

Дюамеля. Однако адекватность результатов следует считать ограниченной, т.к. приведенные в работе зависимости не учитывают нелинейности колебательных процессов (например, релаксационные и гистерезисные явления), поэтому методику целесообразно использовать для предварительных расчетов.

Список литературы

1. Писаренко Г.С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях. - Киев: Наукова думка, 1985. - 235 с.
2. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. - 2-е изд. - М., 1967.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1971. - 375 с.
4. Кирьянов Д.В. Сопротивление материалов с решением задач в Mathcad. - СПб.: БХВ-Петербург., 2006. - 526 с.

УДК 519.242:519.233.5

А.В. Зайцев, С.Н. Синицын, В.А. Фролов
Курганский государственный университет

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ДИФфуЗИОННОМ ХРОМИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

Аннотация. В статье приводятся этапы планирования и математическая обработка результатов эксперимента по определению толщины упрочненного слоя в зависимости от температуры и времени окисления.

Ключевые слова: планирование эксперимента, коэффициенты регрессии, уравнение регрессии.

A.V. Zaitsev, S.N. Sinitsyn, V.A. Frolov
Kurgan State University

PLANNING AND EXPERIMENT PROCESSING AT DIFFUSIVE CHROME- PLATING OF DETAILS FROM GREY CAST- IRON

Annotation. In the article stages of planning and mathematical processing of results of experiment by definition of a thickness of the strengthened layer depending on temperature and oxidation time are resulted.

Key words: experiment planning, regress factors, equation of regression.

Введение

Целью эксперимента являлось получение двухфакторной математической модели (уравнения регрессии), связывающей толщину упрочненного слоя и режим химико-термической обработки: температуру и время выдержки.

На первом этапе проводился полный факторный эксперимент типа 2^2 (ПФЭ 2^2) с целью выявить удельный вес влияния каждого фактора на толщину упрочненного слоя.

Во втором этапе была проведена проверка адекватности полученной модели с помощью проверочных опытов. План эксперимента был достроен до плана второго порядка. Обработка результатов позволила получить модель второго порядка, более адекватно описывающую зависимость толщины упрочненного слоя от ре-

жима химико-термической обработки.

Эксперименты проводились в следующем диапазоне варьирования факторов:

Температура T : 1173...1373 К;

Время выдержки τ : 2...8 часов.

1. Полный факторный эксперимент

Сущность этого плана эксперимента состоит в том, что в каждом опыте оба фактора принимают одно из крайних значений (наибольшее или наименьшее). Количество опытов равняется числу возможных сочетаний этих уровней факторов. Таким образом, при числе факторов и числе уровней, равном 2, число опытов равняется $2^2 = 4$.

Рабочая матрица (таблица соответствия) эксперимента представлена в табл. 1.

Таблица 1

Рабочая матрица полного факторного эксперимента

Уровень	Кодированные значения факторов	Натуральные значения факторов	
		T, К	τ , ч
Нижний	-1	1173	2
Верхний	+1	1373	8
Основной	0	1273	5
Интервал варьирования	1	100	3

Матрица планирования и результатов представлена в табл. 2. Как видно из табл. 2, каждый опыт повторялся 3 раза. При проведении опытов использовался прием рандомизации – случайной последовательности проведения опытов.

Таблица 2

Матрица планирования и результатов эксперимента 2^2

№ опыта	Порядок проведения	X_0	План		$X_1 X_2$	Результаты опытов			
			X_1	X_2		Y_1	Y_2	Y_3	$Y_{ср}$
1	7, 12, 6	+	-	-	+	0,13	0,12	0,14	0,130
2	2, 9, 11	+	+	-	-	0,51	0,70	0,61	0,607
3	1, 4, 8	+	-	+	-	0,38	0,34	0,42	0,380
4	3, 10, 5	+	+	+	+	1,04	1,08	1,06	1,060

