

УДК 621.922.025

В. К. Старков*, **С. А. Рябцев**, **Е. Г. Полканов****,

О. С. Кискин (г. Москва, Россия)

*v.starkov@stankin.ru

**tools@salut.ru

Сравнительный анализ работоспособности инструмента из кубического нитрида бора и микрокристаллического корунда при профильном шлифовании фасонного режущего инструмента

В производственных условиях при профильном шлифовании фасонной длинномерной протяжки из закаленной быстрорежущей стали выполнен сравнительный анализ работоспособности шлифовальных кругов на основе кубического нитрида бора, микрокристаллического корунда и электрокорунда белого. В специфических условиях обработки с ударной нагрузкой и необходимостью частой правки инструмента для точного профилирования круг на керамической связке из кубического нитрида бора показал существенно более высокие результаты по производительности процесса, минимальным затратам времени на циклическую правку и в целом по снижению трудоемкости формообразования рабочего профиля протяжки.

Ключевые слова: кубический нитрид бора, микрокристаллический корунд, электрокорунд белый, работоспособность инструмента, профильное шлифование, фасонная протяжка.

АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В современном машиностроительном производстве встречаются детали, шлифование которых традиционным абразивным инструментом из электрокорунда или карбида кремния на керамической связке вызывает трудности, связанные с низкой производительностью и неудовлетворительным качеством обработанной поверхности. Решение этих проблем возможно за счет применения шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов и, в частности из кубического нитрида бора (КНБ). Однако высокая стоимость и низкая правящая способность кругов из КНБ в ряде случаев становятся препятствием для их широкого внедрения. По этой причине ведется разработка новых высокоэффективных абразивных материалов, у которых отсутствовали бы указанные недостатки.

В последнее время в качестве такого материала рекомендуется модификация корунда, спеченного по специальной золь-гелевой технологии, – микрокристаллический корунд под различными торговыми марками (синтеркорунд, SG, Azures и др.).

Принципиальной особенностью микрокристаллического корунда является зерно в виде спеченного конгломерата мелких кристаллитов с размерами не более 1 мкм, что позволяет зерну работать в режиме самозатачивания путем

обновления новых острых режущих кромок. Микрокристаллическое строение зерна SG обеспечивает ему до трех раз большую прочность по сравнению с зерном электрокорунда белого.

Отмеченные положительные свойства позволяют эффективно использовать инструмент, изготовленный на основе микрокристаллического корунда на операциях шлифования, например фасонных поверхностей деталей из высокотвердых легированных сталей и др. [1–5].

Лабораторными исследованиями было установлено, что, например, при плоском шлифовании образцов из закаленной стали 100Cr6 с твердостью 60 HRC на одном и том же режиме обработки круги на основе микрокристаллического корунда SG показали режущую способность, близкую к инструменту на основе КНБ. Все испытанные круги на керамических связках одного типоразмера имели практически одинаковые зернистость, твердость и относительное содержание абразива в объеме инструмента [1].

Было выявлено, в частности, что при шлифовании кругом из микрокристаллического корунда SG составляющие силы резания P_z и P_y были на 25 % больше, чем при обработке кругом из КНБ, но в 2,0–2,4 раза меньше, чем в аналогичных условиях показал инструмент из электрокорунда белого. Размерный износ кругов из SG и КНБ после удаления 3 см³ металла с поверхности стального образца оказался одинаковым и в 3 раза меньше, чем инструмента из электрокорунда (табл. 1).

Таблица 1. Результаты шлифования закаленной стали инструментом на основе эльбора повышенной прочности ЛКВ, микрокристаллического корунда марки SG и электрокорунда белого марки 25A

Характеристика круга	Составляющие силы резания, Н		Размерный износ круга, мкм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	
	P_z	P_y		R_a	R_z
ЛКВ 160/125 I 150 V	9	48	2	0,31	2,31
SG F80 I 12 V	11,4	60	2	0,4	3,28
25A F80 I 12 V	23,1	144	6	0,55	3,79

Полученные обнадеживающие результаты лабораторных испытаний шлифовальных кругов из микрокристаллического корунда, однако, не дают оснований признать их эффективной альтернативой инструменту на основе КНБ. Такой вывод можно сделать только на основании производственной практики его применения, в процессе которой проявляются все сопутствующие технологические аспекты: условия правки, интенсивность и экономичность обработки, ее качество и др.

