

Технологические особенности получения чугуна с шаровидным графитом различных марок

Студенты: гр.10405120 Гулецкий Н.А., гр. 10405220 Ключко Д.А., Рукина К.А.,
гр.10405221 Татарлы Д.Д., гр. 10405222
Максимов Н.П.

Научные руководители – Слуцкий А.Г., Шейнерт В.А.
Белорусский национальный технический университет

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса получения чугуна с шаровидным графитом различных марок.

Объемы производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом расширяются. При этом актуальным является внедрение технологии получения более высоких марок ЧШГ для отливок ответственного назначения.

Основным фактором, определяющим эффективность сфероидизирующей обработки чугуна является состав применяемой магнийсодержащей лигатуры. Наиболее широко используются литые лигатуры на основе кремния, меди, никеля. Самыми распространёнными способами ковшевого модифицирования ЧШГ являются варианты «Сэндвич – процесса», когда порция модификатора закладывается в ковш перед заливкой исходного чугуна. Это позволяет в зависимости от типа лигатуры получить в отливках структуру и механические свойства, соответствующие маркам от ВЧ40 до ВЧ70 в литом состоянии и ВЧ 80-ВЧ100 после соответствующей термической обработки [1].

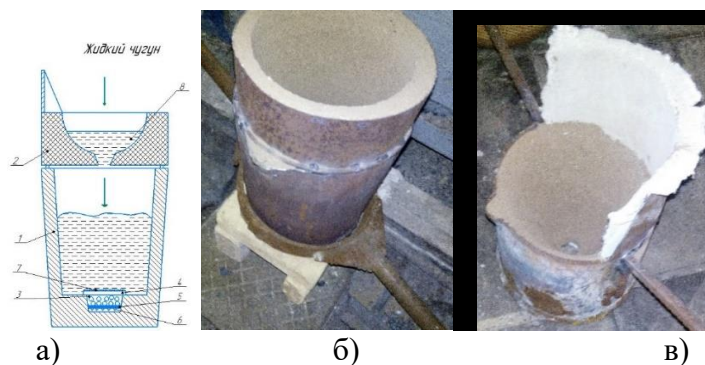
Большинство отливок из ЧШГ изготавливаются литьём в песчаные и керамические формы с умеренным темпом охлаждения отливки, которые позволяют получить феррито-перлитную основу в структуре. Для получения в отливках из ЧШГ перлитной, мартенситной и бейнитной структур необходимо обеспечить соответствующий тепловой режим формы и необходимую термическую обработку [1].

В настоящей работе приведены результаты лабораторных исследований технологических особенностей получения чугуна с шаровидным графитом различных марок методом ковшевого модифицирования магнийсодержащими лигатурами различного состава.

При выполнении исследований использовали индукционную плавильную печь ИСТ006, комплекс оборудования для термической обработки, анализа химического состава, микроструктуры, технологических и механических свойств высокопрочного чугуна.

В лабораторных условиях были изготовлены опытные образцы магнийсодержащих лигатур на основе ферросилиция и меди и никеля [2,3]. Были подобраны составы высокопрочных чугунов для марок ВЧ50, ВЧ70 и ВЧ80 (согласно ГОСТ7293-85).

В качестве основной шихты использовали низкосернистый стальной конверсионный лом и электротехническую сталь. Для науглераживания чугуна применяли измельченные огарки графитовых электродов фракцией 2-5мм. Корректировку чугуна по кремнию осуществляли добавками ферросилиция. После расплавления исходного чугуна отливалась клиновидная технологическая проба по излому которой оценивали величину отбела. Сфероидизирующую обработку чугуна осуществляли по методике, согласно работы [4]. На рисунке 1 приведены схема и общий вид специального ковша с переходной крышкой.



1 – ковш; 2 – переходная крышка; 3 – реакционная камера с лигатурой; 4 – стальная высечка; 5 – перегородка; 6 – графитизирующий модификатор; 7 – слой дисперсного карбюризатора; 8 – жидкий чугун

Рисунок 1 - Схема (а), общий вид ковша (б) и переходной крышки (в) для сфероидизирующего модифицирования ЧШГ.

На первом этапе работы провели сфероидизирующую обработку чугуна добавкой 2,0% магнийсодержащей лигатуры на основе ферросилиция (ФСМг7). Для вторичного модифицирования использовали гранулированный модификатор на основе алюминия с РЗМ (0,1 %). После завершения процесса сфероидизации высокопрочный чугун разливали по литейным формам. В дальнейшем были проведены исследования химического состава, микроструктуры и механических свойств полученного ЧШГ.

