

Р.С. Турманидзе, д-р техн. наук, Д.С. Буцхрикидзе, Тбилиси, Грузия

## **ЭФФЕКТИВНОЕ АЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ, ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ СПОСОБОМ**

*Problems connected with the workability of the scale of hard and brittle, intractable non-metallic materials during diamond grinding by the ring face by progressive method and influences of orientation of the sapphire mono-crystal on the output parameters of the process have been considered.*

Современные тенденции развития инструментальных и ряда конструкционных материалов требуют повышенных значений твердости, прочности на изгиб, высокого предела выносливости и износостойкости при повышенных температурах. Поэтому все более проблематичным становится выбор наиболее подходящих способов механической обработки и инструментального материала для эффективной обработки твердых конструкционных материалов и сверхтвердых композитов с требуемой точностью и качеством поверхности.

Шлифование, доводка и полировка являются практически единственными методами обработки деталей из этих материалов. Шлифование связанным абразивом обеспечивают высокую скорость съема материала, но недостаточное качество обработанной поверхности. Доводка дает высокую размерную и геометрическую точность, но имеет низкую производительность и не отвечает современным требованиям к экологии производства.

Растущие требования к точности и к качеству поверхности деталей, приводят к необходимости совершенствования существующих процессов и оборудования, применяемого в обрабатывающей промышленности.

В свете вышерассмотренного одновременное получение высокой производительности, характерной для шлифования связанными абразивными кругами, и качества поверхности на уровне доводки свободным абразивом является важной проблемой и обеспечивается предложенным прогрессивным способом алмазного шлифования [1].

Предложенный способ алмазного шлифования предназначен для высокоэффективной обработки плоских поверхностей деталей относительно малых размеров из твердых и хрупких труднообрабатываемых неметаллических материалов. Метод обеспечивает малые значения толщин среза, низкие контактные температуры, сохраняет точность формы алмазного круга и дает большие значения площади среза. Все это позволяет повысить скорость съема материала и качество шлифованной поверхности. Кинематика способа обеспечивает практически равномерный износ вдоль всей ширины шлифованного круга.

Увеличение ширины торцевого шлифовального круга повышает производительность процесса, в то время как равномерный износ алмазного шлифовального круга уменьшает расход алмаза и снижает время и частоту правки круга.

Способ осуществляется торцом шлифовального круга с перекрытым абрабатываемой поверхности изделия шириной круга, подпружиненной подачей изделия или инструмента и с принудительным вращением изделия на жесткой оси по направлению вращения инструмента.

Усовершенствованный способ был реализован на лабораторном стенде для экспериментальных исследований алмазного шлифования различных, труднообрабатываемых материалов и на специальных, прецизионных шлифовальных станках, моделей ТШ -8805 и ГПИТ-10.

Станки и некоторые их отдельные технические решения защищены патентами (Патент США №4894957, №4901477, 1990 г., Европатент №88903468, №88903469, №88904709, 1990 г.). Обе модели шлифовальных станков используются на нескольких промышленных предприятиях бывшего СССР, в Японии и во Франции (модель ГПИТ-10 - Рис.1).

