

Планирование экспериментов по внепечной обработке низкохромистого чугуна бор- и барийсодержащими добавками

¹*АУБАКИРОВ Дастан Рахметоллаевич, м.т.н., докторант, dastan_kstu@mail.ru,

²АКБЕРДИН Александр Абдуллович, д.т.н., профессор, зав. лабораторией, akberdin_38@mail.ru,

¹ИСАГУЛОВ Аристотель Зейнуллинович, д.т.н., профессор, aristotel@kstu.kz,

¹СУЛТАНГАЗИЕВ Руслан Бауыржанович, PhD, и.о. доцента, sulrus83@mail.ru,

³КЛЯЦКИЙ Вадим Викторович, главный инженер, atlant_84@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

²Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Казахстан, Караганда, ул. Ермакова, 63,

³ТОО «Каз Карбон», Казахстан, Караганда, Октябрьская промышленная зона,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В настоящее время для повышения эксплуатационных свойств (износостойкости, ударной вязкости, предела прочности) в отливках из чугуна применяют достаточно дорогостоящие способы и методы, такие как высокое легирование с последующей термообработкой, применение комплексного легирования дорогими добавками и внепечной обработкой сложными модификаторами, содержащими, редкие металлы и РЗМ. Использование некоторых современных технологий по улучшению качества литья – обработки металла ультразвуком, вибрацией, электромагнитным излучением и пр., ввиду невысокого уровня технического оснащения на большинстве из отечественных литейных заводов, к сожалению, представляется невозможным. Это даёт пространство для проведения новых исследований в направлении усовершенствования рабочих свойств, в нашем случае, низколегированных хромистых чугунов путём применения менее дорогостоящих, но достаточно эффективных приёмов, таких как внепечная обработка чугуна микродозами бор- и барийсодержащих добавок. В представленной работе предлагается эффективный метод решения проблемы повышения качества и эксплуатационной стойкости отливок из белого чугуна путём применения модифицирующих добавок, содержащих элементы бор и барий. Цель данной работы заключается в определении зависимости твёрдости низкохромистого чугуна от расхода вводимых модификаторов с использованием метода математического планирования металлургического эксперимента. Основные задачи, поставленные в данном исследовании, состоят:

- из оценки влияния ввода в низкохромистый чугун как уже известных модификаторов – ферробора и ферросиликобария, так и совершенно новой комплексной борбариевой добавки [6], содержащей одновременно оба активных компонента, на твёрдость и износостойкость металла;
- определения наиболее оптимальных расходов бор- и барийсодержащих модификаторов с точки зрения технико-экономической эффективности.

В данной статье приведены результаты исследования по повышению показателя твёрдости низкохромистого чугуна при модифицировании различными дозами ферробора, ферросиликобария и борбариевого ферросплава с применением метода математического планирования эксперимента.

Ключевые слова: низкохромистый чугун, математическое планирование, модифицирование чугуна, микролегирование, модификатор, ферробор, ферросиликобарий, борбариевый ферросплав, бор, барий, хром, износостойкость, твёрдость.

Введение

В настоящее время повышения эксплуатационных свойств (износостойкости, ударной вязкости, предела прочности) в отливках из промышленных марок чугунов достигают достаточно дорогостоящими методами – высоким легированием с последующей термообработкой, при-

менением комплексного легирования дорогими добавками и внепечной обработкой сложными модификаторами, содержащими, чаще всего, РЗМ.

В представленной работе предлагается другой подход к решению проблемы повышения качества и эксплуатационной стойкости отливок из

белого чугуна путём применения модифицирующих добавок, содержащих элементы бор и барий.

Известны факты положительного воздействия присадок, содержащих такие достаточно распространённые элементы, как бор и барий, на свойства продукции из стали различных марок [1-2]. При этом воздействие указанных элементов на структуру и свойства чугунов остаётся недостаточно изученным и, в целом, во всём мире научные исследования в области металловедения чёрных металлов и сплавов промышленного значения посвящены изучению сталей, поскольку промышленное применение чугунов незаслуженно считается менее перспективным, а исследования в данном направлении неактуальными. Наиболее значимые научные труды, посвящённые изучению структуры и свойств чугунов, относятся к периоду середины-конца XX века. В подавляющей части изданий того периода вопросы структурообразования, влияния отдельных элементов, повышения износостойкости белых чугунов попросту не включены либо представлены в виде краткой общеизвестной информации.

Всё это даёт пространство для проведения новых исследований в направлении усовершенствования рабочих свойств, в нашем случае, низколегированных хромистых чугунов путём внепечной обработки микродозами бор- и барийсодержащих добавок.

