

# Исследование процессов обработки

УДК 621.922.025

**В. К. Старков, Е. Г. Полканов** (г. Москва, Россия)  
v.starkov@stankin.ru

## **Исследование работоспособности инструмента с пониженной концентрацией кубического нитрида бора при шлифовании закаленной стали**

*Разработаны и испытаны шлифовальные круги из кубического нитрида бора на керамических связках, в которых содержание зерна изменялась от 25 до 12,5 % объема рабочего слоя инструмента (концентрация 100 и 50 % соответственно). Установлено, что при внутреннем шлифовании втулки из закаленной стали круги с пониженной концентрацией кубического нитрида бора обеспечивают более высокую производительность обработки и удельный расход абразива до 2,5 раз меньший, чем инструмент 100 %-ной концентрации.*

**Ключевые слова:** шлифовальные круги из cBN, внутреннее шлифование, концентрация кубического нитрида бора.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Структура шлифовальных кругов из корунда и карбида кремния является важным параметром их работоспособности. При повышении номера структуры с сопутствующим снижением объемного содержания абразива в инструменте уменьшаются усилия, температуры шлифования и расход абразива. Благоприятная термодинамика процесса съема материала способствует формированию поверхностного слоя обработанных деталей с минимальным наклепом и наведением сжимающих остаточных напряжений и, соответственно, повышению их эксплуатационных свойств [1–3].

При шлифовании, например, магнитотвердых материалов повышение номера структуры электрокорундового круга с 10 до 14 обеспечило снижение составляющих силы резания более чем в 2 раза. На операциях глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов повышение структуры инструмента позволило повысить производительность обработки до 2,7 раз и снизить затраты на абразив в 2,5 раза. При обработке кругом с 12-ой структурой температура в зоне шлифования никелевых сплавов и закаленных сталей снижается на 300–400 град в сравнении с обработкой кругом 5-ой структуры [4, 5].

© В. К. СТАРКОВ, Е. Г. ПОЛКАНОВ, 2014

Эффективность применения высокоструктурного абразивного инструмента обусловлена не только пониженным содержанием зерна, но и связанной с этим повышенной пористостью. Объемная и поверхностная пористость становится дополнительным фактором повышения работоспособности высокоструктурного инструмента, так как способствует охлаждению зоны резания и складированию образующейся стружки, препятствуя “засаливанию” рабочей поверхности.

Положительный опыт уменьшения объемной концентрации кубического нитрида бора (сBN) с 25 до 17 % приведен в [6], где описаны результаты создания и испытания инструмента на керамической связке для эффективного шлифования без охлаждения. Инструментом с пониженной концентрацией сBN удалось реализовать процесс врезного шлифования, имитирующий обработку кулачков из закаленной стали распределительных валов автомобильных двигателей, с энергопотреблением до 30 % меньше, чем при шлифовании с обильным охлаждением.

В данной статье приведены результаты разработки и применения инструмента из кубического нитрида бора с пониженной его концентрацией для наиболее приоритетных и наиболее распространенных операций шлифования деталей из закаленных сталей с охлаждением.

Успешность решения задачи создания такого инструмента безусловно будет способствовать расширению области его эффективного применения на операциях профильного шлифования сложнофасонных деталей: зубчатых колес, протяжек, лопаток турбин и компрессоров и др. Для таких операций сохраняется актуальность проблемы экономного и ускоренного профилирования рабочей поверхности кругов из сBN алмазными роликами, трудоемкость которой может достигать двух и более часов, а затраты на правку – до 70 % от себестоимости операции шлифования.

#### **УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Были разработаны и изготовлены шлифовальные круги из кубического нитрида бора высокой прочности (ЛКВ) торговой марки “Эльбор” зернистостью В151 (160/125) на керамической связке К27. В предложенных для испытаний рецептурных составах с объемным содержанием сBN от 25 до 12,5 % были использованы идеи и рекомендации, содержащиеся в [7, 8].

Обычно в состав рабочего слоя, который представляет собой композицию сBN–абразивный наполнитель–керамическая связка, вводят в технологических целях наполнитель в виде зерен карбида кремния или электрокорунда в количестве близком к содержанию сBN. Чтобы уменьшить долю участия абразивного наполнителя в шлифовании, рекомендуется [8] существенно уменьшить его зернистость – на 4–6 номеров меньше зернистости кубического нитрида бора.

