

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),  
 Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ),  
 Л.С. ШУМАНСКАЯ (БНТУ)

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
 НА СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА  
 КРЕМНИЯ. СООБЩЕНИЕ III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
 ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ, ПРИМЕСЕЙ  
 В ШИХТЕ НА ПЛОТНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ**

Содержание примесей (в частности, железа) в шихте, дисперсность порошков, температура и длительность прессования оказывают существенное влияние на плотность и прочность при изгибе. Для установления количественных параметров исследовали влияние температуры горячего прессования (1700, 1750 °С) и содержания железа в шихте (Fe, % мас.) на плотность ( $y_8$ ,  $1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и прочность при изгибе ( $y_9$  – средняя;  $y_{10}$  – максимальная). Для проведения эксперимента был выбран план  $2 \times 6$ , где 2 – два уровня температуры горячего прессования ( $x_1 = -1$ , 1700 °С,  $x_1 = +1$ , 1750 °С), а 6 – шесть уровней содержания железа в шихте ( $x_2 = -1$ ; 4,2 %;  $x_2 = -3/5$ , 5,5 %;  $x_2 = -1/5$ , 6,8 %;  $x_2 = +1/5$ , 7,8 %;  $x_2 = +3/5$ , 9,6 %;  $x_2 = +1$ , 11,5 %).

Матрица плана  $2 \times 6$  и результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана  $2 \times 6$  и свойства горячепрессованных образцов нитридной керамики

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y_8$	$y_9$	$y_{10}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	–	–	+	+	+	3,17	385	530
2	–	–3/5	+3/5	+	9/25	3,17	450	570
3	–	–1/5	+1/5	+	1/25	3,27	508	630
4	–	+1/5	–1/5	+	1/25	3,25	455	550
5	–	+3/5	–3/5	+	9/25	3,30	430	505
6	–	+	–	+	+	3,37	433	490

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	+	–	–	+	+	3,22	445	525
8	+	–3/5	–3/5	+	9/25	3,23	450	520
9	+	–1/5	–1/5	+	1/25	3,27	505	585
10	+	+1/5	+1/5	+	1/25	3,29	465	575
11	+	+3/5	+3/5	+	9/25	3,27	410	490
12	+	+	+	+	+	3,34	395	490
$\sum_1$	0,09	0,422	–0,126	39,65	23,5	39,15	–	–
$\sum_2$	9	–56,6	–107,4	5331	2361,2	–	5331	–
$\sum_3$	–90	–150	40	6460	2879,2	–	–	6460

Для этого плана  $A_0 = 0,119727$ ;  $A_{01} = 0$ ;  $A_{02} = 0,24414$ ;  $A_1 = 0,0833$ ;  $A_2 = 0,17857$ ;  $A_{11} = 0$ ;  $A_{12} = 0,52316$ ;  $A_{22} = 0,17857$ .

Ошибки экспериментов соответственно были равны:  $S_8 = 0,326$ ;  $S_9 = 44,4$  и  $S_{10} = 92,6$ ;  $t = 1,782$ .

После обработки результатов эксперимента по формулам [1] получены выражения:

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y); \quad (1)$$

$$b_1 = A_1(1Y); \quad (2)$$

$$b_2 = A_2(2Y); \quad (3)$$

$$b_{12} = A_{12}(12Y); \quad (4)$$

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y); \quad (5)$$

$$b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y); \quad (6)$$

$$\Delta b_0 = t \cdot S_y \sqrt{A_0}; \quad (7)$$

$$\Delta b_i = t \cdot S_y \sqrt{A_i}; \quad (8)$$

$$\Delta b_{ij} = t \cdot S_y \sqrt{A_{ij}}; \quad (9)$$

$$\Delta b_{ii} = t \cdot S_y \sqrt{A_{ii}}, \quad (10)$$

Для  $y_8$  (плотность) получены следующие значения коэффициентов уравнения и их доверительных интервалов:  $b_0 = 1,986$ ;  $b_1 = 0,0075$ ;  $b_2 = 0,075$ ;  $b_{22} = 2,736$ ;  $b_{12} = -0,0225$ ;  $b_{22} = -3,87$ ;  $\Delta b_0 = 0,259$ ;  $\Delta b_1 = 0,169$ ;  $\Delta b_2 = 0,248$ ;  $\Delta b_{12} = 0,248$ ;  $\Delta b_{22} = 0,423$ , т.е. коэффициенты  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{12}$  – незначимы.

