

УДК 621.762

**Корж В. В.  
Лаптев А. М.****СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ ОБРАЗЦОВ,  
СОДЕРЖАЩИХ КАРБИДОСОДЕРЖАЩИЕ ДОБАВКИ**

Современное развитие металлургии и машиностроения неразрывно связано с созданием новых высокоэффективных технологий и оборудования. Анализ номенклатуры деталей, выпускаемых и применяемых на различных предприятиях Украины, показал наличие большой группы изделий, перспективных для изготовления из металлических порошков. Но вследствие тяжёлых условий эксплуатации порошковые изделия должны приближаться по прочности и твердости к изделиям, полученным из литой стали. Расширение области применения порошковых легированных сталей предъявляет более высокие требования к их механическим свойствам. Поэтому целесообразно провести дальнейшие исследования, направленные на создание технологии производства порошковых изделий, по прочности и твердости, приближающихся к изделиям из литой стали.

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].

Для определения точных параметров механических свойств полученного образца (детали) из порошковых материалов на основе железа, содержащих карбиды хрома, молибдена, ванадия, необходимо произвести серию опытов с использованием методики статистической обработки данных как величины твердости по Бринеллю, так величины предела прочности при растяжении и величины ударной вязкости. Варьирование параметров процесса производится на нескольких уровнях, с повторами (не менее 3-х раз) в каждой точке. 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. 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 данной работы является определение механических свойств полученных порошковых образцов, определение доверительного интервала и дисперсии малой выборки, которые позволят прогнозировать механические свойства для порошковых изделий с различным содержанием карбидной фазы.

Для получения шихты все порошки просеивали через сито 0,25 мм. Стеарат цинка во избежание слеживаемости перетирали через сито 0,16 мм, чтобы размер частиц был меньше, чем самая крупная частица порошка железа. Дозировка компонентов смесей проводилась на весах. Шихту приготавливали в лабораторном смесителе в течение 2 часов. Последовательность загрузки шихты следующая: к порошкам железа и карбида хрома через 20 минут их смешивания добавляли порошок стеарата цинка.

Прессование образцов производилось по схеме одностороннего прессования на машине сжатия МС-500. Давление прессования составляло 750 МПа. На каждую точку приходилось от 3 до 5 опытов. Образцы спекались при температуре 1280 °С в течение 90 мин для получения гомогенной структуры. Необходимо осуществлять тщательный контроль температуры спекания, так как её снижение на 10–15 °С приводит к резкому снижению механических

свойств. Наилучшие механические свойства материалов обеспечиваются при условии охлаждения в температурном интервале 800–300 °С со скоростью не ниже 1,3 °С/сек. Указанный режим охлаждения обеспечивается при спекании в печах с водоохлаждаемым холодильником.

Одной из задач проводимых исследований являлось изучение механических свойств порошковых сталей: твёрдости, ударной вязкости, предела прочности при растяжении. Испытания образцов на ударную вязкость проводили на призматических образцах размером 10 × 10 × 55 мм без надреза на маятниковом копре модели МК-15 согласно ГОСТ 26528-85. На боковых поверхностях образцов измеряли твёрдость. Твёрдость по Бринеллю (НВ) определялась прибором ТШ-2 при нагрузке 750 кг, диаметре шарика 5 мм и выдержке 10 сек согласно ГОСТ 25698-83.

Полученные в ходе работы экспериментальные данные аппроксимировали при помощи степенной, экспоненциальной или линейной функций. Для этого использовали средства программы MS Excel. Вид аппроксимирующей функции выбирался в зависимости от величины коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$ . Этот коэффициент рассчитывался по формуле (1) [4]:

$$R^2 = \frac{Q_f}{Q_y}, \quad (1)$$

$$\text{где } Q_f = \sum_{i=1}^n (\bar{y} - \hat{y}_i)^2, \quad Q_l = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad Q_y = Q_f + Q_l;$$

$y_i$  – экспериментальное значение;

$\hat{y}_i$  – соответствующее значение аппроксимации;

$\bar{y}$  – арифметическое среднее всех экспериментальных значений.

Наилучшей считалась та функция, для которой величина  $R^2$  была наибольшей. Следует отметить, что непосредственное применение формулы (1) возможно только для аппроксимации линейной функцией. Если применяется степенная или экспоненциальная функция, то она должна быть предварительно линеаризована путем логарифмирования. В этом случае при вычислении  $Q_f$  и  $Q_l$  используются значения не самой функции, а их логарифмы [5, 6].