Указанные технологические аспекты по сути своей определяют работоспособность инструмента. В настоящее время считается, что шлифовальные круги на основе кубического нитрида бора по своей работоспособности являются наиболее эффективными и универсальными для самых разнообразных операций обработки в машиностроении [6–8].

В данной работе в производственных условиях исследована работоспособность шлифовальных кругов из кубического нитрида бора, микрокристаллического корунда и традиционного абразива – электрокорунда белого – на примере обработки фасонного режущего инструмента.

Основной целью работы было выявление возможных конкурентных преимуществ инструмента из микрокристаллического корунда в сравнении с его аналогами на основе КНБ и электрокорунда белого при профильном шлифовании фасонного режущего инструмента.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Сравнительный анализ работоспособности шлифовальных кругов на основе КНБ, микрокристаллического корунда SG, а также из электрокорунда белого был выполнен на примере профильного шлифования протяжки с длиной рабочей части 700 мм из высоколегированной быстрорежущей стали марки P12Ф2К5М3-МП, закаленной на твердость 66–68 HRC (рис. 1). Рабочая часть протяжки в виде елочного профиля предназначена для протягивания замков в дисках турбины для крепления лопаток.

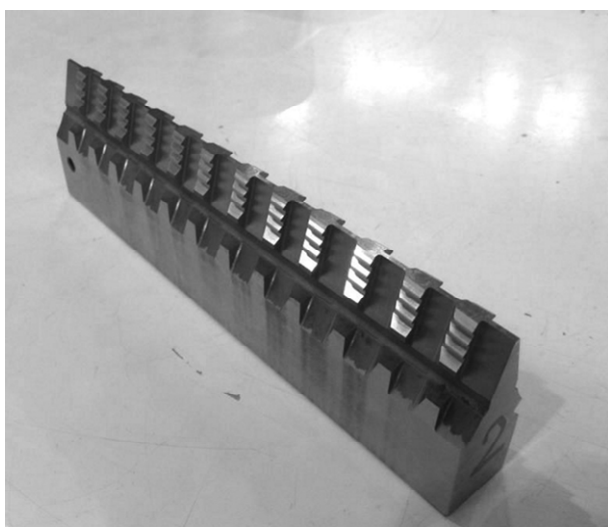


Рис. 1. Фасонная протяжка для обработки пазов в дисках турбины.

Для испытаний были изготовлены шлифовальные круги на керамических связках прямого профиля размером 100×25×51 из высокопрочного эльбора марки ЛКВ зернистостью 160/125, микрокристаллического корунда SG и электрокорунда белого марки 25А зернистостью F80. Все круги имели степень твердости *K*, содержание абразива – 38 % (по объему) (структура № 12 для кругов из SG и 25А и 150 %-ная концентрация для инструмента на основе эльбора ЛКВ).

Изготовленные варианты инструмента с повышенной структурностью являются наиболее эффективной модификацией шлифовальных кругов с точки зрения их производительности и качества обработки [1, 9, 10].

Эффективность инструмента из различных абразивов сравнивали при работе на самой трудоемкой операции изготовления протяжки – профилирование ее рабочей поверхности методом маятникового шлифования с врезанием круга на каждом проходе на постоянную глубину. Глубина врезания зависела от характеристики шлифовального круга, а скорость продольной подачи рабочего стола для всех инструментов была постоянной.

Инструмент на данной операции эксплуатируется в условиях циклической ударной нагрузки при врезании в каждый из 12 обрабатываемых зубьев протяжки. Неблагоприятные условия шлифования в этой связи являются причи-

ной относительно низкой стойкости всех исследованных кругов из-за потери точности формы и размеров профилируемой рабочей поверхности шлифуемой протяжки.

