With the help of the methods of mathematical planning of the experiment there are conducted the tests on optimization of the composition and characteristics of the economically alloyed cast iron for muffs. There is studied the influence of alloying elements Cu, Ni, Cr, V, B, Mg, Ti on the muffs solidity. There are received the mathematical adequate equations, which allowed to optimize the cast composition and solidity. On the basis of these results there are worked out the technology of muffs production and approved at LLMZ.

Р. Э. ТРУБИЦКИЙ, РУП «ЛИДСКИЙ ЛМЗ», А. Г. СЛУЦКИЙ, Б. А. КАЛЕДИН, БНТУ

УДК 621.74

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА ДЛЯ ГИЛЬЗ

Для литейного производства характерно совершенствование существующих и создание новых технологических процессов и оборудования, обеспечивающих повышение производительности, точности, низкую шероховатость поверхности литых заготовок, снижение припусков на механическую обработку, получение заранее созданных свойств и структуры. Это особенно актуально для производства отливок гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, характеризующихся большим объемом механической обработки.

Однако на некоторых заводах процессы литья гильз центробежным способом в изложницах с применением термореакционной смеси на новейших карусельных машинах фирмы «Рено» не отвечают требованиям современного производства из-за высокого уровня литейного брака, низкого коэффициента использования металла (0,38–0,43), неудовлетворительной обрабатываемости, повышенного расхода режущего инструмента.

В связи с этим возникла необходимость создания нового технологического процесса изготовления отливок гильз цилиндров методом литья в облицованный кокиль. Литье в облицованный кокиль позволяет повысить качество отливки, снизить припуск на механическую обработку, получить заданную структуру и необходимые механические свойства отливки. Но для этого необходимо было оптимизировать химический состав и структуру чугунов. При этом была поставлена задача получения оптимальной структуры и твердости гильз при малых материальных затратах, что может быть достигнуто подбором состава легирующего комплекса, составом шихтовых материалов, а также технологией плавки и внепечной обработки.

Состав чугуна оптимизировали при изготовлении отливки гильзы ГАЗ 66 в облицованный кокиль, параллельно для сравнения заливали гильзы в разовые песчаные формы. Полученные результаты сопоставляли со свойствами гильз из чугуна ИЧГ-33М, полученных центробежным литьем.

Для установления зависимости твердости (НВ) гильз, полученных из базового состава чугуна в облицованном кокиле, от содержания меди, никеля и хрома был проведен двухфакторный эксперимент по плану 3х3, где 3 – три уровня элемента (Cu, Ni, Cr) и три уровня их содержания (0,1, 0,3 и 0,5 %). В качестве параметра оптимизации (y) была выбрана твердость НВ. Матрица плана 3х3 и результаты испытаний приведены в табл. 1. Ошибка воспроизводимости опытов S=2,75 НВ (1,3 % от среднего значения твердости). Во всех случаях перед заливкой подвергали модифицированию 0,6 % ФС75.

Таблица 1. **Матрица плана 3х3**

Номер плавки	X_1	X_2	$X_1 X_2$	X_1^2	X_2^2	$Y_э$	$Y_р$
1	-	-	+	+	+	203	197
2	-	0	0	+	0	205	202
3	-	+	-	+	+	208	207
4	0	-	0	0	+	208	204
5	0	0	0	0	0	210	210
6	0	+	0	0	+	215	215
7	+	-	-	+	+	213	212
8	+	0	0	+	0	218	217
9	+	+	+	+	+	232	223

В таблице X_1 и X_2 – кодированные уровни факторов (X_1=–1, Cu, X_1=0, Ni и X_1=+1, Cr), $Y_э$ – экспериментальные значения твердости НВ; $Y_р$ – расчетное значение этого параметра.

После обработки результатов эксперимента по методике работы [1] и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$Y_р=209,6+7,8X_1+5,2X_2+4,3X_1X_2, \quad (1)$$

поскольку дисперсия адекватности $S^2_{ад}=\frac{\sum_1^y \Delta Y_э^2}{N-m}=$ =25,8 ($\Delta Y_э$ – разность между расчетным и экспериментальным значением, т. е. $Y_э-Y_р$; N – число строк в матрице, m – число значимых коэффициентов), а критерий Фишера $F=\frac{S^2_{ад}}{S^2_y}=0,71$.

Из уравнения (1) видно, что наибольшее влияние на твердость оказывает X_1, т. е. элементы Cu, N, Cr, влияние содержания элемента X_2 несколько меньше. Максимальная величина твердости $Y_э$=232HB получена, когда все факторы были на верхнем уровне, т. е. когда содержание хрома составляло 0,5 %.

Дополнительные эксперименты по комплексному легированию чугуна показали близкое к аддитивному влияние Cu, Ni, Cr на твердость отливок, что позволяет использовать для расчета твердости уточненную зависимость [2]:

$$HB^{лег}=HB+\sum_1^n K_iC_i, \quad (2)$$

где коэффициент K_i характеризует относительное влияние C_i (Cu, Ni, Cr) на твердость отливок (K_{Cr}=80, K_{Ni}=35, K_{Cu}=50).

