

УДК 666.1.053.5:621.921.34

М. И. ШКАРУПА, канд. техн. наук

АО "Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента
"ВНИИАЛМАЗ", г. Москва

В. А. РОГОВ, д-р техн. наук

Российский университет дружбы народов, г. Москва

E-mail: vniialmaz@list.ru

Анализ конструктивных решений для алмазно-абразивных кругов применяющихся при глубинно-скоростном шлифовании изделий из конструкционной керамики

Проведен сравнительный анализ различных алмазно-абразивных кругов для механической обработки керамических изделий. Предложены оригинальные конструкции и связки кругов для высокоскоростного и глубинного плоского и кругло шлифования кварцевой керамики, стеклокерамики и нитридной керамики.

Comparative analysis of various diamond grinding wheels for machining of ceramics. Ingenious designs and bundles of circles for high speed and deep flat and round grinding of quartz ceramics, glass ceramics and silicon nitride ceramics.

Ключевые слова: шлифование, сегментный алмазный круг, абразивно-алмазная высокоскоростная обработка керамики, связка круга, зернистость

Key words: grinding, segment diamond grinding wheel, abrasive diamond high speed machining of ceramics, the bond of the wheel, the grit

В настоящее время необходимость в создании инновационных абразивных инструментов является основным условием для увеличения эффективности процесса механической обработки изделий из конструкционной и функциональной керамики. В основном, для механической обработки сверхтвердых неметаллических материалов (твердость по Моосу более 8 единиц, твердость по Виккерсу более 800 Н/мм²), в том числе керамических, применяются алмазные шлифовальные круги [1].

Наиболее рациональными направлениями создания алмазно-абразивных инструментов с оптимальными свойствами являются: во-первых, установление диапазона их физических и механических свойств для обработки конкрет-

ного керамического материала, и, во-вторых, подбор по рассчитанным параметрам композиции компонентов связки с учетом технических условий изготовления инструмента.

Шлифовальные алмазные круги относятся к сборочным изделиям, т.к. состоят из нескольких элементов: корпуса, рабочих сегментов или алмазоносного напрессованного слоя. В соответствии с действующим ГОСТ 14.201—83 "Обеспечение технологичности конструкции изделий" необходимо учитывать показатели технологичности конструкций кругов, указанные в табл. 1 в виде условных коэффициентов. Данные для различных конструкций алмазных кругов были получены на основании экспертных оценок. За базовый уровень (ус-

