



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-15-21>
УДК 669.131.7

Поступила 05.05.2020
Received 05.05.2020

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫСТРООХЛАЖДЕННОЙ МЕДЬ-МАГНИЕВОЙ ЛИГАТУРЫ

А. Г. СЛУЦКИЙ, И. Л. КУЛИНИЧ, В. А. ШЕЙНЕРТ, В. А. СТЕФАНОВИЧ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: slutski@bntu.by

Р. Э. ТРУБИЦКИЙ, А. В. КОТКОВ, ОАО «Лидский литейно-механический завод», г. Лида, Беларусь

Для внепечной обработки чугуна применяются различные модификаторы. Одни из них предназначены для инокулирующего модифицирования, что позволяет повысить механические свойства, исключить появление отбела в отливках, другие – для сфероидизирующей обработки, в частности для получения чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом. Некоторые обладают одновременно сфероидизирующими и инокулирующими свойствами. Основная часть инокулирующих и сфероидизирующих модификаторов изготавливается из железосилициевой, никелевой и медной основ.

Помимо химического состава, большое значение для модифицирования имеют размеры частиц модификатора, а также их форма. Оптимальный размер фракции существенно зависит от технологии внепечной обработки. Так, чем больше ковш и дольше проводится разливка, тем требуется более продолжительный эффект модифицирования. Одним из методов его достижения является увеличение размера частиц модификатора до 50 мкм. При внутриформенной обработке чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом магнийсодержащие модификаторы имеют жесткие ограничения по верхнему пределу (4–5 мкм), кроме того, не допускается содержание мелких фракций (менее 0,6–1,0 мкм).

Научный и практический интерес представляет применение «тяжелых» магнийсодержащих лигатур для сфероидизирующего модифицирования чугуна с целью получения более высоких физико-механических свойств. Многочисленные исследования показывают, что для достижения максимального эффекта формирования в структуре шаровидного графита, дисперсной перлитной металлической основы ЧШГ актуальным является вопрос не только подбора химического состава магнийсодержащей лигатуры, но и фракционного состава, а также эффективного способа ее ввода в жидкий расплав.

Цель настоящей работы – исследование технологических особенностей получения чугуна с шаровидным графитом методом ковшевого модифицирования медь-магниевого лигатурой.

Для исследований применяли растровый микроскоп LEO-1420, оптический микроскоп типа Polat L-213, электронный микроскоп VEGA II LMU с микроанализатором INCA ENERGY 350, высокоскоростную индукционную плавильную установку, комплекс оборудования для анализа технологических и механических свойств высокопрочного чугуна.

Ранее выполненные экспериментальные исследования показали реальную возможность получения в лабораторных условиях «тяжелой» медь-магниевого лигатуры как методом сплавления металлического магния с медью с последующим быстрым охлаждением, так и с использованием прокатки и пластической деформации порошкообразных компонентов лигатуры. Анализ результатов испытаний образцов такой лигатуры показал, что в зависимости от величины ее добавки в жидкий чугун в структуре образуется графитная фаза как в вермикулярной, так и шаровидной форме. При этом металлическая основа чугуна дополнительно легируется медью, что благоприятно сказывается на прочностных характеристиках ЧШГ. Вместе с тем, актуальной проблемой является возможность появления в структуре высокопрочного чугуна цементитной фазы в результате его повышенного переохлаждения за счет процесса сфероидизации графитной фазы. Данное явление усугубляется тем, что медь-магневая лигатура в отличие от «легкой» лигатуры типа ФСМг не содержит кремния активного графитизатора. Такую особенность необходимо учитывать при получении высокопрочных чугунов высоких марок.

Ключевые слова. «Тяжелая» магнийсодержащая лигатура, сфероидизирующая обработка, высокопрочный чугун, лабораторные и заводские испытания, структура, механические свойства.

Для цитирования. Слущкий, А. Г. Технологические особенности получения чугуна с шаровидным графитом с использованием быстроохлажденной медь-магниевого лигатуры / А. Г. Слущкий, И. Л. Кулинич, В. А. Шейнерт, В. А. Стефанович, Р. Э. Трубицкий, А. В. Котков // *Литье и металлургия*. 2020. № 2. С. 15–21. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-15-21>.

