

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ

Гранулирование – один из наиболее многообразных процессов, широко применяемых в химической, металлургической и других отраслях промышленности. Его проводят с целью улучшения качества как промежуточных, так и готовых продуктов. В общем случае гранулирование позволяет существенно уменьшить склонность продукта к слеживанию, а следовательно, упростить хранение, транспортировку и дозирование. В керамической технологии гранулирование способствует повышению текучести порошков, облегчает условия их формования и тем самым позволяет улучшить условия труда в сферах производства, обращения и использования. Наряду с этим гранулирование открывает возможность гомогенизировать смесь для улучшения физико-химических свойств, увеличить поверхность теплообмена, регулировать структуру гранул и связанные с ней свойства. Все это способствует интенсификации процессов, в которых используются гранулированные продукты, повышению производительности труда и культуры производства [1].

Перед гранулированием в исходный порошок, как правило, вводят соответствующие добавки. Последние обеспечивают необходимую прочность гранул и формованных изделий, выступают в роли смазок; они легко разлагаются при спекании, не загрязняют изделия, не поглощают влагу при длительном хранении и т.д. [2].

В данной работе исследовались свойства гранулированных порошковых смесей, изготовленных по технологическим схемам, представленным на рис. 1 и 2.

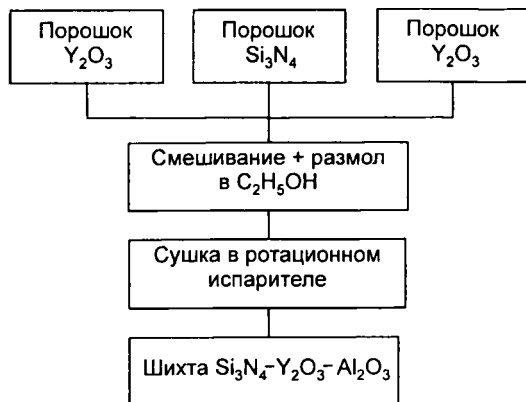


Рис. 1. Технологическая схема получения смеси  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\%$  (по массе)  $\text{Y}_2\text{O}_3 + 1,5\%$  (по массе)  $\text{Al}_2\text{O}_3$

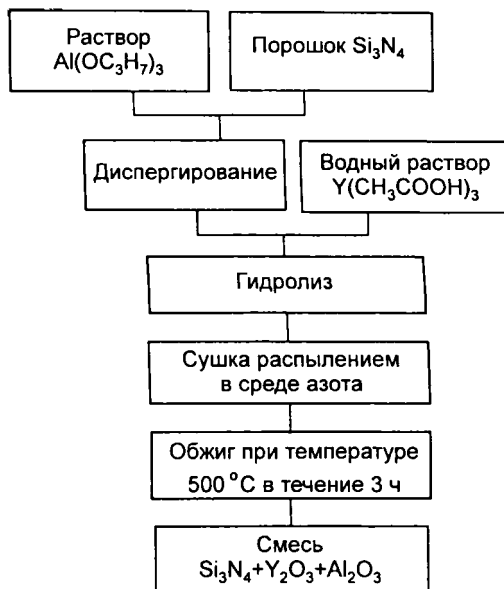


Рис. 2. Технологический вариант получения смеси  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\%$  (по массе)  $\text{Y}_2\text{O}_3 + 1,5\%$  (по массе)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  путем сушки распылением с последующим обжигом

Водные суспензии смесей были получены по схемам 1 и 2, приведенным на рис. 1, 2, путем диспергирования различных их количеств с 1,5% (по массе) поливинилового спирта в качестве связки и 0,5% (по массе) полиэтиленгликоля в качестве пластификатора. Полученные суспензии были высушены и агломерированы.

Содержание гранулирующих средств должно быть минимальным, чтобы уменьшить риск возможного образования пор в формирующихся гранулах при последующем спекании, но достаточным, чтобы обеспечить возможность получения гранул [3].

Для проведения опытов по подбору оптимального количества гранулирующих добавок были подготовлены водные суспензии с 20, 40 и 60% (по массе) порошковой смеси, полученной традиционным размолотом и смешиванием компонентов шихты (состав 1) и химическим осаждением спекающих добавок в виде гидроксидов металлов (состав 2).

Для проведения эксперимента был выбран двухфакторный план типа  $2 \times 3$ , где 2 – два уровня метода получения смеси (гранулирование – размол + смешивание; гранулирование – химическое осаждение гидроксидов металлов на поверхности частиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), а 3 – три уровня концентрации суспензии (20, 40 и 60% (по массе)).