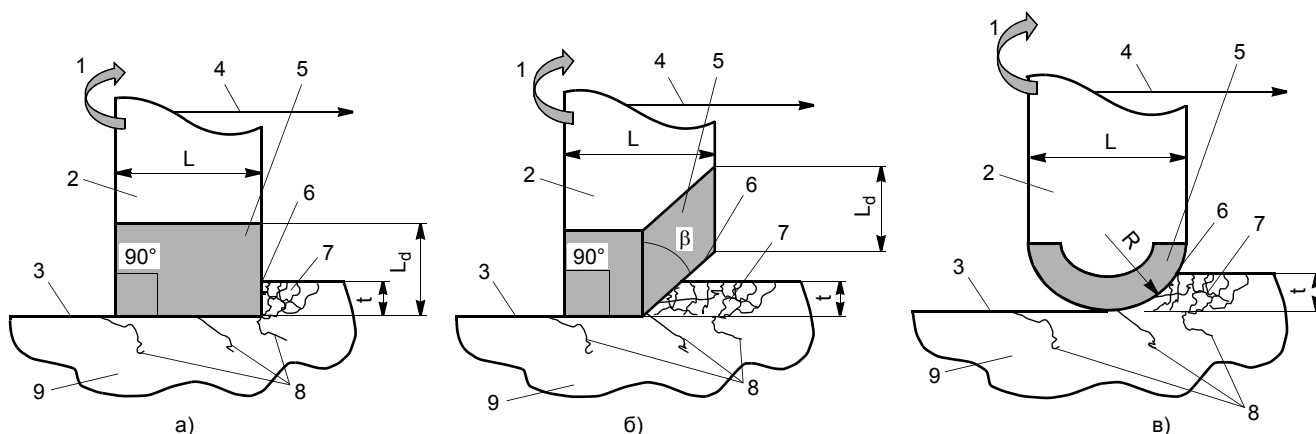


Рис. 1. Схема работы алмазных шлифовальных кругов типа: а) 1А1; б) комбинированного 1А1 + 1V1 "Комби"; в) 1FF1. 1 — скорость вращения круга v_{wh} , м/с; 2 — корпус алмазного круга; 3 — обработанная поверхность керамики; 4 — продольная подача S_{LF} , мм/об; 5 — алмазоносный слой круга; 6 — кромка круга; 7 — зона разрушения керамики; 8 — критические микротрещины; 9 — заготовка

ловную единицу) был взят круг формы 1А1 диаметром 100 мм, шириной 10 мм, толщиной алмазоносного слоя 5 мм на металлической связке М2-01. Такой круг является самым технологичным по сравнению с другими сборными конструкциями алмазных шлифовальных кругов.

В "Методике отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения" 1975 года говорится — "Единым критерием технологичности конструкции изделия является ее экономическая целесообразность при заданном качестве и принятых условиях производства, эксплуатации и ремонта". В связи с этим, повышение производительности ме-

ханической обработки керамических изделий является приоритетным условием для выбора наиболее рациональной конструкции алмазно-абразивных инструментов [2].

На рис. 1 показаны основные схемы абразивной обработки кругами различных конструкций. Для круглого и плоского шлифования керамических изделий в основном используются алмазные круги типа 1А1 (рис. 1, а). Такие круги быстро изнашиваются из-за того, что при продольной подаче на круг действуют большие нагрузки. В связи с этим, кромка алмазного круга является основным концентратором напряжений, возникающими в инструменте. Для повышения эффективности плоского или круглого шлифования было предложе-

Таблица 1

№	Показатель технологичности	Типы алмазных инструментов				
		Круг 1А1	"Комби" (1А1+1V1)	Сегментный сборный	Сегментный с напайными пластинами	"Комби" сегментный
1.	Трудоёмкость изготовления	1	1,4	1,7	1,5	1,9
2.	Удельная материалоемкость	1	2	1,7	1,5	2,4
3.	Технологическая себестоимость	1	1,4	1,6	1,5	2
4.	Средняя оперативная трудоёмкость технического обслуживания (ремонта)	1	1,1	1,5	1,1	1,6
5.	Удельная трудоёмкость изготовления	1	1,6	1,7	1,5	2
6.	Трудоёмкость монтажа	1	1,4	1,6	1,7	2
7.	Коэффициент применимости материала	1	1,9	1,7	1,6	2,9
8.	Коэффициент сборности	1	1,4	1,5	1,6	1,9
9.	Средний коэффициент	1	1,5	1,8	1,5	2

но использовать комбинированный алмазный круг (тип "Комби"), состоящий из двух кругов типа 1А1 и 1V1, скрепленными между собой (рис. 1, б). Такой инструмент обладает большей площадью контакта с обрабатываемой заготовкой. Давление круга на заготовку зависит от угла наклона кромки круга β и распределено более равномерно, чем в случае с кругом 1А1, где врезание в заготовку при продольной подаче происходит под прямым углом. Площадь контакта круга с заготовкой в случае врезания под углом β больше, а, значит больше число алмазных зерен, участвующих в процессе резания. В связи с этим, нагрузка на связку круга при его работе распределяется равномерно и процесс самозатачивания происходит медленнее, а значит, такой круг является более износостойким. В качестве альтернативной конструкции также возможно использование круга типа 1FF1 (рис. 1, в).

Одним из прогрессивных направлений абразивной обработки керамических материалов является использование прерывистых алмазных сегментных кругов [3, 4].