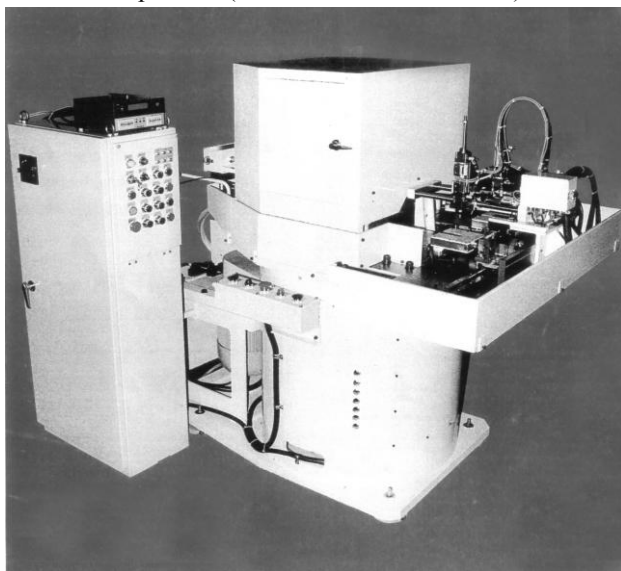


Рисунок 1 – Общий вид станка модели ГПИТ-10

По требованию Ливерпульского Университета Джона Мурса изготовлен лабораторный стенд, как базовая установка, для проведения совместных перспективных работ по разработке конкурентноспособных технологических процессов и станков нового поколения для прецизионной обработки изделий из твердых и хрупких материалов (Рис. 2.).

В ГТУ на подобной установке были проведены исследовательские работы по международным проектам ИНТАС и УНТЦ.

Обработываемость материалов изучалась в диапазоне скоростей от 1 до 12 м/с и при давлениях от 30 до 1500 кПа. Были испытаны круги на металлической, керамической и органической связках с размерами зерен 63/50 мкм и менее.

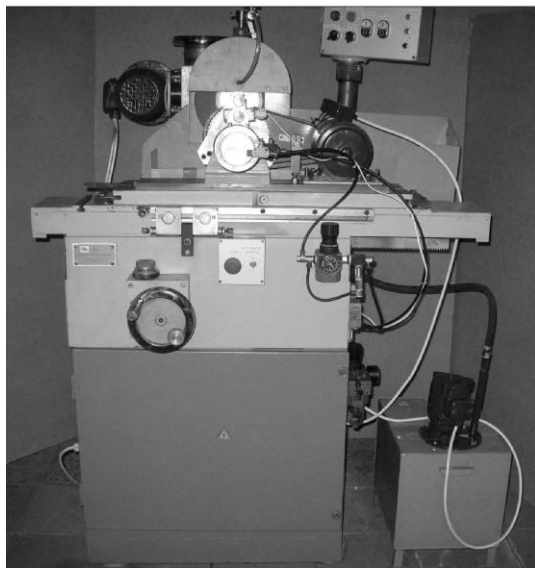
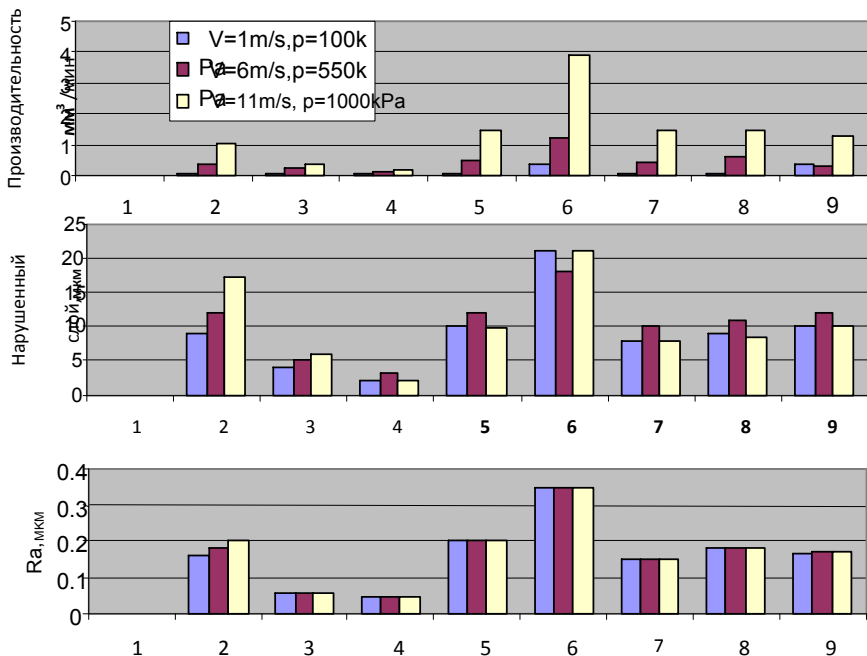


Рисунок 2 – Общий вид лабораторного станка.