Также для полученных экспериментальных данных по определению величин, таких как: твёрдость по Бринеллю, ударная вязкость и предел прочности при растяжении были рассчитаны дисперсия малой выборки и доверительный интервал по формулам (2–6):

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^u (x_i - \bar{A})^2}{u * (u - 1)}}, \quad (2)$$

где  $S(\bar{A})$  – дисперсия малой выборки;

$\bar{A}$  – среднее значение результата опыта;

$u$  – число степеней свободы;

$x_i$  – рядовое численное значение опыта;

$$E = t(P, K) \times S(\bar{A}), \quad (3)$$

где  $E$  – доверительный интервал;

$t(P, K)$  – критерий Стьюдента при  $L = 5\%$ ;

$S(\bar{A})$  – дисперсия малой выборки.

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

$$\bar{x} - \delta < \alpha < \bar{x} + \delta; \quad (4)$$

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

Оценку точности измерений случайных величин  $x_i$  производили по величине средне-кватратичного отклонения  $\sigma$  и доверительному интервалу, покрывающему его (6):

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

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

Результаты расчетов дисперсии малой выборки и доверительного интервала при определении данных величин твёрдости по Бринеллю представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические расчёты дисперсии малой выборки и доверительного интервала при определении величины твёрдости по Бринеллю

Карбид в шихте, %	$\bar{A}$	$u$	$u-1$	$t$	$S(\bar{A})$	$E$	$E - \bar{A} < \bar{A} < E + \bar{A}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Fe + 5 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 1 % стеарата цинка + 0,5% графита							
2	1500	3	2	4,303	5,30	22,8	22,8 – 1500 < 1500 < 22,8 + 1500
4	2800				5,80	24,9	24,9 – 2800 < 2800 < 24,9 + 2800
6	3200				7,64	32,8	32,8 – 3200 < 3200 < 32,8 + 3200
8	3000				6,30	27,1	27,1 – 3000 < 3000 < 27,1 + 3000
10	2600				5,60	24,0	24 – 2600 < 2600 < 24 + 2600
Fe + 7 % Mo <sub>2</sub> C + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	1250	3	2	4,303	3,53	15,21	15,2 – 1250 < 1250 < 15,2 + 1250
4	2000				5,45	23,45	23,4 – 2000 < 2000 < 23,4 + 2000
6	2500				5,60	24,0	24 – 2500 < 2500 < 24 + 2500
8	2000				5,60	24,0	24 – 2000 < 2000 < 24 + 2000
10	1800				5,0	21,70	21,7 – 1800 < 1800 < 21,7 + 1800
Fe + 3 % VC + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	2000	3	2	4,303	5,45	23,45	23,4 – 2000 < 2000 < 23,4 + 2000
4	2500				5,60	24,0	24 – 2500 < 2500 < 24 + 2500
6	2200				6,30	27,1	27,1 – 2200 < 2200 < 27,1 + 2200
8	2000				4,65	20,0	20 – 2000 < 2000 < 20 + 2000
10	1900				5,30	22,8	22,8 – 1900 < 1900 < 22,8 + 1900

В результате обработки экспериментальных данных по методике, описанной выше, и нахождения коэффициентов корреляции установлено, что с увеличением содержания карбида в шихте, твёрдость возрастает неравномерно. Наибольшее увеличение наблюдается в диапазоне от 2 до 6 % карбида в шихте, после чего твёрдость образца уменьшается.

Анализ данных результатов опытов, представленных в табл. 1, позволил установить, что доверительный интервал при определении величины твёрдости по Бринеллю не превышает  $\pm 8\%$  от абсолютного значения.

Результаты расчетов дисперсии малой выборки и доверительного интервала при определении величин предела прочности при растяжении и при определении величины ударной вязкости представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Статистические расчёты дисперсии малой выборки и доверительного интервала при определении величины предела прочности при растяжении

Карбид в шихте, %	$\bar{A}$	$u$	$u-1$	$t$	$S(\bar{A})$	$E$	$E - \bar{A} < \bar{A} < E + \bar{A}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Fe + 5 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	380	3	2	4,303	1,2	5,16	5,16 – 380 < 380 < 5,16 + 380
4	700				2,04	8,78	8,78 – 700 < 700 < 8,78 + 700
6	750				2,19	9,4	9,4 – 3750 < 750 < 9,4 + 750
8	550				1,8	7,74	7,74 – 550 < 550 < 7,74 + 550
10	350				1,2	5,16	5,16 – 350 < 350 < 5,16 + 350
Fe + 7 % Mo <sub>2</sub> C + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	370	3	2	4,303	0,816	3,5	3,5 – 370 < 370 < 3,5 + 370
4	520				1,2	5,16	5,16 – 520 < 520 < 5,16 + 520
6	650				1,8	7,74	7,74 – 650 < 650 < 7,74 + 650
8	630				2,04	8,78	8,78 – 630 < 630 < 8,78 + 630
10	480				1,47	6,33	6,33 – 480 < 480 < 6,3 + 480
Fe + 3 % VC + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	480	3	2	4,303	1,2	5,16	5,16 – 480 < 480 < 5,16 + 480
4	680				2,19	9,4	9,4 – 680 < 680 < 9,4 + 680
6	640				2,04	8,78	8,78 – 640 < 640 < 8,78 + 640
8	540				1,8	7,74	7,74 – 540 < 540 < 7,74 + 540
10	380				0,816	3,5	3,5 – 380 < 380 < 3,5 + 380

