементита, при кристаллизации становящегося на пути растущего графита и мешающего его росту в виде правильной шаровидной формы, для предотвращения чего требуется корректировка химического состава путем увеличения содержания углерода, а также увеличения расхода графитизирующего модификатора.

## Основные результаты

Установлены закономерности влияния состава лигатуры на активность магния при различных температурах расплава системы Fe–Ni–Mg–Si, на основании которых разработан оптимальный состав лигатуры ЖНМг типа по содержанию основных элементов, который в том числе обеспечивает необходимую плотность лигатуры, превосходящую плотность чугунного расплава, что наряду со сбалансированным химическим составом минимизирует пирозэффект при модифицирующей обработке чугунного расплава и снижает угар, обеспечивая усвоение магния 70% и более, редкоземельных элементов (лантана и церия) не менее 80 и 90% соответственно.

Установлено влияние различных условий кристаллизации на структуру ФСМг и ЖНМг модификаторов, от которой в свою очередь зависят физико-механические свойства

литейных заготовок из высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом, на основании чего разработана структура магниевых лигатур для обработки высокопрочных чугунов на шаровидный и вермикулярный графит.

Установлено, что магниесодержащие фазы модификатора активно воздействуют на расплав, формируя в нем разупорядоченные области, при этом размеры этих фаз имеют определяющее влияние на скорость удаления неметаллических включений и магния из чугунного расплава, что в конечном счете оказывает влияние на формирование графитовых включений, их структуру и количество, а также на строение металлической матрицы.

Разработана технология выплавки лигатур, которая определяет порядок закладки шихтовых материалов и регулировку режимов работы плавильной печи; использование покрывных флюсов; модифицирование расплава лигатуры при выдаче из печи в разливочный ковш поверхностно-активными элементами; заливку полученных расплавов лигатур в центробежные машины литья на заданную толщину стенки отливки.

В ходе производственных испытаний подтверждена работоспособность разработанных магниевых лигатур с заданными структурой, составом и свойствами, определены границы возможностей для магниесодержащего сфероидизирующего модификатора на железоникелевой основе, позволяющего обеспечить воспроизводимость ключевой для эксплуатационных свойств ЧВГ характеристики – получение в структуре чугуна доли графита вермикулярной формы не менее 70–80%. Разработанная лигатура с заданной структурой и составом может быть использована при изготовлении специальных отливок станкостроения из чугуна с вермикулярным графитом, имеющих повышенные требования к жесткости конструкции, демпфирующей способности, низкому короблению, износостойкости при относительно низкой металлоемкости, что обосновывает технико-экономическую целесообразность использования никельсодержащей лигатуры, которая также реализуется в части снижения материальных затрат за счет исключения брака микроструктуры при модифицировании чугуна на вермикулярный графит.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чугун. Справочное издание / [А.Д. Шерман и др.]; под редакцией А.Д. Шермана и А.А. Жукова // М.: Металлургия, 1991. 576 с.: ил.; 22 см.; ISBN 5-229-00810-5 (В пер.).
2. **Леушин И.О., Панов А.Г.** Современные тренды производства чугунного литья // Черные металлы. – 2021. № 7. С. 32–40.
3. **Закиров Э.С., Панов А.Г.** Исследование зависимостей различных концентраций элементов на активность магния в лигатуре системы Fe–Mg–Ni–Si // Труды XI МНПК «Прогрессивные литейные технологии». М.: 2022. С. 72–76.
4. **Закиров Э.С., Панов А.Г.** Разработка тяжелого модификатора для чугуна с вермикулярным графитом // Ползуновский вестник. – 2022. – № 4 Т. 2. – С. 93–98.
5. **Власов В.Н., Булдыгин С.В., Агеев Ю.А. [и др.]** Активность и давление пара магния в сплавах Ni–Mg–Si–Fe и Cu–Mg–Si–Fe // Литье и металлургия. 2010. № 3 (57). С. 22–24.

## Авторы

**Закиров Эрнст Сергеевич** –

и.о. главного металлурга ПАО «КАМАЗ»

**Панов Алексей Геннадьевич** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Материалов, технологий и качества»

Набережночелнинского института (филиала) КФУ

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 920 руб

## РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Издание 2-е, испр. и доп.

**Вакс Е.Д., Лебёдкин И.Ф., Миленький М.Н., Платов Е.С., Раевский Е.В., Сапрыкин Л.Г., Толочнов А.В.**

В 2016 г. сотрудники НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» Е.Д. Вакс, И.Ф. Лебёдкин, М.Н. Миленький, Л.Г. Сапрыкин и А.В. Толочнов опубликовали книгу «Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров». Резание различных металлов такими лазерами широко распространено в российской промышленности, и это направление, несомненно, будет развиваться и совершенствоваться далее. Но для этого необходимо понимать природу физических процессов, протекающих при лазерном резании, что позволит разработать методы улучшения его качественных показателей и производительности.

Исправленное и дополненное новыми результатами второе издание этой книги посвящено описанию эффективных решений, разработанных и проверенных экспериментально в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» в период 2014–2019 гг., для улучшения результатов резания. В данном издании приведены и проанализированы новые дополнительные экспериментальные и теоретические результаты исследований зарубежных фирм, посвященные данной тематике.

Второй и третий разделы книги построены таким образом, чтобы читателям стали более понятны физические процессы лазерного резания и оптимизация условий его проведения. Эти знания позволят реализовать повышенную производительность и достичь улучшенных качественных показателей лазерного резания.

Книга рассчитана на специалистов промышленных предприятий, технологических и научно-исследовательских подразделений и групп, использующих лазерные технологии обработки металлов. Она также может быть полезна для преподавателей, студентов, операторов лазерных станков и всех «практиков», изучающих или интересующихся тематикой современной лазерной обработки.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 344 с. + 4 с. цв. вклейки,  
ISBN 978-5-94836-553-4

## КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📞 +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)