

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ф.С.Новик, Л.Г.Воршнин, Г.Ф.Протасевич

В последние годы активно развивается принципиально новый подход к проведению экспериментальных исследований – математические методы планирования экспериментов. К настоящему времени уже существуют разнообразные методы планирования, позволяющие решить практически любую реальную задачу. Наиболее эффективно применение планирования экспериментов для решения экстремальных задач, а именно с такими задачами приходится иметь дело при разработке технологии различных методов химико-термической обработки и исследовании свойств диффузионных покрытий. Например, требуется выбрать состав расплава (насыщающей смеси), обеспечивающий максимальную скорость формирования диффузионного слоя, разработать расплавы для низкотемпературной химико-термической обработки, установить оптимальный режим насыщения, обеспечивающий максимальную износостойкость, жаростойкость или коррозионную стойкость диффузионного слоя, подобрать оптимальный состав стали (сплава) для того или иного способа насыщения, установить наиболее выгодный режим последующей термической обработки и т.д. Задача в этом случае формулируется следующим образом. Предполагается, что параметр оптимизации (например, глубина слоя) связан с факторами (т.е. с теми независимыми переменными – состав насыщающей смеси, температура процесса, время насыщения и пр., которые влияют на изменение глубины слоя) каким-то математическим выражением. Требуется так поставить эксперименты, чтобы при их минимальном количестве найти область оптимума и получить ее математическую модель. Подход здесь чисто кибернетический. Процесс влияния факторов на параметр оптимизации представляется в виде черного ящика, и экспериментатор на первом этапе исследования по сути дела абстрагируется от механизма явления. Он лишь меняет вход в черный ящик и наблюдает за изменением выхода из ящика. После этого исследователь ищет математические модели, связывающие на-

метр оптимизации с факторами. Анализ моделей позволяет найти кратчайшее направление движения к области оптимума.

Планирование экспериментов позволяет построить стратегию исследования, основанную на последовательности четких, логически обоснованных операций. Задача решается поэтапно, причем на каждом этапе ставится небольшая серия опытов, результаты которых вместе с интуитивными решениями определяют следующий шаг.

Решение задачи можно закончить получением математической модели. Математическая модель процесса необходима при переходе от лабораторных исследований к промышленному внедрению и автоматическому управлению и регулированию.

Важно также, что в случаях со многими факторами исследователь при планировании ставит эксперименты так, что все факторы варьируются сразу в отличие от традиционного подхода, где изучается действие каждого фактора в отдельности.

Указанный подход значительно эффективнее традиционного, при котором исследователь решает задачу либо основываясь только на своем опыте и интуиции (методом проб и ошибок), либо вначале всесторонне исследует механизм процесса, создает теорию процесса, а затем уже с ее помощью решает поставленную задачу.

Эффективность нового метода тем выше, чем сложнее изучаемая система.

Задачи химико-термической обработки усложняются с каждым годом. Все большее внимание уделяется процессам насыщения металлов и сплавов двумя и более элементами. Детальный анализ таких процессов требует слишком больших затрат времени и средств и вряд ли может быть эффективным без применения планирования экспериментов. Метод планирования экспериментов может быть весьма полезным и при выяснении механизма процессов диффузионного насыщения.

Проиллюстрируем метод планирования экспериментов на примере получения кавитационностойких силицированных слоев на чугуне марки СЧ 28-48. Насыщение осуществлялось из расплава  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaCl}$ , в который сверх 100% добавлялся карбид кремния ( $\text{SiC}$ ). В качестве факторов (независимых переменных) выбраны: температура силицирования,  $^{\circ}\text{C}$  ( $X_1$ ), количество вводимого в расплав карбида кремния, % ( $X_2$ ), количество  $\text{NaCl}$ , % ( $X_3$ ) и время насыщения, ч. ( $X_4$ ). Параметром оптимизации ( $Y$ ) являлась кавитационная стойкость чугу-

на, которая определялась на магнитострикционном вибраторе при следующих условиях испытания:

резонансная частота - 17,0 кГц,  
 амплитуда колебания - 14,5 мк,  
 температура воды -  $90 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  
 время испытания - 120 мин.,

интенсивность кавитационного разрушения оценивалась по потере веса, мг.

План эксперимента (полуреплика  $2^{4-1}$  с определяющим контрастом  $I = X_1X_2X_4$ ), условия проведения опытов и полученные результаты приведены в табл. I.