В качестве параметров оптимизации  $y_i$  было выбрано 12 показателей:  $y_1$  – содержание кислорода, % (по массе);  $y_2$  – содержание  $\text{H}_2\text{O}$  при температуре 150 °C, % (по массе);  $y_3$  – текучесть, с/50 г;  $y_4$  – насыпная плот-

ность, г/см<sup>3</sup>;  $y_5$  – плотность после утряски согласно DIN 53194, г/см<sup>3</sup>;  $y_6$  – удельная поверхность (ВЕТ), м<sup>2</sup>/г;  $y_7$  – размер частиц  $d_{50}$ , мкм;  $y_8$  – прочность гранул, Н/мм<sup>2</sup>;  $y_9$  – плотность прессовки после одностороннего одноосного прессования при 850 МПа, г/см<sup>3</sup>;  $y_{10}$  – плотность прессовки после холодного изостатического прессования (ХИП) при 200 МПа, г/см<sup>3</sup>;  $y_{11}$  – прочность на сжатие при одностороннем одноосном прессовании, Н/мм<sup>2</sup>;  $y_{12}$  – прочность при ХИП, Н/мм<sup>2</sup>.

В качестве факторов были выбраны метод получения смеси (кодированное значение первой смеси  $x_1 = -1$ , а кодированное значение второй смеси  $x_1 = +1$ ) и концентрация суспензий ( $x_2 = -1,20\%$ ,  $x_2 = 0,40\%$ ;  $x_2 = +1,60\%$ ).

Матрица плана 2×3 и результаты опытов приведены в табл. 1. В последнем столбце указаны значения комплексного показателя  $D$ .

Ошибки воспроизводимости опытов составили соответственно:  $S_1 = 0,19$ ,  $S_2 = 0,01$ ,  $S_3 = 0,96$ ,  $S_4 = 0,03$ ,  $S_5 = 0,06$ ,  $S_6 = 0,63$ ,  $S_7 = 1,96$ ,  $S_8 = 2,54$ ,  $S_9 = 0,102$ ,  $S_{10} = 0,09$ ,  $S_{11} = 2,58$ ,  $S_{12} = 0,58$ .

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнений получены адекватные модели:

$$y_1 = 3,95 + 0,19x_1 + 0,92x_2; \quad (1)$$

$$y_2 = 0,05 + 0,13x_1 + 0,025x_2 - 0,025x_1x_2 + 0,18x_2^2; \quad (2)$$

$$y_3 = 24,4 + 15,2x_1 - 10,7x_2 - 11,65x_1x_2 - 7,85x_2^2; \quad (3)$$

$$y_4 = 0,57 - 0,11x_1 + 0,04x_1x_2; \quad (4)$$

$$y_5 = 0,67 - 0,1x_1 + 0,17x_2; \quad (5)$$

$$y_6 = 12,25 + 1,77x_1; \quad (6)$$

$$y_7 = 37,5 + 5,83x_1 + 2,5x_2 + 5x_1x_2; \quad (7)$$

$$y_8 = 0,59 - 0,46x_1 + 0,21x_2 - 0,16x_1x_2; \quad (8)$$

$$y_9 = 2,05; \quad (9)$$

$$y_{10} = 1,83; \quad (10)$$

$$y_{11} = 55,75 + 12,95x_1 - 3,4x_1x_2 - 6,25x_2^2; \quad (11)$$

$$y_{12} = 9,8 + 0,93x_1x_2 + 1,18x_2^2. \quad (12)$$

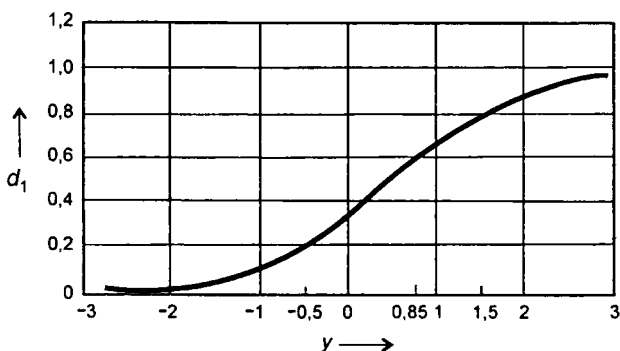
Из уравнений (1) – (12) видно, что на плотность прессовок после одностороннего одноосного прессования и ХИП ( $y_9$  и  $y_{10}$  соответственно) ни один из факторов (в выбранных пределах) не оказывает существенного влияния. На размер частиц ( $y_6$ ) влияет только способ приготовления смеси ( $x_1$ ), причем для второй смеси ( $x_1 = +1$ ) этот показатель выше.

Ввиду противоречивости влияния факторов на указанные показатели было принято решение использовать обобщенный (комплексный) показатель  $D$ . Шкала желательности для показателей представлена в табл. 2.