TECHNOLOGICAL PECULARITIES OF PRODUCING CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE USING A FAST-COOLED COPPER-MAGNESIUM LIGATURE

A. G. SLUTSKY, I. L. KULINICH, V. A. SHEINERT, V. A. STEFANOVICH, *Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti Ave., Minsk, Belarus. E-mail: slutski@bntu.by*

R. E. TRUBITSKY, A. V. KOTKOV, *OJSC «Lida Foundry and Mechanical Plant», Lida, Belarus*

Various modifiers are used for non-furnace processing of cast iron. Some of them are designed for inoculating modification, which improves mechanical properties and eliminates the appearance of whiteness in castings, while others are designed for spheroidizing processing, in particular for producing cast iron with spherical and vermicular graphite. Some have both spheroidizing and inoculating properties. The main part of inoculating and spheroidizing modifiers is made on iron-silicon, Nickel and copper bases.

In addition to the chemical composition, the size of the modifier particles, as well as their shape, are of great importance for modification. The optimal size of the fraction depends significantly on the non-furnace processing technology. Thus, for the larger the bucket and the longer the casting the longer the modification effect is required. One of the methods to achieve this is to increase the particle size of the modifier to 50 mm. When intraform processing of cast iron with spherical and vermicular graphite, magnesium-containing modifiers have strict limits on the upper size (4...5 mm), and in addition, the content of small fractions (less than 0.6...1 mm) is not allowed.

The use of «heavy» magnesium-containing ligatures for spheroidizing modification of cast iron in order to obtain higher physical and mechanical properties has scientific and practical interest. Numerous studies show that for maximum effect the formation of the structure of the spheroidal graphite, dispersed pearlite metallic base of SGI (spheroidal graphite iron) relevant question is not only selection of the chemical composition of magnesium alloys, but also of the fractional composition, as well as effective method of input into the liquid melt.

The purpose of this work was to study the technological features of obtaining cast iron with spherical graphite by bucket modification of copper-magnesium ligature.

The researchers used a Leo-1420 scanning microscope, a Polam I-213 optical microscope, and a VEGA II LMU electron microscope with an INCA ENERGY 350 microanalyzer. High-speed induction melting plant, a set of equipment for analyzing the technological and mechanical properties of high-strength cast iron were used.

Earlier experimental studies have shown the real possibility of obtaining in the laboratory a «heavy» copper-magnesium alloys as the alloying of magnesium metal with copper, followed by rapid cooling with use of rolling and plastic deformation of powder alloys. Analysis of test results of samples of such alloys showed that it depends on the value of its additives into liquid iron in the structure of formed graphite phase in compacted and globular form. At the same time, the metal base of cast iron is additionally alloyed with copper, which has a favorable effect on the strength characteristics of SGI.

However, an urgent problem is the possibility of the appearance of a cementite phase in the structure of high-strength cast iron as a result of its increased supercooling due to the process of spheroidization of the graphite phase. This phenomenon is compounded by the fact that the copper-magnesium ligature, in contrast to the «light» ligature, does not contain silicon active graphitizer. This feature must be taken into account when obtaining high-strength cast iron of high grades.

Keywords: «Heavy» magnesium-containing ligature, spheroidizing treatment, ductile cast iron, laboratory and factory tests, structure, mechanical properties.

For citation. A. G. Slutsky, I. L. Kulinich, V. A. Sheinert, V. A. Stefanovich, R. E. Trubitsky, A. V. Kotkov. Technological peculiarities of producing cast iron with spherical graphite using a fast-cooled copper-magnesium ligature. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 16–21. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-16-21>.

В настоящее время в Республике Беларусь в основном производятся невысокие марки чугуна с шаровидным графитом (ВЧ40 – ВЧ50), при этом используются «легкие» сфероидизирующие лигатуры на основе ферросилиция типа ФСМг, поставляемые по импорту.

При получении таких чугунов более высоких марок (ВЧ60 – ВЧ80) в практике литейного производства используются магнийсодержащие «тяжелые» лигатуры на основе меди либо никеля. При этом актуальным остается вопрос повышения эффективности таких лигатур и в первую очередь за счет увеличения степени усвоения магния, снижения удельного расхода присадки, а также минимизации пылегазовых выбросов в процессе сфероидизирующей обработки жидкого чугуна.

