

Исследование процессов обработки

УДК 621.922.025:661.657.5

В. К. Старков (г. Москва)

Высокопористые круги из кубического нитрида бора для шлифования без охлаждения

Рассмотрено влияние состава высокопористых шлифовальных кругов из cBN на эффективность процесса шлифования закаленной стали при охлаждении масляным туманом и без охлаждения. Экспериментальными исследованиями и статистическим анализом полученных результатов установлено, что энергоемкость процесса съема материала, нагрев детали и шероховатость ее обработанной поверхности зависят от содержания cBN, порообразующих наполнителей и керамической связки в составе абразивной массы.

Ключевые слова: высокопористые шлифовальные круги из cBN, состав абразивной массы, кубический нитрид бора, сухое шлифование.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из экологических проблем, связанных с применением процессов механической обработки, в частности шлифования, является использование в больших объемах смазочно-охлаждающих технологических сред. Возрастающие объемы их использования, с одной стороны, повышают себестоимость обработки деталей, с другой стороны, увеличивается количество отходов (при шлифовании – это мелкодисперсный шлам из смеси абразивов и стружки, трудно подающийся утилизации).

Стремление интенсифицировать процессы шлифования путем увеличения скорости и глубины резания приводит к пропорциональному возрастанию теплонапряженности в зоне обработки и необходимости увеличивать расход смазочно-охлаждающей жидкости для снижения риска термических повреждений обрабатываемой детали. Реализация современных высокопроизводительных методов шлифования, например высокоскоростного шлифования по методу Гюринга или профильного глубинного шлифования, обеспечивается при подаче смазочно-охлаждающей жидкости под давлением 0,5–2,0 МПа с расходом до 200–400 л/мин и связано с применением специальных устройств для ее фильтрации и охлаждения, что усложняет конструкцию станочной системы и удорожает стоимость обработки детали.

Решающим аргументом в пользу отказа от использования смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании становятся также возрастающие

© В. К. СТАРКОВ, 2013

затраты на эксплуатацию систем охлаждения в современных шлифовальных станках – на их функционирование расходуется до 80 % потребляемой мощности.

Положительный опыт шлифования без применения принудительного охлаждения был получен при использовании высокопористых шлифовальных кругов на основе электрокорунда различных модификаций [1, 2].

В данной работе рассмотрена возможность шлифования деталей из закаленных сталей высокопористыми шлифовальными кругами из кубического нитрида бора (сBN) без охлаждения. Этот класс абразивного инструмента находит все более широкое применение в процессах шлифования деталей из сталей, никелевых и титановых сплавов и других конструкционных материалов. Как абразивный материал сBN в настоящее время заслужил репутацию наиболее эффективного в сравнении с алмазом, электрокорундом и карбидом кремния [3].

Ниже приведены результаты исследования различных возможных вариантов составов высокопористых шлифовальных кругов на основе сBN на керамической связке для обработки с минимальным охлаждением или без него.

Идея использовать высокопористые круги (с высокими номерами структуры) для реализации процесса сухого шлифования хорошо зарекомендовала себя при обработке закаленных сталей инструментом на основе электрокорунда белого. В частности, при сухом шлифовании на скорости 96 м/с кругом со структурой 19 (содержание зерен – 24 % (по объему)) нагрев обрабатываемой поверхности детали не превысил 80 °С [3].

В качестве одного из направлений решения проблемы создания инструмента из сBN, который был бы дешевле своих аналогов, но при этом обладал эксплуатационными свойствами, необходимыми для эффективной реализации процесса сухого шлифования, предложен также вариант повышения структурности его рабочего слоя.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Приоритетной областью применения абразивного инструмента из сBN является шлифование закаленных сталей. Авторами были разработаны и изготовлены шлифовальные круги из кубического нитрида бора высокой прочности (ЛКВ) торговой марки “Эльбор” на керамической связке К27. Исследовали пять кругов различного состава, в которых содержание сBN изменялось от 17 до 25 % (по объему), пористость – от 47 до 53 % (по объему) (это позволяет считать состав высокопористым), а зернистость была 200/160 (условное обозначение в работе ЛКВ20), 160/125 (ЛКВ16) и 125/100 (ЛКВ12).