В зависимости от режимов обработки мощность, затрачиваемая на резание при прерывистом шлифовании, меньше чем при обычном шлифовании на 25—65 %. Работа шлифовального круга с прерывистой рабочей поверхностью сопровождается периодически ударами, которые воспринимаются режущими зернами, расположенными на передней кромке выступа сегмента круга. Под воздействием ударных нагрузок происходит выкрашивание зерен из круга и на режущих выступах формируются фронтальные участки (рис. 2), угол наклона и протяженность которых зависят от характеристики кругов, времени их работы и режимов шлифования. После формирования фронтального участка на режущем выступе изменяются условия работы зерен, так как они, располагаясь на различных радиусах от оси вращения шлифовального круга и перемещаясь по концентрическим окружностям, удаляют припуск отдельными тонкими слоями. Режущие зерна, расположенные на передней кромке фронтального участка выступа, среза-

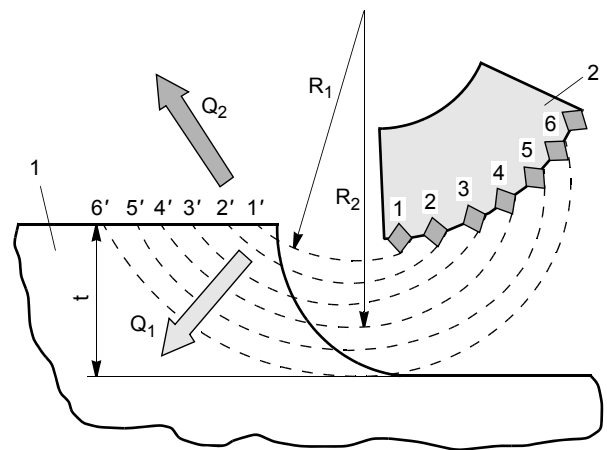


Рис. 2. Схема послыстного удаления припуска кругом с прерывистой рабочей поверхностью: 1 — заготовка, 2 — сегмент круга

ют верхний слой 1'. При срезании верхнего слоя 1' выделившееся тепло Q_1 распространяется в глубинные слои керамического материала. Однако, высокие температуры не успевают распространиться на глубину снимаемого общего припуска t , так как следующая группа режущих зерен, расположенная на большем радиусе фронтальной поверхности, удаляет прогретые до высоких температур слои обрабатываемого материала. При послыстном удалении припуска увеличивается количество тепла Q_2 , поглощаемое стружкой скола, и, уменьшается количество тепла, уходящее в деталь. Экспериментально установлено, что при прерывистом шлифовании количество тепла, поглощаемое заготовкой, значительно меньше, чем в процессе шлифования сплошным кругом той же характеристики. Доля тепла, уходящего в стружку, возрастает с увеличением глубины резания. Уменьшение количества тепла, поглощаемого заготовкой, уменьшает температуру в зоне контакта круга и обрабатываемой поверхности [5, 6].

В действующем ГОСТ 53923—2010 "Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия" определяют предельные рабочие скорости для шлифовальных кругов.

В связи с тем, что в ГОСТ 53923—2010 не указаны скорости выше 125 м/с, назрела необходимость для разработки новых алмазных