Анализ результатов, представленных в таблице 1 свидетельствует, что такая сфероидизирующая обработка позволила за счет образования шаровидного графита и увеличения количества перлита получить механические свойства ЧШГ соответствующие марке ВЧ45.

Таблица 1 – Влияние добавки магнийсодержащей лигатуры на основе ферросилиция на химический состав, микроструктуру, технологические и механические свойства ЧШГ.

№ п.п.	Состав чугуна углерод/кремний	Сфероидизирующая лигатура		Глубина отбела, мм	Твердость В/рочность	Микроструктура					
		тип	Количество, %			Металлическая основа		Графит			
						Перлит	Феррит	Форма Гф	Диаметр Гд	Распределение Гр	Количество Г, %
1	3,81/1,6 2	-	-	4,0	187/ 210	40	60	-	-	-	-
2	3,75/2,6 3	ФСМг 7	2,0	8,0	217/ 455	80	20	5	25- 25	1	10

В качестве примера на рисунке 2 представлены фотографии микроструктуры исходного серого чугуна (а) и высокопрочного (б)

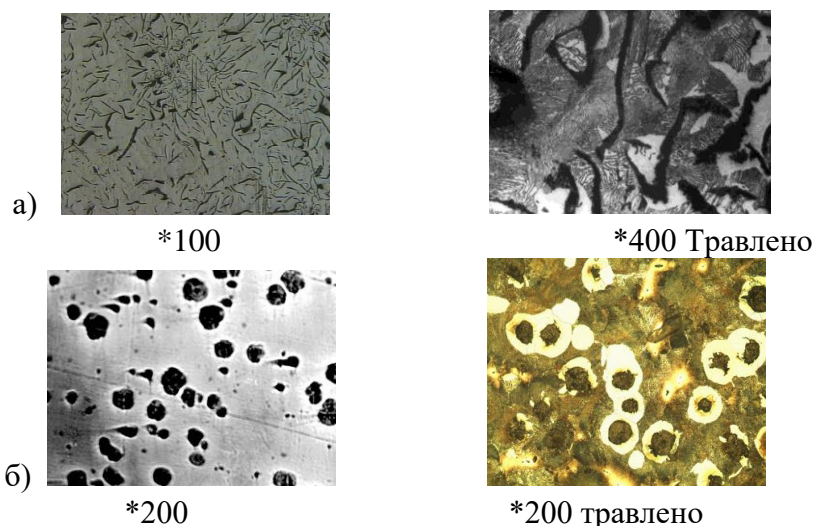


Рисунок 2 - Микроструктура исходного (а) и высокопрочного (б) чугуна

На следующем этапе работы провели исследования технологии получения в отливках структуры и механических свойств, соответствующих марке ВЧ 70.

За основу был выбран состав высокопрочного чугуна, содержащий 3,6 % углерода, 2,4-2,5 % кремния, 0,3-0,4 % марганца, 0,018 % серы, 0,06 % хрома, 0,035% олова. Для сфероидизирующей обработки чугуна использовали добавку 2% быстроохлажденной чипс-лигатуры, содержащей 5,7-6,3% магния, 1-1,5% кальция, 0,8-1,2% РЗМ, до 1,2% алюминия, 50-55% кремния, остальное железо.

В таблице 2 представлены результаты химического анализа исходного чугуна и после сфероидизирующей обработки, которые свидетельствуют о практически полном совпадении с расчетными данными по основным элементам.

Таблица 2–Химический состав исходного и высокопрочного чугуна.

Наименование сплава	Химический состав, %						
	C	Si	Mn	S	P	Mg	Sn
Исходный чугун	3,65	1,56	0,36	0,018	0,031	0,01	0,034
Высокопрочный чугун	3,58	2,48	0,37	0,012	0,043	0,056	0,035

Для обеспечения гарантированной перлитной структуры ЧШГ использовали термическую обработку отливок и образцов в виде нормализации по следующему режиму (нагрев до температуры до 930 °С выдержка 2 ч и охлаждение на воздухе) [5].

Обобщенные результаты исследований микроструктуры и механических свойств полученного высокопрочного чугуна приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Микроструктура и твердость высокопрочного чугуна в литом состоянии и после нормализации.