Состав абразивной массы шлифовальных кругов был разработан с учетом технологических принципов, изложенных в [3–5], в частности учитывали следующие рекомендации:

- высокопористая абразивная композиция состояла из зерен сBN заданного размера, абразивного и порообразующего наполнителей, керамической связки и клеящей добавки;
- абразивными наполнителями были зерна микрокристаллического корунда, изготовленного по SG-технологии, размером на два порядка меньше, чем размеры зерен сBN ;
- как порообразующие наполнители использовали микросферы из алюмосиликата размером от 5 до 560 мкм и частицы молотых фруктовых косточек с размерами аналогичными размеру зерен сBN;

- для управления твердостью инструмента варьировали количество керамической связки и абразивного наполнителя;
- изменение пористости обеспечивали введением молотых фруктовых косточек, которые выгорали при обжиге.

Оригинальность разработанных рецептурных составов инструмента из cBN заключается в замене традиционного абразивного наполнителя в виде зерна из карбида кремния зеленого микрокристаллическим корундом (этот абразив в настоящее время начинают использовать как альтернативу кубическому нитриду бора), а для формирования пористости предложены молотые фруктовые косточки и алюмосиликатные микросферы.

Состав изготовленных для исследований шлифовальных кругов из cBN с размерами 90×12×25 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав шлифовальных кругов из cBN

Шлифовальный круг	V_{cBN}	$\frac{V_{cBN}}{V_n}$	V_{cb}	Относительная пористость
ЛКВ20-1	0,21	0,68	0,095	0,47
ЛКВ16-2	0,19	0,58	0,10	0,49
ЛКВ20-3	0,17	0,49	0,090	0,51
ЛКВ16-4	0,25	0,89	0,085	0,49
ЛКВ16-5	0,19	0,57	0,080	0,53

Примечание. V_{cBN} – относительное объемное содержание cBN в инструменте; $\frac{V_{cBN}}{V_n}$ – отношение объемного содержания cBN и наполнителей; V_{cb} – относительное объемное содержание в шлифовальном круге керамической связки.

В составе исследуемых шлифовальных кругов содержится три ключевые компонента – зерна cBN, наполнитель и керамическая связка, которые определяют объемно-структурное строение рабочего слоя круга и его эксплуатационные свойства. Твердость изменялась от 34 (ЛКВ16-5) до 46 (ЛКВ16-2) *HRC*.

Исследования работоспособности высокопористых шлифовальных кругов из cBN проводили на экспериментальной базе германского научно-исследовательского института IWU-Fraunhofer (Chemnitz, Германия) на круглошлифовальном станке мод. KEL-VARIA UR175/1500 фирмы “Kellenberger”, Германия*.

С цилиндрических образцов из закаленной стали 100Cr6 твердостью 56–61 *HRC* с исходным диаметром 42 мм методом врезного шлифования за каждый опыт удалялся припуск толщиной 0,2 мм.

Режим врезного шлифования был принят для всех шлифовальных кругов одинаковым: скорость круга – 42,2 м/с, скорость вращения детали – 42,4 м/мин, подача на врезание – 5 мкм на оборот детали. На данном режиме шлифования производительность процесса по скорости съема материала составляет 3,53 мм³/(с·мм). Каждый опыт повторяли три раза.

Работоспособность инструмента оценивали при трех вариантах обработки: с обильным охлаждением зоны шлифования эмульсией, с минимальным

* В проведении лабораторных исследований участвовали инженеры IWU-Fraunhofer S. Gentzen, C. Steineke и D. Brau.

охлаждением ее масляным туманом и без охлаждения. Последние два варианта можно рассматривать как экстремальные условия шлифования инструментом из cBN.

Охлаждение производили эмульсией HOMMEL Ecolube W71-10. При охлаждении с минимальным количеством смазки использовали установку MMS фирмы "Bielomatik", Германия. Как смазку применяли масло MSK-98 102 фирмы "Chemie GmbH", Германия, с вязкостью 50–60 мм²/с при 20°C.

