

Исследование процессов обработки

УДК 621.922.02

D. Hessel, A. Karyazin* (г. Целле, Германия)

В. К. Старков, С. А. Рябцев, Н. А. Горин** (г. Москва, РФ)

**alexey.karyazin@drkaiser.de*

***v.starkov@stankin.ru*

Ротационная схема высокоэффективной правки шлифовальных кругов из кубического нитрида бора

Исследована кинематика ротационной схемы правки шлифовальных кругов вращающимся алмазным кругом чашечной формы. На примерах шлифования высокопористыми кругами из кубического нитрида бора на керамических связках деталей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов и высоколегированных сталей показаны преимущества такой правки в сравнении с правкой обтачиванием алмазными карандашами.

Ключевые слова: ротационная правка, шлифовальный круг из кубического нитрида бора, алмазный круг чашечной формы, стойкость круга, время правки.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением эффективного применения инструмента из кубического нитрида бора является шлифование деталей из титановых и никелевых сплавов [1–3].

Благоприятные с точки зрения физики резания морфометрические характеристики зерен кубического нитрида бора (сBN) и их умеренное химическое сродство к никелю и титану создают предпосылки для снижения уровня термодинамической напряженности при шлифовании сплавов на их основе. К преимуществам использования сBN следует также отнести и возможность срезания твердых дисперсных включений в жаропрочных никелевых сплавах без их вырывания из никелевой матрицы, что гарантирует формирование качественной шлифованной поверхности детали [4–7].

Использование кругов из сBN на керамических связках при шлифовании деталей из сплавов на основе никеля и титана вместо инструмента на основе электрокорунда и карбида кремния подтверждает их очевидные преимущества. Однако фактором, сдерживающим эффективное применение шлифовальных кругов из сBN, остается низкопроизводительная и неэкономичная их правка [3].

© D. HESSEL, A. KARYAZIN, В. К. СТАРКОВ, С. А. РЯБЦЕВ, Н. А. ГОРИН, 2015

Применение высокопористого инструмента из cBN на операциях внутреннего и круглого наружного шлифования деталей из никелевых сплавов марок ХН62БМКТЮ-ВД и ХН73МБТЮ-ВД, титанового сплава ВТ20Л и сталей марок 14Х17НЛ и 95Х18 позволило существенно (до 4 раз) снизить машинное время обработки и повысить до 3 раз период стойкости инструмента.

Детали шлифовали на координатно-шлифовальных станках мод. S40 и S50 фирмы “Hauser”, в которых правка круга осуществляется алмазным карандашом, известная как низкопроизводительный процесс с относительно невысокой точностью профилирования [8]. Но в случае правки кругов из cBN, когда их минимально возможная скорость вращения составляет не менее 2,6–16,5 м/с для диаметров применяемого инструмента от 10 до 63 мм, использование алмазных правочных карандашей оказалось крайне неэффективным. Ресурс эксплуатации одного карандаша составлял не более одной рабочей смены для каждого из трех станков, оснащенных cBN-кругами, при низком качестве правки как по точности формы, так по режущей способности.

Для повышения эффективности правки шлифовальных кругов прямого профиля из кубического нитрида бора на керамических связках предложено заменить правку алмазными карандашами на правку вращающимся алмазным кругом чашечной формы.

В работе приведены результаты совместных исследований МГТУ “СТАНКИН” (г. Москва) и “Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG” (ФРГ, г. Целле) по выбору рациональных условий правки шлифовальных кругов и практическому применению правки вращающимся алмазным кругом чашечной формы.

ВЫБОР ДИАМЕТРА И ШИРИНЫ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА ЧАШЕЧНОЙ ФОРМЫ

Предложена схема (рис. 1) правки шлифовального круга диаметром d_w и высотой h алмазным кругом чашечной формы диаметром d_s и шириной рабочей поверхности алмазносного слоя w . Особенностью данной схемы является ортогональность осей вращения шлифовального и алмазного кругов со скоростями соответственно v_w и v_s .