Ранее выполненные исследования [1–3] показали реальную возможность получения «тяжелой» лигатуры на основе порошков меди и магния с использованием дополнительного механического воздействия (прокатка в пластины различной толщины, прессование в брикеты с последующей высокоскоростной ударной деформацией (чипс-лигатура)).

Полученные чипсы использовали для сфероидизирующей обработки чугуна как в исходном состоянии, так и после дробления. При этом наблюдали резкое снижение пылевидных отходов и более однородное распределение элементов лигатуры.

По данным, изложенным в работе [4], кинетика растворения таких чипсов в чугуне существенно отличается от процесса растворения сферических частиц. Благодаря незначительной толщине чипсы быстро прогреваются, что резко сокращает инкубационный период растворения, а остроугольная форма частиц и их самопроизвольное дробление от термического удара не позволяют шлаковым пленкам полностью изолировать от расплава частицы модификатора, что ведет к резкому сокращению времени растворения.

Целью настоящей работы является исследование технологических особенностей получения более высоких марок чугуна с шаровидным графитом с использованием быстроохлажденной медно-магниевого «тяжелой» лигатуры.

Авторами данной работы ранее были выполнены экспериментальные исследования технологических особенностей процесса литья такой лигатуры [5]. В качестве основных материалов использовали металлический магниевый сплав МЛ5 и кусковую медь, лигатуру МЦ60, гранулированный алюминий. Плавку лигатуры осуществляли в графитовом тигле на высокоскоростной индукционной установке. После расплавления расчетного количества меди производили ее раскисление алюминием, после чего на зеркало жидкого металла добавляли флюс в виде кремнийфтористого натрия, вначале вводили необходимое количество церия в виде сплава МЦ60, а затем оперативно добавляли куски магниевого сплава МЛ5, что позволяло минимизировать потери магния на окисление. Полученный расплав лигатуры разливали в холодные металлические формы, что обеспечивало формирование плотной и однородной структуры, легко поддающейся дроблению. Кроме того, это вызывает благоприятное распределение компонентов по фракциям, что обеспечивает более эффективное усвоение магния (50–60%) по сравнению с классическими модификаторами (35–45%), помимо этого сокращается в 1,3–1,5 раза продолжительность пироэффекта и, как следствие, уменьшается объем выбросов в атмосферу цеха.

По такому технологическому режиму была изготовлена опытная партия быстроохлажденной медно-магниевого лигатуры для дальнейших лабораторных и заводских испытаний при получении чугуна с шаровидным графитом. В качестве примера на рис. 1 представлена такая лигатура после измельчения.



Рис. 1. Литая быстроохлажденная лигатура после измельчения

Опытные плавки чугуна в лабораторных условиях проводили на индукционной печи ИСТ-0.06 с кислой футеровкой. Опытную быстроохлажденную лигатуру Cu-Mg вводили в виде фракции размером 2–3 мм. Шихта для получения исходного расплава состояла из передельного рафинированного доменного чугуна (37%) и низкосернистого конверсионного стального лома (63%). Такое соотношение основных материалов обеспечивало минимальную концентрацию серы (порядка 0,016%) и получение в исходном сплаве 3,6–3,8% С. Недостающее количество кремния компенсировалось добавками ферросилиция ФС45 из расчета получения его в исходном чугуне не ниже 2,6%. Сфероидизирующую обработку чугуна осуществляли ковшевым методом при различных по величине добавках лигатуры (от 0,5 до 1,2%) к массе жидкого расплава в виде фракции размером 2–3 мм. Для вторичного модифицирования использовали гранулированную лигатуру на основе алюминия и РЗМ. После завершения процесса сфероидизации высокопрочный чугун разливали по литейным формам в заготовки, из которых вырезали образцы для исследования химического состава, микроструктуры и механических свойств. Обобщенные результаты исследований приведены в табл. 1, 2.