Уравнение регрессии для плотности будет иметь вид:

$$y_8 = \rho = 1,986 + 2,736x_2^2. \quad (11)$$

Проверка адекватности этого уравнения подтвердила эту гипотезу, т.к.  $S_{ад}^2 = \frac{14,06}{12-2} = 1,406$ , а  $F = \frac{1,406}{0,326^2} = 13,23 < F_{кр} = 14,8$  при  $\alpha = 0,01$ ,  $f_1 = 10$  и  $f_2 = 4$ .

Для средней прочности ( $y_9 = \bar{\sigma}_{изг}$ , МПа) при ошибке опыта 44,4 МПа после расчета коэффициентов уравнения и их доверительных интервалов получено уравнение

$$y_9 = \bar{\sigma}_{изг} = 475 - 66x_2^2. \quad (12)$$

Это уравнение адекватно, т.к.  $S_{ад}^2 = \frac{7455,64}{12-2} = 745,564$ , а  $F = \frac{745,564}{1973,6} = 0,3778 < 1$  при всех уровнях доверия  $\alpha$ .

Максимальная прочность  $\bar{\sigma} = 508$  МПа будет при  $x_1 = -1$  и  $x_2 = -1/5$ , а также  $y_2 = 505$  при  $x_1 = +1$  и  $x_2 = -1/5$ , т.е. при содержании железа 6,8 %.

Для максимальной прочности  $y_{10}$  получено адекватное уравнение

$$y_{10} = 571,4 - 26,8x_2 - 70,86x_2^2 \text{ или } y_{10} = 571 - 27x_2 - 71x_2^2, \quad (13)$$

поскольку  $S_{ад}^2 = \frac{8104}{12-3} = 900,44$ , а  $F = \frac{900,44}{756,25} = 1,19 < F_{кр} = 3,1$  при  $\alpha = 0,05$ ,  $f_1 = 9$  и  $f_2 = 11$ .

Таким образом, температура прессования в пределах 1700–1750 °С не оказывает влияния на параметры оптимизации (плотность и прочность при изгибе).

### Литература

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 277 с.

УДК 621.785.539, 620.178.2 + 519.23

**В.М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук,  
**В.Г. ДАШКЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
**А.В. КОВАЛЬЧУК** (БНТУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ХРУПКОСТИ БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЯХ У8А И 9ХС ПО НАПРЯЖЕНИЮ СКОЛА НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ

**Введение.** Определяющую роль в стойкости деталей к изнашиванию играют их поверхностные слои [1–3]. В этой связи перспективным для повышения эксплуатационной стойкости деталей является инженерия их поверхностей с использованием различных способов. Одним из наиболее эффективных путей повышения стойкости стальных изделий в условиях граничного трения и абразивного изнашивания является получение диффузионных слоев в результате диффузионного борирования [4–8].

Упомянув борирование, нельзя не отметить неоценимый вклад в становление и развитие представлений об этом процессе доктора технических наук, профессора Л.Г. Ворошниина, который на протяжении многих лет исследовал закономерности насыщения бором различных материалов. Результаты этих исследований отражены во множестве научных работ, написанных им лично и в соавторстве с Л.С. Ляховичем, В.Ф. Лабунцом, А.А. Алиевым, Г.В. Борисенком, М.В. Киндрачуком, Е.И. Бельским, Б.С. Кухаревым, М.Г. Круковичем и другими, например, [9, 10].