

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ СКЛАДУ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ ЖАРОСТІЙКОЇ СТАЛІ 03Х3СЮ

Сучасне виробництво легованих сталей дозволяє при їх виплавці зменшити вміст вуглецю до 0,02–0,06 % та виготовити листовий металопрокат з різним типом структурного стану. Це дає можливість розробляти та отримувати матеріали, які найбільш ефективно відповідають умовам експлуатації конкретних виробів.

За умов експлуатації при температурах до 400 °С застосування вмісту кремнію та алюмінію в певних межах дозволяє суттєво зменшити вміст хрому і не використовувати при цьому РЗМ.

Як перспективну розробку визнано доцільним створення жаростійкої сталі з низьким (3–6 %) вмістом хрому при збереженні необхідної кількості кремнію і алюмінію для утворення жаростійких плівок на поверхні матеріалу. Це дасть можливість знизити його вартість при забезпеченні оптимального ресурсу експлуатації виробів. Структура сталі з таким легуванням не може бути чисто феритною, що потребує передбачити присутність у ній маловуглецевого (квазіевтектоїдного) перліту. Однак, при цьому такий перліт повинен забезпечити необхідну конструктивну міцність виробів при достатньому рівні експлуатаційних властивостей.

Отже, виходячи із зазначеного вище, є перспективним створення економнолегованого матеріалу з достатнім рівнем жаростійкості до температури 400 °С у агресивному середовищі, оптимальним сполученням експлуатаційних та технологічних властивостей (корозійна стійкість, жаростійкість, штамповність, зварюваність), що дозволяє використовувати такого роду сталь для виготовлення дешевих виробів системи випуску відпрацьованих газів автомобільної та тракторної техніки.

Для оптимізації хімічного складу корозійностійкої сталі 03Х3СЮ було створено лінійний план експерименту (табл. 1–2). Згідно з цим планом були отримані плавки з різним вмістом таких легувальних елементів, як хром, кремній та алюміній.

Таблиця 1 – Перелік факторів ортогонального плану експериментів 2^3

Інтервал варіювання рівень факторів	X_1 (Cr, %)	X_2 (Si, %)	X_3 (Al, %)
Верхній рівень (+)	5,0	2,1	1,1
Нульовий рівень (0)	3,0	1,4	0,75
Нижній рівень (-)	1,0	0,8	0,4
Інтервал варіювання, Δ_j	2,0	0,6	0,35

Для переведу факторів у кодований масштаб використовували стандартну формулу

$$x_j = \frac{X_j - X_{j0}}{\Delta_j} = \pm 1, \quad j = \overline{1,3}. \quad (1)$$

Кількість дослідів необхідна для побудови плану відповідала співвідношенню:

$$N = 2^{k-p}, \quad (2)$$

де k – число незалежних змінних;

p – кількість взаємодій у повному факторному експерименті типу 2^k , замінена новими факторами.

Таблиця 2 – Ортогональний центральний план експериментів 2^3

№ дослідів	X_1 (Cr, %)	X_2 (Si, %)	X_3 (Al, %)	$X_1 * X_2$ (Cr * Si, %)	$X_2 * X_3$ (Si * Al, %)	$X_1 * X_3$ (Cr * Al, %)	y $\Delta m * 10^4$
1	+	+	+	+	+	+	2,2
2	+	-	+	-	-	+	2,1
3	-	+	+	-	+	-	2,0
4	-	-	+	+	-	-	2,4
5	+	+	-	+	-	-	2,8
6	+	-	-	-	+	-	3,2
7	-	+	-	-	-	+	2,7
8	-	-	-	+	+	+	3,4

Далі, визначили коефіцієнти множинної кореляції (R) без урахування парних ефектів і з урахуванням трьох можливих парних взаємодій за формулою [1]:

$$R = \sqrt{\frac{n * (b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + \dots + b_j^2)}{\sum_i y_i^2 - n * \bar{y}^2}} \quad (3)$$

Самі коефіцієнти b_j визначали за співвідношеннями:

$$\bar{y} = b_0 = \frac{\sum_i y_i}{n}, \quad b_1 = \frac{\sum_i y_i * x_{1i}}{n}, \quad b_2 = \frac{\sum_i y_i * x_{2i}}{n}, \quad b_3 = \frac{\sum_i y_i * x_{3i}}{n} \dots$$

Коефіцієнт множинної кореляції (R) без урахування парних ефектів, визначений за формулою (3) склав $R = 0,9546$ при ($b_0 = 2,6$; $b_1 = -0,025$; $b_2 = -0,175$; $b_3 = -0,425$).

