

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫСТРООХЛАЖДЕННОЙ МЕДЬ-МАГНИЕВОЙ ЛИГАТУРЫ

А.Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, **И.Л. КУЛИНИЧ**, **Н.В. ЗЫК**, канд.
хим. наук, **Л.П. ДОЛГИЙ**, канд. техн. наук, **П.Д. ХОРОЛЬСКИЙ**
Белорусский национальный технический университет

Экспериментально исследовано влияние добавок быстроохлажденной лигатуры на основе меди и магния на химический состав, микроструктуру и свойства высокопрочного чугуна. Установлено, что такая лигатура обеспечивает при ковшовой обработке ЧШГ более высокое усвоение магния по сравнению с классическими модификаторами, при этом в 1,5–2,0 раза сокращается продолжительность пироэффекта, что приводит к сокращению объема выбросов в атмосферу цеха. Проведены промышленные испытания медь-магниевого лигатуры, которые показали реальную возможность получения чугуна с шаровидным графитом. Отработаны режимы отжига ЧШГ, позволяющие исключить из его структуры цементитную фазу.

Ключевые слова: лигатура на основе меди и магния, химический состав, микроструктура, свойства высокопрочного чугуна, промышленные испытания.

TEST RESULTS OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING CAST IRON WITH BALL GRAPHITE USING A QUICK COOLED COPPER-MAGNESIUM ALLOY

A.G. SLUTSKY, Ph.D in Technical Science, **I.L. KULINICH**, **N.V. ZYK**,
Ph.D in Chemical Science, **L.P. DOLGIY**, Ph.D in Technical Science,
P.D. KHOROLSKY
Belarusian National Technical University

The effect of additions of a fast-cooled master alloy based on copper and magnesium on the chemical composition, microstructure and properties of high-strength cast iron has been experimentally studied. It has been established that

such a master alloy provides a higher absorption of magnesium in the course of ladle processing of black-iron ore as compared with classical modifiers, while the duration of the pyroelectric effect is reduced by 1.5–2.0 times, which leads to a reduction in the volume of emissions into the workshop atmosphere. Industrial tests of a copper-magnesium alloy were carried out, which showed a real possibility of obtaining nodular cast iron. The regimes of annealing of black iron ore were worked out, allowing excluding the cementite phase from its structure.

Keywords: *master alloy based on copper and magnesium, chemical composition, microstructure, properties of ductile iron, industrial tests.*

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 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, 2] 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 использовались 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.

Были проведены лабораторные исследования технологических особенностей получения чугуна с шаровидным графитом с исполь-

зованием быстроохлажденной медно-магниевого «тяжелой» – лигатуры [3].

Установлено, что в зависимости от количества введенной лигатуры форма графита в чугуне изменяется от вермикулярной (при добавке 0,5 %) до исключительно шаровидной (добавка 1,2 %). При этом концентрация остаточного магния увеличилась от 0,016 % до 0,051 %.

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 отразилось на твердости, которая возросла со 196 НВ в исходном сплаве до 255 НВ, в зависимости от величины присадки лигатуры. При этом в структуре высокопрочного чугуна без вторичного графитизирующего модифицирования обнаружены включения эвтектического цементита. Известно, что чугун с шаровидной формой графита гораздо сильнее склонен к переохлаждению, которое в конечном счете приводит к образованию цементита. Инокулирующее вторичное модифицирование ЧШГ позволяет графитизировать сплав и минимизировать вероятность появления в литой структуре включений.

Для проведения промышленных испытаний технологии получения ЧШГ на ОАО «Лидский литейно-механический завод» в лабораторных условиях была изготовлена опытная партия быстроохлажденной медь-магниевого лигатуры. Плавка исходного чугуна осуществлялась 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 производили традиционной присадкой ферросилиция ФС75. После завершения процесса сфероидизирующей обработки чугуна снимали шлак и отливали образцы для изучения химического состава, микроструктуры и твердости.