Заготовки протяжек устанавливали на магнитную плиту стола профилешлифовального станка мод. Profimat 412 фирмы “Blohm” (Германия) и обрабатывали с обильным охлаждением эмульсией “Укринол”, подаваемой в зону обработки под давлением 6,5 бар с расходом до 20 л/мин (рис. 2).

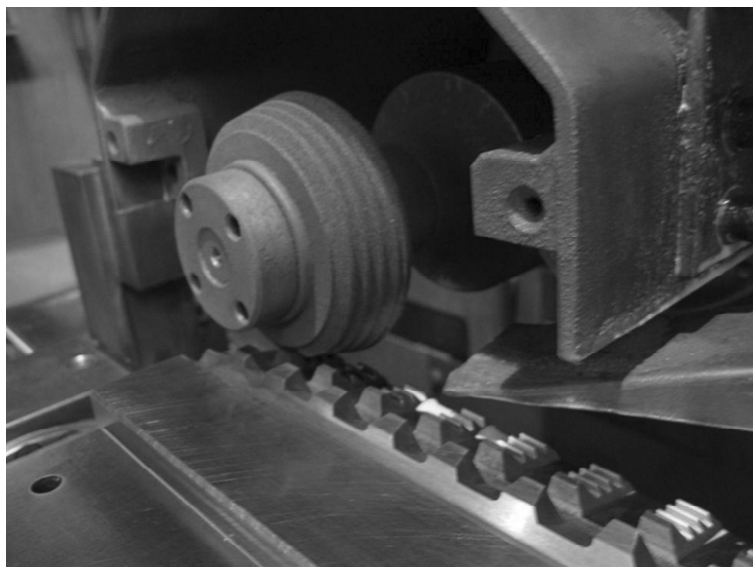


Рис. 2. Профильное шлифование фасонной протяжки.

Для обработки фасонной рабочей поверхности шлифовальные круги профилировали алмазным обтачивающим роликом производства фирмы “Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge” (Германия) с наружным диаметром 150 мм, радиусом при вершине равным 0,16 мм и углом 15° . Режим профилирования выбирали в зависимости от характеристики круга при постоянном значении отношения скорости ролика к скорости круга, равном 0,8, и коэффициенте перекрытия 10. Скорость корундовых кругов при правке, равная 30 м/с, была в 2 раза больше, чем у круга из КНБ.

Шлифованием обрабатывали елочный профиль с глубиной впадины 3,72 мм на длину 700 мм за несколько проходов. Скорость шлифования и скорость продольной подачи детали во всех случаях оставались постоянными и были равны соответственно 30 м/с и 3 м/мин. В процессе шлифования круги правили по мере необходимости через определенное число проходов. Глубина правки была постоянной для всех испытанных кругов и составляла 0,02 мм по диаметру.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ключевым фактором, который определяет работоспособность шлифовального круга как режущего инструмента, является, как известно, уровень принятого режима обработки и, соответственно, производительность процесса. Другой фактор – это время работы инструмента между правками или его стойкость.

На работоспособность шлифовального круга влияет также время предварительного профилирования его рабочей поверхности перед работой и время

принудительного циклического восстановления его режущей способности и точности рабочего профиля в процессе шлифования.

При предварительном профилировании рабочей поверхности шлифовального круга на заданный профиль протяжки специальным алмазным роликом, которое осуществляли непосредственно на станке, наибольшие (59 мин) временные затраты потребовались для круга на основе КНБ, а наименьшие (16 мин) для круга на основе электрокорунда белого (табл. 2).

Таблица 2. Результаты испытаний при шлифовании фасонной протяжки инструментом из различных абразивов

Параметр работоспособности	Шлифовальный круг		
	КНБ	SG	25А
Время профилирования круга алмазным роликом, мин	59	31	16
Удельная производительность шлифования, мм ³ /(мм·мин)	45	15	6
Время циклической правки в процессе шлифования протяжки, мин	7	6	5
Количество проходов круга между правками, шт.	10	2	1
Количество проходов инструмента при шлифовании протяжки, шт.	248	744	1860
Количество промежуточных правок инструмента, шт.	25	372	1860
Время циклической правки, ч	2,92	37,2	155
Время шлифования протяжки, ч	2,12	6,36	15,91
Суммарное время обработки одной протяжки на станке с учетом циклической правки круга, ч	5,04	43,56	170,91
Относительная доля времени шлифования к суммарному времени обработки	0,42	0,15	0,09
Число протяжек, обрабатываемых одним шлифовальным кругом, шт.	6	2	0,8

Время профилирования круга на основе микрокристаллического корунда оказалось почти в 2 раза больше, чем у электрокорундового инструмента, но в 1,9 раз меньше, чем у эльборового круга.

