

Исследование процессов обработки

УДК 621.922.025:661.657.5

В. К. Старков*, **Е. Г. Полканов** (г. Москва)

*v.starkov@stankin.ru

Влияние рецептурного состава на твердость шлифовального круга с пониженной концентрацией кубического нитрида бора

Предложены рецептурные составы абразивно-керамических композиций на основе кубического нитрида бора с концентрацией менее 100 % для технологичного изготовления инструмента с заданной твердостью. Статистическим анализом экспериментальных данных получена регрессионная модель связи твердости, измеренной методом вдавливания шарика, с содержанием основных компонентов состава, включающего абразивный наполнитель в виде зерен микрокристаллического корунда, частиц молотых фруктовых косточек и полых алюмосиликатных микросфер.

Ключевые слова: пониженная концентрация, кубический нитрид бора, керамическая связка, состав абразивно-керамической композиции.

ВВЕДЕНИЕ

Твердость шлифовального круга, связанная с прочностью закрепления абразивных зерен, является одной из ключевых характеристик его работоспособности. Она особенно важна для инструмента из сверхтвердых материалов, так как при оптимальном назначении позволяет эффективно реализовать их уникальную режущую способность [1, 2].

Роль твердости возрастает при использовании шлифовальных кругов на керамических связках на основе кубического нитрида бора (сBN) с пониженным его содержанием в рабочем слое (с концентрацией менее 100 %). При этом получение заданной твердости и особенно больших ее степеней при объемном содержании сBN менее 25 % становится достаточно сложной технологической задачей [3, 4].

Актуальность ее решения заключается в том, что при пониженном содержании сBN в рабочем слое инструмента необходимо его компенсировать за счет введения новых дополнительных компонентов. Состав и количество вводимых компонентов должен подбираться таким образом, чтобы улучшение технологичности изготовления инструмента сопровождалось повышением его эксплуатационных свойств.

Инструмент на керамических связках с пониженной концентрацией сBN в ряде случаев показывает более высокую работоспособность, чем круги с 100 %-ной концентрацией за счет возможности их более экономичной правки и более благоприятных термодинамических условий шлифования [5].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для изготовления шлифовальных кругов с пониженной концентрацией сBN были разработаны рецептурные составы абразивно-керамических композиций на основе кубического нитрида бора высокой прочности (ЛКВ) торговой марки “Эльбор” зернистостью В151 (160/125) на керамической связке К27. Объемное содержание зерен сBN в формовочной массе было выбрано в количестве 12,5, 15 и 18,75 %, что соответствует концентрации в 50, 60 и 75 %.

При формировании различных составов опытных абразивно-керамических композиций учитывали оригинальные технологические подходы к изготовлению высокоструктурных шлифовальных кругов с повышенной пористостью, а также опыт создания и эксплуатации кругов с пониженной концентрацией сBN [5–7].

В состав абразивно-керамических композиций помимо зерен сBN в заданном количестве и керамической связки вводили абразивный и порообразующий наполнители, а также клеящие и увлажняющие добавки.

В отличие от традиционного абразивного наполнителя в виде зерен электрокорунда или карбида кремния, применяемых в производстве инструмента из сBN [8, 9], в опытных составах был использован наполнитель в виде зерен микрокристаллического корунда с зернистостью F120.

В качестве порообразующего наполнителя в состав эльборосодержащего слоя инструмента вводили смесь из алюмосиликатных тонкостенных микросфер и частиц молотых фруктовых косточек в различных комбинациях.

Для испытаний опытных абразивно-керамических композиций на твердость были изготовлены круги типоразмера 1А1 50×8×16×5. Корпус круга состоял из смеси зерен из электрокорунда белого 24А зернистостью F180 и карбида кремния зеленого 63А зернистостью F150. Технология изготовления опытного инструмента соответствовала заводской, принятой в производстве шлифовальных кругов из сBN с концентрацией 100 %.

В качестве эталонных образцов были использованы круги с характеристикой ЛКВ В151 М-Н 100V.

Твердость эльборосодержащего слоя измеряли методом вдавливания шарика по шкале *HRC* в соответствии с ГОСТ Р 53923–2010.