Методика исследований и используемые материалы

Методика повышения эксплуатационных свойств низкохромистого износостойкого чугуна, вкратце, заключается в модифицировании жидкого расплава, перед разливкой в формы, микродоз карботермического ферробора, ферросиликобария и борбариевого ферросплава [3]. Положительный эффект от введения данных присадок объясняется тем, что бор оказывает микролегирующее и компактирующее воздействие на форму структурных составляющих чугуна, а барий способствует измельчению и равномерному распределению металлической структуры и неметаллических включений. Применением комплексного ферросплава, содержащего одновременно бор и барий [4], рассчитывали на улучшение данных показателей и усиление эффекта действия бора на свойства структурных составляющих за счёт снижения его активности при комплексном введении с барием.

Необходимо уточнить, что говоря о повышении износостойких свойств чугуна, мы имеем в виду повышение таких характеристик, как твёрдость и ударная вязкость сплава.

В данной работе в качестве основной функции отклика был принят показатель твёрдости выплавленных образцов чугуна. В связи с тем, что ударостойкость образцов контролировалась на нестандартном оборудовании (заводском копре), во избежание внесения искажений, было принято решение, при общей оценке результатов, данные тестов на ударопрочность учитывать, но не включать в расчёты в качестве выходной характеристики.

В качестве основы послужил низкохромистый чугун (Cr от 1 до 5%) с половинчатой структурой. Для модифицирования чугуна применили:

1) ферробор ФБ12 (В ~ 14,63%), полученный карботермическим способом в лаборатории «Бор» ХМИ им. Ж. Абишева, г. Караганда [5];

2) ферросиликобарий марки ФС60Ba20 (Ba ~ 20,52%), производства Аксуский завод ферросплавов, г. Аксу;

3) комплексный борбариевый ферросплав (В ~ 8,88%, Ba ~ 3,92%), выплавленный в лаборатории «Бор» ХМИ им. Ж. Абишева, г. Караганда [4].

Опытные плавки велись в печи сопротивления Таммана методом переплава в алундовых тиглях. Состав материалов для плавки, использованных в опытах, приведён в таблице 1.

Дозы модификаторов вводились в жидкий расплав при температуре 1500°C на стальных штангах. После 30-секундной выдержки металла производили отливку образцов в вакуумируемых формах методом литья по газифицируемым моделям.

Из литых образцов вырезались фрагменты необходимых форм и размеров для измерения твёрдости на твердомере макроВиккерса Wilson VN 1150.

При планировании опытов руководствовались методом Протождяконова М. М. с применением разработок Малышева В. П. и использовали компьютерную программу Analiz 3.0 – «Расчёты по методу вероятностно-детерминированного планирования эксперимента».

Математическое планирование эксперимента по модифицированию хромистого низколегированного чугуна карботермическим ферробором

Принятые для проведения опытов расходы (в

Таблица 1 – Химический состав применяемых шихтовых материалов, %

Материалы	Содержание основных химических элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe	B	Ba	Al	Ca
Хромистый чугун	3,18	0,66	0,63	1,05	0,03	0,32	ост.	-	-	-	-
ФБ12	0,78	4,05	-	-	0,011	0,031	~80,0	14,63	-	0,40	-
ФС60Ba20	-	56,24	-	-	0,014	0,024	18,5	-	20,52	2,51	-
BaB ₆	-	19,56	-	-	-	-	ост.	8,88	3,92	-	1,87

% от массы чугуна) модификатора (карботермического ферробора марки ФБ12, производства ХМИИ им. Ж. Абишева, г. Караганда): 0,04 ($B \approx 0,003$); 0,08 ($B \approx 0,006$); 0,14 ($B \approx 0,010$); 0,20 ($B \approx 0,015$); 0,27 ($B \approx 0,020$). В скобках указано расчётное процентное содержание основного модифицирующего элемента бора в чугуне после ввода ферродобавки.

В таблице 2 приведены факторы эксперимента по модифицированию низкохромистого чугуна карботермическим ферробором.

В таблице 3 приведён план 6-факторного эксперимента на 5 уровнях.

Методом наименьших квадратов обработали данные таблицы 3 и получили частные зависимости в виде линейных и полиномиальных функций:

1) от фактора X_1 (p_{Cr} , содержание хрома в чугуне, %) уравнение вида

$$Y_1 = 55,4 + 0,48X_1, \quad (1)$$

2) от фактора X_2 (Q_{FeB} , расход ферробора, %):

$$Y_2 = 54,76 + 25,67X_2 - 59,66X_2^2. \quad (2)$$

В таблице 4 приведены экспериментальные значения твёрдости на поверхности образцов из низкохромистого чугуна, обработанного карботермическим ферробором.

Как видно из таблицы 4, средние значения по каждой функции совпадают с общим средним значением, что является свидетельством отсутствия ошибки.

На рисунке 1 показаны графики полученных частных зависимостей, построенные по данным таблицы 4.

В таблице 5 показаны расчётные значения частных функций.

Поскольку средние значения расчётных значений функций полностью совпали с экспериментальными, выборка частных зависимостей проведена правильно.