Правку круга осуществляли с помощью автономной шпиндельной системы, которую устанавливали на рабочем столе станка. Продольное перемещение v_t шлифовального круга относительно алмазного и подачу правки t_p обеспечивали рабочими движениями шпинделя координатно-шлифовального станка.

Данная схема правки (см. рис. 1) идентична схеме ротационного резания (точения), поэтому ее условно можно назвать “ротационной”.

Определение рациональных технологических условий правки включает выбор основных размеров правящего алмазного круга d_s и w , вид и зернистость алмазов, параметры режима правки.

Фирмой “Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG” разработаны шпиндели для правящих кругов со следующими техническими характеристиками: диаметр шпинделя – 33–100 мм, диаметр алмазного круга (ролика) – 20–200 мм, частота вращения – 1500–60 000 мин⁻¹, мощность – 0,08–1,3 кВт. Выбор модели шпинделя должен быть привязан к конкретным условиям правки, типоразмерам и характеристикам шлифовальных кругов.

Для шлифования деталей из сплавов на основе никеля и титана были разработаны и изготовлены круги типоразмеров 1А1 и А8 диаметром 10–63 мм и высотой 6–32 мм с использованием cBN высокой прочности ЛКВ50 торговой

марки “Эльбор” зернистостью по ISO 6106:2005 от B213 (200/160) до B64 (63/50), концентрация cBN в кругах была 50 %. Степень твердости рабочего слоя кругов на керамической связке K27 толщиной от 3 до 5 мм изменялась от М до Р.

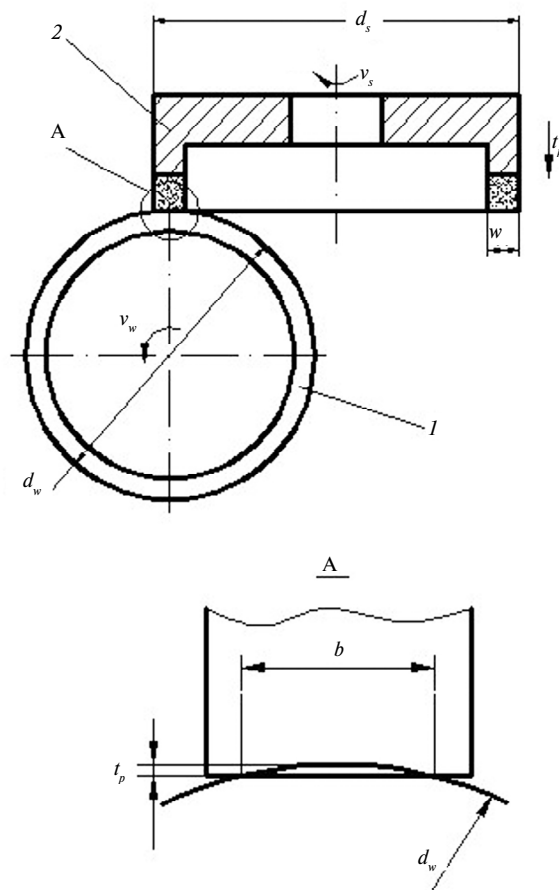


Рис. 1. Кинематическая схема правки шлифовального круга вращающимся алмазным кругом чашечной формы: 1 – шлифовальный круг; 2 – алмазный круг чашечной формы.

При правке шлифовальных кругов с зернистостью от B213 до B64 фирмой “Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG” рекомендовано использовать правящий круг чашечной формы из натуральных алмазов зернистостью D301 (315/250), размер которых по ISO 6106:2005 находится в диапазоне 250–300 мкм. Для крупных алмазов характерны более высокие показатели прочности. В частности, прочность алмазов зернистостью D301 более чем в 70 раз превышает прочность шлифпорошков кубического нитрида бора повышенной прочности [1].

Для указанного диапазона технологических условий шлифования необходимо было определить геометрические параметры правящего алмазного круга. Эту задачу решали на примере правки высокогабаритного шлифовального круга типоразмера 1A1 63×32×16.