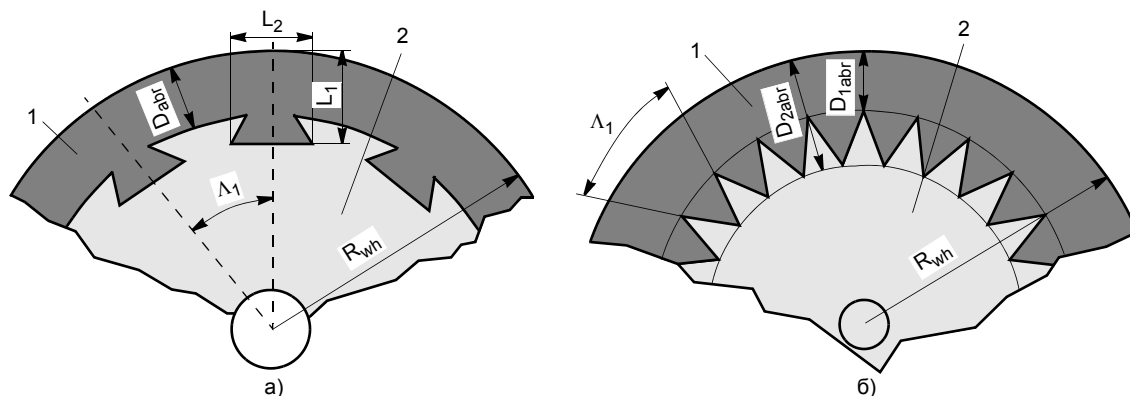


Рис. 3. Общие схемы алмазных кругов для высокоскоростного шлифования разных конструкций: а) "зубчатая"; б) "замковая": 1 — алмазоносный слой; 2 — корпус круга

и нитридборных (эльборных) шлифовальных кругов для высокоскоростной обработки, рабочие скорости которых превышают ограничения действующей нормативной документации.

Для решения проблемы обеспечения необходимых условий для высокоскоростной обработки были предложены некоторые новые конструкции алмазных кругов (табл. 2).

На рис. 3, а изображена общая схема закрепления алмазоносного слоя с корпусом круга зубчатой конструкции. Угол между зубьями Λ_1 равен от 30 до 60 градусов.

В случае с "замковой" конструкцией типа "ласточкин хвост" (рис. 3, б) необходимо отметить важность соотношения между толщиной алмазоносного слоя D_{abr} и длиной замка L_1 . Было предложено использовать для данной пропорции принцип "золотого сечения", широко применяемого в науке и технике:

$$\Phi = \frac{L_1}{D_{abr}} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{D_{2abr}}{D_{1abr}} = 1,62, \quad (1)$$

Таблица 2

Метод шлифования	Материал корпуса круга	Максимальная предельная рабочая скорость круга, v_{wh} , на связках		
		V (керам.)	B (орг.)	M (металл.)
Периферией круга	Металлический	125	100	100
	Композиционный	125	100	—
	Керамический	63	—	—
Торцом круга	Металлический	80	80	80
	Композиционный	80	80	—
	Керамический	63	—	—

где L_1 — толщина алмазоносного слоя с учетом внедрения в корпус круга; L_2 — ширина зубчатого венца; D_{abr} — толщина алмазоносного слоя без учета внедрения в корпус круга.

Преимущество "замковой" конструкции состоит в том, что алмазоносный слой при высоких линейных скоростях вращения круга свыше 100 м/с будет удерживаться на корпусе круга в двух направлениях — в направлении центробежных сил отрыва алмазоносного слоя от корпуса круга и в направлении сил трения об обрабатываемый материал. Угол между "замками" Λ_2 зависит от их количества и диаметров и может колебаться в пределах от 1 до 45 градусов.

При работе шлифовального круга на него действуют центробежные силы, сила закрепления фланцами на шпинделе станка, силы резания и силы, возникающие от неуравновешенных масс (дисбаланс круга). С увеличением скорости резания энергия круга увеличивается пропорционально квадрату скорости его вращения, поэтому при создании высокоскоростных шлифовальных кругов необходимо в первую очередь увеличить их прочность на разрыв, учитывая при этом усталостные нагрузки, возникающие от сил резания и дисбаланс круга.

Распределение напряжений во вращающемся круге от действия центробежных сил может быть рассчитано исходя из условия равновесия сил, которое записывается в поляр-

ных координатах следующим дифференциальным уравнением:

$$\sigma_{\tau} - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\gamma_a}{g} \omega^2 r^2 = 0, \quad (2)$$

где σ_{τ} и σ_r — соответственно тангенциальное и радиальное напряжения в элементе круга; r — текущее значение радиуса круга; g — ускорение свободного падения; ω — частота вращения круга; γ_a — плотность круга (для алмазных кругов — плотность алмазоносного слоя).

