

УДК 621.777

**Корж В. В.  
Лаптев А. М.****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО РЕЖИМА ПРЕССОВАНИЯ ХРОМИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ**

Процессы пластического формоизменения характеризуются сложностью протекающих явлений, которые зависят от геометрических и силовых факторов, структурных особенностей и т. д. Поэтому оптимальное проведение эксперимента не возможно без использования статистических методов и методов планирования экспериментальных исследований [1].

При выборе экспериментальных или экспериментально-аналитических методов для исследования процессов прессования необходимо учитывать следующее:

- уровень сложности эксперимента и возможность его неоднократного воспроизведения в лабораторных и заводских условиях;
- необходимость применения специального оборудования и оснастки;
- необходимость специальной предварительной подготовки образцов и материалов;
- трудоемкость получения первичной экспериментальной информации, последующей математической обработки экспериментальных данных и возможность ее реализации на ЭВМ;
- точность фиксации и измерения параметров эксперимента.

Для определения напряжения выпрессовки образца (детали) из полости матрицы при прессовании порошковых материалов на основе железа содержащих карбид хрома необходимо произвести серию опытов с использованием методики статистической обработки данных с варьированием, как давления прессования, так и содержания карбида в порошке. Варьирование параметров процесса производится на нескольких уровнях, с повторами (не менее 3-х раз) в каждой точке. В результате необходимо произвести не менее ста опытов для определения влияния состава порошка и давления прессования на напряжение выпрессовки (для одного вида карбида). При решении многих задач, связанных с обработкой экспериментальных данных, приходится обрабатывать результаты, имеющие заведомо вероятностный характер. Однако необходимые характеристики соответствующих случайных величин часто неизвестны и должны находиться по экспериментальным значениям. Подобное статистическое описание результатов наблюдений, построение и проверка различных математических моделей, использующих понятие вероятности, составляют основное содержание математической статистики. Обработку полученных в ходе работы экспериментальных данных осуществляли на основе методов математической статистики с помощью точечных и интервальных оценок [2, 3]. При этом основанные технологические параметры процесса прессования порошка рассматривали как случайные величины  $x_i$ , характеризующиеся нормальным законом распределения и полученные в результате равноточных измерений.

Целью работы является определение зависимости напряжения выпрессовки от давления прессования, определение доверительного интервала и корреляционных зависимостей напряжения выпрессовки от давления прессования, которые позволят прогнозировать напряжение выпрессовки для порошков с различным содержанием карбидной фазы.

Построение математической модели технологического процесса или одной из его операций осложнено тем, что, как правило, механизм процесса и его уравнения связи между факторами и показателями неизвестны. Поэтому строят методом подбора вида целевой функции, которая соответствовала бы экспериментальным данным. Применение полиномов в качестве функций для аппроксимации теоретической линии регрессии обусловлено, во-первых, тем, что описывают большой класс непрерывных функций, во-вторых, тем, что полиномы – наиболее простые функции. Производная и интеграл от полинома – тоже полиномы. Степень приближения полинома к теоретической линии регрессии характеризуется числом членов полинома, которое определяют методом подбора. Вначале находят соответствие линий модели экспериментальным данным. Если условие адекватности модели не выдержано,

последовательно проверяют пригодность неполной квадратичной, а затем полной квадратичной моделей, пока не будет выполнено условие адекватности выбранной полиномиальной модели экспериментальным данным.

Полином для  $n$  факторов записывают в виде (1):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{ii < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2 + \dots \quad (1)$$

Коэффициенты полинома  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ , вычисляются на основе экспериментальных данных. Оценку истинного значения измеряемой величины  $x$  проводили по среднеарифметическому значению результатов нескольких опытов и доверительному интервалу (2):

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}; \quad |a - \bar{x}| < t(P; K) \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где  $t(P, K)$  – критерий Стьюдента, зависящей от доверительной вероятности оценки и числа степеней свободы [3],  $K = n - 1$ ;  $n$  – количество опытов;  $S$  – эмпирический стандарт, определяемый как (3):