Статистический анализ результатов измерений твердости опытных образцов абразивно-керамических композиций от их состава выполняли с учетом рекомендаций [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Корреляционным анализом результатов измерения твердости опытных абразивно-керамических композиций установлено, что компоненты их состава по разному влияют на формирование твердости. Статистическая значимость содержания основных компонентов состава по убыванию величины коэффициента их парной корреляции r с измеренной твердостью соответствует следующей последовательности: объемное содержание пор $V_{п}$ (–0,856), абразивного наполнителя $V_{ан}$ (0,562), керамической связки $V_{св}$ (0,139) и кубического нитрида бора $V_{сBN}$ (0,040).

В таблице представлен диапазон исследованных характеристик рабочего слоя шлифовальных кругов, включая опытные абразивно-керамические композиции с содержанием сBN от 12,5 до 18,75 % и стандартные составы 100 %-ной концентрации.

Диапазон исследованных характеристик рабочего слоя шлифовальных кругов из кубического нитрида бора

Характеристика рабочего слоя	Содержание сBN в рабочем слое, % (по объему)			
	12,5	15,0	18,75	25,0
Содержание, % (по объему):				
керамическая связка V_s	7–11	7–10,5	7–10	5–6,5
поры V_p	54–57	53–62	52–58	47
Отношение $V_c/V_{ан}$	0,31–0,62	0,65–1,01	0,95–1,05	1,14–1,19
Твердость, HRC	22–42	9–44	18–42	27–47
Степень твердости	M–N	L–O	L–N	N–O

Содержание сBN в исследованном диапазоне практически не влияет на измеренную твердость круга, поэтому для его идентификации при последующей разработке регрессионной модели связи был принят комбинированный параметр состава $V_{сBN}/V_{а.н}$ – отношение содержания сBN к вводимому абразивному наполнителю в виде зерен микрокристаллического корунда.

В результате статистической обработки средних значений твердости рабочего слоя кругов различного рецептурного состава получена многофакторная регрессионная модель связи твердости с относительным содержанием основных компонентов состава в виде

$$H_R = 147,84 \left(\frac{V_{сBN}}{V_{а.н}} \right)^{0,063} V_{св}^{1,343} V_{п}^{-3,184}. \quad (1)$$

Качество модели (1) по степени адекватности расчетных значений H_R экспериментальным данным можно признать хорошим: средняя ошибка отклонения $\Delta = 7,36$ % при рассеянии от 0,31 до 16,07 %, коэффициент множественной корреляции равен 0,932, остаточная дисперсия – 0,197 и критерий Фишера $F = 8,812$.

Полученные результаты корреляционного анализа и разработанная модель (1) помогают раскрыть особенности формирования твердости как характеристики прочности абразивно-керамических композиций с пониженной концентрацией сBN.

Основными компонентами абразивного инструмента служат абразивные зерна и связка. Их содержание и количественные пропорции между собой в объеме инструмента почти однозначно определяют его технологичность изготовления и работоспособность – чем больше зерен в объеме инструмента, тем легче обеспечить их прочное соединение связкой и соответственно его твердость. Как известно, максимальное количество абразивного зерна в инструменте обусловлено предельно плотной (62 %) упаковкой шаров в ограниченном объеме, что по предложенной фирмой “Norton” классификации соответствует 0-структуре абразивного материала.

Наиболее благоприятным с точки зрения технологичности производства абразивного инструмента является содержание абразива не менее 46 % (по объему), что было установлено ранее при исследовании свойств абразивно-керамических композиций на основе электрокорунда и карбида кремния [5].

При изготовлении шлифовальных кругов на основе сBN (100 %-ной концентрации) необходимая технологическая компенсация дополнительного абразива составляет 21 %.

Для кругов с пониженной концентрацией сBN необходимая технологическая компенсация недостающему абразиву увеличивается до 33,5 % объема рабочего слоя. Ее целесообразно заполнить не только абразивным зерном, но и твердым порообразующим наполнителем. В качестве такого наполнителя в работе использована смесь из частиц молотых фруктовых косточек и полых алюмосиликатных микросфер.

Безусловно, что доминантная роль в формировании твердости рабочего слоя принадлежит керамической связке, с увеличением содержания которой по (1) прямо пропорционально возрастает твердость. При введении порообразователя твердость, напротив, заметно уменьшается.

В формуле (1) параметр V_{Π} представляет собой расчетную пористость рабочего слоя инструмента, которая складывается из естественной пористости и содержания молотых фруктовых косточек и алюмосиликатных микросфер. При выгорании косточек формируется открытая пористость, а при введении полых тонкостенных микросфер – закрытая пористость.