Исследуемые функции оказались значимыми,

Таблица 2 – Факторы и их уровни

Факторы		Уровни факторов				
		1	2	3	4	5
X_1	Содержание хрома, p_{Cr} , мас. %	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
X_2	Расход карботермического ферробора, Q_{FeB} , мас. %	0,04	0,08	0,14	0,20	0,27

Таблица 3 – План эксперимента по модифицированию чугуна ферробором и результаты опытов Y_3 (твёрдость по Роквеллу – HRC, ед.)

№ п/п	p_{Cr} , мас. %	Q_{FeB} , мас. %	Результат эксперимента (Y_3), твёрдость HRC, ед.	№ п/п	p_{Cr} , мас. %	Q_{FeB} , мас. %	Результат эксперимента (Y_3), твёрдость HRC, ед.
1	1,0	0,04	53	14	2,0	0,27	56
2	1,0	0,14	57	15	2,0	0,20	56
3	1,0	0,08	57	16	5,0	0,04	57
4	1,0	0,27	57	17	5,0	0,14	57
5	1,0	0,20	56	18	5,0	0,08	57
6	3,0	0,04	55	19	5,0	0,27	59
7	3,0	0,14	58	20	5,0	0,20	60
8	3,0	0,08	56	21	4,0	0,04	56
9	3,0	0,27	57	22	4,0	0,14	57
10	3,0	0,20	57	23	4,0	0,08	57
11	2,0	0,04	57	24	4,0	0,27	58
12	2,0	0,14	57	25	4,0	0,20	58
13	2,0	0,08	56				

Таблица 4 – Экспериментальные значения частных функций

Функция	Уровень					Среднее значение, $Y_{ср.з.}$
	1	2	3	4	5	
$Y_{1з}$	56,0	56,4	56,6	57,2	58,0	56,84
$Y_{2з}$	55,6	56,6	57,2	57,4	57,4	56,84

что показано в таблице 6.

Соответственно, полученное далее обобщённое уравнение можно будет считать адекватным.

Применив формулу для описания статистических многофакторных зависимостей, предложенную М.М. Протодьяконовым (старшим), используя ранее полученные частные зависимости, получим обобщённое многофакторное уравнение следующего вида:

$$HRC_{\tau(FeB)} = 53,373 + 0,462p_{Cr} + 25,02Q_{FeB} + 0,217p_{Cr}Q_{FeB} - 58,149Q_{FeB}^2 - 0,504p_{Cr}Q_{FeB}^2. \quad (3)$$

Математическое планирование эксперимента по модифицированию хромистого низколегированного чугуна ферросиликобарием

Расходы модификатора (в % от массы металла) – ферросиликобария марки ФС60Ba20, производства Аксуский ферросплавный завод, г. Аксу: 0,03 (Ba ≈ 0,003); 0,05 (Ba ≈ 0,005); 0,08 (Ba ≈ 0,008); 0,10 (Ba ≈ 0,010); 0,15 (Ba ≈ 0,015).

Получены частные зависимости:

1) от фактора X_1 (содержание хрома в чугуне) уравнение вида

$$Y_1 = 58,04 + 0,4X_1, \quad (4)$$

2) от фактора X_2 (расход ферросиликобария):

$$Y_2 = 55,44 + 99,95X_2 - 519,6X_2^2. \quad (5)$$

Средние значения по каждой функции совпадают с общим средним значением (таблица 9), что говорит о правильной выборке опытных точек.

На рисунке 2 показаны графики полученных частных зависимостей.

Подставив уравнения (4) и (5) в формулу Протодьяконова, получим обобщённое многофакторное уравнение следующего вида:

$$HRC_{\tau(FeSiBa)} = 54,308 + 0,374p_{Cr} + 97,909Q_{FeSiBa} + 0,675p_{Cr}Q_{FeSiBa} - 508,989Q_{FeSiBa}^2 - 3,508p_{Cr}Q_{FeSiBa}^2. \quad (6)$$

Математическое планирование эксперимента по модифицированию хромистого низколегированного чугуна борбариевым ферросплавом

Принятые расходы модификатора – борбариевого ферросплава, производства ХМИ им. Ж. Абишева, г. Караганда (% от массы металла): 0,07 (Ba ≈ 0,001/B ≈ 0,003); 0,14 (Ba ≈ 0,003/B ≈ 0,006); 0,22 (Ba ≈ 0,004/B ≈ 0,010); – 0,34 (Ba ≈ 0,007/B ≈ 0,015); 0,45 (Ba ≈ 0,009/B ≈ 0,020).