Все выходные параметры производительность ( $Q$ ), глубина нарушенного слоя ( $H$ ) и шероховатость ( $Ra$ ) поверхности изучались методом планирования эксперимента как функций входных параметров. Для каждого из выходных параметров было построено семейство кривых в зависимости от входных параметров, т.е. скорость ( $V$ ), давление ( $P$ ), размер зерна ( $d$ ), материал связки и процентная концентрация абразивов в круге. На фиг. 3 представлены результаты обработки пьезокварца предложенным способом шлифования.

Независимо от материала связки производительность всегда увеличивается с ростом скорости резания и давления. Такой же эффект получен для глубины нарушенного слоя и шероховатости поверхности для испытываемых кругов на металлической ( $M1$ ) и органической ( $MO12$ ) связках. Чем выше скорость и давление, тем больше глубина нарушенного слоя.



	M1	M012	CK6						
	28/20		5/3	28/20	60/40	28/20			
	100%						25%	75%	125%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Рисунок 3 – Скорость съема материала и параметры качества поверхности при обработке пьезокварца усовершенствованным способом

Размер зерна оказывает большое влияние на все выходные параметры процесса шлифования. Скорость съема материала повышается с увеличением размеров зерен. Меньшие зерна уменьшают глубину нарушенного слоя и шероховатость поверхности. Качественно такие же результаты были получены для гаммы других исследуемых материалов.

Режимы обработки, скорость съема материала и параметры качества поверхности для гаммы материалов представлены в таблице 1.

Морфология поверхностей, обработанных различными методами была изучена на сканирующем электронном микроскопе и сравнивалась между собой. На Рис.4 представлены микрофотографии обработанных поверхностей монокристаллического кремния и соответствующие им нарушенные слои

после обработки предложенным способом (а,б) и после доводки абразивным порошком М5 из карбида бора (с,д).

Таблица 1 – Режимы обработки, скорость съема материала и параметры качества поверхности

Обрабатываемый материал	Алмазный шлифовальный круг		Режимы		Производительность $Q_t$ см <sup>3</sup> /мин	шероховатость $R_a$ , мкм	Нарушенный слой $H$ , мкм
	Зернистость	Связка	скорость рез. $V$ , м/с	Давление $P$ , кПа			
1	2	3	4	5	6	7	8
Пьезокерамика	28/20	М1	10	300	30	0.39	-
	28/20	СК6	10	300	30	0.40	-
	28/20	М012	10	300	4	0.29	-
<b>Монокристаллы</b>							
Монокристаллический кремний	28/20	М1	10	1000	7	-	-
	“	“	6	550	-	0.34	8...10
	28/20	СК6	10	1000	10	-	-
	“	“	1	100	-	0.47	10...15
	14/10	В1	10	1000	1.6	-	-
Арсенид галлия	28/20	М012	6	550	1.9	-	-
	“	“	1	100	-	0.30	6...8
<b>Оптическое стекло</b>							
К8	28/20	М1	6	550	1.9	-	-
	“	“	1	100	-	0.5	7.9
	28/20	СК6	6	550	0.8	-	-
	“	“	1	100	-	0.25	-
	28/20	М012	6	550	0.3	-	-
“	“	1	100	-	0.12	4...6	
<b>Твердые сплавы</b>							
<b>ВК8</b>	28/20	М1	6	550	0.4	0.11	-
“	28/20	СК6	6	550	2.2	0.16	-
	28/20	М020	6	550	1.6	0.15	-
“	28/20	М1	6	550	0.8	0.14	-
<b>Т15К6</b>	28/20	СК6	6	550	1.5	0.12	-
“	28/20	М020	6	550	2.4	0.18	-
<b>Сверхтвердые композиты</b>							
<b>Композит 05</b>	28/20	СК6	6	1000	0.08	0.18	-
<b>Композит 10</b>	28/20	СК6	6	1000	0.04	0.03	-