Чтобы уменьшить концентрацию и, соответственно, увеличить пористость рабочего слоя кругов из сBN, в его состав вводили различные порообразователи, как выгорающие (молотые фруктовые косточки), так и невыгорающие в виде алюмосиликатных микросфер.

Для испытаний были изготовлены круги типоразмера 1А1 50×8×16 с высотой рабочего слоя 5 мм. Корпус круга состоял из смеси электрокорунда белого марки 24А зернистостью F180 и карбида кремния зеленого марки 63С зернистостью F150 на связке К27. Технология изготовления кругов была одинаковой для всех составов и соответствовала общепринятой для производства кругов из сBN на керамических связках.

Твердость рабочего слоя после спекания определяли на твердомере Роквелла методом вдавливания шарика в соответствии с ГОСТ Р 52587–2006 и ГОСТ Р 53923–2010 (ISO 22917:2004).

Было исследовано шесть составов эльборовых композиций, в том числе стандартный состав эталонного круга. Расчетная пористость кругов была увеличена с 47 % для эталонного круга 100 %-ной концентрации до 58 % у нового инструмента. Степень твердости опытных кругов была М, эталонного круга – на границе N–O (44 *HRC*).

В таблице приведены основные компоненты состава и твердость рабочего слоя исследованных кругов, а также данные эталонного образца шлифовального круга из сBN (п. 1). Из представленных данных следует, что при уменьшении концентрации сBN твердость также уменьшается. Причем уменьшение твердости коррелирует с увеличением пористости рабочего слоя круга: при увеличении объемного содержания пор до 23 % средняя твердость образцов уменьшилась почти на 50 %.

### Состав, концентрация и твердость рабочего слоя кругов из сBN

№ п/п	Объемное содержание, %			Концентрация сBN, %	Твердость <i>HRC</i>
	сBN	связка	поры		
1	25,0	6,5	47	100	44
2	18,75	7,0	56	75	32
3	18,75	8,0	58	75	24
4	15,0	8,0	55	60	30
5	12,5	7,0	55	50	29
6	12,5	8,0	54	50	33

Наблюдаемое снижение твердости зафиксировано при более высоком содержании керамической связки, а соответственно, и пористости (см. таблицу). Этот факт является дополнительным свидетельством влияния пористости на твердость рабочего слоя инструмента.

Действующие стандарты по оценке твердости учитывают связь показаний твердомера только с зернистостью абразива, не учитывая влияние концентрации сBN и пористости связки. Поэтому выявленная взаимосвязь твердости и пористости является фактором их косвенного влияния на работоспособность шлифовальных кругов с пониженной концентрации кубического нитрида бора.

Испытания опытных высокопористых кругов из сBN проводили при внутреннем шлифовании на станке мод. TST 250-4R фирмы “Grivet”, Швейцария. Обработывали втулки из закаленной стали ХВГ (60 *HRC*) с наружным диаметром 120 мм, шириной 24,8 мм, с исходным диаметром отверстия 56,3 мм. Втулки крепили в специальной оправке на шпинделе станка. Обработку по схеме маятникового шлифования с охлаждением масляной эмульсией проводили на постоянном режиме: скорость круга – 30 м/с, скорость вращения детали – 25 м/мин, скорость продольного перемещения круга – 400 мм/мин. Характеристики работоспособности инструмента фиксировали при двух значениях глубины шлифования на один ход круга – 0,002 и 0,005 мм.

С каждой втулки кругом одной характеристики при постоянной глубине шлифования удалялся припуск, равный 1 мм на диаметр. Время удаления припуска в опыте составляло 15,5 мин при глубине шлифования 0,002 мм и 6,2 мин при 0,005 мм. Испытания для каждого круга повторяли 3 раза.

Правку кругов перед обработкой втулки осуществляли алмазным обкатным роликом со скоростью вращения 20 м/с и скоростью продольного перемещения 600 мм/мин за два прохода.

В процессе испытаний внутренний диаметр кольца измеряли с помощью нутромера с цифровой индикацией Imicro Tesa type 61.30011. Диаметр шлифовального круга фиксировали при помощи микрометра с ценой деления 1 мкм в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяли как среднее из двух значений [9].

Шероховатость обработанной поверхности отверстия детали после шлифования определяли с помощью портативного прибора Mitutoyo SJ-201.

Работоспособность инструмента оценивали по изменению скорости съема материала  $Q_w$  (мм<sup>3</sup>/мин) и скорости изнашивания рабочего слоя круга  $Q_s$  (мм<sup>3</sup>/мин), удельного расхода cBN  $q$  (мг/г), а также шероховатости обработанной поверхности по параметру  $Ra$  (мкм).

