

Р. Э. ТРУБИЦКИЙ (ОАО «Лядский ЛМЗ»), Г. В. ДОВНАР,  
А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ)

## **РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА ДЛЯ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

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 применяемые на некоторых заводах процессы литья гильз центробежным способом в изложницах с применением термоакционной 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. Была поставлена задача получения оптимальной структуры и твердости гильз при малых материальных затратах, что может быть достигнуто подбором состава легирующего комплекса, состава шихтовых материалов, а также технологий плавки и выпечной обработки.

Повышение надежности, долговечности и экономичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является актуальной задачей со-

временного машиностроения. Увеличение надежности и срока службы двигателей тесно связано с повышением износостойкости материалов основных узлов старения. Непрерывное форсирование двигателей, повышение максимального давления в камере сгорания, числа оборотов при одновременном требовании увеличения ресурса и экономичности двигателя предъявляют высокие требования к материалу деталей цилиндропоршневой группы, в частности к материалу гильз. Гильза во многом определяет срок службы двигателя до капитального ремонта. Поэтому к ней предъявляются весьма жесткие требования: высокие механические свойства, теплопроводность, коррозионная и эрозионная стойкость, низкий коэффициент трения, стабильность свойств во времени, гидрогазонепроницаемость, хорошая обрабатываемость и т. д.

Эти основные требования, предъявляемые к отливкам гильз цилиндров ДВС, можно выполнить путем сочетания оптимального состава чугуна, рациональной технологии его выплавки и получения отливки, статистического моделирования процессов получения гильз ДВС.

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  $3 \times 3$ , где 3 – три уровня элементов (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  $3 \times 3$  и результаты испытаний приведены в табл. 1. Ошибка воспроизводимости опытов  $S = 2,75$  (1,3% от среднего значения твердости). Во всех случаях перед заливкой подвергали модифицированию 0,6% ФС75.

В табл. 1  $X_1$  и  $X_2$  – кодированные уровни факторов ( $X_1 = -1 - \text{Cu}$ ;  $X_1 = 0 - \text{Ni}$ ;  $X_1 = +1 - \text{Cr}$ );  $Y_3$  – экспериментальные значения твердости НВ, а  $Y_p$  – расчетное значение этого параметра. Обработку результатов таблицы проводили по методике работы [1].

Таблица 1. Матрица плана 3×3

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y_s$	$y_p$
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

Кодирование уровней факторов производили по формуле

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - 0,5(\tilde{X}_{i\max} + \tilde{X}_{i\min})}{0,5(\tilde{X}_{i\max} - \tilde{X}_{i\min})}, \quad (1)$$

где  $X_i$  – кодированное значение уровня  $i$ -го фактора;  $\tilde{X}_i$ ,  $\tilde{X}_{i\max}$ ,  $\tilde{X}_{i\min}$  – текущее, максимальное и минимальное значение каждого фактора в натуральных единицах. При этом  $X_i$  может принимать не только значения  $\pm 1$  и 0 (как в табл. 1), но и другие кодированные уровни.

Для расчета статистических оценок коэффициентов  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$  и  $b_{ii}$  будущей математической модели вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^R b_i x_i + \sum_{i \neq j}^K b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

использовали формулы

$$b_0 = A_0(OY) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y), \quad (3)$$

$$b_1 = A_1(1Y), \quad b_2 = A_2(2Y), \quad (4)$$

$$b_{12} = A_{12}(12Y), \quad (5)$$

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(OY), \quad b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(OY), \quad (6)$$

где  $A_0$ ,  $A_{01}$ ,  $A_{02}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{11}$  и  $A_{22}$  – постоянные коэффициенты, зависящие от числа факторов и их уровней и взятые из работы [1, табл. 2.19, 2.20]. В нашем случае  $A_0 = 0,55556$ ,  $A_{01} = A_{02} = 0,33333$ ,

$A_1 = A_2 = 0,16667$ ,  $A_{12} = 0,25$ ,  $A_{11} = A_{22} = 0,5$  (OY), (1Y), (2Y), (12Y), (11Y) и (22Y) – алгебраические суммы произведений столбца ( $Y_7$ ) на соответствующие столбцы матрицы.

После расчета указанных коэффициентов уравнения (2) и проверки их значимости получена адекватная модель:

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

поскольку дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = \frac{\sum \Delta Y_u^2}{N - m} = 25,8$  ( $\Delta Y_u$  – разность между расчетным и экспериментальным значением, т. е.  $Y_7 - Y_p$ ;  $N$  – число строк в матрице;  $m$  – число значимых коэффициентов), а критерий Фишера  $F = S_{ад}^2 / S_y^2 = 0,71$ .