## Шкала функции желательности

$d_i$	$y'_i$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$	$y_{10}$	$y_{11}$	$y_{12}$
1,00...0,80	3,00	2,5	0,0	9,0	0,65	0,99	15	25	0,2	2,0	1,9	55	13
0,80...0,63	1,50	4,0	0,2	7,0	0,58	0,82	12	40	0,5	1,9	1,8	50	12
0,63...0,37	0,85	5,5	0,4	5,0	0,51	0,65	9	55	0,8	1,8	1,7	45	11
0,37...0,20	0,00	7,0	0,6	3,0	0,44	0,48	6	70	1,1	1,7	1,6	40	10
0,20...0,00	0,50	8,5	0,8	1,0	0,37	0,31	3	85	1,4	1,6	1,5	35	9



	8,5	7,0	5,5	4,0	2,5	$y_1$
	1	0,8	0,8	0,8	0,8	$y_2$
	0	10	10	10	10	$y_3$
	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	$y_4$
	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	$y_5$
	3	6	9	12	15	$y_6$
	85	70	55	40	25	$y_7$
	1,4	1,1	0,8	0,5	0,2	$y_8$
	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	$y_9$
	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	$y_{10}$
	40	45	50	55	60	$y_{11}$
	9	10	11	12	13	$y_{12}$

Рис. 3. График функции желательности для показателей свойств гранулированных смесей, полученных по способам 1 (смешивание + размол) и 2 (осаждение гидроксидов металлов + сушка распылением)

График функции желательности для этих показателей приведен на рис. 3. Пользуясь этим графиком и данными табл. 2, для каждого опыта рассчитали матрицы значения  $y'_i$ ,  $d_i$  и  $D_u$  по формулам, приведенным в [4]. Рассчитанные значения частных функций желательности  $d_i$  и  $D_u$  указаны в табл. 3.

Таблица 3

Значения  $d_i$  и  $D_n$  для матрицы 2x3

Номер опыта	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$	$d_{11}$	$d_{12}$	$D_n$
1	1,000	1,000	0,07	1,000	0,877	0,734	0,873	0,703	1,000	0,935	0,100	0,628	0,586
2	0,861	1,060	0,20	1,000	0,887	0,780	0,873	0,430	1,000	0,936	0,110	0,776	0,620
3	0,764	0,900	0,09	1,000	0,866	0,744	0,921	0,200	1,000	1,000	0,100	0,370	0,504
4	0,905	0,630	1,00	0,350	0,721	1,000	0,800	1,000	1,000	0,749	0,939	0,380	0,748
5	0,775	0,900	0,80	0,370	0,693	0,873	0,800	1,000	1,000	0,749	1,000	0,200	0,705
6	0,716	0,630	0,18	0,724	0,630	0,944	0,630	1,000	1,000	0,751	0,725	1,000	0,692

Из табл. 3 видно, что состав 2 и в этом случае обеспечивает более высокий комплекс свойств гранулированной смеси, хотя по некоторым показателям ( $y_2$  – содержание  $H_2O$ ,  $y_4$  – насыпная плотность,  $y_5$  – плотность после утряски,  $y_7$  – размер частиц,  $y_{10}$  – плотность после ХИП) уступает смеси 1. Наибольшее значение  $D_u = 0,748$  получено для условий опыта № 4, т.е. для смеси 2 ( $x_1 = +1$ ) и концентрации суспензии 20% ( $x_2 = -1$ ). Причем в этом случае все показатели будут на достаточно высоком уровне.

Пользуясь табл. 3, можно получить адекватное уравнение для  $D_u$ , которое будет выглядеть так:

$$D_u = y_D = 0,663 + 0,073x_1 - 0,035x_2 .$$

Это уравнение подтверждает предыдущий вывод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Класен П.В., Гришаев И.В., Шомин И.П.* Гранулирование. М.: Химия, 1991. 240 с.
2. Словарь-справочник по новой керамике / Е.Л. Шведков, И.И. Ковенский, Э.Т. Денисенко, А.В. Зырин. Киев: Наук. думка, 1991. 280 с.
3. Granulation and densification of silicon nitride powder / E. Günther, R. Knitter, U. Maciejewski, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl // Third Euro-Ceramics; edit. by P. Durán and J.F. Fernández. Faenze Editrica libérica S.L. Spain, 1993. V. 1. P. 895 – 900.
4. *Каледин Б.А.* Планирование экспериментов в порошковой металлургии: В 2 ч. Ч. 1. Мн.: БПИ, 1982. 62 с.

УДК 666.3/7

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

### ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ НЕЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

Относительно высокая микротвердость ( $3400...3500$  кгс/мм<sup>2</sup>) нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ), а также высокая твердость материалов на его основе, полученных горячим прессованием ( $HV 1630...1600$  кгс/мм<sup>2</sup>) [1], делает его пригодным для использования в качестве режущего материала в абразивных инструментах. Кроме того, высокая стабильность физических свойств и кристаллической структуры вплоть до температуры  $1700$  °С позволяет использовать его в экстремальных условиях эксплуатации указанных инструментов.