Количественную оценку характеристик работоспособности разработанных абразивно-керамических композиций на основе cBN проводили по общепринятой методике с учетом рекомендаций по определению удельного расхода  $q$  [8, 10]. Расчеты значений  $Q_w$ ,  $Q_s$  и  $q$  выполняли по изменению фактических размеров отверстия детали и наружного диаметра круга с точностью до 1 мкм.

Полученные опытные данные статистически обрабатывали по рекомендациям [11, 12], а результаты корреляционного и регрессионного анализов использовали для объяснения выявленных закономерностей и построения графиков. Регрессионные модели связи получены в виде нелинейных логарифмических полиномов для выявления возможных экстремумов.

#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны зависимости скорости съема материала  $Q_w$  от объемного содержания cBN в рабочем слое круга для двух (0,002 и 0,005 мм) значений глубины шлифования при принятых постоянных условиях обработки. В обоих вариантах обработки отмечена общая закономерность изменения скорости съема материала  $Q_w$  от содержания cBN  $V_z$  с наличием экстремальных значений скорости съема материала при объемном содержании cBN в рабочем слое инструмента равном 15 % (концентрация – 60 %).

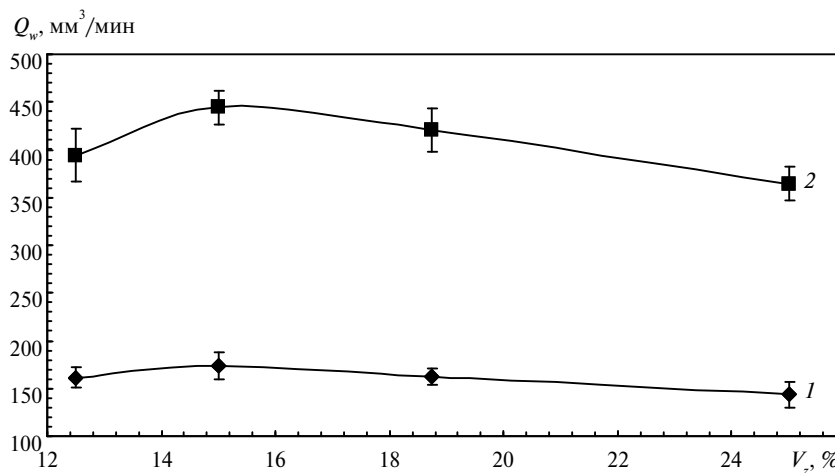


Рис. 1. Влияние объемного содержания cBN в рабочем слое инструмента на скорость съема материала при глубинах шлифования 0,002 (1) и 0,005 (2) мм.

Разница между максимальным и минимальным значениями  $Q_w$  при  $V_z = 25\%$  (концентрация 100 %) при двух глубинах шлифования практически одинакова и составляет 21 % при  $t = 0,002$  мм и 22 % при  $t = 0,005$  мм.

После оценки скорости изнашивания шлифовальных кругов также выявлена экстремальная зависимость  $Q_s$  от относительного содержания сBN в рабочем слое инструмента (рис. 2). При шлифовании с глубиной 0,002 мм минимальная скорость изнашивания в  $0,27$  мм<sup>3</sup>/мин была зафиксирована у круга 100 %-ной концентрации сBN, которая в 1,44 раз была меньше, чем у круга с  $V_z = 15\%$ .

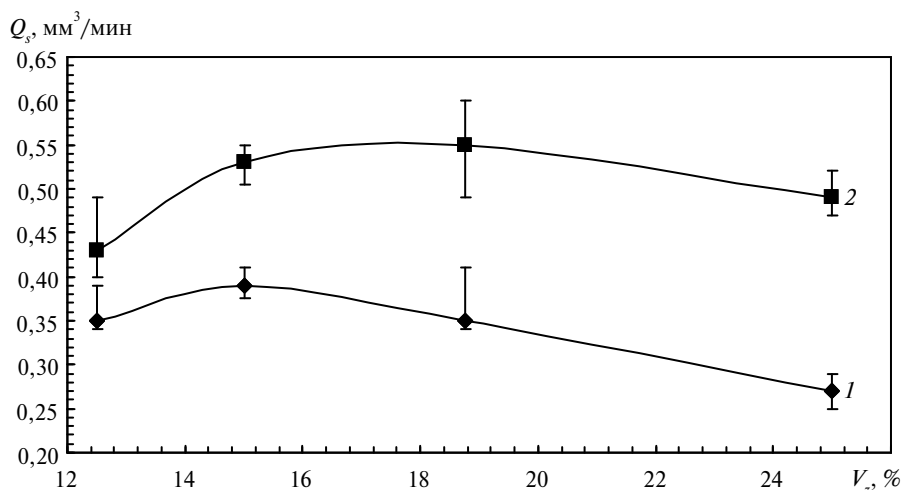


Рис. 2. Влияние объемного содержания сBN в рабочем слое инструмента на скорость его изнашивания при глубинах шлифования 0,002 (1) и 0,005 (2) мм.