Прорезание рабочего профиля протяжки осуществляется методом плоского шлифования по схеме маятниковой обработки с врезанием инструмента на заданную глубину t , величина которой зависит от продольной скорости перемещения детали v_d и характеристики инструмента.

Удельная производительность Q_w , мм³/(мм·мин) процесса съема материала, отнесенная к 1 мм высоты шлифовального круга определяется как

$$Q_w = v_d t. \quad (1)$$

Для высокопористого круга с характеристикой 25А F80 К 12 V оптимальным сочетанием параметров режима шлифования стала комбинация $v_d = 3$ м/мин и $t = 0,002$ мм/дв. ход, которая обеспечивает производительность $Q_w = 6$ мм³/(мм·мин). Критерием оптимальности данного варианта режима шлифования кругом из электрокорунда белого стала возможность бесприжоговой обработки профиля протяжки за один проход с сохранением его точности по форме и размерам.

Восстановление точности профиля и режущей способности правкой алмазным роликом для электрокорундового круга необходимо после каждого его прохода по всей длине обрабатываемой протяжки.

Предварительными испытаниями было установлено, что исследованные круги двух других характеристик обеспечивают реализацию существенно более высоких режимных параметров как по глубине шлифования t , так и по скорости продольного перемещения детали v_d . Но высоколегированную закаленную сталь P12Ф2К5М3-МП из-за ее повышенной чувствительности к термическим дефектам для увеличения производительности бесприжоговой обработки целесообразнее шлифовать с большей глубиной t , а не с большей скоростью v_d .

Было установлено, что при сохранении постоянным значения $v_d = 3$ м/мин глубина бесприжогового шлифования кругом на основе микрокристаллического корунда может быть увеличена до 0,005 мм/дв.ход, инструментом на основе кубического нитрида бора – до 0,015 мм/дв.ход.

Таким образом, круг на основе КНБ обеспечивает производительность по скорости съема материала в 7,5 и в 2,5 раза больше, чем круги из электрокорунда белого и микрокристаллического корунда соответственно. При этом количество проходов эльборового круга, после которых требуется его правка, возрастает до 10 (см. табл. 2).

Столь существенная разница по глубине шлифования кругами из кубического нитрида бора и микрокристаллического корунда заключается, предположительно, в физических особенностях разрушения твердых абразивов, имеющих различное кристаллическое строение. На поверхности зерен из микрокристаллического корунда, внедряемый в обрабатываемый материал, происходит спонтанный вырыв отдельных мелких кристаллов с формированием непредсказуемого рельефа с множеством режущих кромок. Монокристаллы сверхтвердого кубического нитрида бора хрупко разрушаются по механизму скалывания с сохранением доминантной режущей кромки зерна [1, 8].

Обновление режущей поверхности зерен КНБ по механизму хрупкого скалывания более предпочтительно для внедрения на большую глубину при шлифовании, чем при обработке кругами из микрокристаллического корунда. Зерна электрокорунда белого, разрушаясь также по механизму скалывания, имеют более низкую прочность, чем зерна из кубического нитрида бора марки ЛКВ и микрокристаллического корунда SG, что предопределяет их более интенсивное разрушение и более заметное искажение формы и размеров рабочей поверхности инструмента.

Другие параметры работоспособности исследованных шлифовальных кругов, представленные в табл. 2, вычисляли по формулам.

Количество проходов инструмента при шлифовании протяжки с рабочей длиной $L = 700$ мм равно

$$n_{zi} = \frac{Z}{t_i}, \quad (2)$$

где Z – общая глубина врезания круга ($Z = 3,72$ мм) и t_i – глубина врезания круга на проходе в зависимости от его характеристики.