Установлено, что в зависимости от количества введенной лигатуры форма графита в чугуне изменилась от вермикулярной (при добавке 0,5%) до исключительно шаровидной (при добавке 1,2%). При

Таблица 1. Влияние добавок медь-магниевого лигатуры на химический состав чугуна

Количество и тип лигатуры	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Mg	Al
Исходный серый чугун	3,95	1,9	0,38	0,016	0,016	0,038	0,093		
0,5% Cu-Mg	3,85	2,21	0,39	0,015	0,019	0,047	0,36	0,016	–
0,8% Cu-Mg	3,73	2,16	0,38	0,012	0,018	0,046	0,62	0,033	–
1,2% Cu-Mg	3,7	2,10	0,37	0,016	0,016	0,041	0,96	0,051	–

Таблица 2. Влияние добавок медь-магниевого лигатуры на микроструктуру и твердость чугуна

Количество и тип лигатуры	Твердость НВ	Металлическая основа		Графит		
		перлит	феррит	форма	распределение	длина
Немодифицированный	196	П20	Ф80	ПГф2	ПГр1	ПГд(15–750)
0,5% Cu-Mg	229	П92	Ф8	ПГф2	ПГр1 ВГ	ПГд(15–45)
0,8% Cu-Mg	241	П96	Ф4	ВГф1 ШГф5	ВГр1 ШГр1	ШГд(25–45)
1,2% Cu-Mg	255	П(Ф0)	–	ШГф1	ШГр5	ШГд(15–45)

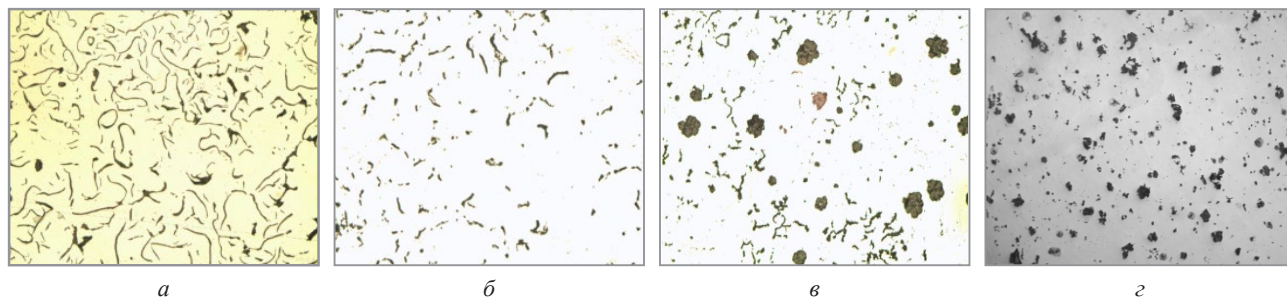


Рис. 2. Структура графита в чугуне, обработанного различными добавками медь-магниевого лигатуры (×100): а – исходный серый чугун; б – 0,5% лигатуры; в – 0,8% лигатуры; з – 1,2% лигатуры

этом концентрация остаточного магния увеличилась от 0,016 до 0,051%. На рис. 2 показаны микроструктуры графита в полученных чугунах.

Металлографический анализ полученных чугунов показал, что дополнительное легирование чугуна медью (от 0,36 до 0,96%) за счет вводимой лигатуры способствует перлитизации металлической основы сплава, что повлияло на твердость, которая возросла с 196 НВ в исходном сплаве до 255 НВ, в зависимости от величины присадки лигатуры.

Вместе с тем следует отметить наличие в структуре высокопрочного чугуна без вторичного графитизирующего модифицирования включений эвтектического цементита. Известно, что в чугунах с шаровидной и пластинчатой формой графита механизмы роста графито-аустенитной эвтектики существенно различаются. Если при кристаллизации серого чугуна пластинчатый графит является ведущей фазой и находится в постоянном контакте с расплавом, то при сферолитной кристаллизации включения графита окружены аустенитной оболочкой, что существенно тормозит их рост. Поэтому чугун с шаровидным графитом гораздо сильнее склонен к переохлаждению и уже при малых скоростях охлаждения даже в сплавах с высоким углеродным эквивалентом возможно локальное термическое и концентрационное переохлаждение микрообъемов, приводящее к образованию цементита.

На рис. 3 приведены микроструктуры полученных чугунов после травления. Инокулирующее модифицирование позволяет графитизировать сплав и исключить появление в литой структуре включений цементита (рис. 3, в), что является неотъемлемой частью внепечной обработки жидких чугунов.