Анализ влияния Cu, Ni и Cr на структуру и твердость чугуна позволил установить оптимальный уровень легирования базового чугуна (табл. 2).

Для получения более оптимального состава чугуна в процессе литья в облицованный кокиль были проведены дополнительные исследования по оценке влияния различных химических элементов на твердость отливки.

Для проведения эксперимента был выбран дробный факторный план (ДФЭ) $N=2^{7-4}$, где N – общее число опытов (строк матрицы), 7 – количество факторов (C, Cr, V+B, Cu+Ni, Mn, Si, Ti), 2 – два уровня содержания факторов.

Факторы и их уровни приведены в табл. 3.

При проведении эксперимента предполагали, что взаимодействия X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3 и $X_1X_2X_3$ незначимы и вместо них ввели факторы $X_4=X_1X_2X_3$, $X_5=X_1X_2$, $X_6=X_1X_3$ и $X_7=X_2X_3$.

Для определения дисперсии параметра оптимизации (Y=HB) S^2_y в каждой строке матрицы проводили три параллельных опыта (n=3).

Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 4. Опыты проводили в случайном порядке.

Таблица 2. **Химический состав чугуна ИЧГ-33М**

C	Mn	Si	P	Cu	Cr	Ni	V	Ti	B
3,30	0,50	2,20	0,30	0,50	0,50	0,15	0,08	0,05	0,02
3,70	0,70	2,60	0,45	0,80	0,75	0,50	0,15	0,15	0,05

Таблица 3. **Уровни исследуемых факторов**

Уровень	C	Cr	V+B	Mn	Si	Cu+Ni	Ti
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
+1 (верхний)	3,5	0,64	0,07	0,78	2,45	0,71	0,07
–1 (нижний)	3,24	0,52	0,04	0,51	2,05	0,62	0,06

Таблица 4. **Матрица ДФЭ $N=2^{7-4}$**

Номер плавки	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	$Y_э$	$Y_р$
1	+	+	+	+	+	+	+	235	234
2	-	+	+	-	-	-	+	229	229
3	+	-	+	-	-	+	-	227	228
4	-	-	+	+	+	-	-	224	224
5	+	+	-	-	+	-	-	229	230
6	-	+	-	+	-	+	-	229	229
7	+	-	-	+	-	-	+	225	224
8	-	-	-	-	+	+	+	223	223

Здесь X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6 и X_7 – кодированные уровни факторов; $Y_э$ и $Y_р$ – среднее значение экспериментальных и расчетных значений параметра оптимизации (HB).

После обработки результатов эксперимента по методике работы [3] и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$Y_р=227,6+1,4X_1+2,9X_2+1,1X_3+0,9X_6, \quad (3)$$

так как при дисперсии адекватности $S_{ад}^2 = \frac{n\sum_{1}^{e}\Delta Y_u^2}{n-m} = 4{,}4$ и дисперсии параметра оптимизации $S_y^2=4$, критерий $F=4{,}4/4=1{,}1<F_{кр}=4{,}1$ (при $\alpha=0{,}05$ и $f=N(n-1)=16$).

Таким образом, даже при ошибке опытов S=2,2 НВ (1 % от минимального y=223 НВ) уравнение (3) оказалось адекватным. Из уравнения (3) видно, что наибольшее влияние на твердость оказывают хром (X_2), затем углерод (X_1), V+B (X_3) и Cu+Ni (X_6). Остальные факторы X_4, X_5 и X_7 (Mn, Si, Ti) в этих интервалах варьирования не оказывают влияния на твердость чугуна. Следовательно, для получения максимальной твердости Y=235 НВ следует все факторы установить на верхних уровнях, т. е. C=3,5 %, Cr=0,64 %, (V+B)=0,07 %, Mn=0,78 %, Si=2,45 %, (Cu+Ni)=0,71 %, Ti=0,07 %.

В результате проведенных экспериментов был разработан новый состав экономно-легированного чугуна для гильз (табл. 5).

Таблица 5. **Химический состав экономно-легированного чугуна**

C	Mn	Si	P	Cu+Ni	Cr	S	V+B	Ti
3,5	0,78	2,45	0,20	0,71	0,64	0,1	0,07	0,07

Кроме твердости, в отливках гильз необходимо обеспечить практически полную перлитизацию металлической матрицы (не более 2–5 % феррита). Поэтому были проведены исследования по влиянию легирующих элементов ванадия и хрома на содержание феррита в структуре отливки (y, %). Для чего был проведен эксперимент по плану 2x3, где 2 – два уровня элемента (V и Cr), а 3 – три уровня содержания этих элементов (0,1, 0,3 и 0,5 %). Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 6. Ошибка воспроизводимости опытов составляла S=0,26 %.

