УДК 669.136.9:621.785.5

Д-р техн. наук Б. П. Середа[1], С. Н. Ткаченко[2]

[1]Запорожская государственная инженерная академия,
[2]АО «Запорожский сталепрокатный завод»;
г. Запорожье

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЧУГУНА И СТАЛИ КРЕМНИЕМ В УСЛОВИЯХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

В данной работе показаны результаты математического планирования свойств поверхностных слоев на деталях из разных марок, нанесенных в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, приведены фотографии поверхности упрочненных деталей.

Ключевые слова: *самораспространяющийся височотемпературный синтез, диффузия, поверхностное упрочнение, микроструктура, поверхностный слой, микротвердость.*

Введение

В работе для нанесения покрытий использовали следующие марки чугунов: АСЧ-1, СЧ-20, СЧ-25, ВЧ 45-5, ВЧ 38-17, ВЧ 42-12. Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ($P = 10^5$ Па) при рабочем интервале температур 950–1050 °С и общей продолжительности изотермической выдержки 2–6 ч (как для одновременного, так и для последовательного способа насыщения). В качестве насыщающей среды [1] использовали смесь порошков [2]: Si, Al, Cr_2O_3, Al_2O_3, NH_4Cl, дисперсностью 100–350 мкм следующих материалов: Cr_2O_3 – оксид хрома – окислитель; Al_2O_3 – оксид алюминия – инертная добавка; Al – алюминий – восстановитель; Si – кремний марки Кр1 – источник кремния в покрытии; NH_4Cl – хлористый аммоний – активатор процесса насыщения.

С целью поиска составов порошковых СВС-смесей [3] обеспечивающих заданные свойства использовался дробный факторный эксперимент [4]. Требуется выбрать оптимальный состав шихты и режим СВС-процесса с целью обеспечения микротвердости наносимого слоя 400 кг/мм^2. Параметр оптимизации (Y) – микротвердость нанесенного слоя. Сокращение экспериментальных затрат достигается применением дробных реплик от полного факторного эксперимента, применением дробного факторного эксперимента ДФЭ. С целью изучения влияния химического состава и условий проведения термической обработки на величину зерна использовался дробный факторный эксперимент [5].

Кодирование факторов

Кодирование факторов необходимо для перевода натуральных факторов (°С и τ) в безразмерные величины, чтобы иметь возможность построить стандартный ортогональный план матрицы эксперимента. Для перевода натуральных переменных в кодовые X_i заполняют таблицу 1 кодирования на двух уровнях. В качестве нулевого уровня факторов выбирают центр интервала, в котором будут проводить эксперименты.

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\delta_i}, \qquad (1)$$

где X_i – натуральное значение фактора; X_{i0} – нулевое (среднее) значение фактора; δ_i – интервал варьирования.

Таблица 1 – Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровни факторов	Содержание Si в шихте, %	Содержание ХС в шихте,%	Температура процесса, °С	Время выдержки, ч
код	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$
Основной уровень $X_i = 0$	30	20	1000	4
Интервал варьирования δ_i	10	10	100	2
Нижний уровень $X_i = -1$	20	10	900	2
Верхний уровень $X_i = 1$	40	30	1100	6

Составление плана матрицы

Так как количество исследуемых факторов составляет 4, то выбираем дробную реплику 2^{4-1} следующего вида. Для построения плана дробного факторного эксперимента записываем дробную реплику в развернутом виде, где исключается фактор X_4, который варьируется с соответствии с генерирующим соотношением $X_4 = X_1X_2X_3$ (табл. 2).

Таблица 2 – Матрица планирования ДФЭ 2^{4-1}

Номер опыта	Значение факторов в кодированном виде				
	*X*0	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4(*X*1*X*2*X*3)
1	+	+	+	+	+
2	+	+	+	-	-
3	+	+	-	+	-
4	+	+	-	-	+
5	+	-	+	+	-
6	+	-	+	-	+
7	+	-	-	+	+
8	+	-	-	-	-

Реализация плана эксперимента

Для определения дисперсии опыта были организованные опыты 9–11 на основном уровне табл. 3. При этом получили значения параметра оптимизации.

Таблица 3 – Расчетная таблица дисперсии опыта

Опыт	y_e	$\lvert y_{0e} - y_0\rvert$	Δy_e^2
9	385	2	36
10	380	3	
11	384	1	
	$y_0 = 383$	$\sum \Delta y = 6$	

Для определения ошибки эксперимента опыты следует дублировать. Чаще дублируют не все опыты, а только опыты на основном уровне. В этом случае, расчет дисперсии опыта *Sy* проводится по формуле: $S_y^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Yoi - Yo)^2}{f_1}$,

где n – количество дублей на основном уровне; i – номер дубля; Yoi – значение параметра оптимизации в i-м дубле; Yo – среднее арифметическое результатов всех дублей; f_1 – число степеней свободы ($f_1 = n - 1$). Тогда:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Yoi - Yo)^2}{f_1} = \frac{36}{4-1} = 12 .$$