На следующем этапе работы были проведены промышленные испытания быстроохлажденной медь-магниевого лигатуры на ОАО «Лидский литейно-механический завод». Плавку чугуна осуществляли в индукционной тигельной печи ИСТ-01. После расплавления шихты брали пробу на химический состав исходного чугуна. Сфероидизирующую обработку проводили ковшевым методом. Для этого в хорошо прогретый ковш емкостью 40 кг на дно вводили расчетное количество лигатуры Cu-Mg фракцией размером 2–5 мм, пригрузив ее прокаленной чугунной стружкой. Вторичное модифицирование

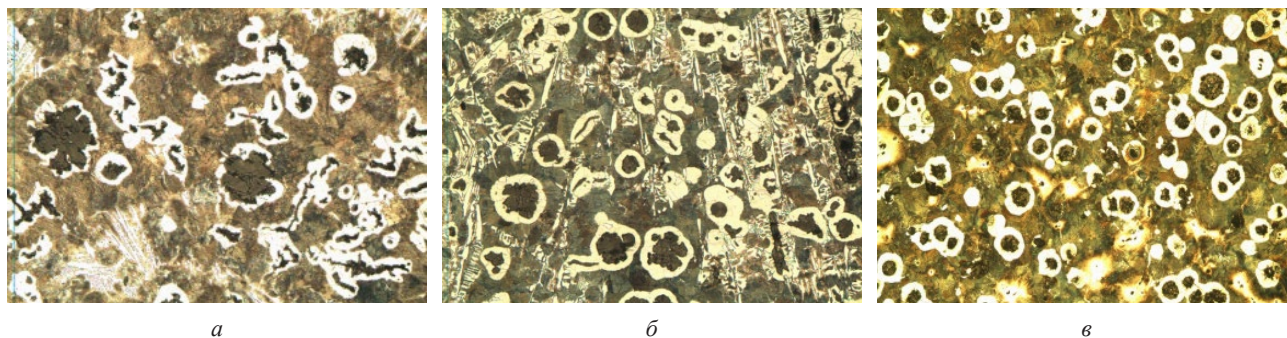


Рис. 3.– Металлическая основа высокопрочного чугуна, обработанного различными лигатурами: *а* – 0,8% лигатуры; *б* – 1,2% лигатуры без вторичного модифицирования; *в* – 1,2% лигатуры с вторичным модифицированием. *а* – *в* – $\times 200$, травлено

проводили традиционной присадкой ферросилиция ФС75. После завершения процесса сфероидизирующей обработки чугуна снимали шлак и отливали образцы для изучения химического состава, микроструктуры и твердости (рис. 4).



Рис. 4. Опытная отливка «Бугель» с литниковой системой из высокопрочного чугуна

Были проведены два эксперимента, результаты которых приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Влияние добавки лигатуры медь-магний на химический состав чугуна

Добавка лигатуры	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mg
Исходный чугун	3,75	2,17	0,80	0,074	0,048	0,16	0,16	–
0,8% лигатуры Cu-Mg	3,65	2,20	0,78	0,076	0,038	1,15	0,16	0,017
1,2% лигатуры Cu-Mg	3,40	1,69	0,97	0,079	0,021	1,07	0,18	0,057

Таблица 4. Влияние добавки лигатуры медь-магний на твердость и микроструктуру чугуна

Добавка лигатуры	НВ		Металлическая основа		Графит		
	исходная	после модифицирования	перлит	феррит	форма	распределение	длина
0,8% лигатуры Cu-Mg	202	234	П (100)	Ф 0,0	ПГф1	ПГр(1–3)	ПГд(25–90)
1,2% лигатуры Cu-Mg	229	415	ШГ	90% Ц	ШГр1	ШГф5	ШГд25

Установлено, что при добавках в ковш медь-магниевого лигатуры в количестве 0,8% шаровидный графит не получен, при этом остаточный Mg составил всего 0,017%. За счет дополнительного легирования чугуна медью (1,15%) была получена перлитная металлическая основа твердостью 234 НВ. При увеличении количества вводимой лигатуры (1,2%) наблюдали значительный пирроэффект. Остаточное содержание в чугуне Mg увеличилось и составило 0,057%. Это обеспечило формирование шаровидного графита (ШГр1, ШГф5, ШГд25). Однако за счет невысокого углеродного эквивалента в исходном сплаве и значительного переохлаждения чугуна в процессе сфероидизации в структуре обнаружено большое количество цементитной фазы, что существенно повысило его твердость. По сравнению с исходным серым чугуном она возросла почти в 2 раза и составила 415 НВ несмотря на проведенное вторичное модифицирование (рис. 5).