В исследованном примере профилирования длинномерной протяжки количество проходов варьировалось от 248 (кругом КНБ) до 1860 (кругом из электрокорунда белого).

Число промежуточных правок алмазным роликом различается еще больше – от 25 до 1860 или в 74 раза, что связано с большим периодом стойкости инструмента из КНБ, определяемым по количеству проходов между его правками n_{pi} :

$$K_{pi} = \frac{n_{zi}}{n_{pi}} . \quad (3)$$

Материал абразива и его количество на рабочей поверхности шлифовального круга оказывают влияние на время его профилирования при подготовке к работе и на время его промежуточной правки в процессе шлифования τ_{pi} . В среднем оно равно 5 мин для электрокорундового круга, 6 мин – для круга из микрокристаллического корунда и 7 мин – для инструмента из КНБ.

Тогда суммарное время, затраченное на правку круга в процессе шлифования одной протяжки, равно

$$\tau_{п} = K_{pi} \tau_{pi} . \quad (4)$$

По формуле (4) время правки круга на основе кубического нитрида бора, равное 2,92 ч, почти в 13 и 53 раза меньше, чем возможные затраты на циклическую правку инструмента из микрокристаллического и белого корундов соответственно.

При оценке времени шлифования учитывали длину перебега круга 0,1L протяжки за один его проход, а время прохода складывалось из рабочего и холостого хода инструмента. Отличие в их величинах при шлифовании различными кругами соответствует разнице в глубине врезания на проходе.

Если отнести время шлифования одной протяжки к суммарному времени ее профильной обработки с учетом времени правки, то оказывается, что ее доля при эксплуатации круга из КНБ составляет 42 %, снижаясь до 9 % при шлифовании инструментом из электрокорунда белого и до 15 % при обработке кругом из микрокристаллического корунда.

Относительную долю времени шлифования в общей трудоемкости обработки протяжки можно рассматривать как один из параметров работоспособности инструмента, так как он по существу характеризует коэффициент его полезного действия. По этому параметру безусловное преимущество имеет шлифовальный круг на основе кубического нитрида бора.

Что касается общей трудоемкости профилирования фасонной протяжки из высокопрочной закаленной стали, то производственными испытаниями установлено, что ее величина по суммарному времени шлифования и правки инструмента, отнесенная к обработке одной протяжки кругом из КНБ, в 8,6 и ~ 34 раза меньше, чем трудоемкость профилирования кругом на основе SG и электрокорунда белого соответственно.

Был рассмотрен еще один важный параметр работоспособности исследованных шлифовальных кругов – их потенциал по возможному числу обработанных протяжек до полного износа. На станке мод. Profimat 412 возможна работа шлифовального круга при уменьшении его исходного диаметра 100 мм до минимального 70 мм. За одну промежуточную правку с круга независимо от его характеристики алмазным роликом удаляется рабочий слой толщиной 0,01 мм (0,02 мм по диаметру) и его потенциал соответственно составляет 1500 возможных правок.

По количеству протяжек, которые можно отпрофилировать одним кругом КНБ, он в 3 раза превосходит технологические возможности инструмента из микрокристаллического корунда.

При одной установке шлифовального круга КНБ время обработки шести протяжек пропорционально времени обработки одной протяжки. Для обработки такого же количества протяжек кругом SG необходима установка, наладка и предварительное профилирование на станке еще двух кругов, на что потребуется дополнительно еще 4 ч (для кругов из электрокорунда белого – 6,5 ч).