С увеличением глубины шлифования с 0,002 до 0,005 мм или в 2,5 раза средняя скорость съема материала для шести исследованных характеристик инструмента увеличилась с 161,9 до 393,6 мм<sup>3</sup>/мин или в 2,43 раза, а средняя скорость изнашивания шлифовальных кругов также увеличилась с 0,34 до 0,445 мм<sup>3</sup>/мин (на 30 %).

Вследствие отмеченной разницы в значениях  $Q_w$  и  $Q_s$  их отношение с учетом пониженной концентрации сBN в исследованных кругах стало причиной закономерности  $q(V_z)$ , представленной на рис. 3. Удельный расход сBN при глубине шлифования 0,005 мм для всех кругов в среднем оказался в 1,64 раза меньше, чем при обработке с  $t = 0,002$  мм.

Характер влияния  $V_z$  одинаков для обоих вариантов шлифования: с уменьшением относительного содержания сBN в рабочем слое инструмента пропорционально снижается его удельный расход. При снижении концентрации сBN от 100 до 50 % на режиме шлифования с глубиной 0,002 мм удельный расход уменьшается с 0,21 до 0,12 мг/г или на 75 %, а при глубине обработки 0,005 мм – с 0,15 до 0,06 мг/г или в 2,5 раза.

На рис. 4 показано влияние объемного содержания сBN в рабочем слое инструмента на результаты измерения шероховатости шлифованной поверхности отверстия втулки. Лучшие результаты по величине параметра  $Ra$  показал эталонный круг с концентрацией сBN в 100 % – в пределах 0,27–0,3 мкм. При более низкой концентрации шероховатость поверхности после обработки возрастает до значений 0,65–0,95 мкм при  $t = 0,005$  мм.

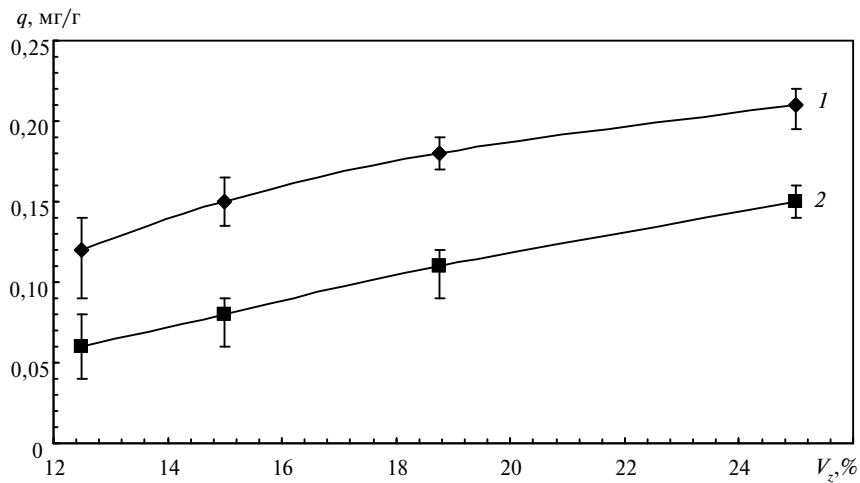


Рис. 3. Влияние объемного содержания сBN в рабочем слое инструмента на его удельный расход при глубинах шлифования 0,002 (1) и 0,005 (2) мм.