При внедрении плоской рабочей поверхности алмазного круга чашечной формы в цилиндрическую поверхность шлифовального круга диаметром d_w на глубину правки t_p (см. рис. 1) формируется площадка контакта шириной b .

Ее величина определяется как ширина хорды окружности d_w с высотой сегмента t_p :

$$b = 2\sqrt{\frac{d_w^2}{4} - \left(\frac{d_w}{2} - t_p\right)^2}. \quad (1)$$

На рис. 2 показано изменение ширины контакта b в зависимости от глубины правки t_p , рассчитанных по формуле (1) для шлифовальных кругов диаметром 10, 16, 32, 40 и 63 мм. Ширина контакта b в исследованном диапазоне возрастает от минимального значения 0,28 мм при $d_w = 10$ мм и $t_p = 0,002$ мм до максимального 2,01 мм при $d_w = 63$ мм и $t_p = 0,016$ мм.

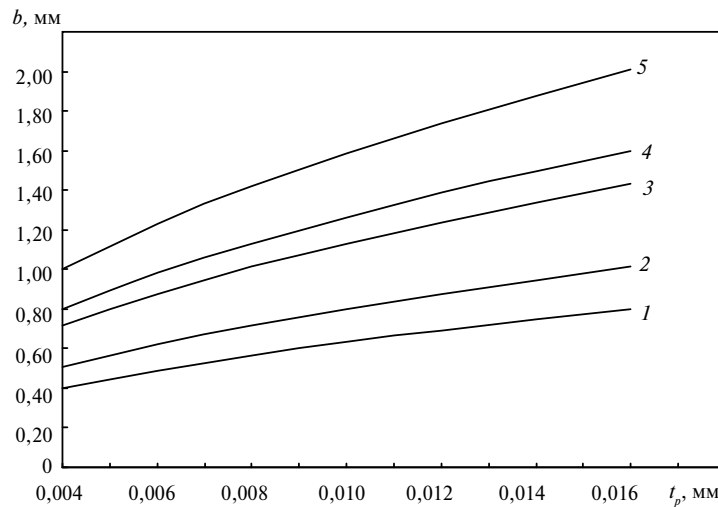


Рис. 2. Расчетное изменение ширины контакта правящего алмазного круга и шлифовального круга в зависимости от глубины правки; диаметр шлифовальных кругов: 10 (1), 16 (2), 32 (3), 40 (4) и 63 (5) мм.

Функциональная зависимость $b(d_w, t_p)$, представленная на рис. 2, позволяет определить ширину w правящего алмазного круга чашечной формы при известных параметрах правки d_w и t_p в широком диапазоне их возможного изменения по условию

$$w \geq b. \quad (2)$$

Для правки cBN-кругов с заданными характеристиками (при $d_w = 10$ –63 мм, $t_p = 0,001$ –0,010 мм и ширине правящей поверхности алмазного круга близкой к оптимальной) выбрана среднестатистическая величина $w = 1,6$ мм.

Из аналогичного геометрического построения, на основании которого получено выражение (1), можно также определить необходимый диаметр d_s правящего алмазного круга шириной 1,6 мм для правки кругов высотой t от 6 до 32 мм:

$$d_s = \frac{h^2 + 4w^2}{4w}. \quad (3)$$

Для средневероятной высоты круга $h = 18$ мм в диапазоне 6–32 мм расчетная величина диаметра d_s составляет 52,2 мм. Выбираем ближайший стандартный размер – 63 мм.

Особенностью кинематики ротационной правки является взаимодействие двух главных рабочих движений шлифовального круга и правящего алмазного круга, векторы скоростей вращения которых ортогональны. Это позволяет рассматривать правку как физический процесс неупругого удара алмазных правящих зерен по зернам cBN шлифовального круга с кинетической энергией удара, пропорциональной v_s^2 . При этом вращение самого шлифовального круга обеспечивает постоянное обновление контактной зоны правки вводом новых зерен cBN, подлежащих восстановлению, влияя на энергию удара и частоту соударений зерен.

