

А.Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, Б.А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук,
В.А. СМЕТКИН, канд. пед. наук (БНТУ),
Г.В. ПАВЛОВИЧ (УПП «Универсал-Лит»)

КОМПЛЕКСНЫЙ МОДИФИКАТОР ДЛЯ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ 110Г13Л

В настоящее время в Беларуси возрастает спрос на отливки и детали из износостойких сталей, самой распространенной из которых является высокомарганцовистая сталь 110Г13Л. Однако многолетний опыт производства таких отливок, в частности на УПП «Универсал-Лит», выявил ряд недостатков этого материала: невысокая износостойкость литых деталей, значительный литейный брак по трещинам, высокая себестоимость литья из-за использования дорогостоящего и дефицитного ферромарганца и слишком продолжительной термической обработки.

Один из перспективных путей повышения качества литья высокомарганцовистой стали – разработка эффективной технологии раскисления и модифицирования жидкого металла. Для этого представляется целесообразным применять комплексные лигатуры и технологии эффективного модифицирования, используя в качестве основных легирующих и модифицирующих компонентов вторичные ресурсы и отходы производства.

Использование в составе модификатора алюминия, РЗМ, магния, титана и других элементов позволит не только эффективно раскислять и модифицировать сталь, обеспечивая при этом требуемый уровень механических и эксплуатационных характеристик, но и снижать себестоимость отливок. Выбор вышеназванных элементов объясняется тем, что в составе известных отечественных и зарубежных модификаторов содержится много кремния и мало РЗМ, алюминия, титана и других компонентов. Но каков должен быть оптимальный состав комплексного модификатора при выплавке стали 110Г13Л? Ответа на этот вопрос пока нет, так как одни исследователи [1] рекомендуют вводить не менее 10% Са, другие [2] – 6% Fe, третьи [3] – 10% Mg. В связи с этим был проведен многофакторный эксперимент типа $N = 2^{5-2}$ (дробный факторный эксперимент), в ходе которого было изучено влияние пяти факторов (Mg, РЗМ, Al, Ti, Fe, остальное – Ni) на пять показателей механических свойств литой стали по Г13Л (предел прочности σ_b , кг/мм²; предел текучести σ_t , кг/мм²; относительное удлинение δ , %; относительное сужение ψ , %; ударная вязкость KCU, Дж/см²). Уровни факторов приведены в табл. 1.

Уровни факторов комплексного модификатора

Уровни факторов	Факторы					Примечание
	Mg (X_1)	PЗМ (X_2)	Al (X_3)	Ti (X_4)	Fe (X_5)	
Нижний ($X_i = -1$)	8	23	14	6	5	Остальное – Ni, % То же
Верхний ($X_i = +1$)	10	25	16	8	6	

Матрица дробного факторного эксперимента $N = 2^{5-2}$ и результаты испытаний $Y_1 = \sigma_b$, $Y_2 = \sigma_T$, $Y_3 = \delta$, $Y_4 = \psi$ и $Y_5 = \text{КСУ}$ приведены в табл. 2, где X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 – кодированные уровни элементов модификатора. Для определения дисперсии параметров оптимизации в каждой строке матрицы проводили два параллельных опыта. В матрице указаны средние значения характеристик свойств в строке.

Таблица 2

Матрица ДФЭ $N = 2^{5-2}$

Но- мер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$Y_1 = \sigma_b$	$Y_2 = \sigma_T$	$Y_3 = \delta$	$Y_4 = \psi$	$Y_5 = \text{КСУ}$	D
1	-	-	-	-	+	72	40	30	51	324	0,300
2	+	-	-	+	-	74	42	32	52	330	0,417
3	-	+	-	+	+	76	44	34	54	340	0,662
4	+	+	-	-	-	73	41	31	51	328	0,340
5	-	-	+	+	-	75	45	35	55	350	0,783
6	+	-	+	-	+	74	42	33	58	345	0,702
7	-	+	+	-	-	78	42	31	51	355	0,466
8	+	+	+	+	+	80	44	33	53	360	0,695

Предполагалось, что взаимодействия $X_1X_2X_3$ и X_1X_2 незначимы, поэтому вместо них были введены факторы X_4 и X_5 , т.е. $X_4 = X_1X_2X_3$ и $X_5 = X_1X_2$. Опыты проводились в случайном порядке.