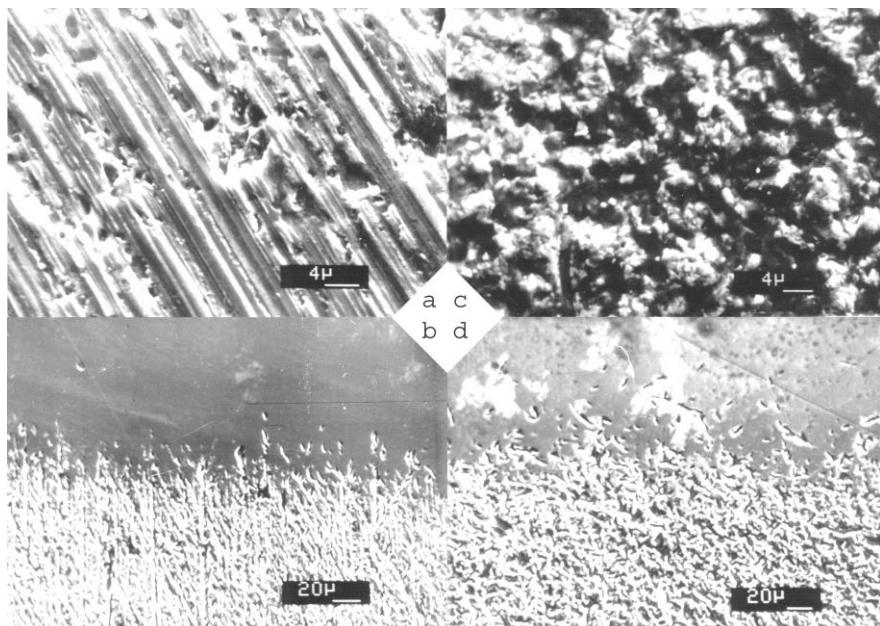


Рисунок 4 – Микрофотографии поверхностей монокристаллического кремния и соответствующие им нарушенные слои (косой шлиф при  $3^0$ ), а, в – после обработки предложенным способом, с, d – после доводки свободным абразивом.

На обработанной предложенным способом поверхности видны бороздки, полученные пластической деформацией (а), которое означает, что эта поверхность формируется главным образом за счет микропластического разрушения материала. Формирование обработанной поверхности при доводке свободным абразивом (с) происходит исключительно за счет хрупкого разрушения удаляемого слоя. Как это видно на косых шлифах обработанных поверхностей фиг. 4 б и d глубина нарушенных слоев находится в соответствии с механизмом образования поверхности.

Скорость съема материала и параметры качества обработанной поверхности при разных ориентациях кристалла сапфира

Таблица 2

№ п-п	Характеристика алмазного инструмента	Ориентация кристалла сапфира			
		{0001}			
		Выходные параметры			
		$q$ , МКМ/МИН	$R_p$ , МКМ	$t_p$ , %	$H$ , МКМ
1	АСМ 28/20, МШ-ТО 100%	55...60	2,5...3	20...25	-
2	АСМ 28/20, СК6 100%	130...150	2...2,5	20...25	8...10
3	АСМ 28/20, СК6 50%	120...130	2...2,5	20...25	-
4	АСМ 28/20, ВС-II 100%	30...35	0,25...0,3	30...35	6...8
5	АСМ 14/10, ВС-11, 100%	15...20	0,2...0,25	35...40	3...5
6	АСМ 14/10, связка органич. спец. 25%	5...8	0,15...0,2	40...45	2...3

Таблица 3

№ п-п	Характеристика алмазного инструмента	Ориентация кристалла сапфира			
		{1010}			
		Выходные параметры			
		$q$ , МКМ/МИ Н	$R_p$ , МКМ	$t_p$ , %	$H$ , МКМ
1	АСМ 28/20, МШ-ТО 100%	180...200	3...3,5	15...2 0	-
2	АСМ 28/20, СК6 100%	280...300	2,5...3	15...2 0	12...14
3	АСМ 28/20, СК6 50%	200...220	2,5...3	15...2 0	-
4	АСМ 28/20, ВС-II 100%	110...120	1,3...1,5	25...3 0	10...12
5	АСМ 14/10, ВС-11, 100%	40...45	0,8...1	30...3 5	8...10
6	АСМ 14/10, связка органич. спец. 25%	20...25	0,3...0,4	30...3 5	3...5

