

## АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

© 2011 г. В. М. Альтшуллер, канд. техн. наук; С. А. Герасимов, канд. хим. наук; М. В. Грималюк

Научно-производственное объединение “Оптика”, Москва

E-mail: teopt@nrooptica.ru

Рассмотрена номенклатура алмазного инструмента для механической обработки оптических деталей. Приведены технические характеристики инструментов для тонкого шлифования, включая показатели работоспособности.

Разработано новое поколение алмазного инструмента на основе высоконаполненных эластомерных композиций. На основе установленных корреляционных зависимостей между составом, физико-механическими свойствами композиций и показателями работоспособности инструмента разработаны инструменты для обработки основной номенклатуры оптических стекол и ряда кристаллических материалов (карбид кремния, лейкосапфир, кварц, флюорит, германий). Для супертонкого шлифования по методу “жестких осей” разработан кольцевой инструмент, обеспечивающий получение шероховатости поверхности до 0,05–0,03 мкм.

**Ключевые слова:** механическая обработка, тонкое шлифование, оптическая деталь, алмазный инструмент, металлическая связка, эластомерная композиция, показатели работоспособности.

Коды OCIS: 220.4610

Поступила в редакцию 07.07.2010

В настоящее время научно-производственное объединение “Оптика” (НПО “Оптика”) располагает опытным производством алмазного инструмента для тонкого алмазного шлифования оптических деталей (ОД). Инструмент выпускается в виде таблеточных элементов, пластин, сферических шлифовальников в широком диапазоне геометрических размеров, зернистости и концентрации алмаза, составов связок (табл. 1).

Показатели работоспособности алмазных таблеточных элементов приведены в табл. 2, примерное назначение различных модификаций в технологических схемах тонкого алмазного шлифования (ТАШ) – в табл. 3.

Инструмент был разработан в НПО “Оптика” в восьмидесятых годах прошлого столетия, обеспечивает обработку основной номенклатуры оптических стекол и до настоящего времени

Таблица 1. Алмазные элементы для тонкого шлифования оптических деталей

Характеристика элемента	Тип элемента		
	таблеточный	пластинчатый	сферические шлифовальники
связка	металлическая	металлическая	металлическая
	металло-полимерная	—	металло-полимерная
зернистость алмазного микропорошка*, мкм	40/28–7/5	40/28–5/3	40/28–10/7
концентрация алмаза**, %	1–25	6–25	6–25
геометрические размеры, мм	диаметр 6, 8, 10, 14 высота 3, 5	20×15×1,5 40×20×3,0	внутренний диаметр 12–30 радиус 6,5–15,5
назначение	шлифование сферических и плоских поверхностей	шлифование плоских ОД большого диаметра, двухстороннее шлифование	шлифование сферических ОД, обработка микрооптики, одиночных деталей

**Примечание.** \*Зернистость алмазного микропорошка определяет размер алмазных зерен. \*\*100 % концентрация соответствует содержанию 4,4 карата алмаза в 1 см<sup>3</sup> объема алмазного микропорошка.

**Таблица 2.** Показатели работоспособности алмазных элементов для тонкого шлифования ОД

Зернистость алмазного микропорошка, мкм	Концентрация алмаза, %	Марка связки	Показатели поверхности стекла после шлифования			Съем стекла за цикл шлифования, мкм/мин, не менее	Относительный износ элементов, %, не более
			$R_a$ , мкм		глубина царапин, мкм, не более		
			не менее	не более			
40/28	25	МЗ-15-1	0,5	0,8	35	120	0,41
28/20	25	МЗ-15-1	0,3	0,5	12	90	0,55
	6	МЗ-15-2	0,35	0,5	10	135	0,92
	6	МЗ-15-3	0,2	0,3	8	60	1,0
	1	МЗ-15-7	0,45	0,6	15	180	2,8
20/14	25	МЗ-15-1	0,2	0,3	8	60	0,83
	6	МЗ-15-2	0,25	0,35	8	90	1,4
14/10	6	МЗ-15-4	—	0,22	6	30	1,7
	8	МЗ-15-5	—	0,12	4	9	8,3
10/7	6	МЗ-15-6	—	0,16	4	15	3,3
20/14	8	МПП-1	—	0,16	9	37	10,7
14/10	8	МПП-1	—	0,08	6	22	17,8