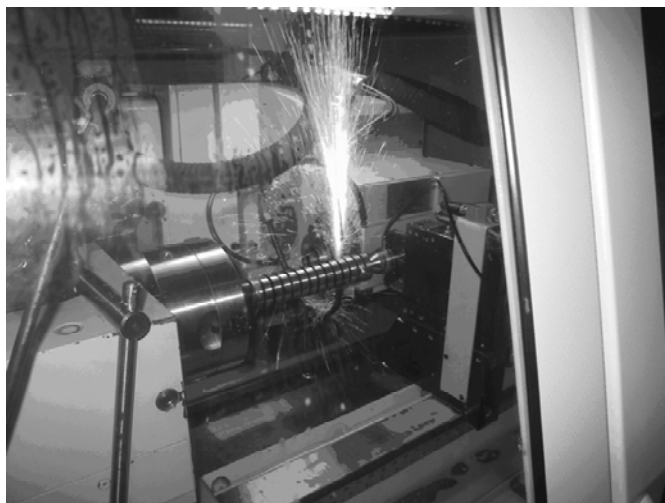
После каждого эксперимента шлифовальный круг правили алмазным роликом фирмы "Dr Kaiser", Германия, с диаметром 125 мм, углом 40°, радиусом 0,5 мм и с алмазным покрытием HP7. По рекомендации фирмы "Dr Kaiser" был выбран метод правки Punktcrushieren.

Параметрами для сравнения работоспособности шлифовальных кругов из cBN были:

- удельная энергоемкость процесса шлифования η с размерностью Дж/мм³, которую вычисляли как отношение мощности шлифования W к фактической скорости съема материала Q_w ;
- приращение температуры обработанной поверхности образца $\Delta\Theta$, °C, измеряемой контактным методом с помощью измерительного шупа;
- шероховатость шлифованной поверхности образца по параметрам Rz и Ra .

Измерение температуры и шероховатости обработанной поверхности образцов производили с помощью портативных установок непосредственно на станке сразу после завершения опыта. Исходная температура заготовки перед экспериментом составляла во всех случаях 19 °C.

На рисунке показан пример сухого шлифования стального образца шлифовальным кругом из cBN.



Сухое шлифование шлифовальным кругом из cBN.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментально установлено, что характеристики шлифовального круга из cBN, зависящие от его состава, оказывают большое влияние на процесс шлифования с охлаждением, с минимальным охлаждением и без охлаждения зоны обработки.

Результаты сравнительных испытаний высокопористых кругов из cBN пяти различных составов на постоянном режиме врезного шлифования, усредненные по трем проведенным экспериментам, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнительных испытаний кругов из cBN различных составов

Шлифовальный круг	Характеристики процесса шлифования											
	с охлаждением эмульсией				с охлаждением туманом				без охлаждения			
	η , Дж/мм ³	$\Delta\Theta$, °C	Ra , мкм	Rz , мкм	η , Дж/мм ³	$\Delta\Theta$, °C	Ra , мкм	Rz , мкм	η , Дж/мм ³	$\Delta\Theta$, °C	Ra , мкм	Rz , мкм
ЛКВ20-1	7,21	0,9	2,48	14,3	8,38	4,7	2,73	15,7	9,52	7,0	3,12	18,1
ЛКВ16-2	8,9	2,6	3,32	15,1	5,58	3,5	3,17	20,8	7,86	4,5	3,23	19,2
ЛКВ12-3	15,78	0,5	2,08	12,4	13,21	2,7	2,48	16,4	9,61	6,4	2,63	15,0
ЛКВ16-4	7,03	0,7	2,72	15,1	5,04	1,8	2,58	16,5	7,27	0,8	2,46	15,5
ЛКВ16-5	10,46	1,3	2,91	17,6	5,46	2,6	3,6	19,9	6,91	3,3	3,14	19,6
Среднее значение	9,74	1,2	14,9	2,7	7,53	3,1	15,9	2,9	8,23	4,4	17,5	2,9

По всем исследуемым параметрам режущей способности разработанные составы инструмента заметно отличаются друг от друга. Мощность процесса шлифования при постоянной интенсивности съема материала по величине η варьируется до 2,2 раз, приращение температуры обработанной поверхности – до 8,8 раз и ее шероховатости – до 1,6 раз.