Таблица 6. **Матрица плана 2x3**

Номер плавки	X_1	X_2	$X_1 X_2$	X_2^2	$Y_э$	$Y_р$
1	-	-	+	+	6,4	6,2
2	-	0	0	0	4,5	4,9
3	-	+	-	+	11,6	11,4
4	+	-	-	+	3,0	3,2
5	+	0	0	0	0,6	0,2
6	+	+	+	+	4,9	5,1

Здесь X_1 и X_2 – кодированные уровни элементов (X_1=–1, V; X_1=+1, Cr) и их содержания (X_2=–1; 0,1 %, X_2=0; 0,3 % и X_2=+1; 0,5 %); $Y_э$ и $Y_р$ – экспериментальные и расчетные значения площади феррита в структуре, %.

После обработки результатов по уже указанной методике [1] и проверки значимости коэффициентов получена адекватная модель

$$Y=2{,}55-2{,}33X_1+1{,}80X_2-0{,}83X_1X_2+ +3{,}93X_2^2, \text{ \% феррита.} \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что наибольшее влияние на содержание феррита оказывает второй фактор – содержание легирующих элементов (X_2), влияние самого элемента (X_2) меньше, но введение хрома (X_1=+1) во всех случаях дает меньшую величину феррита, чем ванадий. Минимальная величина параметра оптимизации y=0,2 % будет при X_1=+1 и X_2=0, т. е. при введении хрома с его содержанием 0,3 %.

Если в уравнение (4) подставить X_1=+1, то получим уравнение параболы

$$Y=0{,}22+0{,}97X_2+3{,}93X_2^2 \quad (4а)$$

с точкой перегиба X_{2e}=–0,123, в которой Y_2=0,16 %, т. е. при содержании хрома 0,27 % получим минимальную величину площади феррита.

С учетом результатов этих исследований и металлографического анализа был установлен оптимальный химический состав чугуна по содержанию в нем основных и легирующих компонентов (см. табл. 5).

На втором этапе работы в условиях действующего производства Лидского литейно-механического завода были проведены испытания технологии получения экономно-легированного чугуна.

Опытные плавки проводили в индукционных тигельных печах с кислой футеровкой емкостью 1 т. В качестве основных шихтовых материалов использовали чугунный и стальной лом, возврат собственного производства, ферросплавы, содержащие хром, титан, бор, ванадий, фосфор. Медь и никель использовали в виде специальных легирующих присадок, изготовленных на основе отходов смежных производств.

Все легирующие элементы вводили в твердую металлозавалку в количествах, обеспечивающих с учетом усвоения получение чугуна разработанного состава.

В процессе плавки контролировали следующие параметры: содержание основных элементов по расплавлению металла, величину отбела по клиновой пробе, окончательный химический состав чугуна, твердость и микроструктуру литых гильз.

Результаты исследований приведены в табл. 7, 8.

Таблица 7. **Химический состав и твердость чугуна**

Номер плавки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	V+B	HB
	%							
1	3,35	2,44	0,61	0,52	0,62	0,06	0,04	229
2	3,24	2,35	0,52	0,61	0,71	0,07	0,06	223
3	3,45	2,52	0,64	0,64	0,64	0,07	0,05	235
4	3,40	2,05	0,71	0,58	0,71	0,06	0,06	229
5	3,50	2,45	0,78	0,64	0,69	0,07	0,07	229

Таблица 8. **Микроструктура чугуна в гильзах**

Номер плавки	Основа сплава	Графит			Фосфидная эвтектика		
		распределение	форма	размер	форма	распределение	кол-во, %
1	П(ФеО)	ПГр1-ПГр2	ПГф1-ПГф2	ПГд45-ПГд90	ФЭ3-5	Фэр1-2	4-5
2	П(ФеО)	ПГр2-ПГр3	ПГф1	ПГд90	ФЭ3-4	Фэр1-2	3-5
3	П(ФеО)	ПГр2-ПГр3	ПГф2	ПГд45-ПГд90	ФЭ4-5	Фэр-2	4-6
4	П(ФеО)	ПГр1-ПГр2	ПГф1-ПГф2	ПГд90	ФЭ4-5	Фэр1-2	4-6

Испытания технологии показали, что применение медь- и никельсодержащих присадок на основе отходов совместно с другими ферросплавами обеспечивает стабильное легирование железоуглеродистого сплава. Полученные отливки гильз по химическому составу, микроструктуре и твердости соответствуют техническим требованиям.

Использование на Лидском ЛМЗ медь- и никельсодержащих присадок, а также оптимизация всего легирующего комплекса позволяет снизить затраты на ферросплавы, исключить поставки первичного никеля и меди, расширить объемы производства гильз, стабилизировать качество отливок, утилизировать образующиеся в республике отходы (шлаки, отработанные катализаторы, железо-никелевые батареи и т. д.).

Литература

1. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981.

2. Леках С. Н., Мартынюк М. Н., Слуцкий А. Г. и др. Экономное легирование железоуглеродистых сплавов. Мн.: Навука і тэхніка, 1996.

3. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971.