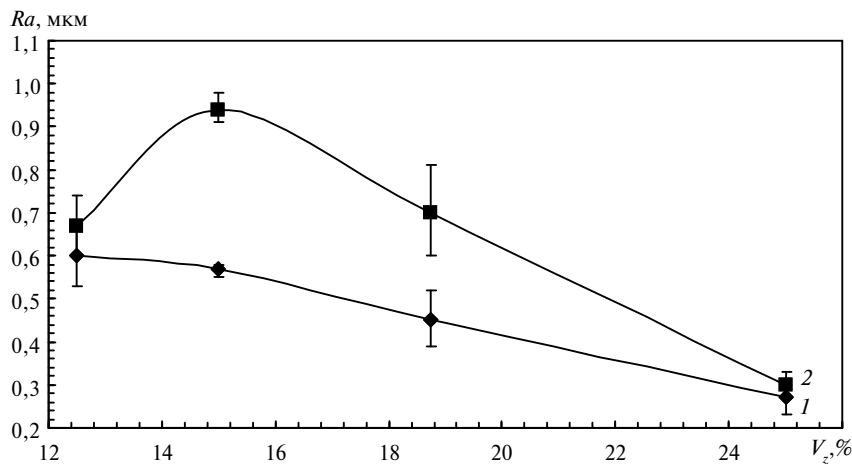


Рис. 4. Влияние объемного содержания сBN в рабочем слое инструмента на шероховатость обработанной поверхности при глубинах шлифования 0,002 (1) и 0,005 (2) мм.

По техническим условиям на обработку отверстия втулки из закаленной стали ХВГ, которая была использована в экспериментах, требование по шероховатости составляет  $Ra \leq 0,63$  мкм. Оно обеспечивается чистовым шлифованием с глубиной 0,002 мм всеми исследованными кругами.

При анализе полученных результатов необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. В процессе исследований можно было ожидать, что на результаты шлифования окажет влияние не только основной исследуемый параметр круга  $V_z$ , который изменялся в диапазоне 12,5–25 %, но и его твердость. Ее значение колебалось от 44 HRC для эталонного образца с  $V_z = 25$  % до минимальной твердости 24 HRC у круга с  $V_z = 18,75$  %, который в экспериментах показал удовлетворительную работоспособность.

По ГОСТ 53929–2010 все пять разработанных и исследованных в данной работе составов шлифовальных кругов (помимо эталонного образца) соответствуют одной степени твердости – М (21–32 HRC). Но, с другой стороны, известно, что твердость как параметр характеристики абразивного инстру-

мента оказывает большое влияние на его работоспособность и особенно на интенсивность изнашивания.

У пяти исследованных кругов с пониженной концентрацией cBN в рабочем слое твердость по Роквеллу изменялась от 24 до 33 *HRC*, а ее среднее значение в 1,38 раз было меньше твердости эталонного круга с 100 %-ной концентрацией. Поэтому вполне ожидаемо, что на результаты шлифования будет оказывать влияние не только объемное содержание cBN в инструменте, но и его твердость. Такая возможность косвенно подтверждается наличием большего рассеяния полученных результатов, представленных на рис. 1–4, для кругов с объемным содержанием cBN 12,5 и 18,75 % (концентрация 50 и 75 % соответственно) и с переменной твердостью рабочего слоя (см. таблицу).

Влияние твердости рабочего слоя круга на исследованные характеристики его работоспособности подтверждается также и результатами корреляционного анализа.

При шлифовании, например, с глубиной 0,002 мм значения коэффициента парной корреляции  $Q_w$  и  $Q_s$  с твердостью  $-0,611$  и  $-0,809$  соответственно были больше, чем с объемным содержанием  $V_z$  ( $-0,482$  и  $-0,256$ ). Корреляционная связь удельного расхода cBN и шероховатости обработанной поверхности, напротив, более значима для  $V_z$ . Но, с другой стороны, из анализа разработанных регрессионных моделей следует, что содержание cBN в круге и его твердость противоположно влияют на принятые в данной работе характеристики работоспособности инструмента.

Следует отметить, что испытанный инструмент имел, по сути, случайную комбинацию значений твердости по Роквеллу и содержания cBN в его рабочем слое. Когда для чистоты эксперимента был выполнен пересчет значений  $Q_w$ ,  $Q_s$ ,  $q$  и  $Ra$  для объемного содержания cBN в исследованном диапазоне от 12,5 до 25 % в рабочем слое инструмента с его постоянной твердостью 32 *HRC*, то оказалось, что характер всех ранее установленных зависимостей, представленных на рис. 1–4, практически не изменился.

Существенно изменились только результаты расчета для круга с 100 %-ной концентрацией cBN, у которого твердость условно уменьшили с 44 *HRC* почти на 40 %. По расчету получилось, что до 70 % увеличивается скорость изнашивания круга и удельный расход кубического нитрида бора, до 30 % возрастает величина  $Ra$  и только на 1 % уменьшается скорость съема материала.

