

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/мм²) нитрида кремния (Si_3N_4), а также высокая твердость материалов на его основе, полученных горячим прессованием ($HV 1630...1600$ кгс/мм²) [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.

Абразивный инструмент из нитрида кремния характеризуется простой изготовления, низкой стоимостью исходного продукта, более высоким уровнем прочности по сравнению с другими абразивными материалами (карбидом кремния, электрокорундом и др.), что способствует повышению износостойкости. С целью исследования этих преимуществ абразивного материала из нитрида кремния был проведен ряд опытов с использованием методов математического планирования экспериментов [2]. В качестве критериев качества (параметров оптимизации) абразивного материала была выбрана сжимающая нагрузка (P , кгс), которую выдерживали зерна до разрушения, и износостойкость единичных зерен при микрорезании стали в условиях, имитирующих работу абразивного зерна в шлифовальном круге (в микрометрах), а в качестве факторов x_i – материал абразивного зерна (гексанит А, нитрид кремния, алмаз АСК, кубонит КР, эльбор ПП), величина зерна (в микрометрах) и путь трения (в метрах).

Материал получали горячим прессованием порошка нитрида кремния с добавками оксида магния. Из этого материала были получены шлифпорошки зернистостью от 100/80 до 500/400 мкм. Разрушающую нагрузку (прочность абразивных зерен) измеряли на установке ПА-2м. За критерий прочности для каждой зернистости принято среднее значение разрушающей нагрузки по результатам последовательного разрушения 100 зерен.

В первой серии опытов исследовали зависимость разрушающей нагрузки (y_1) от материала (Si_3N_4 и гексанит) и зернистости порошков (100/80, 300/240, 500/400). Для проведения эксперимента был выбран несимметричный план второго порядка 2×3 , где 2 означает два уровня материала ($x_1 = -1$, Si_3N_4 ; $x_1 = +1$, гексанит), а 3 – три уровня зернистости. В ранее проведенных опытах была определена ошибка воспроизводимости $S_1 = 0,15$ кгс (5% от средней нагрузки). Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 1, где x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов, y_3 и y_p – соответственно экспериментальные и расчетные значения разрушающей нагрузки.

Таблица 1

План эксперимента 2×3

Номер опыта	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_2^2	y_3	y_p
1	-	-	+	+	0,6	0,50
2	-	0	0	0	1,4	1,62
3	-	+	-	+	5,0	4,90
4	+	-	-	+	0,8	0,96
5	+	0	0	0	3,0	2,78
6	+	+	+	+	6,7	6,82

После обработки результатов эксперимента по методике, изложенной в работе [2], и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель ($S_{ад}^2 = 0,1568$; $F_p = 7,36 < F_{кр} = 10,92$ при $\alpha = 0,01$, $f_1 = 1$ и $f_2 = 6$) в виде полинома:

$$y_1 = P = 2,2 + 0,58x_1 + 2,58x_2 + 0,38x_1x_2 + 1,08x_2^2. \quad (1)$$

Из этого уравнения видно, что наибольшее влияние на величину разрушающей нагрузки оказывает величина зерна (x_2): чем она больше, тем больше P . Максимальная величина $y_{max} = 6,8$ кгс получена при $x_1 = +1$ (гексанит) и $x_2 = +1$ (величина зерна 500/400 мкм).

Подставив в уравнение (1) кодированные уровни нитрида кремния ($x_1 = -1$), получим для этих материалов зависимость нагрузки от величины зерна:

для Si_3N_4

$$y_1 = 1,62 + 2,2x_2 + 1,08x_2^2; \quad (2)$$

для гексанита

$$y_1 = 2,78 + 2,96x_2 + 1,08x_2^2. \quad (3)$$

Уравнения (2), (3) и данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что прочность зерен гексанита несколько выше, чем прочность зерен нитрида кремния.

В следующей серии исследовали прочность зерен на сжатие порошков эльбора ($x_1 = -1$), кубонита ($x_1 = 0$) и алмаза АКС ($x_1 = +1$) в зависимости от величины зерна ($x_2 = -1$, 100/80; $x_2 = 0$, 300/240; $x_2 = +1$, 500/400 мкм). Для проведения эксперимента был выбран план 3×3 , где 3 означает соответственно три уровня марки материала и три уровня размера зерен. Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 2.