Поры, как структурный фактор объемного строения абразивного инструмента, изначально снижают его прочность и, соответственно, твердость. А наличие изоморфизма в размерах, химическом составе и свойствах вводимых порообразователей усугубляет негативное влияние пор на твердость абразивно-керамических композиций [5, 6, 11].

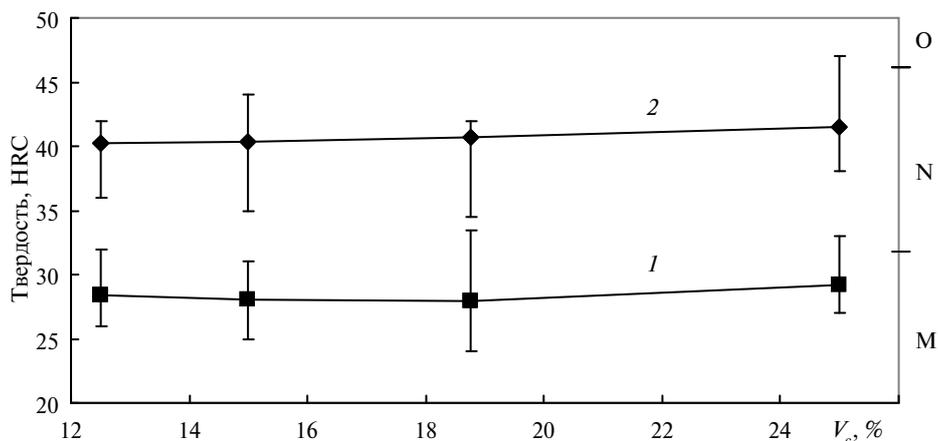
Также необходимо учитывать, что при температуре и времени обжига инструмента из сBN на керамической связке фрагменты фруктовых косточек выгорают не полностью – 1,5–2,5 % их количества в зависимости от состава сохраняется в твердом виде, переходит в жидкий расплав керамической связки, разупрочняя ее.

С учетом вышеизложенного были разработаны рецептурные составы инструмента с пониженным содержанием сBN, обеспечивающие получение степени твердости М и N в соответствии с твердостью эталонных образцов инструмента со 100 %-ной его концентрацией. При формировании рецептурных составов на заданную степень твердости учитывали полярное влияние на нее объемного содержания пор V_{Π} и керамической связки $V_{св}$. Повышение пористости с 47 до 57 % объема или на 21,3 % нивелировалось увеличением содержания связки от 5–6,5 % в эталонных кругах до 8–9,5 % в инструменте с 50 %-ной концентрацией сBN или в 1,46–1,6 раз.

На рисунке приведены расчетные значения твердости H_R по регрессионной модели (1) и диапазоны рассеяния ее предельных значений при измерении методом вдавливания шарика. Подбором оптимального содержания компонентов состава рабочего слоя кругов с объемным содержанием сBN от 25 до 12,5 % удалось достигнуть значений твердости в единицах HRC с разницей в 3–4 %. Все расчетные значения H_R находятся в поле рассеяния экспериментальных данных.

Стабильность экспериментальных данных измеренной твердости по величине ее среднеквадратичного отклонения σ_H описана моделью

$$\sigma_H = 0,315 \left(\frac{V_{сBN}}{V_{а.н}} \right)^{-0,224} V_{св}^{1,398} V_{\Pi}^{0,57}. \quad (2)$$



Расчетные (1) и экспериментальные (2) значения твердости рабочего слоя кругов с пониженным содержанием сBN.

По (2) стабильность значений твердости предложенных абразивно-керамических композиций в значительной степени зависит от содержания связки: рассеяние значений твердости будет тем больше, чем больше в состав вводится керамической связки. В меньшей степени дестабилизирует твердость расчетная пористость композиций. Фактором, повышающим стабильность твердости в объеме инструмента, является отношение содержания сBN к содержанию абразивного наполнителя.

По структуре формула (2) аналогична формуле (1) регрессионной модели, что дает возможность оценить степень и характер влияния одинаковых компонентов состава на величину твердости рабочего слоя инструмента и ее среднеквадратичное отклонение. При этом следует иметь в виду, что при расчете по формуле (1) средняя погрешность отклонения больше ($\Delta = 33,4\%$), чем при расчете по формуле (2), а коэффициент множественной корреляции равен 0,259.

