

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА И СКОРОСТИ СОУДАРЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗНОГО ПОРОШКА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Как указано в работах [1—3], характеристики железного порошка-сырца после водородного отжига и последующего измельчения его спеков существенно меняются.

Для моделирования и оптимизации процесса получения железного порошка, а также оптимизации его характеристик (медианного диаметра, мкм, насыпной плотности, г/см³, формуемости, г/см³, и уплотняемости) был проведен эксперимент с использованием методов математического планирования. В качестве параметров оптимизации и были выбраны отмеченные характеристики при давлении 700 МПа.

На первой стадии исследовали зависимость этих характеристик от температуры отжига (800, 900 и 1000 °С) и скорости соударения частиц (30, 95 и 160 м/с) восстановленного железного порошка.

Для проведения эксперимента был выбран план 2-го порядка 3 × 3 (3 — три уровня обоих факторов).

Матрица плана 3 × 3 и результаты опытов приведены в таблице 1, где y_1, y_2, y_3 и y_4 — натуральные значения исследуемых характеристик, а x_1 и x_2 — кодированные уровни температуры отжига и скорости соударения. Кодирование уровней этих факторов проводили по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0,5(\tilde{x}_{i \max} + \tilde{x}_{i \min})}{0,5(\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min})}, \quad (1)$$

где x_i — кодированный уровень i -го фактора; $\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i \min}, \tilde{x}_{i \max}$ — натуральные значения текущего максимального и минимального уровней i -го фактора.

Обработку результатов проводили по методике [4]. Воспроизводимость (ошибка) опытов не превышала 5 % от среднего значения параметра.

После обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнений регрессии были получены следующие адекватные уравнения:

$$y_1 = 72,23 + 3,67x_1 - 7,5x_2 - x_1x_2 + 3,19x_2^2; \quad (2)$$

Матрица плана 3 × 3

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_1	y_2	y_3	y_4
1	-	-	+	+	+	78	2,39	3,5	7,1
2	-	0	0	+	0	68	2,72	3,9	7,1
3	-	+	-	+	+	65	2,94	4,2	7,0
4	0	-	0	0	+	83	2,35	3,2	6,9
5	0	0	0	0	0	72	2,66	3,5	7,0
6	0	+	0	0	+	68	2,83	3,8	7,1
7	+	-	-	+	+	87	2,23	2,9	7,1
8	+	0	0	+	0	76	2,55	3,1	7,1
9	+	+	+	+	+	70	2,70	3,5	6,9
Σ_1	22	-45	-4	444	451	667	-	-	-
Σ_2	-0,57	1,5	-0,08	15,53	15,44	-	23,37	-	-
Σ_3	-2,1	1,9	-0,1	21,1	21,1	-	-	31,6	-
Σ_4	-0,1	-0,1	-0,1	42,3	42,1	-	-	-	63,3

$$y_2 = 2,66 - 0,1x_1 + 0,25x_2; \quad (3)$$

$$y_3 = 3,49 - 0,35x_1 + 0,32x_2; \quad (4)$$

$$y_4 = 7,03. \quad (5)$$

Из уравнений (2), (3) видно, что наибольшее влияние на величину медианного диаметра (y_1) и насыпную плотность (y_2) оказывает скорость соударения (x_2), воздействие температуры отжига (x_1) существенно меньше.

Для получения минимальной величины медианного диаметра ($\hat{y}_1 = 64,25$ мкм) нужно отжечь порошок при температуре 800°C ($x_1 = -1$), а скорость соударения взять равной 160 м/с ($x_2 = +1$).

При этих условиях и насыпная плотность (y_2) будет максимальной ($\hat{y}_2 = 2,91$; $\hat{y}_3 = 2,94$ г/см³).

На третий параметр (формуемость) оба параметра оказывают одинаковое влияние. Максимальная величина этой характеристики ($y_3 = 4,2$ г/см³) будет также получена в условиях опыта № 3 ($x_1 = -1$ и $x_2 = +1$).