Режим ТО	Твёрдость НВ/ Прочность МПА	Металлическая основа, %		Графит			
		перлит	феррит, цементит	форма	распределение	длина, мкм	кол-во, %

Литое состояние	285/510	П100	Ц-10	ШГф4-5	ШГр1-3	ШГд 25-45	ШГ6
нормализация	269/720	П100	Ц-1	ШГф4-5	ШГр1-3	ШГд25-45	ШГ10

Анализ полученных результатов показал, что твердость чугуна в литом состоянии достаточно высокая и составляет 285 НВ а после нормализации она снизилась до 269НВ. При этом литая структура состоит из перлита и до 10 % цементитной фазы, а графит имеет шаровидную форму с размером включений 25–45 мкм. Нормализация отливок по вышеуказанному режиму позволила исключить в структуре цементитную фазу и обеспечить перлитную металлическую основу чугуна с пределом прочности при растяжении 720 МПа.

На рисунке 3 приведены фотографии микроструктуры высокопрочного чугуна в литом состоянии и после нормализации.

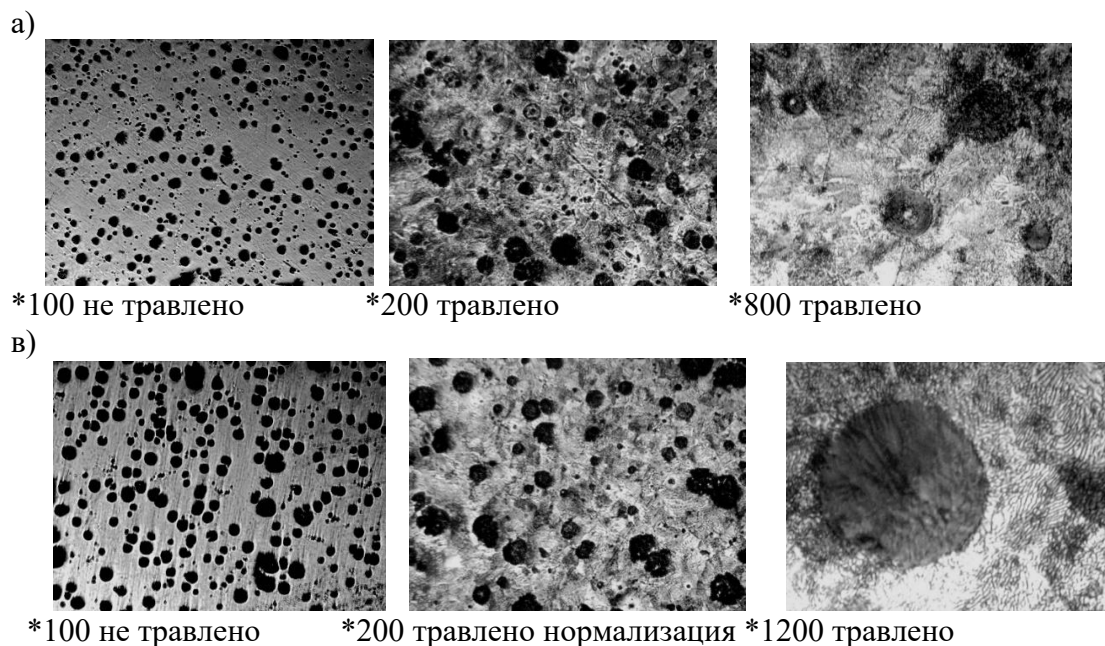


Рисунок 3 - Микроструктура высокопрочного чугуна в литом состоянии (а) и после нормализации (в)

Для получения высокопрочного чугуна выше марки ВЧ 70 использовали медь-магниевую лигатуру. Для гарантированного обеспечения таких прочностных характеристик исходная концентрация серы должна быть не выше 0,02 % при соотношении $M_{\text{гост.}}/S_{\text{ост.}} \geq 3$. Расчетное количество лигатуры составило 0,95 % к весу жидкого чугуна. Результаты химического анализа исходного чугуна и после сфероидизирующей обработки, представленные в таблице 3 свидетельствуют о совпадении с расчетными данными по основным элементам. При этом концентрация остаточного магния составила 0,051%, а содержание меди в высокопрочном чугуне увеличилось до 0,87%.