Коэффициенты регрессии полного факторного эксперимента

Коэффициенты регрессии полного факторного эксперимента определяются как среднее арифметическое результатов опытов со знаками соответствующего столбца:

$$b_0 = (0,130 + 0,607 + 0,380 + 1,060) / 4 = 0,54;$$

$$b_1 = (-0,130 + 0,607 - 0,380 + 1,060) / 4 = 0,29;$$

$$b_2 = (-0,130 - 0,607 + 0,380 + 1,060) / 4 = 0,176;$$

$$b_{12} = (0,130 - 0,607 - 0,380 + 1,060) / 4 = 0,05.$$

Малое значение коэффициента регрессии при взаимодействии факторов вынуждает проверить гипотезу о статистической значимости этого коэффициента.

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии проводится по величине доверительного интервала:

$$\Delta b_i = \pm t S(b_i),$$

где $\pm t$ – коэффициент Стьюдента. При числе степеней свободы $f = N(n - 1) = 4(3 - 1) = 8$ (N – число опытов, n – число параллельных опытов) и доверительной вероятности 0,95 коэффициент Стьюдента равен 2,3; $S(b_i)$ – ошибка коэффициентов регрессии.

Вычисление $S(b_i)$ проводилось по следующим зависимостям:

Построчные дисперсии параллельных опытов:

$$S_i^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{f_1}, \text{ где } f_1 = n - 1 = 2.$$

$$\text{Дисперсия воспроизводимости: } S^2(y) = \frac{\sum S_i^2}{N}.$$

$$\text{Дисперсия коэффициентов регрессии: } S^2(b_i) = \frac{S^2(y)}{Nn}.$$

$$\text{Ошибка коэффициентов регрессии: } S(b_i) = \sqrt{S^2(b_i)}.$$

Результаты расчета

$$\text{Дисперсия воспроизводимости: } S^2(y) = 0,0028.$$

$$\text{Дисперсия коэффициентов регрессии: } S^2(b_i) = 0,00023.$$

$$\text{Ошибка коэффициентов регрессии: } S(b_i) = 0,0152.$$

$$\text{Доверительный интервал коэффициентов регрессии: } \Delta b_i = \pm 0,035.$$

Все коэффициенты регрессии статистически значимы, так как их величина больше доверительного интервала.

Таким образом, уравнение регрессии полного факторного эксперимента имеет вид:

$$y = 0,54 + 0,29 X_1 + 0,176 X_2 + 0,05 X_1 X_2.$$

С математической точки зрения уравнение представляет собой неполный полином второй степени.

Анализ уравнения показывает, что наблюдается взаимовлияние температуры и времени выдержки на толщину упрочненного слоя (коэффициент b_{12} значим).

Поверхность отклика полного факторного эксперимента представлена на рис. 1. Поверхность представляет собой седловидный гиперболический параболоид с малой кривизной поверхности и непараллельностью граней из-за взаимовлияния факторов.

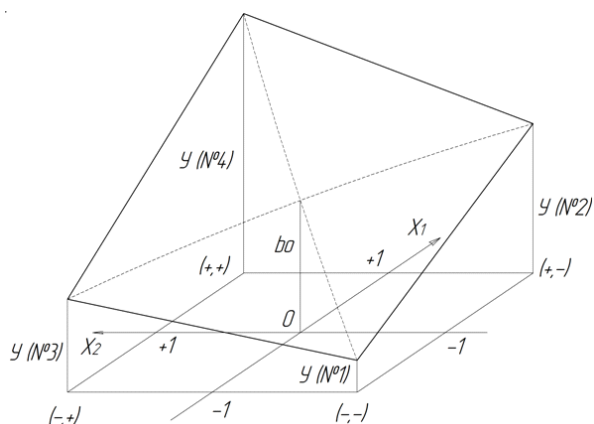


Рис. 1. Поверхность отклика ПФЭ 2²

Полученное уравнение справедливо только в кодированной (безразмерной) форме. Для перевода уравнения в размерный вид используют формулу, связывающую безразмерные (кодированные) и размерные (натуральные) значения факторов:

$$X_{\text{кодир}} = (X_{\text{натур}} - X_{\text{осн}}) / \text{интервал}.$$

$$\text{Для температуры: } X_1 = \frac{T - 1273}{100}.$$

$$\text{Для времени выдержки: } X_2 = \frac{\tau - 5}{3}.$$

После подстановки этих выражений в безразмерное уравнение и после арифметических преобразований получается размерное уравнение для расчета толщины слоя:

$$g = -2,3842 + 0,0021 \cdot T - 0,1535 \cdot \tau + 0,0002 \cdot T \cdot \tau, \text{ мм.}$$

2. Эксперимент второго порядка

Для проверки адекватности уравнения полного факторного эксперимента был проведен проверочный опыт в центре плана, а именно при $T=1273$ К и $\tau = 5$ часов. В безразмерной (кодированной) форме координаты этой точки (0; 0).

В трех повторных опытах среднее значение толщины упрочненного слоя получилось 0,58 мм. А по уравнению полного факторного эксперимента 0,54 мм. Расхождение превышает 7%. Поэтому было принято решение провести дополнительные опыты, построив план полного факторного эксперимента до плана второго порядка.

За основу был выбран ортогональный центральный композиционный план, ядро которого составляет план ПФЭ 2².

План эксперимента и результаты (средние по параллельным опытам) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Двухфакторное ортогональное
центрально-композиционное планирование

№ опыта	Температура		Время выдержки		g, мм
	X ₁	T, К	X ₂	τ, ч	
1	-	1173	-	2	0,130
2	+	1373	-	2	0,607
3	-	1173	+	8	0,380
4	+	1373	+	8	1,060
5	-	1173	0	5	0,235
6	+	1373	0	5	0,872
7	0	1273	-	2	0,270
8	0	1273	+	8	0,680
9	0	1273	0	5	0,580

При обработке эксперимента второго порядка использовалась программа Statistika.

Поверхность отклика эксперимента изображена на рис. 2.

Уравнение регрессии второго порядка имеет вид:

$$g = 3,4344 - 0,0074 \cdot T - 0,1078 \cdot \tau + 3,7333 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0046 \cdot \tau^2 + 0,0002 \cdot T \cdot \tau, \text{ мм}$$

Следует иметь в виду, что уравнение справедливо только в рассмотренном диапазоне изменения температуры и времени выдержки.

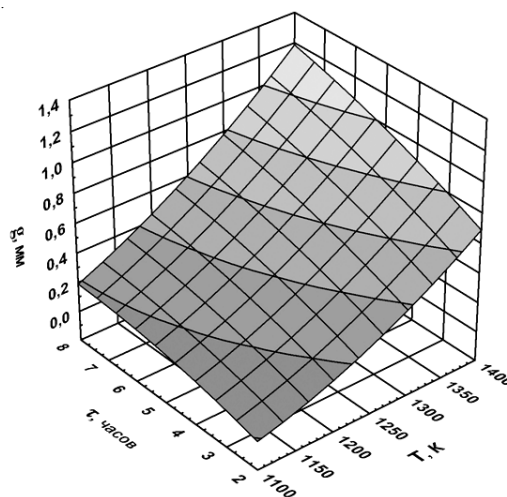


Рис. 2. Поверхность отклика второго порядка

Закключение

Получено уравнение регрессии, описывающее глубину упрочненного диффузионным хромированием слоя деталей из серого феррито-перлитного чугуна в зависимости от температуры и времени выдержки. На основании этого уравнения можно назначить режим химико-термической обработки с целью получения упрочненного слоя требуемой толщины.

Предложены два уравнения регрессии: неполный полином второй степени и полный полином второй степени. Второе уравнение адекватнее описывает глубину упрочненного слоя, однако для упрощенных расчетов можно использовать более простое уравнение полного факторного эксперимента.