Частные зависимости, полученные в результа-

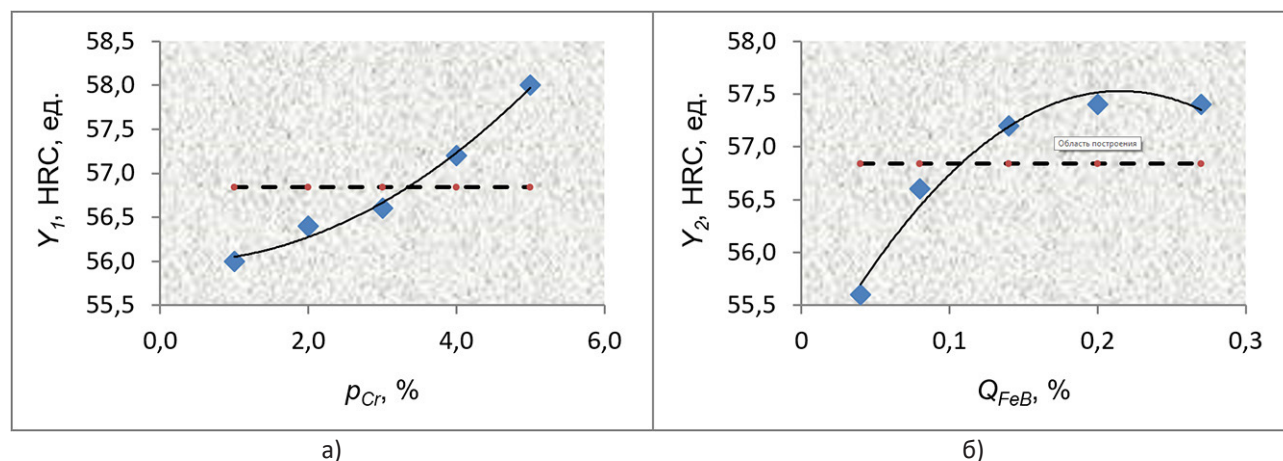


Рисунок 1 – Частные зависимости твёрдости чугуна (HRC)

Таблица 5 – Расчётные значения частных функций

Функция	Уровень					Среднее значение, $Y_{ср.т.}$
	1	2	3	4	5	
$Y_{1r} = 55,4 + 0,48X_1$	55,88	56,36	56,84	57,32	57,8	56,84
$Y_{2r} = 54,76 + 25,67X_2 - 59,66X_2^2$	56,075	56,364	56,797	57,23	57,735	56,84

Таблица 6 – Коэффициенты корреляции и их значимость для частных функций

Функция	R	t_r	Значимость функции
Y_1	0,9731	25,9652 > 2	функция значима
Y_2	0,9889	65,5683 > 2	функция значима

Таблица 7 – Факторы эксперимента и их уровни						
Факторы		Уровни факторов				
		1	2	3	4	5
X_1	Содержание хрома, p_{Cr} , мас. %	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
X_2	Расход ферросиликобария, Q_{FeSiBa} , мас. %	0,03	0,05	0,08	0,10	0,15

Таблица 8 – План эксперимента по модифицированию чугуна ферросиликобарием и результаты опытов Y_3 (твёрдость по Роквеллу – HRC)							
N п/п	p_{Cr} , мас. %	Q_{FeSiBa} , мас. %	Результат эксперимента (Y_3), твёрдость HRC, ед.	N п/п	p_{Cr} , мас. %	Q_{FeSiBa} , мас. %	Результат эксперимента (Y_3), твёрдость HRC, ед.
1	1,0	0,03	57	14	2,0	0,15	58
2	1,0	0,08	59	15	2,0	0,10	59
3	1,0	0,05	60	16	5,0	0,03	59
4	1,0	0,15	57	17	5,0	0,08	61
5	1,0	0,10	59	18	5,0	0,05	58
6	3,0	0,03	58	19	5,0	0,15	61
7	3,0	0,08	60	20	5,0	0,10	61
8	3,0	0,05	60	21	4,0	0,03	58
9	3,0	0,15	59	22	4,0	0,08	61
10	3,0	0,10	60	23	4,0	0,05	59
11	2,0	0,03	57	24	4,0	0,15	59
12	2,0	0,08	60	25	4,0	0,10	61
13	2,0	0,05	60				

Таблица 9 – Экспериментальные значения частных функций						
Функция	Уровень					Среднее значение, $Y_{ср.э.}$
	1	2	3	4	5	
$Y_{1э}$	58,4	58,8	59,4	59,6	60,0	59,24
$Y_{2э}$	57,8	59,4	60,2	60,0	58,8	59,24

Таблица 10 – Расчётные значения частных функций						
Функция	Уровень					Среднее значение, $Y_{ср.т.}$
	1	2	3	4	5	
$Y_{1т} = 58,04 + 0,4X_1$	58,45	58,85	59,25	59,65	60,05	59,25
$Y_{2т} = 55,44 + 99,95X_2 - 519,6X_2^2$	58,57	58,98	59,35	59,52	59,84	59,25

Таблица 11 – Коэффициенты корреляции и их значимость			
Функция	R	t_R	Значимость функции
Y_1	0,9899	$69,9958 > 2$	функция значима
Y_2	0,9777	$31,4242 > 2$	функция значима

те обработки данных:

1) от фактора X_1 (содержание хрома в чугуне)
уравнение вида

$$Y_1 = 56,66 + 0,54X_1, \quad (7)$$

2) от фактора X_2 (расход борбариевого ферро-сплава):

$$Y_2 = 55,46 + 21,12X_2 - 29,96X_2^2. \quad (8)$$

Зависимость изменения твёрдости на поверхности чугуновых образцов, обработанных борбариевой добавкой, показана на рисунке 3.