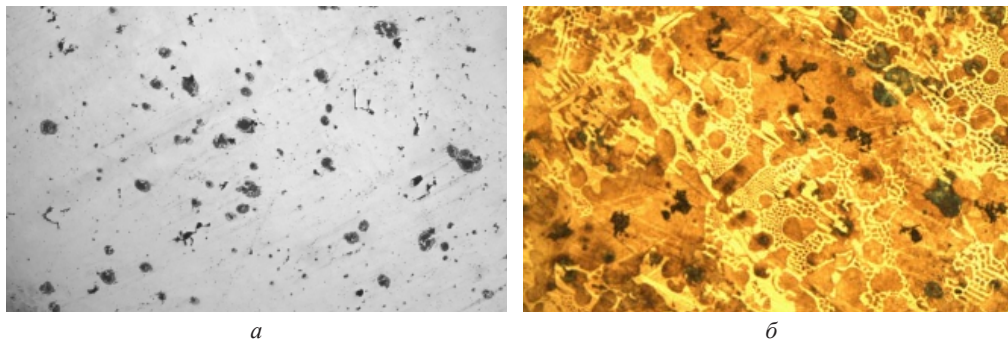


Рис. 5. Микроструктура высокопрочного чугуна:
a – шаровидный графит; *б* – металлическая основа. *a* – $\times 100$; *б* – $\times 200$

На практике для получения заданных механических свойств высокопрочного чугуна его подвергают высокотемпературной термической обработке, обеспечивающей перераспределение структурных составляющих. Это позволяет получить дисперсную перлитную структуру, что в сочетании с шаровидной формой графита обеспечивает высокий уровень механических свойств ЧШГ.

Была проведена термическая обработка литых образцов высокопрочного чугуна по следующему режиму: нагрев до температуры 950 °С, выдержка – 2 ч и охлаждение с печью. На рис. 6 приведены микроструктуры высокопрочного чугуна после ТО.

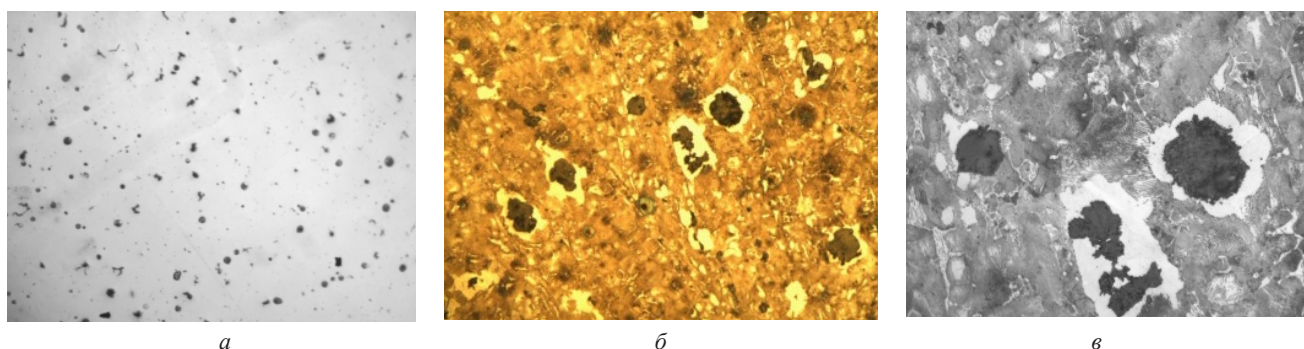


Рис. 6. Микроструктура высокопрочного чугуна после графитизирующего отжига (950 °С, выдержка 2 ч и охлаждение с печью):
a – графит; *б*, *в* – металлическая основа. *a* – $\times 100$; *б* – $\times 200$; *в* – $\times 500$

Металлографический анализ показал, что высокотемпературный отжиг опытных образцов высокопрочного чугуна по такому режиму позволяет практически полностью исключить эвтектический цементит и обеспечить формирование металлической основы сплава в виде дисперсного перлита и незначительного количества феррита вокруг шаровидного графита (рис. 6, *б*, *в*). Это позволит в сочетании с шаровидной формой графита обеспечить высокий уровень механических свойств ЧШГ.