Список литературы

1. Некрасов В.И. Многофакторный эксперимент. Планирование и обработка результатов: Учеб. пособие. – Курган: Изд-во КГУ, 1998. – 146 с.
2. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
3. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение. София: Техника, 1980. – 304 с.
4. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
5. Лавренчик В.Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.

УДК 519.87(04)

А.Г. Кокин

Курганский государственный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация. В работе рассматривается использование метамоделей - регрессионной модели, полученной в результате экспериментов с имитационной моделью с целью замещения последней при оптимизации. В качестве объекта для исследования выбран пост ДПС. В результате исследования выявлены основные характеристики системы.

Ключевые слова: оптимизация, мета модель, регрессия, факторы, отклик.

A.G.Kokin,

Kurgan State University

OPTIMIZATION OF SIMULATION MODELS

Annotation. The work studies the use of meta - regression model got from the experiments with the simulation model to replace it in optimization. The post of traffic patrol service is chosen as an study object. As the results of the research the main system characteristics are brought out.

Key words: meta-model, regression, factors, response.

Задача оптимизации на основе имитационного моделирования формулируется следующим образом: необходимо найти значения входных переменных (факторов),

оптимизирующих основной выходной показатель системы (отклик). При этом предполагается, что функция отклика может быть рассчитана с помощью проведения имитационного эксперимента с моделью сложной системы [1].

Оптимизация на основе имитационного моделирования заключается в совместном использовании имитационной модели сложной системы и алгоритма оптимизации. С помощью ИМ рассчитываются значения отклика для различных комбинаций значений факторов, которые предлагает алгоритм оптимизации. Поисковый алгоритм оптимизации, в свою очередь, используя значения отклика, пытается улучшить решение.

Применение в качестве алгоритма оптимизации точных математических методов оптимизации, обеспечивающих нахождение оптимального решения, не всегда целесообразно, поскольку имитационная модель является копией реальной системы с некоторой степенью точности. Поэтому, в большинстве случаев в качестве алгоритма поисковой оптимизации лучше использовать методы, которые не обязательно гарантируют достижение точного оптимума, а находят близкие к оптимальным решения и при этом обеспечивают быструю поисковую сходимости алгоритма.

На сегодняшний день существует несколько программных пакетов оптимизации имитационного моделирования, которые используют средства имитационного моделирования совместно с различными методами поиска решений. В большинстве пакетов оптимизации в качестве процедур поиска решений используются эволюционные стратегии и генетические алгоритмы.

Наиболее применимым на практике способом решения данной проблемы является использование метамоделей. Мета моделью принято называть приближенную математическую модель, полученную в результате экспериментов с имитационной моделью с целью замещения последней при оптимизации.

Основными методами построения метамоделей являются регрессионные модели и искусственные нейронные сети, к которым в последнее время проявляется большой интерес, благодаря их мощной аппроксимирующей способности.

Мета модели являются регрессионными моделями, представляющими собой оценку функции реакции системы на изменение значений факторов. С построением регрессионных моделей связано планирование машинных экспериментов с моделями систем.

Машинные эксперименты моделей систем производятся с помощью средств имитационного моделирования, к которым относятся сети Петри, система GPSS и другие.

Рассмотрим исследование моделей в системе GPSS. Важными характеристиками системы оптимизации на основе имитационного моделирования являются: нормативы обслуживания заявок и стационарность получаемых оптимальных решений.

Нормативы обслуживания для каждой операции обслуживания заявок разрабатываются как определенные нормы времени обслуживания от $t_{\min}$ до $t_{\max}$. Время обслуживания в заданных нормах определяет квалификацию исполнителя. Введение времени обслуживания в приборах СМО в соответствии с нормативами позволяет осуществлять оптимизацию с заданными ограничениями.

Стационарность потоков обслуживания определяется как поток событий, в котором его вероятностные характеристики не зависят от времени. Стационарность потоков предполагает, что оптимальный режим обслуживания должен сохраняться на протяжении всего рабочего времени. Это достигается равенством средних значений времени поступлений заявок в систему и вре-