Построение математической модели

После реализации всех опытов матрицы планирования по их результатам строят математическую модель изучаемого процесса. Для этого при использовании ДФЭ, рассчитываем коэффициенты регрессии уравнения по формуле: $b_j = \sum_{j=1}^{n} \frac{X_{jn} \cdot Y_n}{N}$, b_j – значение j-го коэффициента регрессии ($j = 0,1,2,,k$); X_{jn} – значение j-го фактора в n-м опыте в кодированном виде; Y_n – значение параметра оптимизации в n-м опыте;

N – число опытов в матрице планирования. В результате получаем модель, которая имеет следующий вид: $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \ldots + b_jX_j$

Таблица 4 – Результаты опытов

опыт	1	2	3	4	5	6	7	8
результат	395	375	370	380	395	390	395	370

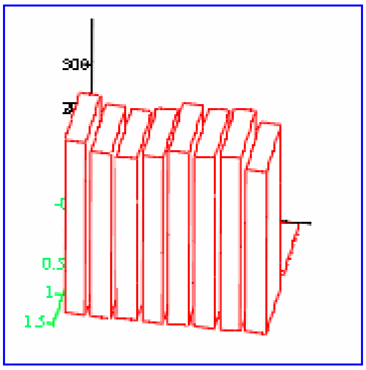

Рис. 1. Гистограмма результатов опытов

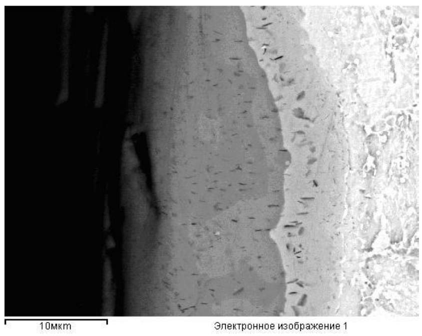

Рис. 2. Электронное изображение поверхности борированной стали марки Ст45

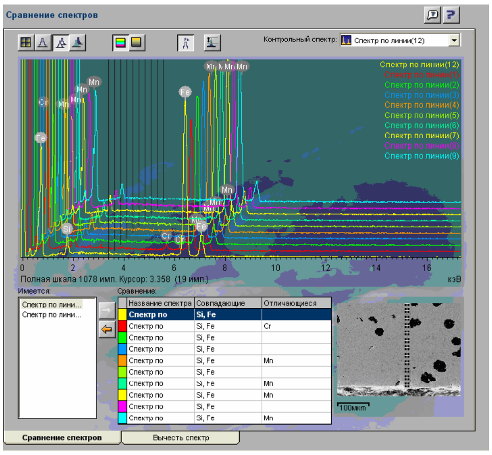

Рис. 3. Распределение элементов в весовых процентах на силицированной детали из чугуна марки ВЧ 45-5

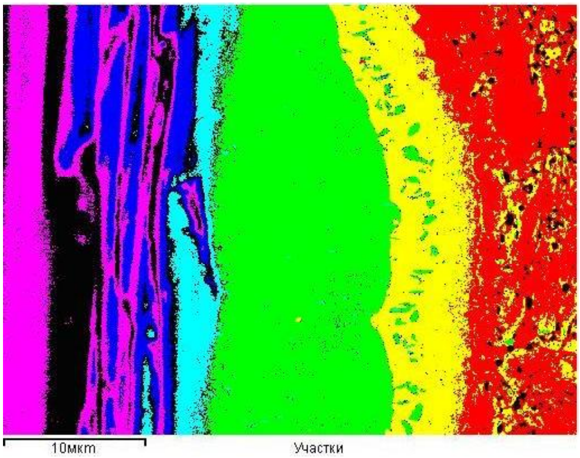

Рис. 4. Электронное изображение поверхности по участкам борированной детали марки Ст45

По формуле рассчитываем коэффициенты регрессии искомой модели:

$$b_0 = 1/8 \cdot [395+375+370+380+395+390+395+370] = 383{,}75;$$

$$b_1 = -3{,}75;\ b_2 = 5;\ b_3 = 5;\ b_{123} = 6{,}25.$$

Линейная модель имеет вид:

$$y = 383{,}75 - 3{,}75.X_1 + 5X_2 + 5X_3 + 6{,}25X_1X_2X_3.$$

Статический анализ модели. Целью анализа является проверка пригодности модели для ее использования при описании исследуемого объекта. Анализ состоит из двух этапов. На первом этапе проверяем статистическую значимость коэффициентов раегрессии. В статистике принято осуществлять проверку значимости коэффициентов регрессии с помощью критерия Стьюдента (t- критерия). Для этого, рассчитываем доверительный интервал коэффициентов $\Delta b_i = t_{\alpha fl} \cdot S_{bi}$, где S_{bi} – среднеквадратическая ошибка в определении коэффициентов регрессии $S_{bi} = \sqrt{\dfrac{S_y^2}{N}}$, $t_{бfl}$ – значение t- критерия, которое выбираем в зависимости от уровня значимости «α» и числа степеней свободы при определении дисперсности опыта f_1. Значения коэффициентов регрессии сравниваем с Δb_i и те, которые оказываются по абсолютной величине меньше доверительного интервала, исключают из уравнения. На втором этапе, окончательно полученное уравнение проверяем на адекватность, то есть его пригодность для описания объекта исследования. Рассчитываем доверительный интервал коэффициентов регрессии Δb_i. Для этого в начале определим S_{bi}. $S_{bi} = \sqrt{\dfrac{12}{8}} = \pm 1{,}22$. Выбираем для $\alpha = 0{,}05$ и f_1. Значение критерия Стьюдента равно 3,18. Определяем $\Delta b_i = \pm 3{,}18 \cdot 1{,}22 = \pm 3{,}88$.

