

Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук,
А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук,
В. А. АЛЬХИМЕНОК (БНТУ)

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ОБОБЩАЮЩЕГО ПОКАЗАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СФЕРОИДИЗИРУЮЩИХ МОДИФИКАТОРОВ

Основные цели и задачи исследования: разработать методы повышения механических свойств чугунов с шаровидным графитом (ЧШГ) с помощью различных модифицирующих добавок; получить математические полиномиальные модели, устанавливающие количественную связь между такими параметрами оптимизации, как предел прочности σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ , твердость НВ, ударная вязкость КС, и влияющими на них температурой изотермической закалки и видом модификатора; выбрать оптимальный вариант технологического процесса изготовления отливок из ЧШГ со свойствами: $\sigma_b > 900$ МПа, $\sigma_{0,2} > 550$ МПа, $\delta > 5\%$.

Для решения перечисленных задач опробованы наиболее широко применяемые сфероидизирующие модификаторы для ковшевого и внутриформенного модифицирования.

Чугун плавил в индукционной тигельной печи с основной футеровкой, в шихте использовали передельные чугуны, отходы углеродистой стали и ферросплавы. В качестве сфероидизирующих модификаторов применяли ЖКМК-4Р (49,6% Si, 9,5% Cu, 8,6% Mg, 4,7% PЗМ, Fe – остаточное); Cu-Mg-лигатуру (91,4% Cu, 8,6% Mg); Ni-Mg-Ce-лигатуру (90% Ni, 9% Mg, 1% Ce), в качестве флюса – криолит К2. Графитизирующее модифицирование осуществлялось ФС75. Модификатор ЖКМК-4Р вводили в ковш с помощью «колокольчика», тяжелые лигатуры – на дно ковша.

Для получения аустенитно-бейнитной структуры использовали двухступенчатую закалку: аустенизация – нагрев образцов до 900°C в соляной ванне, выдержка 0,5 ч; заготовки для прокаливаемости выдерживали 1 ч; изотермическая закалка в центре в течение 2 ч при 300 и 350°C, дальнейшее охлаждение на воздухе.

Применяли различные варианты модифицирования: 2,5% ЖКМК-4 (вариант 1); 0,6% Ni-Mg-Ce + 0,6% Cu-Mg + 0,6% ФС75 (вариант 2); 1,1% Ni-Mg-Ce + 0,6% ФС75 (вариант 3); 1,2% Cu-Mg + 0,6 % ФС75 (вариант 4). При варианте 1 чугун содержал 2,9 – 3,1% Si, при остальных вариантах 2,4 – 2,6% Si, при варианте 2 – 0,48 – 0,52% Mg и 0,49 – 0,52% Cu; при варианте 3 – 0,85 – 0,93% Ni; при варианте 4 – 0,81% Cu.

Требуемый уровень прокаливаемости (до 15 мм) обеспечивали введением в чугун до 0,5% Ni и Cu. В нелегированных чугунах, модифицированных ЖКМК-4, прокаливаемость доводилась до 10 мм.

Для проведения эксперимента и обработки данных применяли математическое планирование эксперимента (двухфакторный эксперимент). В частности, был выбран план 2×4: 2 – два уровня температуры изотермической закалки (300 и 350°C), 4 – четыре варианта модифицирования (1, 2, 3 и 4).

Матрица плана 2×4 и результаты опытов приведены в табл. 1 (X_1 и X_2 – кодированные уровни факторов; № – номер опыта; $Y_1 = \sigma_b$, МПа; $Y_2 = \sigma_{0,2}$, МПа; $Y_3 = \delta$, %; $Y_4 = \text{HB}$; $Y_5 = \text{КС}$, Дж/см²; $Y_6 = D$ – комплексный показатель).

Ошибки воспроизводимости опытов соответственно были равны: $S_1 = 7,5$ МПа ($\approx 1\%$ от средней величины); $S_2 = 7$ МПа (1%); $S_3 = 0,65\%$ (10%); $S_4 = 8$ (2,5%) и $S_5 = 7$ Дж/см² (8% от средней величины).

После обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнений по методике [1] были получены следующие адекватные модели:

$$Y_1 = \sigma_b = 1128,4 - 206,9X_1 + 70,8 X_2^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = \sigma_{0,2} = 989,2 - 240,6X_1 - 13,1X_1X_2; \quad (2)$$

$$Y_3 = \delta = 3,5 + 2,8X_1 - 0,5X_2 + 3,5 X_2^2; \quad (3)$$

$$Y_4 = \text{HB} = 363,4 - 42,1X_1; \quad (4)$$

$$Y_5 = \text{КС} = 74,4 + 16,6X_1 - 9,1X_2 - 7,1X_1X_2 + 19,5 X_2^2. \quad (5)$$

Из уравнений (1), (2) и (4) видно, что наибольшее влияние на σ_b , $\sigma_{0,2}$ и HB оказывает температура изотермической закалки X_1 : чем она выше, тем ниже значения этих характеристик. Влияние варианта модифицирования X_2 значительно меньше или совсем отсутствует, как свидетельствует уравнение (4).