Решение этого уравнения для различных граничных условий показывает, что у посадочного отверстия алмазного круга максимальное тангенциальное напряжение больше, чем максимальное радиальное напряжение. Это приводит к тому, что разрушение круга начинается от посадочного отверстия под действием тангенциального напряжения. Для шлифовального круга, имеющего форму кольца с отношением диаметров $k = D_{in}/D_{wh}$ где D_{in} — внутренний посадочный диаметр круга, D_{wh} — наружный диаметр круга, максимальное тангенциальное напряжение у посадочного отверстия равно:

$$(\sigma_{\tau})_{\max} = \frac{\gamma_a V^2}{g} \frac{3 + \mu_a}{4} \left(1 + \frac{1 - \mu_a k^2}{3 + \mu_a} \right), \quad (3)$$

где μ_a — коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона), равный для кругов на металлической связке 0,25—0,35.

Разрушение круга произойдет тогда, когда максимальное напряжение достигнет предела прочности на разрыв σ_{\max} . С учетом этого условия может быть рассчитана критическая разрывная скорость круга v_{\max} :

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{4g\sigma_{\max}}{\gamma_a(3,25 + 0,75k^2)}}. \quad (4)$$

В некоторых случаях исходят из условия, когда не максимальное, а среднее (с учетом градиента распределения) напряжение достигает предела прочности круга. Тогда разрыв-

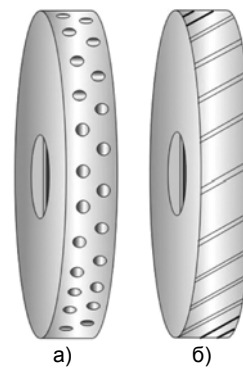


Рис. 4. Конструкции алмазных кругов: а — с перфорированными отверстиями; б — с прерывистым слоем

ная скорость для кругов будет рассчитываться по формуле:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{3g\sigma_{\max}}{2\gamma_a(1 + k + k^2)}}. \quad (5)$$

Значение v_{\max} , рассчитанное по формуле (5), в 1,15 раза меньше, чем рассчитанное по формуле (4). Значения v_{\max} , рассчитанные по формуле (5), ближе к экспериментальным разрывным скоростям круга. Однако, расчеты показывают, что в ряде случаев расчетное значение v_{\max} оказывается меньше экспериментальных, поэтому в дальнейшем для расчета разрывной скорости используется уравнение (4). Из приведенных уравнений видно, что для того, чтобы повысить разрывную скорость, следует увеличивать прочность материала круга, уменьшать отношение k за счет уменьшения диаметра посадочного отверстия круга и стремиться к уменьшению плотности круга [7—9].

Необходимо отметить, что для обработки керамических материалов на плоскошлифовальных станках со скоростью резания выше 80 м/с рекомендуется использование кругов с перфорированным алмазоносным слоем (с отверстиями) или с угловыми прорезями (с прерывистым слоем). Такие конструкции позволяют обеспечивать наибольшее охлаждение зоны контакта и лучше отводить стружку скола (рис. 4).