Принципиальным достоинством ротационной схемы правки в этой связи является возможность выбора скорости правящего алмазного круга независимо от скорости вращения шлифовального круга. На практике эффективность ее использования при постоянном значении v_s не обуславливается необходимостью изменения скорости шлифовального круга.

Скорость алмазного круга v_s выбирали для достижения максимально возможной кинетической энергии удара алмазных зерен о зерна кубического нитрида бора и исходя из технических возможностей выбранной модели шпинделя.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальную проверку рекомендаций теоретической модели ротационной правки по выбору ее параметров выполняли в производственных условиях.

В качестве шпинделя правящего алмазного круга была выбрана мод. C58F фирмы “Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG” с системой управления CFU 0401 SSE. Выбранная с учетом предполагаемых условий правки модель шпинделя обеспечивает частоту вращения правящего алмазного круга от 8 000 до 20 000 мин⁻¹ с эффективной мощностью 0,2 кВт.

Для установки правящего устройства на рабочем столе с Т-образными пазами координатно-шлифовального станка мод. S40 фирмы “Hauser” (рис. 3) были спроектированы и изготовлены несложное установочное приспособление для крепления шпинделя, корпус для размещения преобразователя частоты и зажимное приспособление для крепления установки очистки воздуха. Пульт управления процессом правки был закреплен на одной стойке с пультом управления шлифовальным станком.

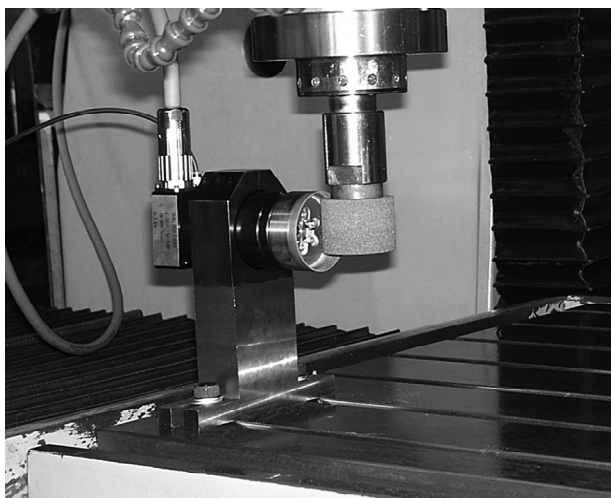


Рис. 3. Установка шпинделя правящего круга на рабочем столе станка.

При управлении процессом ротационной правки частоту вращения шпинделя задают через преобразователь частоты. Другие параметры – частота вращения шлифовального круга, глубина правки и продольная подача – обеспечиваются системой управления станка. Система правки позволяет контролировать затрачиваемую мощность по световому индикатору. Вместе с системой правки фирмой “Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG” по оригинальной технологии был изготовлен правящий алмазный круг с наружным диаметром 63 мм, шириной алмазоносного слоя (на спекаемой металлической связке) равной 1,6 мм и высотой – 8 мм. Зернистость натуральных алмазов – D301 при 150 %-ной концентрации. Характеристика алмазного круга соответствовала рекомендациям, обусловленным кинематикой правки предполагаемой номенклатуры шлифовальных кругов из кубического нитрида бора.

Период стойкости cBN-кругов при шлифовании различных деталей, а также режим правки на заданную глубину подачи t_p , определяли с помощью акустической системы станка.

Скорость правящего алмазного круга во всех случаях была постоянной, равной 25,1 м/с. Продольная скорость перемещения шлифовального круга относительно неподвижного алмазного круга чашечной формы в процессе правки также принята постоянной, равной 1 м/мин. Правку выполняли без охлаждения.

