

холодной деформации ( $x_1$ ), влияние сужения ( $x_2$ ) существенно меньше.

Таким образом, в результате применения комбинированной схемы упрочнения (ПТМО) удается получить более высокие значения прочностных характеристик и износостойкости изделий из стали 60ХФА. По-видимому, повышение прочностных свойств можно объяснить изменениями в тонкой структуре стали, связанными с влиянием предварительной холодной деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Жарский, И. М.* Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / И. М. Жарский, Б. А. Каледин, И. Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2004. – 179 с.
2. Предварительная термомеханическая обработка сталей / М. Л. Бернштейн [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1978. – № 1. – С. 27–31.

УДК 621.793

**Е. С. ГОЛУБЦОВА**, д-р техн. наук,  
**Б. А. КАЛЕДИН**, канд. техн. наук (БНТУ),  
**Н. Б. КАЛЕДИНА** (БГТУ)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УЗЛА ТРЕНИЯ**

С целью увеличения износостойкости, коррозионной стойкости, теплостойкости в 1,5–2,0 раза поверхностный слой металла насыщают бором совместно с другими легирующими элементами. В настоящей работе приведены результаты решения задачи по разработке и реализации методики определения оптимальных режимов борохромирования металлов, минимизирующих их износ с применением математических методов планирования эксперимента.

Априорная информация и предварительно проведенные опыты по исследованию указанных выше свойств никелевых покрытий показали, что основными факторами, существенно влияющими на

качество поверхностных слоев при борохромировании, являются температура электролита  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), плотность тока  $j$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ), время процесса  $\tau$  (мин) и содержание оксида хрома в ванне  $q$  (%). Эти факторы и были выбраны в качестве варьируемых. Параметром оптимизации, характеризующим свойства борохромированного слоя, выбрана величина износа, который оценивался при испытании весовым способом.

Борохромированию подвергались образцы из стали 45 с предварительно нанесенным никелевым покрытием толщиной до 0,1 мм. Испытания на износостойкость проводили на установке с торцевой нагрузкой трущихся деталей в водно-абразивной среде (вода водопроводная с 5 % абразива), при удельном давлении  $p = 3 \text{ кгс}/\text{cm}^2$  и скорости скольжения  $v = 3 \text{ м}/\text{с}$ , что позволило в более короткое время получить данные об износе. В табл. 1 представлены уровни варьируемых факторов и интервалы их варьирования.

В качестве плана эксперимента использована дробная реплика (полуреплика) с генерирующим соотношением  $x_4 = x_1 x_2 x_3$ .

Таблица 1. Уровни выбранных факторов

Уровень факторов	Кодированные значения				Натуральные значения факторов			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$j, \text{A}/\text{cm}^2$	$\tau, \text{мин}$	$q, \%$
Основной уровень	0	0	0	0	930	0,15	3	5
Интервалы варьирования	1	1	1	1	30	0,05	1	2
Верхний уровень	+1	+1	+1	+1	960	0,20	4	7
Нижний уровень	-1	-1	-1	-1	900	0,10	2	3

Для уменьшения систематических ошибок опыты проводили в случайном порядке. В табл. 2 представлена матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 2. Результаты эксперимента

№ опыта	Матрица плана $N = 2^{4-1}$				Результаты эксперимента		Средние значения $\bar{y}_u$	Средние значения $y_p$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_{u1}$	$y_{u2}$		
1	-	-	-	-	15,4	16,2	15,80	12,2
2	+	-	-	+	3,9	3,5	3,70	5,1
3	-	+	-	+	13,7	13,4	13,55	12,6
4	+	+	-	-	5,1	5,5	5,30	8,3
5	-	-	+	+	6,2	5,6	5,90	8,7
6	+	-	+	-	4,1	4,4	4,25	4,0
7	-	+	+	-	10,4	10,8	10,60	11,9
8	+	+	+	+	8,9	8,7	8,8	5,0

Обработку результатов эксперимента проводили по методике [1]. Коэффициенты уравнения рассчитали по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{u=1}^8 x_{0u} \bar{y}_u; \quad (1)$$

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{u=1}^8 x_{iu} \bar{y}_u; \quad (2)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{8} \sum_{u=1}^8 x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u. \quad (3)$$

Однородность дисперсий параллельных опытов проверяли по критерию Кохрена

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (4)$$

где  $S_{u \max}^2$  – максимальная дисперсия в  $u$ -м опыте;  $S_u^2$  – дисперсия строки  $u$ .

Расчетное значение  $G = 0,376$  оказалось меньше табличного  $G_{кр} = 0,68$ , следовательно, дисперсии строк  $S_u^2$  однородны [1]. После расчета дисперсии параметра оптимизации и проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии получили неадекватную модель

$$\hat{y} = 8,50 - 2,90x_1 + 1,05x_2 - 1,10x_3 - 0,55x_4. \quad (5)$$

Неадекватность уравнения (5) объясняется тем, что расчетный критерий Фишера  $F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_4^2} = \frac{32,75}{0,106} = 309 \gg F_{кр} = 4,46$  [1].

Анализ уравнения (5) показывает, что влияние фактора  $x_4$  ( $q$ , %) и его взаимодействие с другими факторами является менее значимым, а поэтому дальнейшее исследование процесса проводили при фиксированном (постоянном) значении  $x_4$ , соответствующем 5-процентному содержанию окиси хрома.

В связи с неадекватностью уравнения (5) был проведен эксперимент по плану Бокса-Бенкина, матрица которого и результаты эксперимента приведены в табл. 3, где  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  – кодированные уровни температуры электролита  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), плотность тока  $j$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) и время процесса  $\tau$  (мин).

После статистической обработки результатов этой таблицы получили адекватное уравнение ( $F_p = 5,2 < F_{кр} = 19,3$  при  $\alpha = 0,05$ ,  $f_1 = 4$  и  $f_2 = 2$ )

$$y_2 = 3,75 - 3,06x_1 + 0,67x_2 - 0,57x_3 - 0,32x_1x_2 + 1,93x_1x_3 + 1,12x_2x_3 + 4,6x_1^2. \quad (6)$$

Таблица 3. План Бокса-Бенкина

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$y_3$
1	-	-	0	+	0	0	+	+	0	11,26
2	+	-	0	-	0	0	+	+	0	9,50
3	-	+	0	-	0	0	+	+	0	11,56
4	+	+	0	+	0	0	+	0	0	6,08
5	-	0	-	0	+	0	+	0	+	11,65
6	+	0	-	0	-	0	+	0	+	3,93
7	-	0	+	0	-	0	0	0	+	9,11
8	+	0	+	0	+	0	0	+	0	9,20
9	0	-	-	0	0	+	0	+	0	4,77
10	0	+	-	0	0	-	0	+	0	2,63
11	0	-	+	0	0	-			0	1,41
12	0	+	+	0	0	+				5,17
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,14
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,94
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,74

Как видно из этого уравнения, наибольшее влияние на износ оказывает  $x_1$ , т. е. температура электролита. С ее повышением износ уменьшается. Минимальный износ  $y_2 = 1,41$  получен при  $x_1 = 0$ ;  $x_2 = -1$  и  $x_3 = +1$ , т. е. при  $t = 930$  °С,  $j = 0,10$  А/см<sup>2</sup> и  $\tau = 4$  мин.

Таким образом, применение плана второго порядка позволило установить оптимальные уровни температуры электролита, плотности тока и времени процесса, при которых износ составил 1,41 г, т. е. в 2,6 раза ниже, чем в двухфакторном эксперименте (табл. 2).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования экспериментов в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 262 с.