Для разработки связки алмазных кругов для высокоскоростной абразивной обработки

Таблица 3

№ п/п	Шифр связи	Состав связи при 100 % концентрации алмазов		Разработчик связи
		компоненты	%, весовые	
Органические связи				
1.	B1-02	Пульвербакелит	8,9	ВНИИАЛМАЗ (г. Москва)
		Олово	29	
		Медь	56,2	
2.	B1-07	Карбид бора	5,9	
		Полиалканамид	10,1	
		Медь	70,5	
		Карбид титана	15,6	
		Дисульфид молибдена	3,8	
3.	B1-12	Пульвербакелит	150	
		Медь	455	
		Электрокорунд белый	266	
		Висмут	100	
		Калий марганово-кислый	28	
		Оксид марганца	1	
			(в граммах)	
Металлические связи				
4.	M1-08	Медь	78	ВНИИАЛМАЗ (г. Москва)
		Олово	18	
		Калий марганцовокислый	4	
	M2-01	Медь	80	
		Олово	20	
5.	M3-11	Медь	77,2	
		Олово	19,3	
		Фтористый натрий	3,5	
6.	M3-18	Медь	52	
		Олово	7	
		Никель	39	
		Сернокислый цирконий $Zr(SO_4)_2$	2	
7.	МЛ-4	Олово	2—3	
		Никель	5—10	
		Кремний	8—10	
		Медь	7—11	
		Цинк	6—9	
		Алюминий	остальное	
8.	МШ	Медь	52,0—79,6	
		Олово	13,0—19,9	
		Глинозёмосодержащее вещество	0,5—30,0	
		Гидрат окиси железа $Fe(OH)_3$	0,05—5,0	
9.		Железо	30—50	ИСМ АН Украины (Киев)
		Медь	30—50	
		Олово	3—6	
		Цинк	3—6	
		Вольфрам	1—8	
		Магний	0,1—10	
		Оксид магния	0,1—10	
		MgO		
10.	M3-16	Медь	60—90	
		(Zn, Sn, Cd, Al, Ag)	8—30	
		Фториды металлов : Cr, Fe, Ni, Co, Zr	1—15	
11.	M3-22, M3-24, M3-25	Медь	70—85	
		Алюминий	5	
		Титан	10—25	
12.	МИ	Медь	в соотн. 4:1 в кол.	Завод "Ильич" (г. Санкт-Петербург)
		Олово	22,7—26	
		Электрокорунд белый	7,4—10,7	
		Органические кислоты жирного ряда	0,002—0,005	

и доводки труднообрабатываемых керамических материалов был проведен сравнительный анализ существующих вариантов металлических и органических связок (табл. 3). Состав связок обусловлен определенным сочетанием физико-механических свойств (прочность, твердость, ударная вязкость, модуль упругости и т.п.). Алмазный инструмент, работающий в условиях силового резания с жесткими динамическими нагрузками, как правило, оснащается износостойкими связками на основе таких прочных металлов как железо, никель, хром, молибден, вольфрам, титан, ниобий, тантал, ванадий или их сплавов. Для достижения определенных свойств, например для повышения пластичности, прочности, коррозионной стойкости, для снижения искрообразования инструмента и графитизации алмазов при изготовлении кругов и механической обработке к связкам добавляют медь, олово, цинк, свинец, бор, фосфор, магний, кремний, алюминий, углерод. Небольшие добавки фосфора и бора понижают температуру изготовления связок (на 200—400 градусов). Эти добавки вводят, как правило, в виде лигатур, например Cu-P. Твердость связи возможно регулировать, вводя в ее состав дисперсионные упрочнители такие как: карбиды, бориды, нитриды переходных металлов IV, V, VI групп Периодической системы элементов и нитрид алюминия. Как известно, зерна алмаза удерживаются в связке за счет механического захвата и химического или адгезионного сцепления. В связках на основе меди, бронз, латуни и медно-никелевых сплавов алмазы удерживаются слабо лишь механически и, поэтому инструмент на таких связках имеет низкую износостойкость. Для повышения износостойкости в состав таких связок целесообразно вводить добавки адгезионно-активных по отношению к алмазу металлов или сплавов (до 10 %), образующих с углеродом химические соединения. Такими добавками могут быть, например, железо (10—50 %), магний (3—12 %), хром (7—8 %), титан (10 %), цирконий и другие, их сочетания, т.е. Fe-Mn, Co-Cr, Nb-Zr, или металл из группы железа, по крайней мере с одним из метал-