Обобщённое многофакторное уравнение имеет вид:

$$HRC_{\tau(BaB6)} = 53,918 + 0,514p_{Cr} + 20,533Q_{BaB6} + 0,196p_{Cr}Q_{BaB6} - 29,127Q_{BaB6}^2 - 0,278p_{Cr}Q_{BaB6}^2. \quad (9)$$

Выводы

С использованием метода планирования эксперимента получены математические обобщённые уравнения зависимости изменения твёрдости чугуна от степени легирования хромом (от 1 до 5% по массе), расхода ферробора (от 0,04 до 0,27%), ферросиликобария (от 0,03 до 0,15%) и борбариевого ферросплава (от 0,07 до 0,45% от

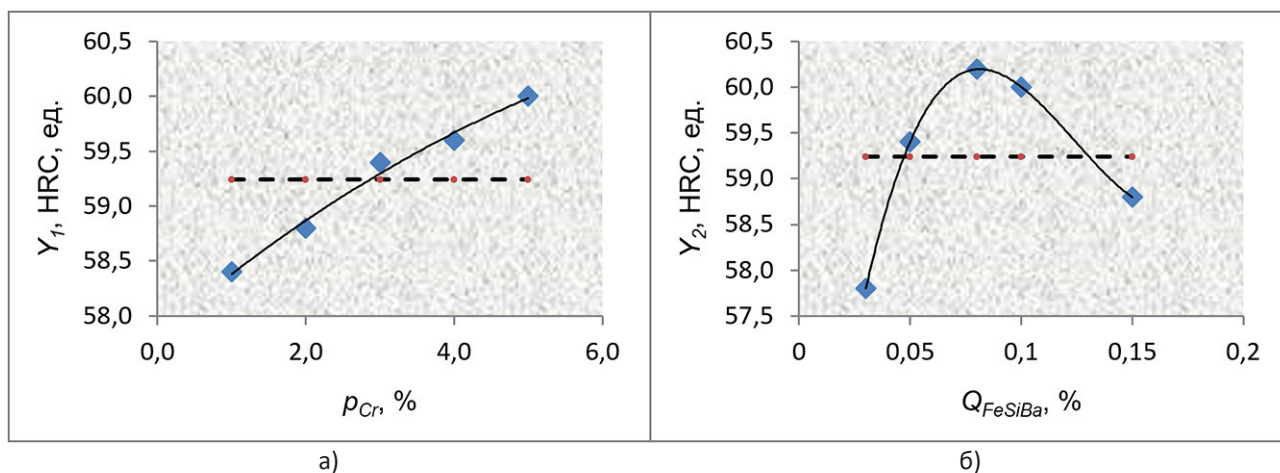


Рисунок 2 – Частные зависимости твёрдости чугуна (HRC)

Таблица 12 – Факторы эксперимента по модифицированию хромистого низколегированного чугуна борбариевым ферросплавом

Факторы		Уровни факторов				
		1	2	3	4	5
X_1	Содержание хрома, p_{Cr} , мас. %	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
X_2	Расход борбариевого модификатора, Q_{BaB6} , мас. %	0,07	0,14	0,22	0,34	0,45

Таблица 13 – План эксперимента по модифицированию чугуна борбариевой добавкой и результаты опытов (твёрдость по Роквеллу – HRC)

N п/п	p_{Cr} , мас. %	Q_{BaB6} , мас. %	Результат эксперимента (Y_3), твёрдость HRC, ед.	N п/п	p_{Cr} , мас. %	Q_{BaB6} , мас. %	Результат эксперимента (Y_3), твёрдость HRC, ед.
1	1,0	0,07	56	14	2,0	0,45	59
2	1,0	0,22	58	15	2,0	0,34	58
3	1,0	0,14	57	16	5,0	0,07	58
4	1,0	0,45	57	17	5,0	0,22	59
5	1,0	0,34	58	18	5,0	0,14	59
6	3,0	0,07	57	19	5,0	0,45	61
7	3,0	0,22	58	20	5,0	0,34	60
8	3,0	0,14	58	21	4,0	0,07	57
9	3,0	0,45	59	22	4,0	0,22	59
10	3,0	0,34	59	23	4,0	0,14	59
11	2,0	0,07	55	24	4,0	0,45	59
12	2,0	0,22	59	25	4,0	0,34	60
13	2,0	0,14	58				