**Таблица 3.** Назначение алмазных элементов для тонкого шлифования ОД

Зернистость алмазного микропорошка, мкм	Марка связки	Примерное назначение
40/28	МЗ-15-1	предварительная обработка сферических блоков при повышенных припусках на обработку
28/20	МЗ-15-1	1-й переход шлифования сферических блоков
	МЗ-15-2	1-й переход шлифования плоских блоков
	МЗ-15-3	1-й переход шлифования сферических блоков при стеклах малой и средней твердости
	МЗ-15-7	шлифование плоских блоков при повышенных припусках на обработку
20/14	МЗ-15-1	промежуточные переходы обработки сферических блоков 2-й переход шлифования деталей низкой точности при интенсивных режимах полирования
	МЗ-15-2	то же при небольшой относительной высоте блоков и повышенных требованиях к абразивной способности
14/10	МЗ-15-4	2-й переход шлифования сферических и плоских блоков при интенсивных режимах полирования промежуточный переход шлифования (например, перед элементами зернистости 14/10 на связке МЗ-15-5)
	МЗ-15-5	2-й переход шлифования сферических и плоских блоков: стекла низкой и средней твердости после элементов зернистости 28/20, любые стекла после элементов зернистости 14/10 на связке МЗ-15-4
10/7	МЗ-15-6	2-й переход шлифования плоских и сферических блоков после элементов зернистости 20/14
20/14	МПП-1	2-й переход шлифования плоских блоков после элементов зернистости 28/20 на связке МЗ-15-2
14/10	МПП-1	2-й переход шлифования плоских блоков после элементов зернистости 20/14 на связке МЗ-15-2

применяется в производстве ОД на оптических предприятиях.

В то же время создание новых технологических процессов механической обработки ОД и автоматизированного оборудования для их реализации, возрастающее применение в оптике кристаллических материалов (лейкосапфир, кварц, карбид кремния, флюорит, германий, кремний) определяют необходимость принципиального обновления номенклатуры алмазного инструмента для механической обработки оптических деталей.

К настоящему времени в НПО “Оптика” разработано новое поколение алмазного инструмента для финишной механической обработки оптических деталей на основе не имеющего аналогов связующего – высоконаполненных эластомерных композиций [1].

Разработанные ранее на синтетических каучуковых связках алмазные инструменты [2] не нашли применения в обработке ОД вследствие их эластичности и низкой теплостойкости, что не обеспечивает геометрической точности обрабатываемых поверхностей.

Высокие теплостойкость и твердость разработанного инструмента на основе эластомерных композиций обеспечиваются использованием в качестве вулканизирующего агента органического пероксида, что позволило ввести дополнительную операцию термовулканизации изделий в свободном состоянии, обеспечивающую получение твердого теплостойкого материала.

Рассмотрим некоторые характеристики алмазного инструмента на основе разработанных композиций, полученные при исследовании кинетики процесса шлифования оптического стекла. В отличие от инструмента на металлической и органической связках (особенно мелкозернистого) инструмент на основе эластомерной композиции обладает высокой стабильностью съема припуска в единичном цикле шлифования и слабой зависимостью работоспособности от начальной шероховатости поверхности, т. е. менее склонен к “засаливанию”. Уменьшение давления, естественно, приводит к снижению производительности шлифования, однако, инструмент сохраняет работоспособность даже при минимальных удельных нагрузках порядка 30–50 г/см<sup>2</sup>, что принципиально при обработке тонких деталей и блоков большого диаметра.