Т а б л и ц а I

Матрица планирования  $2^{4-1}$  и результаты опытов

Факторы	Фиктивная переменная*	$t$ , °C	Количество SiC в расплаве, %	Количество NaCl в расплаве, %	$\tau$ , ч.	Потеря веса, мг ( $t_{\text{исп.}} = 120$ мин)	
I	2	3	4	5	6	7	
К о д	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	у	
Основной уровень (0)		950	25	35	3		
Интервал варьирования (J)		50	10	15	1		
Верхний уровень (+1)		1000	35	50	4		
Нижний уровень (-1)		900	15	20	2		
Опыты	I	+	-	-	-	+	60,1
	2	+	+	-	-	-	75,0
	3	+	-	+	-	-	96,6
	4	+	+	+	-	+	79,8
	5	+	-	-	+	+	96,7
	6	+	+	-	+	-	85,5
	7	+	-	+	+	-	95,5
	8	+	+	+	+	+	109,5

\*  $X_0 = +1$ , ее оценка дает величину свободного члена ( $\beta_0$ ) в уравнении регрессии.

	1	2	3	4	5	6	7
Осн. уровень	9	+	0	0	0	0	93,9
	10	+	-	+	-	-	87,0
	11	+	+	+	-	+	88,5
	12	+	-	-	+	+	92,6
	13	+	+	-	+	-	87,2
Осн. уровень	14	+	0	0	0	0	94,6

Каждый из факторов варьировался на двух уровнях +I и -I, закодированных в табл. 1 знаками "+" и "-". Серия параллельных экспериментов позволила рассчитать дисперсию в определении кавитационной эрозии  $S^2\{y\}$ , оказавшуюся равной 18,81.

На основании полученных результатов построена линейная модель  $y = f(X_1; X_2; X_3; X_4)$  и рассчитаны ее коэффициенты:  $\theta_0 = 87,34$ ;  $\theta_1 = 0,11$ ;  $\theta_2 = 8,01$ ;  $\theta_3 = 9,46$ ;  $\theta_4 = -0,81$ . Доверительный интервал коэффициентов регрессии ( $\Delta\theta_i$ ) оказался равным  $\pm 3,52$ , в связи с чем коэффициенты  $\theta_1$  и  $\theta_4$  - статистически незначимы. Окончательно линейная модель имеет следующий вид:

$$y = 87,34 + 8,01X_2 + 9,46X_3.$$

Эта модель адекватно представляет результаты опытов при 5%-ном уровне значимости, поскольку экспериментальное значение F - критерия ( $F_{5;5}^{\text{эксп}} = 4,85$ ) оказалось меньше табличного ( $F_{5;5;0,05}^{\text{табл.}} = 5,05$ ).

Полученная модель позволила сделать вывод о том, что кавитационная стойкость силицированного серого чугуна наиболее сильно зависит от количества вводимых в расплав хлористого натрия и карбида кремния.

Причем, для снижения скорости кавитационной эрозии необходимо понижать от основного уровня количество вводимых в расплав NaCl и SiC. Температура и время силицирования в пределах выбранных интервалов варьирования этих факторов существенного влияния на кавитационную стойкость серого чугуна не оказывают.

С помощью полученной модели осуществлен следующий этап планирования - круговое восхождение к оптимуму по градиенту линейной модели (табл. 2). Лучший результат (60,0 мг) получен во втором опы-

те крутого восхождения. В результате силицирования удалось повысить кавитационную стойкость серого чугуна по сравнению с исходным состоянием в 2 раза.

Достигнутое значение кавитационной стойкости силицированного чугуна, по всей вероятности, близко к максимально возможному, так как силицирование не изменяет количества, формы, величины и характера распределения графитных включений, а влияет лишь на физико-механические свойства металлической основы. В связи с изложенным выше дальнейшие эксперименты были прекращены.

Таким образом, довольно сложная задача – анализ влияния четырех факторов на кавитационную стойкость серого чугуна и выбор оптимальных условий силицирования, была решена всего за 18 опытов.

Т а б л и ц а 2

Поиск при крутом восхождении оптимальных условий силицирования

Факторы	$t$ , °C	SiC, %	NaCl, %	$\tau$ , ч	Потеря веса, мг ( $\tau_{\text{исп.}} = 120\text{мин}$ )
К о д	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	У
$\theta_i$	0,13	8,01	9,46	-0,81	
$\times J$	6,5	80,1	141,9	-0,81	
Ш а г	0	-5,0	-10,0	0	
Опыты	I 950	20	25	3	84,5
	2 950	15	15	3	60,0
	3 950	10	15	3	117,6
	4 950	5	15	3	