Использованный экспресс-метод контактного измерения температуры шлифованной поверхности, возможно, не обеспечивает точной ее оценки. Но в данном случае при измерении температуры нагрева поверхности после обработки этот метод оказался достаточно чувствительным для сравнительного анализа различных вариантов состава инструмента. Зафиксированная температура шлифованной поверхности коррелирует с достигнутым уровнем теплонпряженности зоны резания. При шлифовании без охлаждения, например, максимальным значениям η соответствуют максимальные приращения $\Delta\Theta$.

Дополнительными металлографическими исследованиями не обнаружено структурно-фазовых изменений в поверхностном слое образцов и каких-либо термических повреждений. Этот факт является прямым подтверждением отсутствия критического нагрева исследованной закаленной стали, чувствительной к возможным изменениям структуры.

Относительно большие значения шероховатости обработанной поверхности по параметрам Ra и Rz характерны для схемы круглого наружного врезного шлифования с постоянной подачей круга на каждый оборот детали, также как и их незначительное увеличение при экстремальных условиях обработки. Кроме того, это свидетельствует о работе круга в режиме умеренного самозатачивания с постоянным обновлением режущих кромок зерен за время цикла эксперимента.

При введении выхаживающего прохода без врезания круга, например ЛВК16-4, формируемая шероховатость поверхности образца существенно уменьшается до значений $Ra = 0,69$ мкм и $Rz = 4,8$ мкм.

В табл. 2 представлены также обобщенные данные для всех исследуемых составов в виде средних значений характеристик режущей способности инструмента для трех условий обработки – с охлаждением эмульсией, масляным

туманом и без охлаждения. Их анализ дает возможность оценить целесообразность изготовления высокопористых шлифовальных кругов из сBN по технологическим принципам, изложенным выше.

Установлено, что такие круги позволяют, по сравнению с обработкой с принудительным охлаждением поливом, уменьшить энергоемкость процесса съема материала почти на 30 % при шлифовании с масляным туманом и на 18 % – при сухом шлифовании. Незначительный нагрев обрабатываемой поверхности образца (в среднем до 4,4 °С), безусловно, не может рассматриваться как негативный фактор. Наблюдаемое увеличение шероховатости шлифованной поверхности легко устраняется выжигивающим проходом круга.

Таким образом, можно сделать заключение, что предложенные технологические принципы могут быть рекомендованы при изготовлении высокопористых кругов из сBN для шлифования закаленных сталей без охлаждения или с минимальным охлаждением масляным туманом.

При компьютерной статистической обработке экспериментальных данных корреляционным анализом обнаружена тесная связь компонентов состава круга с исследованными характеристиками процесса шлифования [6]. Это позволяет установить степень влияния того или иного компонента на ожидаемые результаты шлифования.

При сухом шлифовании, например, содержание керамической связки очень сильно влияет на удельную энергоемкость процесса η и нагрев поверхности образца $\Delta\Theta$ (коэффициенты парной корреляции равны 0,848 и 0,832 соответственно). В меньшей степени на них влияет содержание сBN (коэффициенты парной корреляции – 0,384 и 0,683 соответственно) и практически не влияет его зернистость (0,117 и 0,014 соответственно).

Дифференцированный анализ результатов, полученных для высокопористых кругов из сBN пяти различных составов на постоянном режиме шлифования, показал, что наилучшим оказался круг ЛКВ16-4. При обработке с охлаждением и без охлаждения указанный круг сохраняет практически на одном уровне свою режущую способность по удельной энергоемкости процесса η , приращению температуры шлифованной поверхности $\Delta\Theta$ и параметрами ее шероховатости Ra и Rz .

Среди исследованных вариантов состава рабочего слоя круг ЛВК16-4 имеет наибольшую концентрацию сBN – 100 (25 % (по объему)), и минимальное объемное содержание использованных наполнителей – 28 % (по объему) в виде абразивных зерен SG, выгорающих и невыгорающих порообразователей, содержание керамической связки – 8,5 % (по объему).

