

УДК 669.131.7

А.Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук,
Л.П. ДОЛГИЙ, канд. техн. наук,
И.Л. КУЛИНИЧ,
А.В. КОТКОВ,
А.И. ИВАНОВ,
А.В. БЫЧИК,
А.И. ДАНИЛОВА (БНТУ)

ПРИМЕНЕНИЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕЙ ЛИГАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

В практике литейного производства широко используется чугун с шаровидным графитом (ЧШГ), который характеризуется высокими свойствами и конкурирует с углеродистой сталью. Характеристики литых деталей из ЧШГ определяются химическим составом исходного сплава, условиями формирования отливки и технологией сфероидизирующего модифицирования. В первую очередь, свойства ЧШГ зависят от микроструктуры чугуна и количества сфероидального графита.

В настоящее время в Республике Беларусь при производстве чугуна с шаровидным графитом используются «легкие» сфероидизирующие модификаторы на основе ферросилиция типа ФСМг, что позволяет получать высокопрочный чугун в основном марок от ВЧ40 до ВЧ50.

При получении высокопрочных чугунов более высоких марок используются магнийсодержащие «тяжелые» лигатуры на основе меди либо никеля. При этом актуальным остается вопрос повышения эффективности таких лигатур и в первую очередь за счет повышения степени усвоения магния, снижения удельного расхода присадки, и минимизация пылегазовых выбросов в процессе сфероидизирующей обработки жидкого чугуна.

Ранее выполненные исследования [1–3] показали перспективность получения «чипс» лигатуры на основе порошков меди и магния с использованием дополнительного механического воздействия

(прокатка порошковой композиции в пластины различной толщины и высокоскоростная ударная деформация предварительно брикетированной лигатуры).

Целью настоящей работы является исследование особенностей получения более высоких марок чугуна с шаровидным графитом с использованием быстроохлажденной «тяжелой» лигатуры на основе меди и магния.

На первом этапе провели экспериментальные исследования технологических особенностей процесса литья такой лигатуры. В качестве основных материалов использовали металлический магний и кусковую медь. Плавка лигатуры осуществлялась на высокоскоростной индукционной установке. Вначале расплавляли кусковую медь и после ее перегрева вводили расчетное количество магния. Процесс вели под слоем специального флюса для защиты магния от окисления. Полученный расплав лигатуры разливали в холодные металлические формы, что обеспечивало ее быструю кристаллизацию. Этапы процесса представлены на рисунке 1.



а – металлический магний; *б* – лом меди; *в* – плавильный тигель с расплавом;
г – быстроохлажденная отливка лигатуры; *д* – лигатура измельченная
Рисунок 1 – Этапы процесса получения «тяжелой» магниесодержащей лигатуры

По такому технологическому режиму была изготовлена опытная партия лигатуры с целью дальнейших лабораторных и заводских испытаний при получении чугуна с шаровидным графитом.

Опытные плавки чугуна в лабораторных условиях проводили на индукционной печи ИСТ-0.06 с кислой футеровкой. Для сравнительной оценки использовали серийный сфероидизирующий модификатор ФСМг7 и опытную быстроохлажденную лигатуру Cu-Mg в виде фракции размером 2–3 мм. Шихта для получения исходного расплава состояла из передельного рафинированного доменного чугуна (37 %) и низкосернистого стального лома (63 %). Такое соотношение основных материалов обеспечивало минимальную кон-

центрацию серы (порядка 0,016 %) и получение в исходном сплаве 3,7 % С и 1,0–1,2 % Si. Низкое содержание кремния компенсировалось лигатурой ФСМг7. В дальнейшем при обработке чугуна лигатурой Cu-Mg в исходный чугун добавляли ферросилиций из расчета получения 1,9–2,2 % кремния. Модифицирование чугуна проводили ковшевым методом, величина добавки лигатуры составляла от 0,5 % до 1,2 % к весу жидкого чугуна. В качестве вторичного модифицирования использовали гранулированную лигатуру на основе алюминия и РЗМ. После завершения процесса сфероидизации высокопрочный чугун разливали по литейным формам в заготовки для последующего исследования химического состава, механических свойств и микроструктуры. Обобщенные результаты исследований представлены в таблицах 1 и 2.