Таблица 3 – Влияние величины добавки магниесодержащей лигатуры на основе меди на химический состав чугуна

Количество и тип лигатуры	Химический состав, %							
		i	n		r	Cu	g	

(ЧШГ) 1,0 % Cu-Mg	,7	,10	,37	,016	,016	,041	0,8 7	,051	
(СЧ) серый чугу н	,95	,9	,38	,016	,016	,038	0,0 93		

Металлографический анализ показал (таблица 4), что литая структура ЧШГ состоит из перлита и порядка 14% цементита и 8% феррита, а графит имеет правильную шаровидную форму с диаметрами включений 25-45мкм (рисунок 4а). При этом твердость чугуна высокая и составляет 294НВ. Высокотемпературная обработка чугуна с последующим охлаждением на воздухе позволила устранить в структуре цементит и снизить твердость до 255НВ и за счет перлитизации обеспечить прочностные характеристики ЧШГ на уровне марки ВЧ80 (рисунок 4б,в).

Таблица 4 – Влияние величины добавки магнийсодержащих лигатур на основе меди на микроструктуру и прочность чугуна.

Наименование сплава	Твёрдость, НВ/прочность, МПа	Металлическая основа, %		Графит		
		перлит	Цементит/феррит	форма	распределение	длина
ЧШГ в литом состоянии	294/-	86	14/8	ШГф4-5	ШГр1	ШГд15-45
ЧШГ после нормализации	255/815	100	0/0	ШГф5	ШГр1	ШГд25-45
Серый чугун	196/200	20	0/80	ПГф2	ПГр1	ПГд45-180

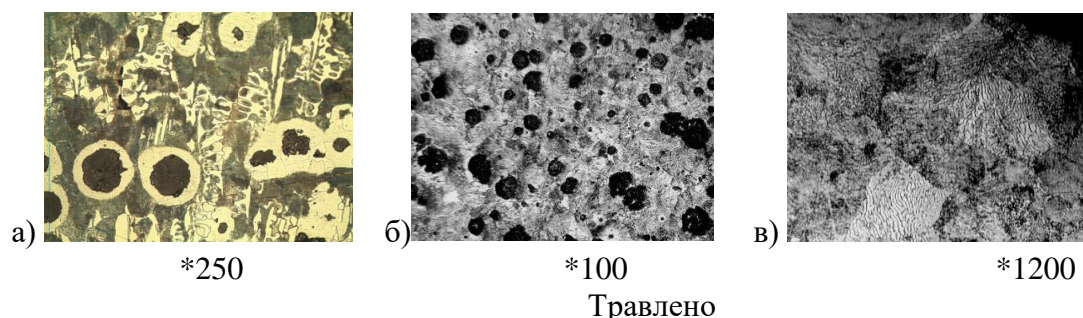


Рисунок 4. Микроструктура высокопрочного чугуна полученного с использованием медь-магниевого лигатуры в литом состоянии (а) и после нормализации (б,в)

На завершающем этапе проанализировали результаты экспериментальной плавки ЧШГ в ФТИ НАН РБ. Был предложен вариант бейнитного высокопрочного чугуна для отливки «нож-сучкорез» взамен сталей 20ХНМ, 20ХН2М следующего химического состава: углерод-3,5%, кремний-2,4%, марганец- 0,20%, медь-1,8%, никель-0,8%, хром-0,1%, сера не более 0,01%, магний-0,02-0,05%. Опытная плавка чугуна осуществлялась в индукционной тигельной печи емкостью 170кг. В качестве шихтовых материалов использовали передельный чугун ПЛ1 (82%) содержащий 4,39% углерода, 1,1% кремния, 0,09% марганца, 0,007% серы, 0,029% фосфора а также низкоуглеродистый стальной лом (18%).

Расчетный состав по углероду в исходном чугуне-3,6%. Для легирования чугуна использовали лом меди, ферромolibден, никелевую лигатуру. Для сфероидизации графита в ковш емкостью 180кг вводили тяжелую никель-магниевою лигатуру (15% магния) в количестве 1,7кг(1%). Вторичное модифицирование осуществляли за счет ферросилиция ФС75 (0,3%) на дно ковша.

По расплавлению основных компонентов шихты отливали контрольную технологическую пробу на отбел и осуществляли корректировку исходного чугуна по углероду и кремнию.