После статистической обработки результатов эксперимента по методике, изложенной в работе [2], и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель (при ошибке воспроизводимости опытов $S_2 = 0,054$)

$$y_2 = P = 0,79 + 0,62x_1 + 0,52x_2 + 0,28x_1x_2 + 0,42x_1^2. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что наибольшее влияние на прочность зерен оказывает материал (x_1). Максимальное значение $y_{2max} = 2,7$ получено, когда оба фактора были на верхнем уровне ($x_1 = +1$, $x_2 = +1$) – алмазный порошок и размер зерна 500/400 мкм.

Матрица плана 3×3

Номер опыта	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	$y_3 = P$	$y_p = P$
1	–	–	+	+	+	0,3	0,35
2	–	0	0	+	0	0,6	0,59
3	–	+	–	+	+	0,9	0,89
4	0	–	0	0	+	0,4	0,27
5	0	0	0	0	0	0,8	0,79
6	0	+	0	0	+	1,2	1,31
7	+	–	–	+	+	1,0	1,03
8	+	0	0	+	0	1,8	1,83
9	+	+	+	+	+	2,7	2,63

Сравнение значений, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что алмазные порошки, порошки кубонита и эльбора значительно уступают по прочности нитриду кремния и гексаниту ($2,63 < 5,0 < 6,7$). По этому критерию зерна порошка Si_3N_4 уступают лишь зернам порошка гексанита ($5 < 6,7$).

Износостойкость абразивного инструмента исследовали при микрорезании микрорезцами из гексанита, нитрида кремния, эльбора и кубонита. Работу абразивного зерна в шлифовальном круге имитировали на единичных микрорезцах конической формы с углом при вершине 100° и радиусом закругления вершины 20 мкм. Из заготовок диаметром 30 мм и высотой 10 мм вырезали прямоугольные образцы размерами $2 \times 2 \times 10$ мм, которые закрепляли в стальных державках и затачивали на станке алмазными кругами на связке БР. Шероховатость поверхности микрорезцов $R_a = 0,032 \dots 0,016$ мкм, а их форма контролировалась с помощью биологического микроскопа. Микрорезание без охлаждения на воздухе производили на токарном станке. Микрорезец вдавливали в периферию диска с помощью тарированной пружины с силой $P = 0,4$ кгс. Линейная скорость периферии диска составляла 34,5 м/с, осевая подача – 0,07 мм/об. Износ резца оценивали по уменьшению высоты конуса с помощью микроскопа.

Для проведения эксперимента вначале был выбран план 2×3 , где 2 означает два уровня материала (гексанит и Si_3N_4), а 3 – три уровня пути резания (факторы x_1 и x_2).

В качестве параметра оптимизации (y_3) был выбран линейный износ (в микрометрах). Ошибка воспроизводимости опытов составляла 1,21 мкм ($S_3 = 1,21 \approx 2,25\%$ средней величины).

Матрица плана и результаты эксперимента представлены в табл. 3.

После обработки результатов и проверки значимости коэффициентов получена адекватная модель, устанавливающая количественную связь между износом (y_3) и исследуемыми факторами:

$$y_3 = 58,3 + 7,7x_1 + 16,7x_2 - 1,9x_1x_2 - 6,5x_2^2. \quad (5)$$

Матрица плана 2x3

Номер опыта	x_1	x_2	x_1x_2	x_2^2	y_3'	y_p'	y_4'	y_4''
1	-	-	+	+	26,0	27,4	133,2	128,3
2	-	0	0	0	50,0	50,6	170,2	172,7
3	-	+	-	+	63,0	60,8	207,2	217,1
4	+	-	-	+	44,4	42,8	162,8	175,1
5	+	0	0	0	66,6	66,0	222,0	219,5
6	+	+	+	+	74,0	76,2	266,4	263,9

Из уравнения (5) видно что наибольшее влияние оказывает x_2 (путь резания 0). Минимальный износ $y_{\min} = 26$ мкм получен при $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$ (гексанит, 150 мкм). Для нитрида кремния $y_{3\min} = 42,8$ мкм, для гексанита (при $x_1 = -1$) $y_3 = 50,6 + 18,6x_2 - 6,5x_2^2$, для Si_3N_4 (при $x_1 = +1$) $y_3 = 66 + 14,8x_2 - 6,5x_2^2$.