Исследование работоспособности и условий правки выполняли на трех типоразмерах шлифовальных кругов из кубического нитрида бора: 1A1 63×32×20×5, 1A1 32×16×10×5 и A8 16×10×6. В кругах на керамической связке K27 с 50 %-ной концентрацией зерен ЛКВ 50 зернистостью B123 твердость изменялась от К до Р.

Высокопористые круги были изготовлены с учетом технологических принципов, изложенных в [3] и положительного опыта их применения [9–11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 показана экспериментальная зависимость измеренной мощности правки N от глубины правки t_p в диапазоне от 0,002 до 0,01 мм для высоты круга равной 10, 16 и 32 мм. Особенностью приведенных данных (см. рис. 4) является их дискретность, обусловленная дискретностью показаний датчика (10 % от максимальной мощности шпинделя правящего алмазного круга).

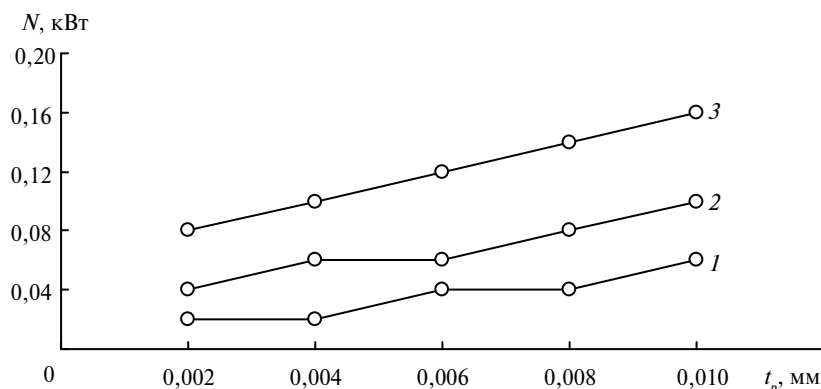


Рис. 4. Мощность правки в зависимости от глубины правки при высоте шлифовального круга $h = 10$ (1), 16 (2), 32 (3) мм.

Во всех случаях ротационной правки шлифовальных кругов из cBN на керамической связке с увеличением подачи t_p возрастает потребление мощности до 2,2 раз.

По результатам оценки мощности глубина правки выбрана равной 0,01 мм на каждый двойной ход перемещения шлифовального круга относительно правящего алмазного круга.

В отличие от схемы правки, показанной на рис. 1, возможна правка не боковой кромкой алмазного круга, а его рабочей поверхностью по вертикальной оси (рис. 5).

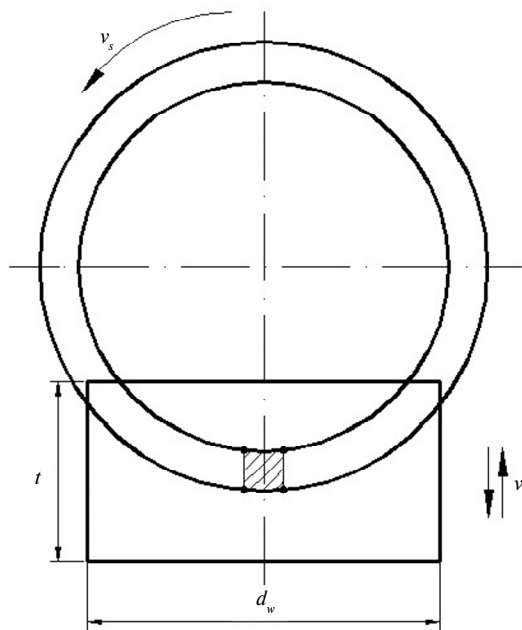


Рис. 5. Кинематическая схема правки шлифовального круга рабочей поверхностью вращающегося алмазного круга чашечной формы по вертикальной оси.

Производительность правки при этом уменьшается до 2 раз за счет увеличения числа реверсивных проходов шлифовального круга относительно правящего алмазного круга с 2 до 4. Мощность правки также уменьшается до значений 0,02–0,04 кВт в исследованном диапазоне изменения глубины правки.