При дальнейшем форсировании режима шлифования за счет увеличения подачи врезания с 5 до 20 мкм на оборот круга удалось обеспечить эффективную обработку образцов из закаленной стали 100Cr6 кругом ЛВК16-4 без охлаждения при производительности в 4 раза выше – 14,12 мм³/(мм·с).

ВЫВОДЫ

По результатам производственных испытаний высокопористых кругов из сBN на керамической связке, изготовленных в виде композиций из эльбора высокой прочности, зернистостью 200/160, 160/125 и 125/100 с объемной концентрацией от 17 до 25 % наполнителя в виде зерен микрокристаллического корунда и порообразователей в виде молотых фруктовых косточек и алюмосиликатных микросфер установлено, что они могут быть эффективно использованы при шлифовании закаленных сталей без охлаждения или с минимальным охлаждением масляным туманом.

Среди исследованных вариантов составов кругов наиболее оптимальным является круг, рабочий слой которого содержит, % (по объему): кубического нитрида бора – 25, наполнителей и порообразователей – 28, керамической связки – 8,5.

Высокопористые круги из cBN позволяют по сравнению с обработкой с обильным охлаждением эмульсией снизить до 18 % энергопотребление шлифования закаленной стали без охлаждения и до 30 % при обработке с охлаждением масляным туманом. Структурно-фазовые изменения в поверхностном слое образцов или термические повреждения на шлифовальной поверхности при этом отсутствуют из-за незначительного ее нагрева.

Розглянуто вплив складу високопористих шліфувальних кругів із cBN на ефективність процесу шліфування загартованої сталі при охолодженні масляним туманом і без охолодження. Експериментальними дослідженнями і статистичним аналізом отриманих результатів встановлено, що енергоємність процесу знімання матеріалу, нагрівання деталі і шорсткість її обробленої поверхні залежать від вмісту cBN, пороутворюючих наповнювачів і керамічної зв'язки у складі абразивної маси.

Ключові слова: високопористі шліфувальні круги із cBN, склад абразивної маси, кубічний нітрид бору, сухе шліфування.

The paper addresses the influence of composition of highly porous cBN grinding wheels on the efficiency of grinding hardened steel with oil mist cooling and without cooling. Experimental investigations and statistical analysis of test data have demonstrated that the power intensity of the material removal process, workpiece heating, and ground surface roughness depend on the amount of cBN, pore-forming fillers, and vitrified bond in the abrasive mix composition.

Keywords: highly porous cBN grinding wheels, abrasive mix composition, cubic boron nitride, dry grinding.

1. Соломенцев Ю. М., Старков В. К., Neugebauer R, Harzbecker C. Высокопроизводительное шлифование без применения смазочно-охлаждающих средств // Конструкторско-технологическая информатика 2000: Труды IV междунар. конгресса: В 2 т. – М.: МГТУ “СТАНКИН”, 2000. – Т. 2. – С. 156–158.
2. Соломенцев Ю. М., Старков В. К., Neugebauer R., Harzbecker C. Экологически безопасное и высокопроизводительное шлифование без применения смазочно-охлаждающих средств // Экологически безопасное шлифование – шлифование без применения смазочно-охлаждающих средств. – М.: МГТУ “СТАНКИН”, 2001. – С. 4–97.
3. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
4. Старков В. К., Рябцев С. А., Полканов Е. Г. Разработка и применение высокопористых шлифовальных кругов из кубического нитрида бора // Технология машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 26–33.
5. Пат. 2152298 РФ, МПК⁷ B24D3/18, B24D3/34. Масса для изготовления абразивного инструмента / В. К. Старков. – Заявл. 11.10.99; Опубл. 20.07.2000.
6. Starkov V. K., Sergushev G. N. Generalized statistical models of cutting tool life // Russ. Eng. J. – 1979. – 59, N 6. – P. 42–44.

Московский государственный
технологический ун-т “Станкин”

Поступила 24.05.13