Одним из ярких представителей рассматриваемого класса твердых и хрупких неметаллических материалов является искусственный кристалл сапфира, который отличается высокой чистотой по химическому составу, твер-

достью, износостойкостью и долговечностью при работе в парах трения. В связи с этим кристалл сапфира, как наиболее биосовместимый конструкционный материал с человеческим организмом, является особенно привлекательным для такой области применения, как медицина. Подразумевается применение сапфира в имплантологии, в частности, для изготовления сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Таблица 4

№ п-п	Характеристика алмазного инструмента	Ориентация кристалла сапфира			
		{1012}			
		Выходные параметры			
		q, МКМ/МИ Н	q, МКМ/МИН	q, МКМ/ МИН	q, МКМ/МИ Н
1	АСМ 28/20, МШ-ТО 100%	150...170	3...3,5	15...2 0	-
2	АСМ 28/20, СК6 100%	230...250	2,5...3	15...2 0	12...14
3	АСМ 28/20, СК6 50%	180...200	2,5...3	15...2 0	-
4	АСМ 28/20, ВС-II 100%	100...110	0,8...1	25...3 0	10...12
5	АСМ 14/10, ВС-11, 100%	35...40	0,6...0,8	30...3 5	8...10
6	АСМ 14/10, связка органич. спец. 25%	15...20	0,3...0,4	30...3 5	3...5

К этим изделиям предъявляются особо высокие требования по точности формы и качеству поверхностей. Однако, сапфир является анизотропным материалом, что создает определенные трудности при механической обработке для достижения требуемых высоких уровней точности и качества. По этому, экспериментальные исследования влияния анизотропии кристалла сапфира на его обрабатываемость является актуальной проблемой.

В таблицах 2, 3, 4 даны результаты экспериментальных исследований по всем выходным параметрам для исследуемых алмазных кругов.

Анализ данных по параметру q показывает, что для всех испытуемых кругов ориентация (0001) характеризуется наименьшей производительностью, чем остальные.

Для всех испытуемых алмазных кругов соотношение значений производительности находится в пределах:  $q_{0001}/q_{1010}=0,25...0,5$ .

Разница между ориентациями (1010) и (1012) невелика, соотношение лежит в пределах:  $q_{1012}/q_{1010}=0,75...1$ .



На всех ориентациях максимальную производительность показывает алмазный круг на керамической связке СК6,  $q=130...300$  мкм/мин. Также, максимальна величина соотношения:  $q_{0001}/q_{1010}=0,4...0,5$ .

Инструмент данной характеристики отличается стабильностью в работе и самозатачиванием.

Общая картина влияния  $V$  и  $p$  на  $q$  на кругах других характеристик практически остается неизменным.

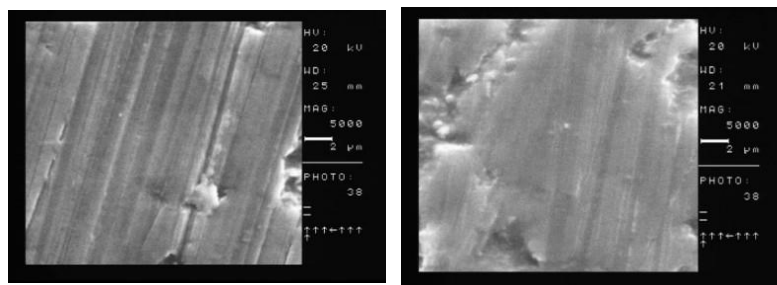
Надо отметить, что характеры зависимостей  $q=f(V)$  и  $q=f(p)$  при обработке сапфира хорошо коррелируют с данными по обработке подобных материалов, например пьезокварца.