Таблица 1

Матрица плана 2×4

№	X_1	X_2	X_1X_2	X_2^2	$Y_1=\sigma_b$	$Y_2=\sigma_{0,2}$	$Y_3=\delta$	$Y_4=\text{HB}$	$Y_5=\text{КС}$	$Y_6=D$
1	-	-	+	+	1390	1220	2,8	401	79	0,60
2	-	-1/3	+1/3	1/9	1330	1230	1,1	415	53	0,52
3	-	+1/3	-1/3	1/9	1350	1230	1,2	382	71	0,55
4	-	+	-	+	1420	1270	2,1	415	71	0,56
5	+	-	-	+	1000	765	9,3	302	132	0,74
6	+	-1/3	-1/3	1/9	930	755	5,4	338	83	0,57
7	+	+1/3	+1/3	1/9	930	745	7,2	311	99	0,64
8	+	+	+	+	975	760	7,9	331	93	0,65

На относительное удлинение Y_3 и ударную вязкость Y_5 влияние варианта модифицирования X_2 существенно больше, чем температуры изотермической закалки, как это следует из уравнений (3) и (5).

В связи с тем что исследуемые факторы оказывают противоречивое влияние на характеристики прочностных и пластических свойств отливок, для выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления отливок из ЧШГ было решено использовать обобщенный (комплексный) показатель D_2 [2], который равен

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n}, \quad (6)$$

где d_1, d_2, \dots, d_n – частные функции желательности, определяемые в свою очередь по формуле

$$d_i = e^{-y'_i}; \quad (7)$$

y'_i – кодированное значение i -го параметра оптимизации.

Для нахождения D сначала была составлена шкала желательности для исследуемых параметров оптимизации, которая представлена в табл. 2. Пользуясь табл. 1 и 2, можно рассчитать значения y'_i и d_i для каждого опыта табл. 1. Результаты этого расчета представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что наибольшая величина $D = 0,74$ соответствует условиям опыта № 5 табл. 1, т. е. оптимальный вариант технологического процесса будет $X_1 = +1$ и $X_2 = -1$, т. е. температура изотермического отпуска 350°C и вариант 1 модификатора (2,5% ЖКМК-4).

Следует обратить внимание на то, что максимальная величина D соответствует максимальной величине ударной вязкости ($KC = 132 \text{ Дж/см}^2$), которая, как показывает практика, в наибольшей мере характеризует на-

Таблица 2

Шкала желательности

d_i	y'_i	σ_s	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	НВ	КС
1,00 – 0,80	3,000	1300	950	10	450	140
0,80 – 0,63 (хорошо)	1,500	1100	750	8	400	120
0,63 – 0,37 (удовл.)	0,850	900	550	6	350	100
0,37 – 0,20 (плохо)	0,000	700	350	4	300	80
0,20 – 0,00 (очень плохо)	-0,500	500	150	2	250	60

Значения y'_i и d_i и D для таблицы 1

№	y'_1	d_1	y'_2	d_2	y'_3	d_3	y'_4	d_4	y'_5	d_5	Pd_i	D
1	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,30	0,27	1,53	0,80	-0,025	0,36	0,0787	0,60
2	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,50	0,20	1,95	0,90	-0,500	0,20	0,0360	0,52
3	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,50	0,20	1,34	0,78	-0,225	0,30	0,0486	0,55
4	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,48	0,21	1,95	0,90	-0,225	0,30	0,0567	0,56
5	1,18	0,73	1,61	0,82	2,48	0,97	0,13	0,38	2,40	0,96	0,2118	0,74
6	0,95	0,66	1,54	0,80	0,60	0,55	0,65	0,56	0,13	0,38	0,0618	0,57
7	0,95	0,66	1,49	0,79	1,24	0,75	0,19	0,42	0,81	0,62	0,1018	0,64
8	1,10	0,72	1,58	0,81	0,47	0,79	0,53	0,51	0,55	0,52	0,1222	0,65

дежность материала отливок. Причем $\sigma_b = 1000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 765$ МПа и $\delta = 9,3\%$, что превышает требуемые значения этих характеристик ($\sigma_b > 900$ МПа, $\sigma_{0,2} > 550$ МПа и $\delta = 5\%$).

Таким образом, пользуясь обобщенным показателем характеристик материалов, можно более обоснованно выбирать оптимальный вариант технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 205 с.

УДК 620.22

К. Э. БАРАНОВСКИЙ, канд. техн. наук,
А. С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук,
В. Я. КЕЗИК, д-р техн. наук,
Е. А. ВОРОНИН (БНТУ)

ЛИТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАПРАВЛЕНИЯ

Литые композиционные материалы принадлежат к группе материалов с нульмерными упрочняющими компонентами, имеющими три размера одного и того же порядка и равномерно распределенными в объеме матрицы. В качестве упрочняющей фазы используются гранулы или сферические частицы различной степени дисперсности. Матрица служит основой материала, связывает другие элементы, передает и распределяет нагрузку