лов: титан, ванадий, хром, ниобий, вольфрам, цирконий. Чем выше сродство металла с углеродом, тем лучше удержание алмазов в связке. Высокую прочность удержания алмазов достигается и применением в инструменте металлизированных алмазов. В качестве покрытий применяют металлы I группы Периодической системы элементов или их сплавы с другими металлами. Прочность сцепления еще более усиливается при использовании адгезионно-активных металлов и их сплавов, например таких, как вольфрам, молибден, ванадий, ниобий, тантал, титан, железо, магний, хром. Для защиты алмазов от окисления и графитизации в состав связки вводят гидриды (до 5 %), например TiH_2 , ZrH_2 , CaH_2 , AlH_3 . Для того чтобы снизить коэффициент трения, в связку добавляют вещества, имеющие высокие антифрикционные свойства, т.е. твердую смазку. В качестве смазок применяют сульфиды молибдена (8—10 %), чистую серу (0,2—1,5 %), фториды металлов I, II, III групп Периодической системы элементов (10—50 %), фториды хрома, никеля, железа, кобальта (1—15 %), сурьму (10—18 %), CdI_2 (2—15 %), $BaSeO_4$ (1—5 %), $CdSO_4$, $MgSO_4$, $CaSO_4$ (0,1—5 %) и др. [10].

При шлифовании изделий из кварцевой керамики и стеклокерамики был определен диапазон значений оптимальных характеристик алмазных кругов, а именно: использование алмазов марки AC20-125 (синтетических) и АЗ-А6 (природных), относительной концентрацией 100—150 % (концентрация алмазов в объеме 25—37,5 %) на металлических связках М04, МН17-01, М1-10, М2-01, а зернистость алмазов, в зависимости от производительности обработки и требуемой шероховатости поверхности изделия, должна находиться в пределах 125/100—315/250 мкм [11].

ВЫВОДЫ

Наиболее рациональными конструктивными решениями при проектировании алмазных шлифовальных инструментов для глубинно-скоростной обработки изделий из конструкционной керамики являются следующие:

1. Использование сборных алмазных сегментов;
2. Закрепление алмазоносного слоя с корпусом круга соединением типа "ласточкин хвост";
3. Перфорирование рабочей поверхности алмазного круга типа 1А1 для наилучшего удаления стружки скола и охлаждения зоны резания;
4. Использование в составе связок антифрикционных и поглощающих тепло легирующих добавок;
5. Использование наиболее качественного и термостойкого алмазного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рогов В. А., Шкарупа М. И.* Сравнительный анализ механической обработки сверхтвердых материалов шлифованием // *Технология машиностроения*. 2009. № 5. С. 12—16.
2. *Бузник Е. Н.* Технологичность конструкций изделий и деталей: Учебное пособие / М.: МГИУ, 2004. 36 с.
3. *Пилинский А. В.* Инновационные методы и вызовы в скоростном и ультраскоростном шлифовании / *Тольятти, Вектор науки ТГУ*, 2015. № 2. С. 136—144.
4. *Никифоров И. П.* Современные тенденции шлифования и абразивной обработки / *Старый Оскол: ТНТ*, 2016. 150 с.
5. *Старшев Д. В.* Совершенствование процесса шлифования титановых сплавов прерывистыми кругами на базе математического моделирования механики и теплофизики процесса / *Ижевск.: дисс. ... канд. техн. наук*, 2006. 147 с.
6. *Душко О. В., Шумячер В. М.* Алмазное шлифование карбидкремниевой керамики для машиностроения / *Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т.: Волг-ГАСУ*, 2009. 80 с.
7. *Колегов С. А.* Совершенствование процесса плоского шлифования коррозионно-стойких, хромоникелевых сталей аустенитного класса алмазными кругами с коническими отверстиями на торце / *Ижевск.: дисс. ... канд. техн. наук*, 2012. 154 с.
8. *Никитков Н. В., Рабинович В. Б.* Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики / *Л.: Машиностроение*, 1984. 131 с.
9. *Филимонов Л. Н.* Высокоскоростное шлифование / *Л.: Машиностроение*, 1979. 248 с.
10. *Чертович А. Ф., Панкевич А. П., Балашова Н. В.* Состав металлических связок для обработки прочных материалов (Обзор патентов) // *Алмазы и сверхтвердые материалы*. М.: НИИмаш, 1981. № 3. С. 12—13.
11. *Ливинский Ю. Е., Суздальцев Е. И.* Кварцевая керамика и огнеупоры. Т. 1. Теоретические основы и технологические процессы / М.: "Теплоэнергетик", 2008. 672 с.