ВЫВОДЫ

Анализом работоспособности в производственных условиях шлифовальных кругов на основе эльбора повышенной прочности марки ЛКВ, микрокристаллического корунда SG и электрокорунда белого марки 25А одного типоразмера и одинаковой характеристики на керамических связках при профилировании фасонной протяжки с длиной рабочей части 700 мм из быстрорежущей стали P12Ф2К5М3-МП, закаленной до 66–68 HRC, плоским маятниковым шлифованием с врезанием на каждом двойном ходе инструмента установлено:

- возможная глубина врезания на каждом проходе при бесприжоговом шлифовании кругом на основе кубического нитрида бора в 2,5 и 7,5 раз больше, чем при обработке кругами на основе микрокристаллического корунда SG и электрокорунда белого, количество промежуточных правок за период обработки одной протяжки соответственно в 5 и 10 раз меньше;

- коэффициент полезного действия инструмента из эльбора повышенной прочности по относительной доле времени шлифования в общей трудоемкости профилирования протяжки составляет 42 %, существенно превышая аналогичные показатели для кругов микрокристаллического корунда SG (14 %) и электрокорунда белого (9 %);

- трудоемкость профилирования протяжки шлифовальным кругом на основе кубического нитрида бора в 8,6 раз меньше, чем кругом на основе микрокристаллического корунда SG, и почти в 34 раза меньше, чем инструментом из электрокорунда белого.

Шлифовальный круг на основе кубического нитрида бора существенно превосходит по своей работоспособности аналоги на основе микрокристаллического корунда и электрокорунда белого при профилировании фасонной протяжки из закаленной быстрорежущей стали в специфических условиях частой правки инструмента.

У виробничих умовах при профільному шліфуванні фасонної довгомірної протяжки з загартованої швидкорізальної сталі виконано порівняльний аналіз працездатності шліфувальних кругів на основі кубічного нітриду бору, мікрокристалічного корунду і електрокорунду білого. У специфічних умовах обробки з ударним навантаженням і необхідністю частой правки інструменту для точного профілювання круг на керамічній зв'язці з кубічного нітриду бору показав істотно вищі результати по продуктивності процесу, мінімальним витратами часу на циклічну правку і в цілому щодо зниження трудомісткості формоутворення робочого профілю протяжки.

Ключові слова: кубічний нітрид бору, мікрокристалічний корунд, електрокорунд білий, працездатність інструменту, профільне шліфування, фасонна протяжка.

A comparative analysis of performance of cubic boron nitride, microcrystalline alumina, and white fused alumina wheels has been carried out in profile grinding of long-length HSS profile broach under production conditions. In a particular case, where grinding is

accompanied by impact loading and the wheel has to be frequently dressed to provide precise profiling, the vitrified cubic boron nitride wheel has demonstrated an essentially better performance in terms of removal rate, minimum time for dressing cycles, and overall labor input in shaping a working profile of the broach.

Keywords: *cubic boron nitride, microcrystalline alumina, white fused alumina, tool performance, profile grinding, profile broach.*

1. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
2. Herman D., Markul J. Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina // Int. J. Machine Tools. Manufacture. – 2004. – **44**. – P. 511–522.
3. Herman D., Plichta J., Karpinski T. Effect of glass-crystalline and amorphous binder application to abrasive tools made of microcrystalline alumina grains type SG // Wear. – 1997. – **209**. – P. 213–218.
4. Zhang H. X., Chen W. Y., Huang L. X. Grinding characteristics and mechanism of ceramic wheels on aeronautical alloys // Mater. Sci. Forum. – 2012. – **723**. – P. 433–438.
5. Minke E. Auswirkung der Additivierung eines Schleiföls auf Prozess – und Ergebnis größen beim Schleifen von Schnellarbeitsstahl // Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen, 61. Ausgabe. – Essen: Vulkan-Verlag, 2004. – S. 49–64.
6. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2002. – 528 с.
7. Старков В. К. Высокопористые круги из кубического нитрида бора для шлифования без охлаждения // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 56–62.
8. 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.
9. Poklad V. A., Abysov I. A., Starkov V. K., Ryabtsev S. A. Surface layer properties of turbine blade tailpiece in deep grinding by porous wheels // Rus. Eng. Res. – 2010. – **30**, N 11. – P. 1132–1136.
10. Starkov V. K. Deep grinding with continuous tool correction // Ibid. – 2010. – **30**, N 12. – P. 1218–1221.

Московский государственный
технологический ун-т “СТАНКИН”
Научно-производственный центр
газотурбостроения “САЛЮТ”

Поступила 16.07.13