Таким образом, с учетом проведенной корректировки результатов эксперимента установлено, что работоспособность шлифовальных кругов с пониженной концентрацией cBN будет заметно выше, чем кругов с концентрацией cBN в 100 %, при условии близких значений их твердости.

Опыт правки кругов с пониженной концентрацией cBN алмазным правящим роликом свидетельствует, что время их профилирования на сложный профиль сокращается (например, с размерами 100×20×51 в 2 раза) в сравнении с шлифовальными кругами со 100 %-ной концентрацией cBN. Уменьшение времени правки достигается за счет возможности двукратного увеличения ее глубины с 5 до 10 мкм.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что круги на керамических связках с пониженной концентрацией кубического нитрида бора высокой прочности с зернистостью B151 (160/125) в условиях внутреннего чистового шлифования деталей из закаленной стали ХВГ могут обеспечить более высокие результаты по скорости съема материала и удельному расходу cBN по сравнению с его концентрацией в 100 %.

При шлифовании с глубиной 0,002 и 0,005 мм круги с содержанием cBN от 12,5 до 18,75 % объема рабочего слоя инструмента обеспечили скорость съема материала до 22 % больше, а удельный расход кубического нитрида бора высокой прочности до 2,5 раз меньше, чем эталонный круг 100 %-ной концентрации.

В свою очередь, эталонный круг показал лучшие результаты по скорости изнашивания рабочего слоя и по шероховатости шлифованной поверхности. Скорость изнашивания эталонного круга была до 44 %, а шероховатость по параметру  $Ra$  в 2–3 раза меньше, чем при шлифовании кругами с пониженной концентрацией cBN.

Применение кругов с пониженной концентрацией cBN имеет еще одно важное преимущество – время их правки на сложный профиль уменьшается до двух раз.

*Розроблено та випробувано шліфувальні круги з кубічного нітриду бору на керамічних зв'язках, в яких вміст зерна змінювався від 25 до 12,5 % обсягу робочого шару інструменту (концентрація 50 і 100 % відповідно). Встановлено, що при внутрішньому шліфуванні втулки з загартованої сталі круги зі зниженою концентрацією кубічного нітриду бору забезпечують більшу високу продуктивність обробки і питому витрату абразиву до 2,5 разів меншу, ніж інструмент 100 %-ної концентрації.*

**Ключові слова:** шліфувальні круги з cBN, внутрішнє шліфування, концентрація кубічного нітриду бору.

*Developed and tested grinding wheels from cubic boron nitride with ceramic ligaments in which the content of grain varied from 25 to 12,5 % of volume of the worker-layer tool. It is established that for internal grinding bushes made of hardened steel wheels with low concentration of boron nitride ensures higher productivity and specific consumption of abrasive up to 2,5 times less than the tool with 100 % concentration.*

**Keywords:** cBN grinding wheels, internal grinding, the concentration of boron nitride.

1. Силин С. С., Хрульков В. А., Лобанов А. В. и др. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
2. Starkov V. K. Deep grinding with continuous tool correction // Russ. Engineering Res. – 2010. – 30, N 12. – P. 1218–1221.
3. Старков В. К., Рябцев С. А., Горин Н. А. Повышение эффективности процессов глубинного шлифования / Под ред. В. К. Старкова. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ “Станкин”, 2012. – 118 с.
4. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
5. Старков В. К., Рябцев С. А., Костров С. В. и др. Высокоструктурные шлифовальные круги и их эффективное применение / Под ред. В. К. Старкова – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ “Станкин”, 2013. – 213 с.
6. Starkov V. K. Highly porous cubic boron nitride wheels for dry grinding // J. Superhard Materials. – 2013. – 35, N 5. – P. 298–302.
7. Старков В. К. Высокопористый абразивный инструмент нового поколения // Вестник машиностроения. – 2002. – № 4. – С. 56–62.
8. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Зубкова М. Я. и др. Эльборовое шлифование быстрорежущих сталей. – Харьков: Вища школа, 1974. – 136 с.
9. Grigoriev, S. N., Teleshevskii V. I. Measurement problems in technological shaping processes // Measurement Techniques. – 2011. – 54, N 7. – P. 744–749.
10. Инструменты из сверхтвердых материалов // Под ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ НАНУ, 2002. – 528 с.
11. Венцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
12. Starkov V. K., Sergushev G. N. Generalized statistical models of cutting tool life // Russ. Engineering J. – 1979. – 59, N 6. – P. 42–44.

Московский государственный  
технологический ун-т “СТАНКИН”

Поступила 24.02.14