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (3)$$

Доверительная вероятность оценки  $P$  была принята равной 0,95, а доверительный интервал, покрывающий величину  $a$  с надёжностью  $P$ , определяли следующим образом (где  $d$  – точность оценки, характеризуемая выражением) (4, 5):

$$\bar{x} - d < a < \bar{x} + d; \quad (4)$$

$$d = t(P, K) \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

Оценку точности измерений случайных величин  $x_i$  производили по величине среднеквадратичного отклонения  $S$  и доверительному интервалу, покрывающему его (6):

$$S(1 - q) < s < S(1 + q), \quad (6)$$

где  $q$  определяется по таблицам в зависимости от величин  $P$  и  $K$ .

Степень соответствия двух распределений, полученных в результате математического моделирования и на основе обработки экспериментальных данных, оценивали с помощью критерия Колмогорова [4] (7):

$$I_k = \frac{\max |Y_{\text{exp}} - Y_{\text{teor}}|}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где  $Y_{\text{exp}}$ ,  $Y_{\text{teor}}$  – экспериментальные и теоретические значения;  $n$  – количество экспериментов. Адекватность полученных моделей  $f(y)$  реальному процессу оценивали по критерию Фишера (8)–(9):

$$F_{\text{ras}} = \frac{S^2_{a\partial}}{S^2_{on}}; \quad (8)$$

$$S^2_{a\partial} = \sum_{i=1}^n \frac{[\bar{x}_y - f(y)y]^2}{n - k - 1}, \quad (9)$$

где  $S^2_{on}$  – дисперсия опыта;  $S^2_{a\partial}$  – дисперсия адекватности.

Адекватность математической модели считали обоснованной в случае выполнения соотношения  $F_{рас} < F_{табл}$ , где табличное значение критерия Фишера определялось в зависимости от принятого уровня значимости и количества степеней свободы:

В ходе экспериментальных исследований регистрировалось давление прессования и усилие выпрессовки образца из полости матрицы. Анализ данных напряжения выпрессовки в зависимости от давления прессования для различного состава порошка позволяют проанализировать характер изменения напряжения выпрессовки. Анализ данных графиков, между напряжением выпрессовки и давлением прессования имеет место сложная нелинейная взаимосвязь, характер которой определяется содержанием карбида хрома.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы на основе железа легированного карбидами –  $Cr_3C_2$ . На каждую точку было сделано по 4 опыта (табл. 1), масса навески шихты составляла – 5,5 г, диаметром 16,80 мм.

Таблица 1

Результаты полученных экспериментальных данных прессования смеси железного порошка, легированного карбидом хрома

2 % $Cr_3C_2$	$P_{пр}$ , МПа						
	100	250	500	750	1000	1250	1500
$\sigma_{вып}$ , МПа	0,425	4,25	12,50	22,50	35,0	45,0	50,0
	0,430	4,30	12,60	22,0	35,50	44,50	49,50
	0,420	4,20	12,40	22,50	34,50	44,50	51,0
	0,425	4,25	12,70	23,0	35,0	46,0	50,0
4 % $Cr_3C_2$	$P_{пр}$ , МПа						
	100	250	500	750	1000	1250	1500
$\sigma_{вып}$ , МПа	0,45	4,50	15,50	24,50	37,0	41,50	48,8
	0,43	4,30	16,0	25,0	37,0	42,0	50,0
	0,50	5,0	15,0	25,0	37,20	41,0	48,0
	0,44	4,40	15,50	23,0	36,80	41,05	48,5
5 % $Cr_3C_2$	$P_{пр}$ , МПа						
	100	250	500	750	1000	1250	1500
$\sigma_{вып}$ , МПа	0,430	4,30	12,50	22,50	35,0	41,30	49,30
	0,430	4,30	12,0	22,0	35,0	41,50	50,0
	0,420	4,20	13,0	22,0	34,80	41,0	49,0
	0,425	4,25	12,40	23,0	35,10	41,30	49,10
6 % $Cr_3C_2$	$P_{пр}$ , МПа						
	100	250	500	750	1000	1250	1500
$\sigma_{вып}$ , МПа	0,55	5,50	17,50	12,0	45,0	49,30	65,50
	0,55	5,50	18,0	12,50	45,0	49,50	65,0
	0,54	5,40	17,0	12,90	44,80	49,50	66,0
	0,56	5,60	17,30	12,60	44,90	49,0	65,0
8 % $Cr_3C_2$	$P_{пр}$ , МПа						
	100	250	500	750	1000	1250	1500
$\sigma_{вып}$ , МПа	0,70	7,0	12,70	27,50	36,0	45,80	60,0
	0,70	7,0	12,50	27,0	36,0	45,5	60,0
	0,73	7,30	12,90	27,50	36,30	45,7	59,80
	0,70	7,0	12,60	27,0	36,0	46,0	60,10
10 % $Cr_3C_2$	$P_{пр}$ , МПа						
	100	250	500	750	1000	1250	1500
$\sigma_{вып}$ , МПа	0,575	5,75	17,50	32,50	42,50	57,50	67,50
	0,580	5,80	17,0	32,0	42,0	57,0	67,0
	0,570	5,70	17,20	33,0	42,10	57,30	67,40
	0,570	5,70	18,10	32,40	43,0	58,0	67,90