Было проведено два эксперимента, обобщенные результаты которых приведены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1– 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 2 – Влияние добавки лигатуры медь-магний на твердость и микроструктуру чугуна

Добавка лигатуры	НВ		Металлическая основа		Графит		
	исх.	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 медно-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 пироэффект. 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.

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.

Лидским литейно-механическим заводом была передана опытная отливка из ЧШГ вместе с литниковой системой для проведения лабораторных исследований. Из шлакоуловителя были вырезаны образцы и проведена их термическая обработка по режиму, изображенному на рисунке 1.

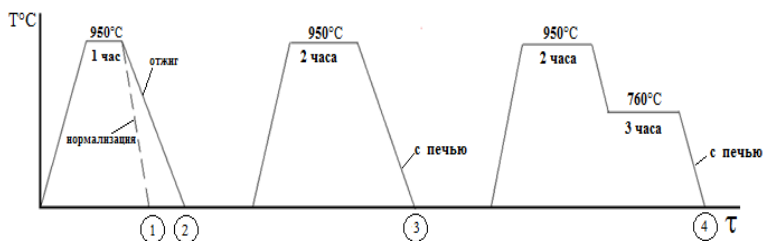


Рисунок 1 – Режимы термической обработки образцов из ЧШГ

Анализ полученных результатов показал, что при нормализации ЧШГ (режим 1) его твердость снизилась от 388НВ в литом состоянии до 341НВ. Еще большее снижение твердости до 277НВ имело место при отжиге (режим 2). Более длительная выдержка ЧШГ в процессе отжига позволила получить твердость в 248НВ (режим 3). Двойной отжиг чугуна не оказал существенного влияния на твердость, которая составила 241НВ (режим 4).

На следующем этапе работы были выполнены металлографические исследования структуры ЧШГ в зависимости от режима ТО, результаты которых приведены на рисунке 2.

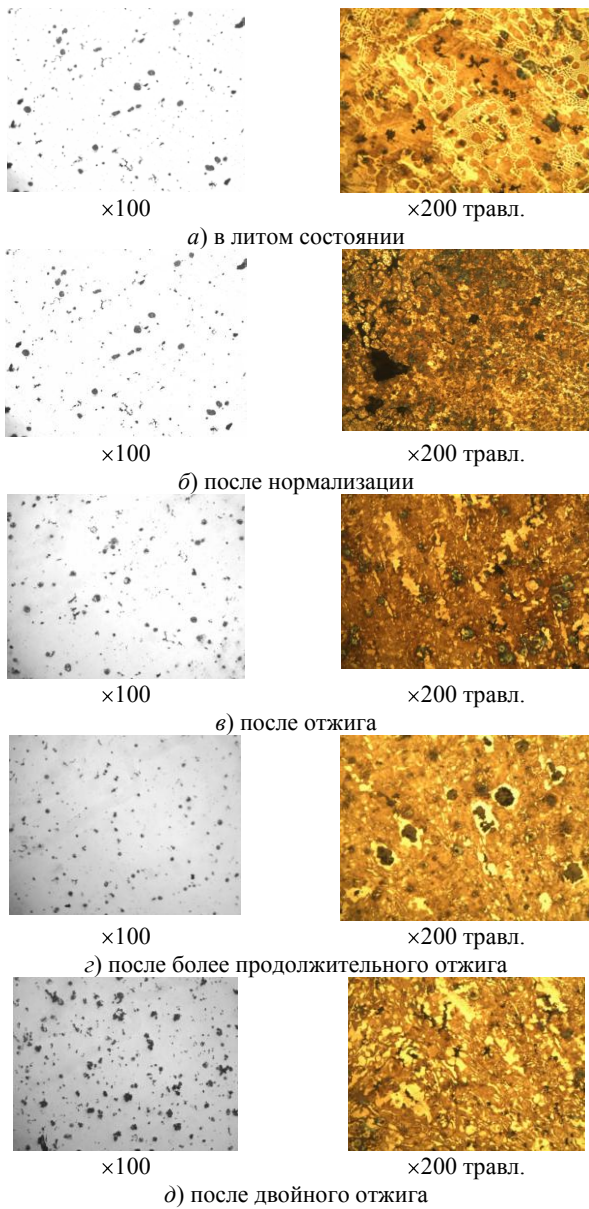


Рисунок 2 – Влияние режима ТО на микроструктуру ЧШГ

Анализ результатов исследований показал, что в литом состоянии (рисунок 2, а) структура металлической основы ЧШГ состоит из перлита и ледебурита (типичная для доэвтектического белого чугуна). Но на нетравленном шлифе наглядно просматривается шаровидный графит (ШГр1, ШГф4-5, ШГ4, ШГд25-45.)