На примере работы шлифовальных кругов трех различных типоразмеров были исследованы условия шлифования для определения периода стойкости кругов и времени их правки алмазным кругом по ротационной схеме обработки. В таблице приведены области применения шлифовальных кругов при внутреннем шлифовании отверстий с охлаждением, период стойкости круга на принятом режиме обработки и время ротационной правки.

Стойкость круга для конкретной операции, безусловно, зависит от обрабатываемости материала и режима шлифования, причем зависимость от обрабатываемости больше, чем от принятого режима шлифования. Поэтому из-за плохой шлифуемости жаропрочных никелевых и титановых сплавов при их обработке стойкость даже высокопористого инструмента в 1,5–1,75 раз меньше, чем при обработке легированной стали.

Полученные результаты шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов показали, что применение высокопористых кругов из кубическо-

го нитрида бора позволяет до 4 раз повысить их период стойкости по сравнению с инструментом на основе электрокорунда белого и карбида кремния зеленого.

Период стойкости и время ротационной правки высокопористых шлифовальных кругов из cBN

Обрабатываемая деталь, материал	Типоразмер и характеристика круга	Режим шлифования	Стойкость круга, мин	Время правки, мин
Диск турбины, никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД	1A1 63×32×20×5 ЛКВ50 В213 100 P V	$v_s = 35$ м/с $v_w = 5,6$ м/с $h = 0,008$ мм	24±3	0,15
Переходник, титановый сплав BT20Л	1A1 32×16×10×5 ЛКВ50 В213 100 L V	$v_s = 43,2$ м/с $v_w = 0,03$ м/с $ht = 0,02$ мм	28±3	0,08
Корпус, сталь 95X18	A8 16×10×6 ЛКВ50 В213 100 K V	$v_s = 22,5$ м/с $v_w = 0,01$ м/с $h = 0,01$ мм	42±4	0,05

При использовании ротационной правки алмазным кругом время восстановления режущей способности кругов составляет в среднем 0,28–0,3 с на 1 мм их высоты, что в 10 раз меньше, чем при обтачивании алмазным карандашом. При этом ротационная правка способствует достижению более высокого качества рабочей поверхности абразивного инструмента (рис. 6).

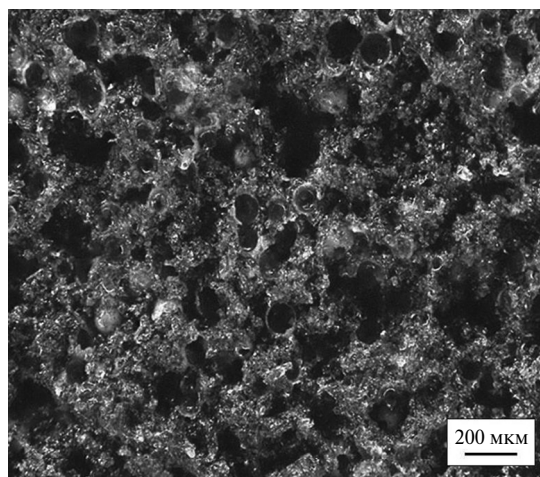


Рис. 6. Рабочая поверхность высокопористого шлифовального круга из кубического нитрида бора после ротационной правки.

Положительным моментом ротационной правки является ее использование на принятой рабочей скорости шлифовального круга. Условия восстановления режущего рельефа рабочей поверхности кругов из кубического нитрида бора более благоприятны с точки зрения физики хрупкого разрушения. При обтачивании алмазным карандашом разрушение зерен происходит в результате механического давления с усилием 20–100 Н при интенсивном его

шлифовании зернами cBN [8]. В процессе ротационной правки микроскальвание зерен cBN является результатом их усталостного разрушения при соударении с алмазными зернами правящего круга. Расчетами установлено, что для исследованных условий правки с учетом характеристик инструмента (прежде всего, размеров и концентрации зерен алмазов и cBN) и режимов, усилие разрушения составляет 0,8–1,6 Н при частоте соударений зерен $(1,0–1,9) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Эффективность ротационной правки шлифовальных кругов из cBN обусловлена также существенным снижением затрат на правящий инструмент: за год активной эксплуатации алмазного круга чашечной формы высота его рабочего слоя уменьшилась только на 20 % исходного размера.