Разработанная модель (2) может быть полезной при формировании рецептурных составов абразивно-керамических композиций на основе сBN с учетом требований по стабильности достижения заданной твердости.

ВЫВОДЫ

Для изготовления шлифовальных кругов из кубического нитрида бора с концентрацией от 50 до 100 % предложены абразивно-керамические композиции на основе сBN, в которых технологической компенсацией на уменьшенное его содержание являются наполнители в виде зерен микрокристаллического корунда, частицы молотых фруктовых косточек и полые алюмосиликатные микросферы.

По результатам измерения твердости рабочего слоя шлифовальных кругов различных составов, их корреляционного и регрессионного анализов разработана модель связи твердости с основными компонентами предложенных абразивно-керамических композиций.

Установлено, что при снижении в рабочем слое инструмента содержания сBN с 25 до 12,5 % (по объему) пористость возрастает с 47 до 57 %, и это негативно сказывается на величине твердости. Чтобы нивелировать разупрочняющий эффект пористости, необходимо увеличивать количество кера-

мической связи до 1,6 раз в сравнении с ее содержанием в круге с 100 %-ной концентрацией cBN.

Запропоновано рецептурні суміші абразивно-керамічних композицій на основі кубічного нітриду бору з концентрацією менше 100 % для технологічного виготовлення інструменту із заданою твердістю. Статистичним аналізом експериментальних даних отримана регресійна модель зв'язку твердості, виміряної методом вдавнення кульки, з вмістом основних компонентів складу, що включає абразивний наповнювач у вигляді зерен мікрокристалічного корунду, часток мелених фруктових кісточок і порожнистих алюмосилікатних мікросфер.

Ключові слова: знижена концентрація, кубічний нітрид бору, керамічна зв'язка, суміш абразивно-керамічної композиції.

Suggested prescription compositions abrasive ceramic compositions on the basis of cubic boron nitride with a concentration of less than 100 % for technological tools manufacturing on a given hardness. Statistical analysis of experimental data obtained regression model of relation between hardness, measured by ball indentation, HRC units of the main components of the composition, including abrasive filler in the form of grains microcrystalline corundum, particles of ground pits and hollow aluminosilicate microspheres.

Keywords: decreased concentration, cubic boron nitride, vitrified bond, the composition of abrasive ceramic compositions.

1. *Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ НАНУ, 2002. – 528 с.*
2. *Merbecks T. Entwicklung eines Charakterisierungsverfahrens für Keramisch gebundene CBN-Schleifscheiben // Berichte aus der Produktionstechnik. RWTH Aachen. – 2003. – N 12. – S. 134.*
3. *Juchem H. O. Einsatzverhalten keramisch gebundener CBN-Schleifscheiben // Werkstatt und Betrieb. – 1987. – 120, N 1. – S. 49–53.*
4. *Starkov V. K. Highly porous cubic boron nitride wheels for dry grinding // J. Superhard Mater. – 2013. – 35, N 5. – P. 298–302.*
5. *Starkov V. K. Grinding of high-porous wheels. – М.: Mashinostroenie, 2007. – 688 p.*
6. *Старков В. К., Рябцев С. А., Костров С. В. и др. Высокоструктурные шлифовальные круги и их эффективное применение. – Москва: ФГБОУ ВПО МГТУ “Станкин”, 2013. – 213 с.*
7. *Starkov V. K., Ryabtsev S. A., Polkanov E. G., Kiskin O. S. Comparative analysis of performance of cubic boron nitride and microcrystalline alumina tools in profile grinding of form cutters // J. Superhard Mater. – 2014. – 36, N 1. – P. 43–48.*
8. *Ковальчук Ю. М., Букин В. А., Глаговский Б. А. и др. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.*
9. *Пташников В. С. Совершенствование инструмента из эльбора для скоростного шлифования колец подшипников // Станки и инструмент. – 1987. – № 9. – С. 21–23.*
10. *Starkov V. K., Sergushev G. N. Generalized statistical models of cutting tool life // Russ. Engineering J. – 1979. – 59, N 6. – P. 42–44.*
11. *Батайсков Ю. С., Носенко В. А., Лежнева А. В. и др. Физико-механические и эксплуатационные свойства высокопористых фасонных шлифовальных кругов для заточки лезвийного инструмента // Тр. конф. Intergrind'91. – Ленинград, 1991. – С. 82–87.*

Московский государственный
технологический ун-т “Станкин”

Поступила 14.03.14