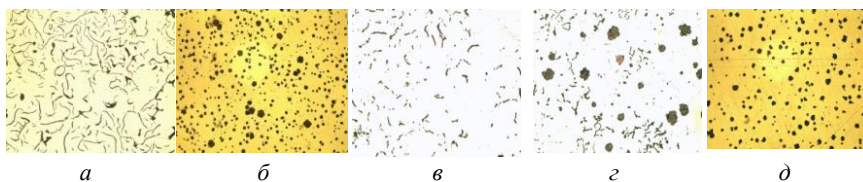
Таблица 1 – Влияние величины добавки магнийсодержащих лигатур на химический состав чугуна

Количество и тип лигатуры	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Mg	Al
2,0 % ФСМг7	3,91	1,63	0,35	0,019	0,015	0,033	0,08	0,033	0,04
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	3,70	2,10	0,37	0,016	0,016	0,041	0,96	0,051	–
Исходный серый чугун	3,95	1,9	0,38	0,016	0,016	0,038	0,093	–	–

Таблица 2 – Влияние величины добавки магнийсодержащих лигатур на микроструктуру и твердость чугуна

Количество и тип лигатуры	Твердость, НВ	Металлическая основа		Графит		
		перлит	феррит	форма	распределение	длина
2 % ФСМг7	239	П92	Ф8	ШГф1	ШГр5	ШГд(15-45)
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)
Не модифиц.	196	П20	Ф80	ПГф2	ПГр1	ПГд(15-750)

Установлено, что добавка лигатуры ФСМг7 позволила получить структуру чугуна с шаровидным графитом, при этом металлическая основа состоит из перлита (92 %) и незначительного количества феррита. При использовании сфероидизирующей лигатуры медь-магний в зависимости от ее количества структура графита полученного чугуна изменилась от вермикулярной формы (0,5 %) до исключительно шаровидной (1,2 %). При этом твердость полученного чугуна увеличилась до 255 НВ. За счет дополнительного легирования чугуна медью произошла перлитизация металлической основы сплава. В качестве примера на рисунке 2 приведены микроструктуры графита полученных чугунов.



a – исходный серый чугун ($\times 100$); *б* – 2 % ФСМг7 ($\times 100$);
в – 0,5 % Cu-Mg ($\times 100$); *г* – 0,8 % Cu-Mg ($\times 100$); *д* – 1,2 % Cu-Mg ($\times 100$)

Рисунок 2 – Структура графита в чугуне, обработанного магниесодержащей лигатурой

На следующем этапе были проведены промышленные испытания быстроохлажденной лигатуры медь-магний на ОАО «Лидский литейно-механический завод». Плавка 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 таблицах 3 и 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	3,65 3,40	1,56 1,69	0,94 0,97	0,078 0,079	0,052 0,021	0,16 1,07	0,17 0,18	– 0,057

Таблица 4 – 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 пирроэффект. Остаточное содержание в чугуне Mg увеличилось и составило 0,057 %. Это обеспечило формирование шаровидного графита (ШГр1, ШГф5, ШГд25). Однако за счет высокого переохлаждения в структуре обнаружено большое количество цементитной фазы. При этом твердость полученного чугуна с шаровидным графитом по сравнению с исходным серым чугуном возросла почти в 2 раза и составила 415 НВ, несмотря на проведенное вторичное модифицирование. Данное обстоятельство связано в первую очередь с недостаточно высоким углеродным эквивалентом исходного сплава и неэффективным вторичным модифицированием. На практике для

получения заданных механических свойств высокопрочного чугуна его подвергают высокотемпературной термической обработке, обеспечивающей распад первичного цементита, с последующим охлаждением на воздухе. Это позволяет получить дисперсную перлитную структуру, что в сочетании с шаровидной формой графита обеспечивает высокий уровень механических свойств ЧШГ.

Заключение

Экспериментально исследован процесс получения быстроохлажденной лигатуры медь-магний и изготовлены опытные образцы.

В лабораторных условиях исследовано влияние добавок магнийсодержащих лигатур на химический состав, микроструктуру и твердость высокопрочного чугуна. Установлено, что для формирования в структуре шаровидного графита необходимо обеспечить соотношение остаточного магния к остаточной сере не менее трех.

Проведены заводские испытания лигатуры и получены предварительные результаты.

Список литературы

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

3. 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.