Обработку результатов проводили по методике, изложенной в работе [3]. После обработки и проверки значимости коэффициентов уравнений были получены следующие уравнения в виде полиномов первого порядка:

$$Y_1 = \sigma_b, \text{ МПа} = 75,3 + 1,5X_2 + 1,5X_3 + X_4; \quad (1)$$

$$Y_2 = \sigma_T, \text{ МПа} = 42,5 - 0,25X_1 + 0,25X_2 + 0,75X_3 + 1,25X_4; \quad (2)$$

$$Y_3 = \delta, \% = 32,4 + 0,63X_3 + 1,13X_4; \quad (3)$$

$$Y_4 = \psi, \% = 53,1 - 0,88X_2 + 1,13X_3 + 0,88X_5; \quad (4)$$

$$Y_5 = \text{КСУ}, \text{ Дж/см}^2 = 341,5 + 4,3X_2 + 11X_3 + 3,5X_4. \quad (5)$$

Уравнения (1) – (5) оказались адекватными (при $\alpha = 0,01$ и дисперсиях параметров оптимизации $S_1^2 = 0,72$, $S_2^2 = 0,44$, $S_3^2 = 0,37$, $S_4^2 = 1,503$ и

$S_5^2 = 5,6$). Из этих уравнений видно, что в выбранных интервалах варьирования магний (X_1) практически не влияет на все параметры оптимизации. На предел прочности наибольшее влияние оказывает содержание РМЗ (X_2) и алюминия (X_3); влияние титана (X_4) меньше, железо (X_5) также не оказывает в этих пределах влияния на σ_b . На предел текучести σ_T (Y_2) наибольшее влияние оказывает содержание титана (X_4) и алюминия (X_3) (с их ростом предел текучести увеличивается). На относительное удлинение $Y_3 = \delta$, %, как видно из уравнения (3), наибольшее влияние оказывает титан (X_4); влияние алюминия (X_3) меньше. С увеличением их содержания δ также растет. На относительное сужение $Y_4 = \psi$, % наибольшее влияние оказывает алюминий (X_3), наименьшее – РЗМ (X_2) и железо (X_5). С ростом содержания РЗМ (X_2) ψ уменьшается, а с ростом содержания алюминия (X_3) и железа (X_5) – увеличивается. На ударную вязкость КСУ (Y_5) наибольшее влияние оказывает содержание алюминия (X_3), влияние РЗМ (X_2) и титана (X_4) существенно меньше. С ростом содержания алюминия, РЗМ и титана ударная вязкость увеличивается.

Положительное влияние алюминия (X_3) на все параметры оптимизации объясняется его раскисляющим воздействием на обрабатываемый сплав, снижением температуры плавления лигатуры, что и приводит к улучшению механических свойств стали. Кроме того, благоприятное влияние алюминия проявляется в глобулизации неметаллических включений и измельчении аустенитной структуры.

РЗМ (X_2) обуславливают модифицирующий эффект на макро- и микроструктуру отливок, повышают их трещиноустойчивость, усиливают влияние алюминия на повышение физико-механических свойств модифицирующих сталей.

Титан (X_4) измельчает структуру сталей, повышает их длительную прочность, ударную вязкость, износостойкость и коррозионную стойкость, преимущественно за счет образования карбидов, нитридов и карбонитридов.

В связи с тем что указанные в табл. 1 элементы по-разному влияют на исследуемые параметры оптимизации, была предпринята попытка оптимизировать состав безкремниевой лигатуры с помощью обобщенного (комплексного) показателя D , определяемого по формуле [3]

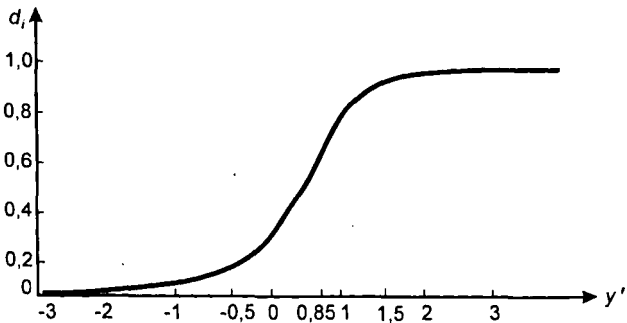
$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n}, \quad (6)$$

где d_i – частные функции желательности: $d_i = \exp[-\exp(-y'_i)]$; y'_i – кодированный уровень i -го натурального показателя (параметра оптимизации).