Из уравнения (1) видно, что наибольшее влияние на твердость оказывает  $X_1$ , т. е. элемент V, Cr; влияние содержания элемента  $X_2$  несколько меньше. Максимальная величина твердости ( $Y_3 = 232$  HB) 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 [8]:

$$HB^{лег} = HB + \sum_1^n K_i C_i, \quad (8)$$

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).

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

Для получения более оптимального состава чугуна в процессе литья в облицованный кокиль были проведены дополнительные исследования по оценке влияния содержания 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.

Таблица 3. Уровни исследуемых факторов

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

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 ( $Y = \text{HB}$ )  $S_f^2$  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 4. Матрица ДФЭ  $N = 2^{7-4}$

$N$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$y_s$	$y_p$
1	+	+	+	+	+	+	+	235	234
2	-	+	+	-	-	-	+	229	229
3	+	-	+	-	-	+	-	227	228
4	-	-	+	+	+	-	-	224	224
5	+	+	-	-	+	-	-	229	230
6	-	+	-	+	-	+	-	229	229
7	+	-	-	+	-	-	+	225	224
8	-	-	-	-	+	+	+	223	223

В табл. 4  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$  и  $X_7$  – кодированные уровни факторов;  $Y_3$  и  $Y_p$  – среднее значение экспериментальных и расчетных значений параметра оптимизации (НВ).

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

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

так как при дисперсии адекватности  $S_{ад}^2 = \frac{1}{n-m} \sum \Delta Y_u^2 = 4,4$  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  $S = 24$  НВ (1% от минимального  $Y = 223$  НВ) уравнение (9) оказалось адекватным. Из уравнения (9) видно, что наибольшее влияние на твердость оказывает 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), Ti = 0,07%.

В результате проведенных экспериментов был разработан новый состав экономнолегированного чугуна для гильз, который приведен в табл. 5.

Таблица 5. Химический состав экономнолегированного 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 этого был проведен эксперимент по

плану  $2 \times 3$ , где 2 – два уровня элементов (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 составляет  $S = 0,26\%$ .

Таблица 6. Матрица плана  $2 \times 3$

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$X_1^2$	$Y_s$	$Y_p$
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

В табл. 6  $X_1$  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  $X_2 = +1 - 0,5\%$ );  $Y_s$  и  $Y_p$  – экспериментальные и расчетные значения площади феррита в структуре, %.

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

$$Y = \% \text{ феррита} = 2,55 - 2,33X_1 + 1,80X_2 - 0,83X_1X_2 + 3,93X_2^2. \quad (10)$$

Из уравнения (10) видно, что наибольшее влияние на содержание феррита оказывает второй фактор – содержание легирующих элементов ( $X_2$ ), влияние самого элемента ( $X_1$ ) 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 0,3%.

Если в уравнение (10) подставим  $X_1 = +1$ , то получим уравнение параболы

$$Y = 0,22 + 0,97X_2 + 3,93X_2^2 \quad (11)$$

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

С учетом результатов этих исследований и металлографического анализа и 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 экономнолегированного чугуна. Опытные плавки осуществлялись 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 применяли 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 контролировались следующие параметры: содержание основных элементов по расплавлению металла, величина отбела по клиновой пробе, окончательный химический состав чугуна, твердость и микроструктура литых гильз. Результаты исследований приведены в табл. 7, 8.

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.

Таблица 7. Химический состав и твердость чугуна, %

Номер плавки	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Медь + никель	Титан	Ванадий + бор	Твердость НВ
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(FeO)	ПГр1 ПГр2	ПГф1 ПГф2	ПГд45 ПГд90	ФЭ3-5	Фэр1-2	4-5
2	П(FeO)	ПГр2 ПГр3	ПГф1	ПГд90	ФЭ3-4	Фэр1-2	3-5
3	П(FeO)	ПГр2 ПГр3	ПГф2	ПГд45 ПГд90	ФЭ4-5	Фэр1-2	4-6
4	П(FeO)	ПГр1 ПГр2	ПГф1 ПГф2	ПГд90	ФЭ4-5	Фэр1-2	4-6

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М., Статистика, 1974. – 162 с.
2. Леках С. Н., Мартынюк М. Н., Слуцкий А. Г. и др. Экономное легирование железоуглеродистых сплавов. – Минск: Наука і техника, 1996. – 176 с.
3. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 158 с.

УДК 621.74.021

А. М. МИХАЛЬЦОВ, канд. техн. наук, А. А. ПИВОВАРЧИК (БНТУ)

### РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Главным направлением развития современной технологии литья под давлением является повышение качества получаемых отливок. Опыт крупнейших отечественных предприятий показывает, что качест-