Таблица 3

Статистические расчёты дисперсии малой выборки и доверительного интервала при определении величины ударной вязкости

Карбид в шихте, %	$\bar{A}$	$u$	$u-1$	$t$	$S(\bar{A})$	$E$	$E - \bar{A} < \bar{A} < E + \bar{A}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Fe + 5 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	150	3	2	4,303	0,816	3,5	3,5 – 150 < 150 < 3,5 + 150
4	340				0,912	3,92	3,92 – 340 < 340 < 3,92 + 340
6	350				1,63	7,01	7,01 – 350 < 350 < 7,01 + 350
8	300				1,2	5,2	5,2 – 300 < 300 < 5,2 + 300
10	250				1,8	7,74	7,74 – 250 < 250 < 7,74 + 250
Fe + 7 % Mo <sub>2</sub> C + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	160	3	2	4,303	0,58	2,48	2,48 – 160 < 160 < 2,48 + 160
4	350				1,22	5,27	5,27 – 350 < 350 < 5,27 + 350
6	550				1,8	7,74	7,74 – 550 < 550 < 7,74 + 550
8	480				1,63	7,01	7,01 – 480 < 480 < 7,01 + 480
10	200				0,912	3,92	3,92 – 200 < 200 < 3,92 + 200
Fe + 3 % VC + 1 % стеарата цинка + 0,5 % графита							
2	350	3	2	4,303	1,2	5,16	5,16 – 350 < 350 < 5,16 + 350
4	420				1,63	7,01	7,01 – 420 < 420 < 7,01 + 420
6	380				1,8	7,74	7,74 – 380 < 380 < 7,74 + 380
8	350				1,8	7,74	7,74 – 350 < 350 < 7,74 + 350
10	210				0,912	3,92	3,92 – 210 < 210 < 3,92 + 210

В результате анализа экспериментальных данных, представленных в табл. 2, 3, установлено, что доверительный интервал при определении предела прочности при растяжении, как и при определении величины ударной вязкости, не превышает  $\pm 3\%$  от абсолютного значения. С увеличением содержания карбидов в шихте величина предела прочности при растяжении, как и величина ударной вязкости, возрастает неравномерно. Наибольшее увеличение наблюдается в диапазоне от 2 до 6 % карбидов в шихте, после чего величины предела прочности при растяжении образца и ударной вязкости уменьшаются.

Оценка адекватности показала, что полученные результаты являются обоснованными и могут применяться для прогнозирования механических свойств в зависимости от давления прессования и содержания карбидов в шихте. Отклонения не превышают  $\pm 10\%$ , что удовлетворяет требуемой точности и позволяет прогнозировать механические свойства порошковых изделий, содержащих карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , карбид молибдена  $\text{Mo}_2\text{C}$ , карбид ванадия  $\text{VC}$ .

## ВЫВОДЫ

Установлено, что доверительный интервал при определении предела прочности при растяжении, как и при определении величины ударной вязкости, не превышает  $\pm 3\%$  от абсолютного значения. С увеличением содержания карбида в шихте величина предела прочности при растяжении, как и величина ударной вязкости, возрастает неравномерно. Наибольшее увеличение наблюдается в диапазоне от 2 до 6 % карбида в шихте, после чего величины предела прочности при растяжении образца и ударной вязкости уменьшаются.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что с увеличением процентного содержания карбидов  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$  и  $\text{VC}$ , твёрдость возрастает неравномерно. Наибольшее увеличение наблюдается в диапазоне от 2 до 6 % карбида в шихте, после чего твёрдость образца уменьшается. С увеличением содержания карбидов в шихте величина предела прочности при растяжении, как и величина ударной вязкости, возрастает неравномерно. Наибольшее увеличение наблюдается в диапазоне от 2 до 6 % карбидов в шихте, после чего величины предела прочности при растяжении образца и ударной вязкости уменьшаются.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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.
5. Джонсон Н. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке : методы обработки данных : пер. с англ.* / Н. Джонсон, Ф. Лион; под ред. канд. техн. наук Э. К. Лецкого. – М. : Мир, 1980. – 612 с.
6. *Математическая статистика : учеб. для вузов* / [Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М., Тескин О. И.] ; под ред. Зарубина В. С., Крищенко А. П. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 424 с.

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

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

ЦП – Центр производительности, г. Краматорск.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: Wikuchka1@yandex.ua