В алмазных инструментах на металлических связках алмазное зерно жестко закреплено в металлической матрице и при работе производит хрупкое разрушение поверхности об-

рабатываемой ОД, образуя нарушенный слой значительной толщины. В полимерных связках алмазное зерно, разогреваясь при работе, размягчает термопластичный полимер и утапливается в связку, что приводит к потере режущей способности инструмента. Эластомерное связующее обеспечивает упругое закрепление алмазного зерна в жестком каркасе связки, его достаточную подвижность при трении об обрабатываемую поверхность и высокую адгезионную прочность закрепления алмазов [3].

При этом упругая деформация алмазного зерна при динамическом контакте с обрабатываемой деталью позволяет получать поверхности с минимальными шероховатостью и глубиной нарушенного слоя благодаря большему проявлению эффектов пластического резания и вязкого оттеснения материала.

Проведенные исследования влияния различных факторов на свойства эластомерных алмазных инструментов позволили установить корреляционные зависимости между составом композиций, температурно-временными параметрами их вулканизации, физико-механическими свойствами термовулканизатов и определить их взаимосвязь с показателями работоспособности изготовленного на их основе инструмента.

Таким образом, целенаправленное изменение состава композиций и режима термовулканизации открывают возможности создания алмазных инструментов с заранее заданными свойствами для обработки материалов с различной структурой и физико-механическими свойствами.

В качестве примера в табл. 4 приведены показатели работоспособности алмазного инструмента на эластомерных связках для зернистости алмаза в диапазоне 10/7–50/40 мкм. Видно, что производительность шлифования может изменяться в 10–20 раз, шероховатость обработанной поверхности ( $R_a$ ) в 3–4 раза.

На основе установленных корреляционных зависимостей в НПО “Оптика” разработаны алмазные инструменты для механической обработки основной номенклатуры оптических стекол, ситалла, ряда кристаллических материалов с различной структурой и физико-механическими свойствами – от мягких (флюорит, германий) до высокопрочных (карбид кремния, лейкосапфир) [4].

Инструменты для тонкого шлифования флюорита и германия обеспечивают получение поверхности без локальных дефектов

**Таблица 4.** Показатели работоспособности алмазного инструмента в зависимости от состава композиций

Зернистость алмазного микропорошка, мкм	Производительность шлифования, мкм/мин	$R_a$ , мкм
10/7	2–43	0,02–0,10
14/10	4–76	0,02–0,13
20/14	6–98	0,06–0,25
28/20	8–130	0,10–0,30
40/28	16–180	0,20–0,62
50/40	25–250	0,30–0,82

**Примечание.** Шлифование по методу свободного притира, стекло К8.

**Таблица 5.** Показатели работоспособности эластомерных алмазных инструментов при обработке флюорита и германия

Зернистость алмазного микропорошка, мкм	Обрабатываемый материал			
	Флюорит		Германий	
	Показатели работоспособности			
	Производительность шлифования, мкм/мин	$R_a$ , мкм	Производительность шлифования, мкм/мин	$R_a$ , мкм
40/28	—	—	210	0,19
20/14	65	0,07	80	0,08
14/10	34	0,037	52	0,046
7/5	23	0,017	22	0,015
3/2	7	0,006	20	0,007

с шероховатостью до 0,006–0,007 мкм при достаточно высокой производительности и стабильности процесса. Показатели работоспособности инструмента в диапазоне зернистости 40/28–3/2 мкм приведены в табл. 5.

### Алмазный инструмент для обработки карбида кремния

Благодаря уникальным свойствам кристаллический карбид кремния активно применяется в производстве оптических деталей и, в первую очередь, облегченных лазерных зеркал диаметром до 1500 мм и с асферичностью до нескольких сотен микрометров.

В то же время технология формообразования поверхностей оптических деталей из кар-

бида кремния осуществляется на всех операциях низкопроизводительным методом обработки абразивными порошками в свободном состоянии.