На уплотняемость (y_4) оба фактора в указанных интервалах варьирования не оказывают влияния.

Такое поведение восстановленного порошка можно объяснить пористой структурой и формой частиц порошка [5].

С повышением температуры отжига (x_1) прочность спеков возрастает и насыпная плотность при одинаковых условиях размола снижается. В то же время с увеличением скорости соударения частицы уплотняются, контуры их скругляются и возрастает насыпная плотность.

По тем же причинам с повышением скорости соударения улучшается и текучесть порошка.

Чем выше развиты внешние контуры и пористая структура частиц, тем сильнее сцепление между частицами спрессованных образцов и, следовательно, тем лучше формуемость порошка.

Отсутствие зависимости уплотняемости от температуры отжига и интенсивности помола можно объяснить преобладающим влиянием пластической деформации частиц порошка при уплотнении.

Представляет интерес выявление корреляционной связи между исследуемыми характеристиками восстановленного порошка. Для этого были рассчитаны коэффициенты парной корреляции между этими параметрами по формуле

$$r_{ij} = \frac{\sum_1^n \Delta y_i \Delta y_j}{\sqrt{\sum_1^n \Delta y_i^2 \sum_1^n \Delta y_j^2}} \quad (6)$$

Результаты расчета коэффициентов парной корреляции $r_{1,2}$; $r_{1,3}$; $r_{2,3}$ приведены в таблице 2, из которой видно, что между характеристиками порошка существует тесная корреляционная связь, ибо табличное значение $r_{кр} = 0,7977$ (при $\alpha = 0,01$ и $f = n - 2 = 7$).

Следовательно, связь между этими параметрами может быть выражена линейно-корреляционными уравнениями:

$$y_2 = 0,377 + 0,031y_1; \quad (7)$$

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции для восстановленного порошка

Параметры y_j	Медианный диаметр	Насыпная плотность	Формуемость
y_1	—	0,953	0,962
y_2	0,953	—	0,973
y_3	0,962	0,973	—

$$y_3 = 0,053y_1 - 0,43; \quad (8)$$

$$y_3 = 1,7y_2 - 0,92. \quad (9)$$

Пользуясь этими уравнениями, можно, зная одну из характеристик порошка, рассчитать две другие, что имеет практическое значение.

В следующей серии опытов была сделана попытка установить связь между теми же характеристиками и факторами для распыленного железного порошка. Для проведения эксперимента был выбран полнофакторный план первого порядка типа $N = 2^2$ (двойка в степени означает число факторов ($k = 2$), а в основании — число уровней факторов ($x_i = \pm 1$)).

Матрица плана и результаты опытов приведены в таблице 3; y_1, y_2, y_3 и y_4 — натуральные значения медианного диаметра; насыпной плотности; формуемости и уплотняемости, а x_1 и x_2 — кодированные уровни (верхний +1 и нижний -1) факторов (температура отжига 900 и 1100 °С; скорость соударения 80, 160 и 240 м/с).

В каждой строке матрицы опыты повторялись три раза ($n = 3$).

Обработку результатов опытов проводили по известной методике [6]. В итоге были получены адекватные уравнения:

$$y_1 = 70 + 14,5x_1 - 7,5x_2; \quad (10)$$

$$y_2 = 3,24 - 0,21x_1 + 0,27x_2; \quad (11)$$

$$y_3 = 4,8 - 0,58x_1 + 0,53x_2; \quad (12)$$

$$y_4 = 6,38. \quad (13)$$

Эти уравнения качественно мало отличаются от уравнений (2)—(5) для восстановленного порошка — характер влияния исследуемых факторов (температуры отжига и скорости соударения) остался прежним. А вот роль факторов сильно изменилась: значительно увеличилась роль температуры отжига (x_1), что привело к