Таблица 14 – Экспериментальные значения частных функций

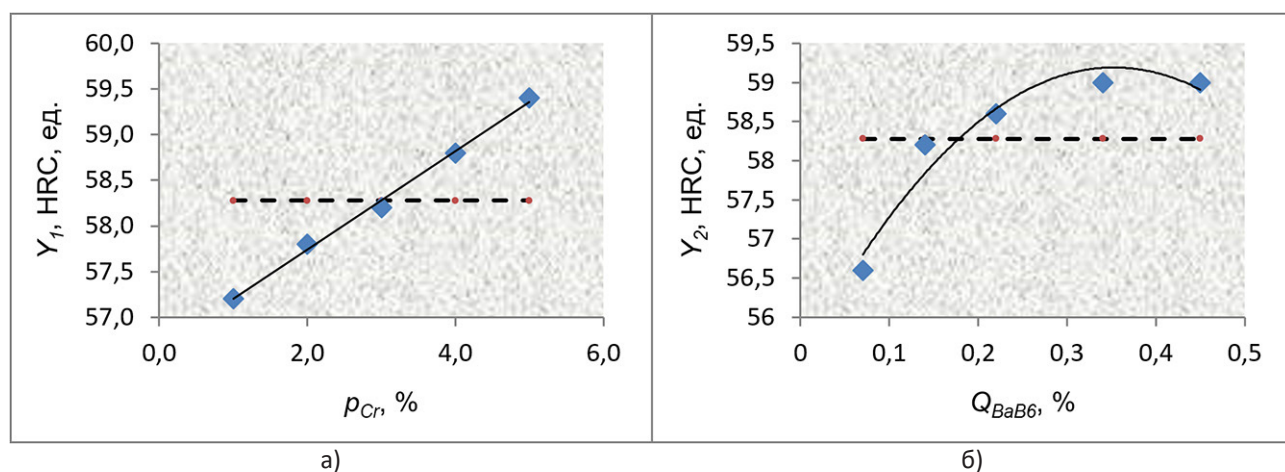
Функция	Уровень					Среднее значение, $Y_{\text{ср.э.}}$
	1	2	3	4	5	
$Y_{1э}$	57,2	57,8	58,2	58,8	59,4	58,28
$Y_{2э}$	56,6	58,2	58,6	59,0	59,0	58,28

Таблица 15 – Расчётные значения частных функций

Функция	Уровень					Среднее значение, $Y_{\text{ср.т.}}$
	1	2	3	4	5	
$Y_{1т} = 56,66 + 0,54X_1$	57,03	57,92	58,45	58,83	59,12	58,27
$Y_{2т} = 55,46 + 21,12X_2 - 29,96X_2^2$	56,93	57,83	58,41	58,96	59,31	58,29

Таблица 16 – Коэффициенты корреляции и их значимость

Функция	R	t_R	Значимость функции
Y_1	0,9975	$282,1329 > 2$	функция значима
Y_2	0,9716	$24,5364 > 2$	функция значима



а) от содержания хрома, $Y_1 = f(p_{Cr}, \%)$; б) от расхода борбариевой добавки, $Y_2 = f(Q_{BaB6}, \%)$

Рисунок 3 – Частные зависимости твёрдости чугуна (HRC)

массы чугуна).

Исходя из результатов эксперимента, повышение содержания хрома в чугуне на каждый 1% способствует линейному росту твёрдости, в среднем, на 0,5 единиц HRC. Такая тенденция вполне характерна для чугунов с содержанием хрома до 12%, когда в структуре чугуна преобладают карбиды Me_3C (микротвёрдость H_{50} до 1100 единиц), а основная часть введённого в шихту в относительно небольшом количестве хрома легирует металлическую основу – перлит, и лишь малая его доля затрачивается на образование собственных карбидов Cr_3C_2 .

Установлено, что прирост показателя твёрдости чугуна, содержащего всего 1,0% Cr, в результате его внепечной обработки микродозами (от 0,04 до 0,14% по массе) использованных модифи-

каторов сопоставим по значению с результатами, полученными при повышении легированности чугуна хромом до 5% без модифицирования, что говорит о более высокой технологической и экономической эффективности применения модифицирующих добавок без повышения расхода феррохрома как основного легирующего компонента.

Пользуясь полученным уравнением (4), установили, что рациональный расход карботермического ферробора, при котором наблюдается максимальный прирост твёрдости низкохромистого чугуна, лежит в пределах 0,04-0,14% от массы расплава, дальнейшее повышение расхода FeB12 представляется менее рациональным. Соответственно оптимального прироста твёрдости низкохромистого чугуна можно достичь введением в

расплав 0,08% ферробора, не повышая при этом содержания хрома в чугунах, оставляя его значение на минимальном уровне около 1-3%, поскольку дальнейшее повышение расхода феррохрома в шихте является малоэффективным.

Согласно полученному многофакторному уравнению (6), оптимальный расход ферросиликобария ФС60Ба20 для модифицирования низкохромистого чугуна находится в пределах 0,05% по массе, при содержании хрома от 1 до 3%. Сильные графитизирующие свойства как самого

бария, так и содержащегося в добавке в больших количествах кремния (56,24% по массе), при более высоких расходах ФС60Ба20 оказывают негативное воздействие на твёрдость.