После его перегрева производили замеры температуры расплава и выпуск плавки в ковш для сфероидизирующей обработки и вели наблюдение. Затем удаляли шлак с поверхности чугуна и осуществляли его разливку по литейным формам. В таблицах 5,6 представлены результаты исследований химического состава, микроструктуры и механических свойств полученного высокопрочного чугуна.

Таблица 5 – Влияние величины добавки магнийсодержащей лигатуры на основе никеля на химический состав чугуна

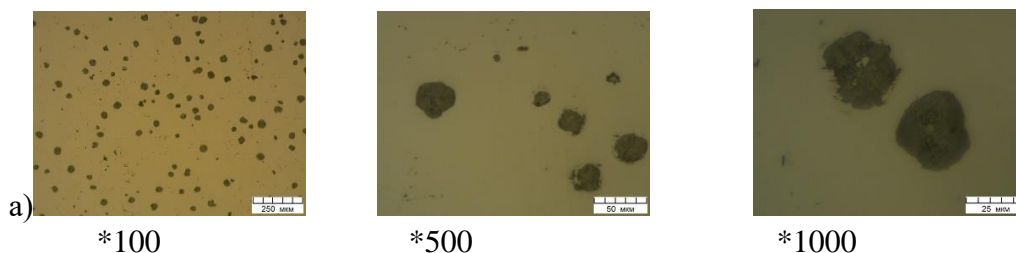
Количество и тип лигатуры	Химический состав, %								
		Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Mg	Ni
ЧШГ1,0 % Ni-Mg	3,39	2,58	0,56	0,016	0,016	0,034	1,47	0,049	0,73
Серый чугун	3,62	2,42	0,35	0,018	0,015	0,07	0,093	–	0,05

Результаты химического анализа исходного чугуна и после сфероидизирующей обработки, представленные в таблице 3 свидетельствуют о совпадении с расчетными данными по основным элементам. При этом концентрация остаточного магния составила 0,049%, а содержание меди в высокопрочном чугуне несколько ниже расчетных значений (1,47). При этом концентрация никеля, введенного в чугун сфероидизирующей лигатурой близка к расчетной и составила 0,73%.

Таблица 6 – Влияние величины добавки магнийсодержащих лигатур на основе никеля на микроструктуру и прочность чугуна

Наименование сплава	Твёрдость, НВ/прочность, МПа	Металлическая основа, %		Графит		
		перлит	Цементит/феррит	форма	распределение	длина
ЧШГ в литом состоянии	294/-	80	20/0	ШГф4-5	ШГр1	ШГд15-25
ЧШГ после нормализации	255/815	100	0/0	ШГф5	ШГр1	ШГд25-45

Металлографический анализ показал (таблица 6), что литая структура ЧШГ состоит из 80 % перлита и 20% цементита, а графит имеет правильную шаровидную форму с диаметрами включений 15-25мкм (рисунок 5а). При этом твердость чугуна высокая и составляет 294НВ. Для обеспечения требуемых свойств ЧШГ бала проведена термическая обработка, что позволило не только устранить цементит, но и обеспечить формирование бейнитной структуры, обеспечивающей высокие механические и эксплуатационные свойства ЧШГ на уровне марки ВЧ80.





Травлено

Рисунок 5 - Микроструктура высокопрочного чугуна полученного с использованием никель-магниевого лигатуры.(литое состояние)

а-графит при различном увеличении;

б- металлическая основа при различном увеличении.

Таким образом, в результате выполненных исследований подтверждена возможность получения ЧШГ различных марок. При этом определяющую роль играет качество исходной шихты по сере, выбор необходимого состава и величины ковшевой добавки сфероидизирующей лигатуры, вторичного графитизирующего модифицирования и режима термической обработки.

Список использованных источников

1. Российская Ассоциация Литейщиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2968/8460>. – Дата доступа: 06.04.2021.

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

4. Слуцкий А.Г., Гулецкий Н.А., Федорович Д.С., Бусел А.А. Исследование влияния режимов термической обработки на микроструктуру и свойства чугуна с шаровидным графитом. Сборник научных работ V Международной научно-практической интернет конференции студентов и магистрантов «Литье и металлургия 2022» Республиканской студенческой научно-технической конференции. 24-25 ноября – 2022. С– 56-59.

5.Слуцкий, А.Г. особенности получения чугуна с шаровидным графитом повышенной прочности / А.Г. Слуцкий, В.А. Шейнерт, Н.А. Гулецкий, Д.С. Федорович // Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 43,с. 125–133.