Изготовление асферических зеркал проводится автоматизированным формообразованием рабочей поверхности асферизацией полированной поверхности заготовки с радиусом ближайшей сферы и осуществляется полированием свободным абразивом. Низкая производительность удаления припуска полированием в значительной степени определяет высокую трудоемкость изготовления зеркал и, соответственно, их стоимость, особенно при больших значениях асферичности и габаритных размеров зеркал. На основании изложенного была поставлена задача снижения трудоемкости формообразования поверхностей ОД из SiC путем разработки высокоэффективных средств их механической обработки.

При испытании алмазного инструмента, используемого в оптическом производстве, все модификации показали отрицательные результаты по стабильности шлифования в единичном цикле, теряя работоспособность в течение первых 2–3 мин, тем самым не обеспечивая удаление заданного припуска после предыдущей операции механической обработки.

При шлифовании SiC алмазным инструментом на эластомерном связующем стабильность процесса обеспечивалась только инструментом с малым размером алмазных зерен (14/10–5/3 мкм), обладающим низкой производительностью (6 и 0,7 мкм соответственно) и высоким относительным износом (240–320%).

Данная ситуация связана, очевидно, с особенностями структуры и свойств карбида кремния – высокими прочностью и неоднородностью его структуры. Силицированный карбид кремния представляет собой гетерогенный композиционный материал, содержащий кристаллическую фазу первичного и вторичного карбида кремния и стекловидную фазу кремния, которые отличаются по своим физико-механическим свойствам и, соответственно, обрабатываемости. Высокая твердость материала приводит к быстрому притуплению алмазных зерен и, как следствие, потере режущей способности инструмента. Чередование участков материала с различной твердостью и структурой – к разрушению или вырыванию алмазов из связующего.

Повышение износостойкости и производительности алмазного инструмента на эла-

стомерном связующем для обработки силицированного карбида кремния потребовало решения задач увеличения прочности, твердости эластомерных композитов и повышения способности удерживать работающие алмазные зерна в связующем в условиях высоких ударных нагрузок.

С учетом полученных корреляционных зависимостей было определено оптимальное содержание алмаза в инструменте для обработки карбида кремния. Поскольку неоднородная структура силицированного карбида кремния, как отмечалось, приводит к быстрому разрушению и вырыванию алмазных зерен из связующего материала за счет высоких ударных нагрузок, оптимальные значения содержания алмаза в инструменте, обеспечивающие поддержание производительности шлифования, лежат в диапазоне от 50 до 100%.

Как показано в табл. 6, разработанный инструмент по сравнению с аналогом обеспечивает увеличение производительности тонкого шлифования в 2 раза, уменьшение износа в 5 раз, снижение шероховатости обработанной поверхности в 3 раза.

Инструмент на эластомерном связующем используется при шлифовании карбида кремния в качестве 2-го или 3-го перехода после предварительного шлифования разработанным ин-

струментом на металлическом связующем специального состава. Рациональные технологические схемы шлифования приведены в табл. 7, достигаемые значения показателей работоспособности в приведенных схемах – в табл. 8.

Специальный инструмент разработан для асферизации ОД из карбида кремния на автоматизированных доводочных (серии АД) станках с программным управлением. В основу инструмента положена двухслойная конструкция гибкая основа – алмазосносный слой. Алмазосносный слой образован таблеточными элементами диаметром 3,2 мм на эластомерном связующем, привулканизованными к основе, в качестве которой использована медная сетка. Для обеспечения работы инструмента по обрабатываемой поверхности алмазосносный слой приклеивается на корпус из упругой резины заданной твердости.

На основе двухслойной конструкции изготавливается алмазный инструмент в виде кругов 6А2Т диаметром 150 мм. Инструмент может использоваться в качестве малоразмерного при асферизации крупногабаритных ОД, как заготовка для изготовления малоразмерных инструментов меньшего диаметра, а также инструмента маски или ее фрагментов. Алмазный инструмент двухслойной конструкции для предварительной асферизации деталей из

**Таблица 6.** Показатели работоспособности алмазного инструмента зернистости 14/10 при тонком шлифовании карбида кремния