Также установлено, что наиболее рациональным, с точки зрения повышения твёрдости, представляется расход борбариевого ферросплава при модифицировании низкохромистого чугуна равный 0,07-0,14% по массе, при содержании хрома 1-3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротин Д.В. Эффективность повышения качества стали за счёт микролегирования. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, Изд-во Препринт, 2013. – 50 с.
2. Гасанли Р.К. Влияние способов модифицирования на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2013. – № 1. 2 (46). – С. 74-78.
3. A.A. Akberdin, A.Z. Issagulov, S.S. Kvon, Ye.P. Chsherbakova, D.R. Aubakirov, G.H. Adamova. Modifier Effect on Mechanical Properties of Low-Chromium Cast Iron // «Metalurgija» Zagreb (Croatia), – 2020. – Volume 1, Issue 59. – pp. 141-143.
4. Akberdin A., Karbayev M., Kim A., Sultangaziyev R. Production of Borbarium Ferroalloy // «Metalurgija» Zagreb (Croatia). – 2020. – Volume 1, Issue 59. – pp. 141-143.
5. Ким А.С., Акбердин А.А., Султангазиев Р.Б. Экспериментальные исследования по выплавке карботермического ферробора с использованием различных видов борсодержащего сырья // Промышленность Казахстана. – 2019. – № 2 (106). – С. 68-70.
6. Поддубный А.Н. Факторы, определяющие твёрдость и износостойкость отливок из Fe-C сплавов // Литейное производство. – 2018. – № 10. – С. 2-6.

Құрамында бор және барий бар қоспалармен төмен хромды шойындарды пештен тыс өңдеу бойынша тәжірибелерді жоспарлау

¹*АУБАКИРОВ Дастан Рахметоллаевич, т.ғ.м., докторант, dastan_kstu@mail.ru,

²АКБЕРДИН Александр Абдуллович, т.ғ.д., профессор, зертхана меңгерушісі, akberdin_38@mail.ru,

¹ИСАҒҰЛОВ Аристотель Зейнуллинович, т.ғ.д., профессор, aristotel@kstu.kz,

¹СУЛТАНГАЗИЕВ Руслан Бауыржанович, PhD, доцент м.а., sulrus83@mail.ru,

³КЛЯЦКИЙ Вадим Викторович, бас инженер, atlant_84@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

²Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты, Қазақстан, Қарағанды, Ермеков көшесі, 63,

³«Каз Карбон» ЖШС, Қазақстан, Қарағанды, Октябрь өнеркәсіптік аймағы,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қазіргі таңда шойын құймаларында өнімділік қасиеттерін (тозуға төзімділік, соққыға төзімділік, созылу беріктігі) жақсарту үшін жоғары легірлеуден, термиялық өңдеуден кейін, қымбат қоспалармен күрделі легірлеуді қолдану және сыртқа шығару сияқты қымбат әдістер мен тәсілдер қолданылады. Құрамында сирек металдар мен СЖМ бар күрделі модификаторлармен пештен өңдеу. Құйма сапасын арттыру үшін кейбір заманауи технологияларды қолдану – металды ультрадыбыспен, дірілмен, электромагниттік сәулеленумен және т.б. өңдеу, отандық құю зауыттарының көпшілігінде техникалық жабдықталу деңгейінің жеткіліксіз болуына байланысты, өкінішке орай, мүмкінсіз болып табылады. Бұл біздің жағдайда қымбат емес, бірақ жеткілікті, тиімді әдістерді, мысалы, шойынды құрамында бор және барий бар қоспалардың микродозаларымен пештен тыс өңдеуді қолдану арқылы төмен легірленген хромды шойындардың жұмыс қасиеттерін жақсарту бағытында жаңа зерттеулерге орын береді. Жұмыста құрамында бор және барий элементтері бар модифицирлеу қоспаларды қолдану арқылы ақ шойын құймаларының сапасы мен қызмет ету мерзімін жақсарту мәселесін шешудің тиімді әдісі ұсынылған. Жұмыстың мақсаты – металлургиялық тәжірибені математикалық жоспарлау әдісін қолдана отырып, төмен хромды шойынның қаттылығының енгізілген модификаторлардың шығынына тәуелділігін анықтау. Зерттеуде алға қойылған негізгі міндеттер мыналардан тұрады:

- төмен хромды шойынға бұрыннан белгілі модификаторларды – ферробор мен ферросиликобарийді және құрамында екі белсенді компоненті бір мезгілде болатын мүлде жаңа күрделі бор-барий қоспасын [6] енгізудің металдың қаттылығы мен тозуға төзімділігіне әсерін бағалау;

- құрамында бор және барий бар модификаторлардың техникалық-экономикалық тиімділігі бойынша ең оңтайлы шығындарын анықтау.