ВЫВОДЫ

Ротационная схема правки алмазным кругом чашечной формы шлифовальных кругов из cBN на керамической связке, принципиальной особенностью которой является ортогональность их векторов скоростей, позволяет обеспечивать эффективную правку при постоянной скорости правящего алмазного круга и инвариантной по отношению к ней скорости шлифовального круга.

Предложена методика выбора диаметра и ширины рабочей поверхности правящего алмазного круга в зависимости от номенклатуры различных по типоразмерам шлифовальных кругов, подлежащих правке.

По сравнению с правкой обтачиванием алмазным карандашом время восстановления режущей способности высокопористых кругов из cBN на керамических связках при ротационной правке сокращается до 10 раз при высоком качестве рабочей поверхности. Эффективность ротационной правки обусловлена благоприятными условиями микроскальвания зерен cBN в результате усталостного их разрушения при соударении с алмазными зернами правящего круга чашечной формы с частотой порядка 10^5 с^{-1} при нагрузке 0,8–1,6 Н.

Досліджено кінематику ротаційної схеми правки шліфувальних кругів алмазним кругом чашечної форми, що обертається. На прикладах шліфування високопористими кругами з кубічного нітриду бору на керамічних зв'язках деталей з жароміцних нікелевих і титанових сплавів і високолегованих сталей показано її переваги порівняно з правкою обточуванням алмазними олівцями.

Ключові слова: ротаційна правка, шліфувальний круг з кубічного нітриду бору, алмазний круг чашечної форми, стійкість круга, час правки.

Studied rotational kinematics scheme dressing of grinding wheels by rotating diamond cup. Examples of highly porous grinding wheels of cubic boron nitride ceramic ligaments parts of heat-resistant nickel alloys and titanium alloys and alloyed steels shown its advantages in comparison to edit the turning of diamond pencils.

Keywords: rotational dressing, grinding wheel cBN, diamond cup ruling, resistance range, while editing.

1. *Инструменты из сверхтвердых материалов* / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2002. – 528 с.
2. *Зубарев Ю. М., Приемышев А. В.* Эффективность применения при шлифовании кругов из кубического нитрида бора // *Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр.* – Харків: НТУ “ХПІ”, 2006. – Т. 1. – С. 93–98.
3. *Starkov V. K.* Grinding of high-porous wheels. – М.: Mashinostroenie, 2007. – 688 p.
4. *Носенко В. А.* Шлифование адгезионно-активных материалов. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.

5. *Starkov V. K.* Physics and optimization of cutting materials. – М.: Mashinostroenie, 2009. – 640 p.
6. *Яцерицын П. Н., Зайцев А. Г.* Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. – Минск: Наука и техника, 1972. – 482 с.
7. *Кремень З. И., Юрьев В. Г.* Шлифование суперабразивами высокопластичных сплавов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 167 с.
8. *Киселев Е. С.* Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ. – Ульяновск: УЛГТУ, 2001. – 170 с.
9. *Starkov V. K.* Highly porous cubic boron nitride wheels for dry grinding // *J. Superhard Materials*. – 2013. – **35**, N 5. – P. 298–302.
10. *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 // *Ibid.* – 2014. – **36**, N 1. – P. 43–48.
11. *Grigoriev S. N., Starkov V. K., Gorin N. A. et al.* Creep-feed grinding: an overview of kinematics, parameters and effects on process efficiency // *Strojniški vestnik – J. Mech. Eng.* – 2014. – **60**, N 4. – P. 213–220.

Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co.KG

Поступила 08.04.14

Московский государственный технологический ун-т “СТАНКИН”