После нормализации (рисунок 2, б) очевидно, что в структуре образовалось большое количество перлита и немного остаточного первичного цементита, а также небольшое количество феррита вокруг шаровидного графита. Что касается графитной фазы, то ее количество, форма и распределение практически не изменились, при этом несколько увеличился размер включений (ШГ45).

После непродолжительного отжига ЧШГ (рисунок 2, в) в структуре обнаружено до 40 % феррита в основном вокруг шаровидного графита, а также незначительное количество цементита. При этом заметно увеличилось общее количество графитной фазы (ШГ6-ШГ10).

После отжига чугуна в течение 2 ч (рисунок 2, г) получена структура, состоящая из 80–85 % перлита, остальное феррит, а также до 3 % цементита, при этом графит приобрел более шаровидную форму (ШГф4-5), увеличилось общее его количество (до ШГ10) и размеры включений (50 % ШГд90). При этом, как отмечалось ранее, твердость снизилась до 248НВ.

Двойной отжиг ЧШГ (рисунок 2, д) привел к сохранению в структуре перлита, при этом количество феррита увеличилось до 55–60 %. Заметно возросло количество графита (ШГ10-12) и его размеры (70 % ШГд90 остальное ШГд45 и ШГд25). Следует отметить, что твердость чугуна по сравнению с одностадийным отжигом снизилась незначительно и составила 241 НВ. Таким образом для получения ферритной структуры необходимо вторую стадию отжига проводить более продолжительно по времени.

Проведенные заводские испытания «тяжелой» медь-магниевого литейного сплава показали реальную возможность получения ЧШГ. При этом следует обратить особое внимание на химический состав исходного серого чугуна, обеспечив в нем более высокое содержание углерода и кремния, минимальную концентрацию карбидообразующих элементов, таких как хром и естественно минимальное содержание серы. Все это в сочетании с дополнительным легировани-

ем медью за счет сфероидизирующей лигатуры позволит стабильно получать ЧШГ повышенной прочности.

Список литературы

1. **Особенности** сфероидизирующего модифицирования высокопрочного чугуна лигатурами на основе меди / А.Г. Слущкий [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2 (83). – С. 110–115.

2. **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.*

3. **Технологические** особенности получения чугуна с шаровидным графитом с использованием быстроохлажденной медь-магниевого лигатуры / А. Г. Слущкий [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 2. – С. 15–21.

References

1. **Osobennosti sferoidiziruyushchego modifitsirovaniya vysokoprochnogo chuguna ligaturami na osnove medi** [Features of spheroidizing modification of high-strength cast iron with copper-based alloys] / A.G. Slutsky [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2016. – No. 2 (83) – P. 110–115.

2. **Ispol'zovanie «chips»-ligatury na osnove medi dlya vysokoprochnogo chuguna** [Using «chips» – copper-based master alloy for ductile iron] / I.L. Kulinich [et al.] // *Litejnye process: mezhregional'nyj sbornik nauchnyh trudov = Foundry processes: interregional collection of scientific papers*. – Magnitogorsk, 2016. – Vyp. 15. – P. 11–14.

3. **Tekhnologicheskie osobennosti polucheniya chuguna s sharovidnym grafitom s ispol'zovaniem bystroohlazhdennoj med'-magnievoj ligatury** [Technological features of producing nodular cast iron using fast-cooled copper-magnesium alloy] / A.G. Slutsky [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2020. No. 2. – P. 15–21.

Поступила 28.08.2020
Received 28.08.2020