В результате обработки экспериментальных данных по методике, описанной выше, и нахождения коэффициентов корреляции установлено, что при увеличении давления прессования, напряжение выпрессовки увеличивается неравномерно. Наибольшее увеличение наблюдается в диапазоне от 500 до 1250 МПа, после чего напряжение выпрессовки растет

с меньшей интенсивностью. Доверительный интервал при определении напряжения выпрессовки не превышает  $\pm 3\%$  от абсолютного значения.

Целевая функция для описания зависимости напряжения выпрессовки от давления прессования имеет вид (10):

$$F(p_{np}) = B_0 + B_1 \cdot p_{np} + B_2 \cdot p_{np}^2 + B_3 \cdot p_{np}^3, \quad (10)$$

где  $B_i$  – коэффициенты корреляции, приведенные в табл. 2. График зависимости напряжения выпрессовки от давления прессования представлен на рис. 1.

Таблица 2

Значения полученных коэффициентов корреляции

Содержание карбида, %	Коэффициенты корреляции			
	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
Карбид хрома – Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>				
2	-0,841	0,014	3,418E-5	-1,379E-8
4	-0,909	0,016	3,55E-5	-1,445E-8
6	-1,074	0,022	3,367E-5	-1,331E-8
8	-0,126	0,014	3,584E-5	-1,324E-8
10	-1,118	0,022	3,868E-5	-1,554E-8

Оценка адекватности показала, что полученные эмпирические модели являются обоснованными и могут применяться для прогнозирования величины напряжения выпрессовки в зависимости от давления прессования и содержания карбида хрома в шихте. Отклонения от экспериментальных данных не превышают  $\pm 5\%$ , что удовлетворяет требуемой точности.

### ВЫВОДЫ

По результатам экспериментальных исследований установлено, что зависимость напряжения выпрессовки от давления прессования имеет сложный вид, который можно описать полиномом  $n$ -й степени. Установлено, что при повышении давления прессования напряжение выпрессовки увеличивается. Доверительный интервал при определении напряжения выпрессовки не превышает  $\pm 3\%$  от абсолютного значения.

Установлено что при повышении содержания карбидной фазы напряжение выпрессовки увеличивается.

По результатам экспериментальных исследований рассчитаны корреляционные зависимости напряжения выпрессовки от давления прессования, позволяющие прогнозировать напряжение выпрессовки для порошков с различным содержанием карбидной фазы, что является важным при разработке технологического процесса прессования порошковых материалов. Отклонения от экспериментальных данных не превышают  $\pm 5\%$ , что удовлетворяет требуемой точности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М. : Изд-во МИСИС, 2001. – 380 с.
2. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с.
3. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М. : Металлургия, 1969. – 157 с.
4. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 2004. – 479 с.

Корж В. В. – канд. техн. наук, научный сотрудник ЦП;

Лаптев А. М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТиТОМ ДГМА.