Таким образом, в полученном уравнении коэффициент «b_1» статистически незначим, так как для него условие $|b_1| > \Delta b$ не выполняется, и уравнение приобретает окончательно следующий вид: $y = 383{,}75 + 5 \cdot X_2 + 5 \cdot X_3 + 6{,}25 \cdot X_1 X_2 X_3$. Теперь проверяем адекватность полученной модели в целом. Для этого, подставляем в полученное уравнение последовательно для всех опытов значение «X_i» в кодированном виде, которые берем из таблицы 2. Таблица 5 составлена, исходя из алгоритма проверки полученного уравнения на адекватность, т. е. его пригодности для написания объекта исследования. Последовательность проверки такова:

1. По полученной модели определяют поочередно для всех опытов матрицы планирования расчетные значения параметра оптимизации ($y_{расч}$). Для этого в уравнение подставляют значение факторов в кодированном виде. $y_{расч1} = 383{,}75+5(+1)+5(+1)+6{,}25(+1) = 400$ и т. д.
2. По формуле получают оценку дисперсии адекватности: $S^2_{ад} = \dfrac{\sum_{n=1}^{N} (y_n^{расч} - y_n^{расч})^2}{f_2}$, где $f_2 = N - K'$, K' –число коэффициентов модели, включая b_0.
3. Определяют расчетное значение F-критерия (Фишера), сравнивают с табличным, которое выбирают из таблицы в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы f_1 и f_2. В случае, если расчетное значение окажется меньше табличного, или будет равно ему, то модель признают адекватной. Если модель оказывается адекватной, то это значит, то ее можно использовать для описания объекта исследования в изученных пределах изменения факторов $F^{расч}_{f1,f2} = \dfrac{S^2_{ад}}{S^2_y} \le F_t(0.05; f_{ад} f_y)$.

Таблиця 5 – Расчет дисперсии адекватности

Опыт	Значение у		$\lvert\Delta y\rvert$	Δy^2
	Экспериментальное	Расчетное		
1	395	400	5	25
2	375	378	3	9
3	370	378	8	64
4	380	380	0	0
5	395	388	7	49
6	390	390	0	0
7	395	390	5	25
8	370	368	2	4

$\sum = 176$ $S_{ад}^2 = \frac{176}{8-4} = 44$; $F_{f1,f2}^{расч} = \frac{44}{12} = 3{,}67$. Из таблицы для $\alpha = 0{,}05$, $f_1 = 3$ и $f_2 = 4$ находим табличное значение критерия Фишера, равное 6,59. Таким образом, условие адекватности модели $F^{табл} < F^{расч}$ выполняется и ею можно пользоваться для расчета значений микротвердости силицированных покрытий чугунов. Для этого, надо в уравнение подставить значение факторов в кодированном масштабе. При этом следует помнить, что полученная модель описывает процесс силицирования чугунов только в изученных пределах варьирования факторов.

Список литературы

1. Многокомпонентные диффузионные покрытия под ред. Ляховича Л. С. — Минск : Наука и техника, 1974. – 272 с.
2. Мержанов А. Г. Процессы горения и синтеза материалов / А. Г. Мержанов. — Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
3. Середа Б. П. Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Б. П. Середа, Н. Є. Калініна, І. В. Кругляк.– Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2004. – 230 с.
4. Середа Б. П. Теория строения жидкого, кристаллического и аморфного состояния вещества / Б. П. Середа. – Запорожье, 2003. – 179 с.

Поступила в редакцию 30.03.2010

Середа Б.П., Ткаченко С.М. Математичне планування поверхневого зміцнення чавуну і сталі кремнієм в умовах високотемпературного синтезу

У даній роботі показані результати математичного планування властивостей поверхневих шарів на деталях з різних марок, нанесених в умовах високотемпературного синтезу, що саморозповсюджується, приведені фотографії поверхні зміцнених деталей.

Ключові слова: *саморозповсюджуваний високотемпературний синтез, дифузія, поверхневе зміцнення, мікроструктура, поверхневий шар, мікротвердість.*

Sereda B., Tkachenko S. Mathematical planning of surface hardening of iron and steel with silicon in a self-propagating high temperature synthesis

In this work the results of the mathematical planning of properties of superficial layers are rotined on details from different brands, inflicted in the conditions of self-propagating high temperature synthesis, the pictures of surface of the work-hardened details are resulted.

Key words: *self-propagating high-temperature synthesis, diffusion, superficial work-hardening, microstructure, superficial layer, microhardness.*