Мақалада тәжірибені математикалық жоспарлау әдісімен ферробор, ферросиликобарий және бор-барий ферроқорытпасының әртүрлі дозаларымен модифицирлегенде төмен хромды шойынның қаттылық көрсеткішін арттыру бойынша зерттеу нәтижелері берілген.

Кілт сөздер: төмен хромды шойын, математикалық жоспарлау, шойынды модифицирлеу, микроқоспалау, модификатор, ферробор, ферросиликобарий, бор-барий ферроқорытпасы, бор, барий, хром, тозуға төзімділік, қаттылық.

Planning Experiments on Out-of-furnace Treatment of Low-chromium Cast Iron with Boron- And Barium-containing Additives

¹*AUBAKIROV Dastan, Mast. of Tech. Sci., doctoral student, dastan_kstu@mail.ru,

²AKBERDIN Alexander, Dr. of Tech. Sci., Professor, Head of Laboratory, akberdin_38@mail.ru,

¹ISSAGULOV Aristotle, Dr. of Tech. Sci., Professor, aristotel@kstu.kz,

¹SULTANGAZIYEV Ruslan, PhD, Acting Associate Professor, sulrus83@mail.ru,

³KLYATSKY Vadim, Chief Engineer, atlant_84@mail.ru,

¹NPJSC «Abylbas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

²Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Kazakhstan, Karaganda, Ermekov Street, 63,

³«Qaz Carbon» LLP, Kazakhstan, Karaganda, Oktyabrskaya industrial zone,

*corresponding author.

Abstract. Currently, to improve the performance properties (wear resistance, impact strength, tensile strength) in cast iron castings, rather expensive methods and methods are used, such as high alloying followed by heat treatment, the use of complex alloying with expensive additives and out-of-furnace processing with complex modifiers containing, most often, rare metals and rare earth metals. The use of some modern technologies to improve the quality of casting – metal processing by ultrasound, vibration, electromagnetic radiation, etc., due to the existing rather low level of technical equipment at most of the domestic foundries, unfortunately, seems impossible. This gives space for new research in the direction of improving the working properties, in our case, of low-alloy chromium cast irons by using less expensive, but quite effective methods, such as out-of-furnace treatment of cast iron with microdoses of boron- and barium-containing additives. In the presented work, an effective method is proposed for solving the problem of improving the quality and service life of white cast iron castings by using modifying additives containing the elements boron and barium. The purpose of this work is to determine the dependence of the hardness of low-chromium cast iron on the consumption of introduced modifiers using the method of mathematical planning of a metallurgical experiment. The main tasks set in this study consist of:

- assessment of the effect of introducing into low-chromium cast iron both already known modifiers – ferroboration and ferrosilicobarium, and a completely new complex boron-barium additive [6], containing both active components simultaneously, on the hardness and wear resistance of the metal;
- determination of the most optimal costs of boron- and barium-containing modifiers in terms of technical and economic efficiency.

This article presents the results of a study on increasing the hardness index of low-chromium cast iron when modified with various doses of ferroboration, ferrosilicobarium and boron-barium ferroalloy using the method of mathematical planning of the experiment.

Keywords: low-chromium cast iron, mathematical planning, modification of cast iron, microalloying, modifier, ferroboration, ferrosilicobarium, boron-barium ferroalloy, boron, barium, chromium, wear resistance, hardness.

REFERENCES

1. Sirotnin D.V. Effektivnost' povysheniya kachestva stali za schyot mikrolegirovaniya. – Yekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN, Publ. Preprint, 2013. – 50 p.
2. Gasanli R.K. Vliyaniye sposobov modifizirovaniya na strukturu i svoystva vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom // Progresivniye tekhnologii i isistemi mashinobuduvannya. – 2013. – No. 1. 2 (46). – pp. 74-78.
3. A.A. Akberdin, A.Z. Issagulov, S.S. Kvon, Ye.P. Chsherbakova, D.R. Aubakirov, G.H. Adamova. Modifier Effect on Mechanical Properties of Low-Chromium Cast Iron // «Metalurgija» Zagreb (Croatia). – 2020. – Volume 1, Issue 59. – pp. 141-143.
4. Akberdin A., Karbayev M., Kim A., Sultangaziyev R. Production of Borbarium Ferroalloy // «Metalurgija» Zagreb (Croatia). – 2020. – Volume 1, Issue 59. – pp. 141-143.
5. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziev R.B. Eksperimental'nye issledovaniya po vyplavke karbotermicheskogo ferrobora s ispol'zovaniem razlichnykh vidov borsoderzhashchego syr'ya // Promyshlennost' Kazahstana. – 2019. – No. 2 (106). – pp. 68-70.
6. Poddubnyy A.N. Faktory, opredelyayushchie tvyordost' i iznosostojkost' otlivok iz Fe-C splavov // Litejnoe proizvodstvo. – 2018. – No. 10. – pp. 2-6.