ЦП – Центр производительности, г. Краматорск.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [Wikuchka1@yandex.ua](mailto:Wikuchka1@yandex.ua)

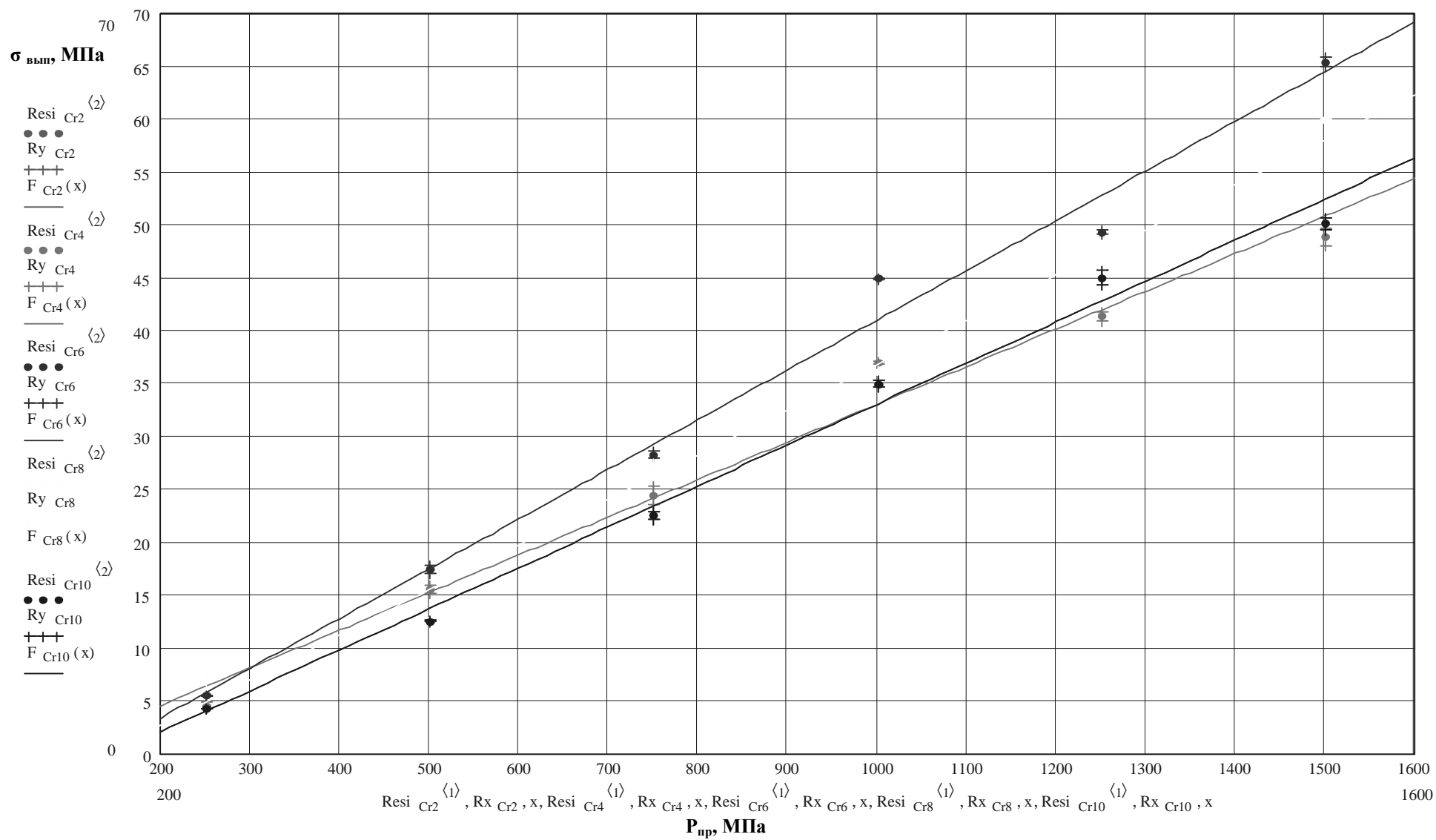


Рис. 1. Зависимость напряжения выпрессовки от давления прессования