Таблица 3

Матрица 2×2

N	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	y_3	y_4
1	-	-	+	61	3,15	4,8	6,4
2	+	-	-	34	2,79	3,7	6,4
3	-	+	-	50	3,75	5,9	6,3
4	+	+	+	75	3,27	4,7	6,4

Коэффициенты парной корреляции для распыленного порошка

Параметры y_i	Медианный диаметр	Насыпная плотность	Формуемость
y_1	—	0,97	0,97
y_2	0,97	—	0,98
y_3	0,97	0,98	—

существенному уменьшению медианного диаметра (в 1,3 раза); увеличению насыпной плотности (в 1,28 раза); формуемости (в 1,4 раза) и снижению уплотняемости (в 1,11 раза).

Сказанное можно объяснить различием структуры частиц порошка, получаемого методом распыления воздухом, у которых до отжига форма была сферической, а структура — плотной [5].

Частицы готового порошка резко отличаются от исходного, так как чаще всего представляют собой конгломерат, образующийся при отжиге.

Расчет коэффициентов парной корреляции между медианным диаметром, насыпной плотностью и формуемостью подтвердил их важную роль: $r_{1,2} = 0,97$; $r_{1,3} = 0,97$ и $r_{2,3} = 0,98$ (таблица 4), что позволило получить корреляционные уравнения, устанавливающие связь между этими характеристиками:

$$y_2 = 1,82 + 0,021y_1; \quad (14)$$

$$y_3 = 1,7 + 0,044y_1; \quad (15)$$

$$y_3 = 2,09y_2 - 2,03. \quad (16)$$

Таким образом, методы планирования эксперимента и статистической обработки результатов дали возможность не только оптимизировать свойства железных порошков, но и установить тесную корреляционную связь между медианным диаметром частиц, насыпной плотностью и формуемостью.

Удалось также показать влияние формы и пористой структуры частиц восстановленного и распыленного железного порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кононов М. И., Турецкий Я. М. Условия размола губки (спеков), полученной из железного порошка при восстановительном отжиге // Порошковая металлургия. — 1979. — Вып. 6. — С. 17—21.
2. Кононов М. И., Турецкий Я. М. Получение восстановленного порошка с заданными характеристиками // Порошковая металлургия. — 1979. — Вып. 7. — С. 90—95.

3. Кононов М. И., Турецкий Я. М. Получение распыленного воздухом железного порошка с заданными характеристиками // Порошковая металлургия. — 1979. — Вып. 8. — С. 8—12.

4. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 263 с.

5. Кононов М. И., Турецкий Я. М. Влияние формы и пористой структуры частиц железного порошка на его характеристики // Порошковая металлургия. — 1981. — Вып. 8. — С. 1—4.

6. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976.

УДК 669.018.95

Е. С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук,
Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БГПА)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИАЛОНОВ

Наиболее важные критерии перспективного применения конструкционной керамики — высокая прочность (>1000 МПа), повышенная надежность (модуль Вейбулла > 20), трещиностойкость (достигается армированием керамики различными волокнами и нитевидными кристаллами) и сопротивление ползучести (достигается исключением межзеренных фаз, являющихся причиной вязкого течения керамики при повышенных температурах) [1—3]. Кроме этого, сиалон обладает совокупностью свойств, обеспечивающих высокое сопротивление воздействию шлаков, различных расплавов, термических ударов и других физико-механических нагрузок. Малое термическое расширение, высокие термостойкость, прочность и кислотоустойчивость обуславливают значительные возможности использования этого материала в различных конструкциях и устройствах [4]. Благодаря этим свойствам сиалонсодержащие огнеупоры находят применение в футеровке доменных печей и установок [5].

По сравнению с SiC сиалон обладает более высокими прочностью при изгибе, трещиностойкостью, стойкостью к термическим ударам. Отмечено [6], что получение сиалонов в огнеупорах, содержащих SiC, способствует повышению их прочностных свойств, особенно при высоких температурах.