Показатели работоспособности	Инструмент	
	по ТУ 3972-101-17412936-99	разработанный
производительность шлифования, мкм/мин	6	12
относительный износ инструмента, %	178	34
$R_a$ , мкм	0,10	0,034

**Таблица 7.** Технологические схемы шлифования карбида кремния

Номер перехода шлифования	Номер схемы шлифования		
	I	II	III
1	М 160/125	М 125/100	М 80/63
2	М 40/28	Э 50/40	Э 14/10
3	Э 14/10	Э 14/10	—

**Примечание.** М – алмазный инструмент на металлическом связующем. Э – алмазный инструмент на эластомерном связующем.

**Таблица 8.** Показатели работоспособности алмазного инструмента при шлифовании карбида кремния

Показатель работоспособности	Номер схемы шлифования		
	I	II	III
суммарный снимаемый припуск с обрабатываемой детали, мкм	233	205	161
$R_a$ , мкм	0,087	0,072	0,085



карбида кремния обеспечивает стабильность съема и получение оптической поверхности с шероховатостью  $R_a = 0,06-0,03$  мкм в диапазоне зернистости алмазного порошка от 14/10 до 5/3 мкм соответственно.

### **Алмазный инструмент для обработки лейкосапфира**

Уникальные свойства лейкосапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) сделали его перспективным конструкционным материалом в целом ряде отраслей науки и техники, и, в первую очередь, в производстве деталей оптических систем, микроэлектроники, лазерной техники, оптоэлектроники. Однако удовлетворение возрастающих потребностей в изделиях из лейкосапфира сдерживается низкопроизводительной технологией их механической обработки.

Как и в случае карбида кремния, алмазные инструменты, используемые в обработке оптического стекла, не обеспечивают стабильности съема припуска в единичном цикле при шлифовании лейкосапфира, что объясняется его высокой твердостью (второй после алмаза). Более того, лейкосапфир относится к анизотропным кристаллам, в которых физико-механические свойства, в том числе поверхностная твердость, механическая прочность и хрупкость и, соответственно, обрабатываемость существенно отличаются в различных кристаллографических направлениях, что и затрудняет их механическую обработку, особенно на операциях шлифования и полирования. При этом производительность и стабильность процесса шлифования, шероховатость и глубина нарушенного слоя шлифованной поверхности также зависят от ее ориентации относительно оптической оси.

Рассмотренные особенности механической обработки лейкосапфира, а также его невысокая доля в общем объеме производства ОД, по-видимому, и определили значительное отставание технологии его механической обработки, которая преимущественно основывается на применении свободного абразива. Алмазный инструмент используется на операции предварительного, реже тонкого, шлифования, обеспечивая шероховатость поверхности до 0,5–0,6 мкм. Однако в обоих случаях инструмент обладает высоким износом и недостаточной стабильностью снимаемого припуска в единичном цикле шлифования. Таким образом, актуальной задачей остается повыше-

ние стабильности и производительности процесса алмазного шлифования лейкосапфира и получение шероховатости поверхности менее 0,1 мкм.

Проведенные исследования обработки лейкосапфира на операциях предварительного, тонкого и супертонкого шлифования позволили определить оптимальные характеристики алмазного инструмента и технологические схемы механической обработки деталей из него. Для предварительного шлифования лейкосапфира оптимальными являются связующие материалы на основе системы Cu-Fe-Ni, содержащие в своем составе прочные алмазные порошки АС 50, АС 65 с зернистостью 100/80–160/125 при содержании алмаза 25–30%. Для повышения стабильности снимаемого припуска в состав инструмента вводится в качестве вспомогательного абразива порошок карбида бора.