Коефіцієнти множинної кореляції (R) з урахуванням парних ефектів склали:

- R з урахуванням парного ефекту $x_1 * x_2$ (Cr*Si) $R = 0,9769$ при

$$b_{12} = \frac{\sum_i y_i * (x_1 * x_2)_i}{n} = 0,1; \quad (4)$$

- R з урахуванням парного ефекту $x_2 * x_3$ (Si*Al) $R = 0,9769$ при

$$b_{23} = \frac{\sum_i y_i * (x_2 * x_3)_i}{n} = 0,1; \quad (5)$$

- R з урахуванням парного ефекту $x_1 * x_3$ (Cr*Al) $R = 0,9546$ при

$$b_{13} = \frac{\sum_i y_i * (x_1 * x_3)_i}{n} = 0. \quad (6)$$

Отже, в цілому отримано такі результати розрахунків R

- без урахування парних ефектів:

$$R = 0,9546;$$

- з урахуванням парних ефектів:

$$x_1 * x_2 \rightarrow R = 0,9769;$$

$$x_2 * x_3 \rightarrow R = 0,9769,$$

$$x_1 * x_3 \rightarrow R = 0,9546.$$

Два парних ефекти $x_1 * x_2$ та $x_2 * x_3$ (Cr*Si та Si*Al) мають однаковий коефіцієнт множинної кореляції, що свідчить про те, що обидві комбінації легувальних елементів (Cr з Si та Si з Al) практично однаково позитивно впливають на жаростійкість досліджуваної сталі, зменшуючи втрату маси Δm .

Контрольну перевірку значень коефіцієнта множинної кореляції R здійснювали за допомогою оцінки коефіцієнта лінійної кореляції $r_{ye/yp}$ (y_e – експериментальні значення втрати маси, y_p – розрахункові значення втрати маси)

без урахування парних ефектів та з урахуванням найкращого парного ефекту відповідно до співвідношення:

$$r_{y_e/y_p} = \frac{\sum_i^n y_{e_i} * y_{p_i} - n * \bar{y}_e * \bar{y}_p}{\sqrt{\left(\sum_i^n y_{e_i}^2 - n * \bar{y}_e^2 \right) * \left(\sum_i^n y_{p_i}^2 - n * \bar{y}_p^2 \right)}} \quad (7)$$

дала результати, що наведені в таблицях: табл. 3–5.

Таблиця 3 – Значення експериментальних та розрахункових даних щодо втрати маси $\Delta m, \times 10^{-4} \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2} \right)$ без урахування парних ефектів (згідно з поліномом $y = b_0 + b_1 * x_{1_i} + b_2 * x_{2_i} + b_3 * x_{3_i}$)

№	y_e	y_p	$ \Delta y $	r_{y_e/y_p}
1	2,2	1,975	0,225	0,9546
2	2,1	2,325	0,225	
3	2,0	2,025	0,025	
4	2,4	2,375	0,025	
5	2,8	2,825	0,025	
6	3,2	3,175	0,025	
7	2,7	2,875	0,175	
8	3,4	3,225	0,175	
середнє	2,6	2,6		

Таблиця 4 – Значення експериментальних та розрахункових значень втрати маси $\Delta m, \times 10^{-4} \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2} \right)$ з урахуванням найкращого парного ефекту $x_1 * x_2$ ($b_{12} = 1$) (згідно з поліномом $y = b_0 + b_1 * x_{1_i} + b_2 * x_{2_i} + b_3 * x_{3_i} + b_{12} * x_{12}$)

№	y_e	y_p	$ \Delta y $	r_{y_e/y_p}
1	2,2	2,075	0,125	0,9769
2	2,1	2,225	0,125	
3	2,0	1,925	0,075	
4	2,4	2,475	0,075	
5	2,8	2,925	0,125	
6	3,2	3,075	0,125	
7	2,7	2,775	0,075	
8	3,4	3,325	0,075	
середнє	2,6	2,6		

Всі значення коефіцієнтів множинної кореляції (R) відповідають значенням лінійної кореляції r_{y_e/y_p} , що, в свою чергу, свідчить про коректність та надійність проведених розрахунків.