Для сравнения по этому же плану эксперимента были испытаны на износостойкость образцы из эльбора и кубонита ($x_1 = -1$ и $x_2 = +1$). Результаты испытаний приведены в табл. 3 (y_4' и y_4'').

После обработки результатов получено адекватное уравнение (при ошибке воспроизводимости $S_4 = 4,5$ мкм)

$$y_4 = 196,1 + 23,4x_1 + 44,4x_2 + 7,4x_1x_2. \quad (8)$$

Здесь путь резания (x_2) также оказывает наибольшее влияние на износ, но последний ($y_{4\min} = 133$ мкм) намного больше минимального износа инструмента из гексанита и нитрида кремния ($y_3 = 43$ мкм).

Таким образом, по износостойкости абразивный инструмент из нитрида кремния уступает только сверхтвердому материалу – гексаниту А.

Из табл. 3 видно, что с увеличением пути резания (x_2) и, следовательно, увеличением площади контакта микрорезца в зоне резания разница в износостойкости гексанита А и исследуемых материалов на основе нитрида кремния уменьшается. Поэтому при больших площадях контакта, т.е. при черновых и обдирочных операциях шлифования, целесообразно применять абразивный материал на основе нитрида кремния. При уменьшении площади контакта (< 50 мкм) износостойкость гексанита выше. Следовательно, для чистового шлифования даже незакаленных сталей следует применять гексанит [3].

Дальнейшее повышение износостойкости материалов на основе нитрида кремния возможно посредством совершенствования технологии его получения (повышение однородности и дисперсности шихты, активация исходного порошка нитрида кремния различными методами, использование активирующих добавок).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванько А.А.* Твердость: Справочник. Киев: Наук. думка, 1968. 127 с.
2. *Вознесенский В.А.* Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1974. 192 с.
3. *Гнесин Г.Г., Осипова И.И.* Износостойкость конструкционных материалов на основе нитрида кремния // Вестник машиностроения. 1974. № 12. С. 32 – 36.

УДК 621.746

О.С. КОМАРОВ, д-р техн. наук, В.Н. ВОЛОСАТИКОВ,
И.Б. ПРОВОРОВА, Д.О. КОМАРОВ (БНТУ)

РЕЦИКЛИНГ ХРОМА ИЗ ХРОМОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ КОЖЕВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В результате производственной деятельности человека на предприятиях образуются те или иные металлосодержащие отходы. Для большинства отходов литейного, химического и машиностроительного производства разработаны и используются различные технологии их переработки [1, 2].

В последнее время активизировалась деятельность по разработке процессов и установок для максимального вовлечения отходов в хозяйственный оборот. Сырье или компонент из отходов в 2 – 3 раза дешевле, чем специально изготавливаемое, в связи с тем, что расход топлива при использовании отдельных видов отходов вместо первичного сырья снижается на 10...40%, а удельные капиталовложения – на 30...50% [3]. В то же время на предприятиях кожевенной промышленности образуется широкая номенклатура отходов. Наиболее экологоопасными из них являются хромосодержащие твердые и шламообразные (кек, ил). Если твердые отходы частично используются, то шламообразные полностью направляются в накопители или на захоронение. Проблема переработки отходов кожевенного производства актуальна для многих стран. В Германии разработана технология производства кожевенного волокнистого материала с использованием твердых отходов кож [4]. В США действует ряд технологий утилизации многообразных отходов с помощью расплава чугуна [5, 6]. В Беларуси основное количество хромосодержащих отходов кожевенного производства образуется на ОАО «Минское производственное кожевенное объединение» (МПКО), ОАО «Бобруйский кожевенный комбинат» (БКК) и ОАО «Кожевенник» (г. Могилев). Характеристика данных отходов приведена в табл. 1.

Более 70% хромосодержащих отходов приходится на ил, кек, осадки, т.е. отходы от очистки сточных вод кожевенного производства. В отличие от стружки и обрезки для данных отходов не существует технологии утилизации.