Оптимальными связующими для тонкого и супертонкого шлифования, обеспечивающими стабильный съем припуска деталей из лейкосапфира, являются связки на основе эластомерных композиций с высокими значениями твердости и модуля упругости при пониженной сопротивляемости истиранию. Особенностью инструмента для обработки лейкосапфира является введение в состав композиции абразивного наполнителя, способствующего вскрытию инструмента в процессе шлифования, а также активных по отношению к обрабатываемой поверхности наполнителей – оксидов железа и кремния. Стабильность снимаемого припуска в единичном цикле шлифования, как показали проведенные исследования, обеспечивается только при малом содержании алмазных частиц в инструменте, что способствует увеличению удельной нагрузки на единичные алмазные зерна и работе инструмента в режиме самозатачивания. В отличие от карбида кремния оптимальная концентрация алмаза в порошке для обработки лейкосапфира составляет 0,8–3,0% в диапазоне зернистости 10/7–80/63 мкм и падает практически до нуля на 2-й мин обработки при концентрации 5–6%.

Определение оптимальных размеров зерен и концентрации алмаза в микропорошке позволило создать алмазный инструмент для тонкого и супертонкого шлифования деталей из лейкосапфира, обеспечивающий высокую производительность, стабильность процесса шлифования и получение в два перехода шероховатости поверхности до 0,05 мкм.

**Таблица 9.** Показатели работоспособности алмазного инструмента для тонкого (ТАШ) и супертонкого (СТАШ) шлифования деталей из лейкосапфира

Показатели работоспособности	ТАШ	СТАШ
	АС 15 63/50	АСМ 28/20
производительность шлифования, мкм/мин	130	32
относительный износ инструмента, %	23	38
$R_a$ , мкм	0,13	0,05

**Примечание.** Станок ЗПП-320. Образец – пластины лейкосапфира по плоскости (0001).

Показатели работоспособности алмазных инструментов для тонкого и супертонкого шлифования лейкосапфира приведены в табл. 9.

### Кольцевой алмазный инструмент для тонкого шлифования

Рассмотренные выше алмазные инструменты предназначены для обработки ОД по методу свободного притира, широко применяемому в серийном производстве. Однако технологии ТАШ, основанные на использовании этого метода, малоэффективны в условиях мелкосерийного производства, так как требуют большой номенклатуры специального дорогостоящего инструмента и приспособлений. Наиболее эффективная технология обработки ОД в “жестких осях” кольцевым алмазным инструментом до недавнего времени применялась только для предварительного шлифования, поскольку для осуществления ТАШ требуются дорогостоящие прецизионные станки высокой жесткости.

К настоящему времени ведущими фирмами в области оптического станкостроения (“*Optotech*”, “*SatisLoh*” и др.) разработано и поставляется на мировой рынок автоматизированное

прецизионное оптическое оборудование, включая многоцелевые обрабатывающие центры, что позволяет не только реализовать, но и сделать экономически выгодным формообразование оптических поверхностей ОД кольцевым алмазным инструментом на операции ТАШ.

В НПО “Оптика” впервые этот метод был реализован еще 20 лет назад в сферошлифовальных станках модели АШ-70К, входящих в состав поточно-автоматизированных линий ЛПА-70М, которые до настоящего времени эксплуатируются на заводе “Юпитер”.

Кольцевой алмазный инструмент для ТАШ изготавливался на металлической связке из оловянистой бронзы с алмазным порошком АСМ 14/10 при содержании алмаза 25%. Оптимальные режимы обработки кольцевым алмазным инструментом различных материалов приведены в табл. 10.

Повышение эффективности процесса ТАШ по методу “жестких осей” достигается применением разработанного кольцевого алмазного инструмента на основе эластомерных композиций, обладающего достаточной прочностью, износостойкостью и теплостойкостью.

Испытания инструмента проводились на станке модели АШ-70К при следующих параметрах его настройки:

частота вращения шпинделя инструмента –  $67 \text{ с}^{-1}$  (4000 об/мин),

частота вращения шпинделя детали –  $6,7 \text{ с}^{-1}$  (400 об/мин),

скорость подачи шпинделя детали – 400 и 100 мкм/мин, соответственно, для зернистостей алмаза 63/50 и 14/10.

Обрабатывались плоские детали диаметром 31 мм из стекла ТК14. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали 0,3% водный раствор фосфопага. Геометрические размеры инструмента  $\varnothing 60 \times 50 \times 7$  мм.