Отже без урахування парних ефектів маємо:

$$R = 0,9546, \quad r_{y_e/y_p} = 0,9546,$$

Таблиця 5 – Значення експериментальних та розрахункових значень втрати маси $\Delta m, \times 10^{-4} \left(\frac{\Gamma}{\text{М}^2} \right)$ з урахуванням парного ефекту $x_2 * x_3$ ($b_{23} = 1$)

№	y_e	y_p	$ \Delta y $	$\frac{r \cdot y_e}{y_p}$
1	2,2	2,075	0,125	0,9769
2	2,1	2,225	0,125	
3	2,0	2,125	0,125	
4	2,4	2,275	0,125	
5	2,8	2,725	0,075	
6	3,2	3,275	0,075	
7	2,7	2,775	0,075	
8	3,4	3,325	0,075	
середнє	2,6	2,6		

- з урахуванням парного ефекту $x_1 * x_2$:

$$R = 0,9769, \quad r \frac{y_e}{y_p} = 0,9769$$

- з урахуванням парного ефекту $x_2 * x_3$:

$$R = 0,9769; \quad r \frac{y_e}{y_p} = 0,9769.$$

Нижче наведено результати визначення похибки середньо квадратичних значень (Δb) за формулою:

$$(\Delta b) = \pm \sqrt{\frac{\sum (\Delta y)_i^2}{n * (1+k)}}, \quad (8)$$

де k – кількість факторів.

Розрахунки за цією формулою дали такі результати:

- без урахування парних ефектів

$$(\Delta b) = \pm 0,0718;$$

- з урахуванням парного ефекту $x_1 * x_2$,

$$(\Delta b) = \pm 0,0515.$$

Нижче наведені рівняння залежності втрати маси Δm від вмісту легувальних елементів без та з урахуванням парних ефектів у кодовому та натуральному масштабах:

Без урахування парних ефектів масмо:

- у кодовому масштабі

$$y = 2,6 - 0,025 * x_1 - 0,175 * x_2 - 0,425 * x_3,$$

- у натуральному масштабі

$$\Delta m * 10^4 \left(\frac{\Gamma}{\text{М}^2} \right) = 3,9566 - 0,0125 * \%Cr - 0,2917 * \%Si - 1,2143 * \%Al.$$

З урахуванням парного ефекту $x_2 * x_3$:

- у кодовому масштабі:

$$y = 2,6 - 0,025 * x_1 - 0,175 * x_2 - 0,425 * x_3 + 0,1 * x_1 * x_2,$$

- у натуральному масштабі

$$\Delta m * 10^4 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2} \right) = 4,4566 - 0,0125 * \text{Cr} - 0,6489 * \text{Si} - 1,8810 * \text{Al} + 0,4762 * \text{Si} * \text{Al}.$$

Отже з урахуванням трьох факторів впливу, отримане лінійне рівняння в кодовому масштабі зі множинним коефіцієнтом кореляції більшим за 0,95; крім цього було знайдено середньоквадратичну похибку коефіцієнтів цього рівняння з урахуванням ротабельності дисперсії дослідів. Перевірка наявності змішаних ефектів парного впливу не привела до суттєвого збільшення коефіцієнта кореляції, що дозволило знехтувати цими ефектами. Отже отримана нами гіперплощина цільової функції (втрата маси) достатньо точно характеризує вплив концентраційних факторів, що дозволяє ефективно скористатися цим рівнянням для корегування процентних кількостей зазначених вище хімічних елементів, а саме хрому, кремнію та алюмінію. Ця обставина дає можливість знайти найкращий хімічний склад дослідного сплаву з урахуванням усіх вимог; що ставлять технологи та конструктори до сталі 03X3CЮ при її застосуванні в умовах виробництва як жаростійкого матеріалу.

Список літератури

1. Ольшанецкий В. Е. О физических подходах к математическому моделированию функциональных связей / В. Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 80–86.

Одержано 26.12.2013

© Д-р техн. наук В. Ю. Ольшанецький, канд. техн. наук О. В. Нестеров,
Л. М. Денисенко, О. А. Джуган

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

Olshanetskiy V., Nesterov O., Denisenko L., Dzhugan O. An optimization of the low carbon heat resistant steel 03X3CЮ composition