Сначала строим табл. 3 частных функций желательности для исследуемых параметров. Затем, пользуясь данными табл. 3, строим график функции желательности (рис. 1).

Шкала желательности

d_i	y'	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
1,0...0,80	3,00	80	45	35	60	360
0,80...0,63	1,500	72	43	34	58	350
0,63...0,37	0,85	74	41	33	56	340
0,37...0,20	0,00	71	39	32	54	330
0,20...0,00	-0,50	68	37	31	52	320



65	68	71	74	77	80	$y_1 = \sigma_a$
	37	39	41	43	45	$y_2 = \sigma_w$
	31	32	33	34	35	$y_3 = \delta$
	52	54	56	58	60	$y_4 = \psi$
	320	380	340	350	360	$y_5 = KCU$

Рис. 1. График функции желательности

С помощью рис. 1 находим кодированные значения y'_i , d_i и D для каждого параметра оптимизации. Результаты этих расчетов вносим в табл. 4.

Таблица 4

Значения y'_i , d_i и D

Номер опыта	y'_1	d_1	y'_2	d_2	y'_3	d_3	y'_4	d_4	y'_5	d_5	D
1	0,28	0,470	0,425	0,520	-0,50	0,200	-0,60	0,190	-0,30	0,259	0,300
2	0,85	0,630	0,175	0,734	0,00	0,370	-0,50	0,200	0,000	0,370	0,417
3	1,28	0,758	2,250	0,900	1,50	0,800	0,00	0,370	0,850	0,630	0,662
4	0,57	0,570	0,850	0,630	-0,50	0,200	-0,60	0,190	-0,10	0,331	0,340
5	1,07	0,709	3,000	1,000	3,00	1,000	0,425	0,520	1,500	0,800	0,783
6	0,85	0,630	1,175	0,734	0,85	0,630	1,500	0,800	1,175	0,734	0,702
7	2,00	0,873	1,175	0,734	-0,50	0,200	-0,60	0,190	2,250	0,900	0,466
8	3,00	1,000	2,250	0,900	0,85	0,630	0,225	0,286	3,000	1,000	0,695

Как видно из табл. 4, наибольшее значение D , равное 0,783 (хороший результат, так как $0,80 > 0,783 > 0,63$), соответствует условиям опыта № 5 ($X_1 = -1$, $Mg = 8\%$; $X_2 = -1$, $PЗМ = 23\%$; $X_3 = +1$, $Al = 16\%$; $X_4 = +1$, $Ti = 8\%$; $X_5 = -1$, $Fe = 5\%$), где $\sigma_b = 75$ МПа, $\sigma_T = 45$ МПа, $\delta = 35\%$, $\psi = 55\%$, $KCU = 350$ Дж/см².

Таким образом, этот состав комплексного модификатора может быть рекомендован в качестве оптимального, так как он обеспечивает достаточно высокие прочностные и пластические свойства стали 110Г13Л.

В лабораторных условиях была изготовлена опытная партия комплексного модификатора и проведены предварительные исследования его эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Н.Г. Высокомарганцовистая сталь. М.: Металлургия. 1979. 232 с.
2. Тунков В.П. Производство фасонного литья из износостойкой высокомарганцевой стали. М.: Металлургиздат, 1962. 32 с.
3. Повышение качества отливок из стали Г13Л (ЦНИИТмаш). М.: Машгиз, 1963. 204 с.

УДК 621.74:669.13-27

Е.И. МАРУКОВИЧ, д-р техн. наук (ИТМ НАН Беларуси),
М.И. КАРПЕНКО, канд. техн. наук,
В.М. КАРПЕНКО, канд. техн. наук (ГГТУ им. Сухого)

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Решение проблемы повышения надежности и долговечности литых деталей машин и механизмов, инструментальной и технологической оснастки, работающих в условиях интенсивного износа, в большинстве случаев связано с созданием и использованием сложно- или высоколегированных сталей и Fe – С-сплавов, введением большого количества дорогостоящих лигатур и ферросплавов и необходимостью термической обработки. Служебные свойства этих сплавов формируются в зависимости от химического состава, металлургических и технологических приемов воздействия на расплавы в процессе первичной и вторичной кристаллизации и в конечном итоге определяются свойствами основных структурных составляющих.