Испытания показали (табл. 11), что разработанные кольцевые инструменты на основе

**Таблица 10.** Оптимальные режимы обработки кольцевым алмазным инструментом

Обрабатываемый материал	Скорость резания, м/с	Скорость рабочей подачи, мм/мин	Машинное время обработки, мин
оптические стекла всех марок, кроме флинттовых	30–32	0,15–0,2	1–1,2
флинттовые стекла	30–32	0,10–0,15	1,2–1,5
кремний	15–16	0,03–0,04	1–2,5
германий	8–10	0,01–0,02	4–5

**Таблица 11.** Показатели работоспособности кольцевого алмазного инструмента на эластомерном связующем при шлифовании стекла ТК14

Инструмент	Время обработки, с	Снимаемый припуск, мкм	$R_a$ , мкм
АС 20 63/50	27	180	0,80
АСМ 14/10	24	40	0,05

**Таблица 12.** Показатели работоспособности кольцевого алмазного инструмента на металлическом связующем

Материал	Снимаемый припуск, мкм	Время обработки, мин	$R_a$ , мкм
карбид кремния:			
1-й переход	100	4,0	0,38
2-й переход	30	1,0	0,12
лейкосапфир:			
1-й переход	100	1,5	0,41
2-й переход	40	1,1	0,10

эластомерных композиций обладают высокими производительностью и износостойкостью, обеспечивают по сравнению с инструментом для ТАШ на металлическом связующем уменьшение шероховатости обработанной поверхности в 3–4 раза (до  $R_a = 0,05$  мкм), глубины разрушенного слоя в 2 раза, снимаемого припуска на операции полирования в 1,5 раза.

Тонкое шлифование кольцевым алмазным инструментом в “жестких осях” эффективно и при обработке кристаллических труднообрабатываемых материалов. При шлифовании на станке АШ-70К кольцевым инструментом на металлическом связующем в два перехода (зернистости 63/50 и 20/14 мкм соответственно) плоских образцов карбида кремния и лейкосапфира были получены результаты, представленные в табл. 12.

Положительные результаты получены также при ТАШ кольцевым алмазным инструментом полусферической детали из лейкосапфира диаметром 66 мм. Тонкое шлифование в два перехода проводили после предварительной обработки детали кольцевым инструментом с зернистостью алмазного микропорошка 200/160 мкм. Суммарное время обработки составило 6 мин. На 2-м переходе ТАШ снимаемый припуск составил 150 мкм, время цикла – 3 мин.

Основываясь на эффективности и экономической целесообразности обработки оптических поверхностей по методу “жестких осей” в НПО “Оптика” разработаны технологические процессы и кольцевой алмазный инструмент для предварительного и ТАШ плоских ОД и деталей микрооптики.

Полученные результаты в части создания алмазного кольцевого инструмента для обработки ОД по методу “жестких осей” являются основой для дальнейшего поиска решений в направлении разработки инструмента для обработки перспективных оптических материалов, а также постановки на производство кольцевого инструмента полной готовности для обработки ОД на специальных станках с числовым программным управлением и обрабатывающих центрах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов С.А., Овсянников Н.Я., Неклюдов Ю.Г., Альтшуллер В.М., Терентьева О.Ю., Косарева Т.А. Состав алмазного инструмента // Патент России № 2070852. 1996.
2. Синтетические сверхтвердые материалы: в 3-х т. Т. 2. Композиционные инструментальные материалы / Под ред. Новикова Н.В. Киев: Наукова думка, 1986. 264 с.
3. Альтшуллер В.М., Герасимов С.А., Терентьева О.Ю. Алмазный инструмент на каучуковой связке для тонкого шлифования оптического стекла // Оптический журнал. 1994. № 6. С. 53–55.
4. Альтшуллер В.М., Герасимов С.А., Духовской О.И., Подобранный А.В. Состав алмазного инструмента // Патент России № 2356852. 2007.