Качество поверхности оценивалось высотой неровностей шероховатости поверхности  $Rz$ , мкм, относительной опорной длиной профиля на уровне  $03-tr_{03}\%$  и глубиной нарушенного-трещиноватого слоя  $H$  мкм.

Размер зерна значительной степени влияет на  $Rz$ , чем концентрация –  $K$ . С увеличением  $d_3$ ,  $Rz$  увеличивается в пределах  $1...1,5$  класса. При этом на ориентации (0001)  $Rz$  имеет наименьшие значения, затем на ориентациях (1012) и (1010).

По этому параметру наилучшие результаты дают круги на органических связках (табл. 2, 3, 4). По сравнению с кругами на металлической и керамической связках,  $Rz$  имеет на порядок низкие значения. Эта картина сохраняется для всех ориентаций сапфира.

Наилучшие результаты по этим показателям качества поверхности дают круги на органических связках: ВС-11, органическая специальная,  $tr$  примерно в 1,5 раза выше, а  $H$  –  $3...5$  раз меньше, чем на кругах с металлическими и керамическими связками.



а)

б)

Рисунок 5 – Микрофотографии поверхностей экспериментальных образцов сапфира.

**а**-Ориентация 0001 Алмазный круг – АСМ 14/10, ВС11, 100%, Режимы резания:

$V=3$ м/с,  $P=750$  кПа. **б**- Ориентация 1010 Алмазный круг – АСМ 14/10, связка ВС-11

100%, Режимы резания:  $V=3$ м/с,  $P=750$  кПа.

Круги на керамической и металлической связках дают взрыхленную поверхность со сколами и выколами. Поверхность образцов обработанные кругами на органической связке отличаются строением поверхности (Рис. 5). Отчетливо видны следы резания материала путем пластической деформации (снятие мельчайших частиц в виде стружки) вместе с хрупким разрушением материала.

Соотношение площадей участков поверхности полученных двумя разными механизмами разрушения материала примерно равно единице.

### **Выводы:**

1. Для каждого исследуемого материала определены оптимальные условия механической обработки по выбранному критерию оптимизации – производительности или параметров качества поверхности;
2. Предложенный прогрессивный способ может заменить трудоемкие и экологически нежелательные операции доводки свободным абразивом в технологическом процессе механической обработки конкретного изделия из исследуемых материалов с достижением как высокой производительности (в более десятков раз), так и показателей качества поверхности;
3. Характер влияния факторов процесса шлифования прогрессивным способом ( $V$ ,  $P$ ;  $d_3$ ,  $K\%$ , материал связки) на выходные параметры для исследуемых материалов одинаковый.

**Список использованных источников:** 1. *B.I.Batiashvili, D.S.Butskhrikidze, G.L.Mamulashvili, R.S.Turmanidze, K.Kromp, B.Mills, O.B.Mgaloblishvili*. Technological Possibilities of Low-Temperature Precision Grinding Process when Machining Hard and Brittle Materials. Key Engineering Materials Vol. (2002), pp.149-156. 2. *R.Turmanidze, D.Butskhrikidze, M.Beridze*. Workability of the Sapphire crystal of Medical Purpose and Scheme of Formation of Spherical Surface of Increased Precision. FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE «Materials and Coatings for Extreme Performances: Investigations, Applications, Ecologically Safe Technologies for Their Production and Utilization». 22-26 September, 2008. Big Yalta, Zhukovka, Crimea, Ukraine. 3. *R.Turmanidze, O.Mgaloblishvili, D.Butskhrikidze, M. Beridze*. Grindability of single crystal sapphire in medical use and the scheme of forming highly precise spherical heads. The 66<sup>th</sup> International Congress of Precision Machining ICPM 2011. Liverpool John Moores University, 13<sup>th</sup>–15<sup>th</sup> September 2011. Day 1. Liverpool.

*Поступила в редколлегию 15.06.2012*