Выводы

1. На основании ранее выполненных исследований показана перспективность применения быстроохлажденных сфероидизирующих лигатур при получении чугуна с шаровидным графитом, обеспечивающая за счет быстрого растворения высокую степень усвоения магния в процессе ковшевой обработки жидкого расплава.

2. С учетом ранее выполненных исследований в лабораторных условиях была изготовлена опытная партия медь-магниевого лигатуры методом литья с последующим быстрым охлаждением и дроблением на фракции.

3. Экспериментально исследовано влияние добавок быстроохлажденной лигатуры на химический состав, микроструктуру и свойства высокопрочного чугуна. Установлено, что такая лигатура обеспечивает при ковшевой обработке более высокое усвоение магния (50–60%) по сравнению с классическими модификаторами (35–45%), при этом в 1,5–2,0 раза сокращается продолжительность пироэффекта, что приводит к сокращению объема выбросов в атмосферу цеха.

4. На ОАО «Лидский литейно-механический завод» проведены промышленные испытания медь-магниевого лигатуры, которые показали возможность получения чугуна с шаровидным графитом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Калиниченко, А. С.** Использование сфероидизирующей «чипс»-лигатуры на основе меди, содержащей наноразмерные частицы оксида иттрия, для высокопрочного чугуна / А. С. Калиниченко [и др.] // Литье и металлургия. 2016. № 1 (82). С. 130–135.
2. **Слуцкий, А. Г.** Особенности сфероидизирующего модифицирования высокопрочного чугуна лигатурами на основе меди / А. Г. Слуцкий [и др.] // Литье и металлургия. 2016. № 2 (83). С. 110–115.
3. **Кулинич, И. Л.** Использование «чипс»-лигатуры на основе меди для высокопрочного чугуна / И. Л. Кулинич [и др.] // Литейные процессы: Межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск, 2016. Вып. 15. С. 11–14.
4. **Леках, С. Н.** Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С. Н. Леках, Н. И. Бестужев. Мн.: Навука і тэхніка, 1992. 269 с.
5. Применение сфероидизирующей лигатуры на основе меди при получении высокопрочного чугуна / А. Г. Слуцкий [и др.] // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2019. Вып. 40. С. 62–67.

REFERENCES

1. **Kalinichenko A. S.** Ispol'zovanie sferoidizirujushhej «chips»-ligatury na osnove medi, sodержashhej nanorazmernye chasticy oksida ittriya, dlja vysokoprochnogo chuguna [The use of spheroidizing «chips» -ligature based on copper containing nanosized particles of yttrium oxide for high-strength cast iron]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no.1 (82), pp. 130–135.
2. **Slutsky A. G.** Osobennosti sferoidizirujushhego modifitsirovanija vysokoprochnogo chuguna ligaturami na osnove medi [Features of spheroidizing modification of ductile iron by copper-based alloys]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 2 (83), pp. 110–115.
3. **Kulinich I. L.** Ispol'zovanie «chips»-ligatury na osnove medi dlja vysokoprochnogo chuguna [The use of «chips» -ligature based on copper for ductile iron]. *Litejnye processy: Mezhhregional'nyj sbornik nauchnyh trudov = Foundry processes: Interregional collection of scientific papers*, Magnitogorsk, 2016, Vyp. 15, pp. 11–14.
4. **Lekah S. N., Bestuzhev N. I.** Vnepechnaja obrabotka vysokokachestvennyh chugunov v mashinostroenii [Out-of-furnace machining of high-quality cast irons in mechanical engineering]. Minsk, Navuka i tjechnika Publ., 1992, 269 p.
5. **Slutsky A. G.** Primenenie sferoidizirujushhej ligatury na osnove medi pri poluchenii vysokoprochnogo chuguna [The use of spheroidizing ligatures based on copper in the production of ductile iron]. *Metallurgija: respublikanskij mezhhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2001, Vyp. 40, pp. 62–67.