

УДК 621.9.025.7

## О роли и возможностях инструментов из сверхтвёрдых материалов при обработке деталей радиоэлектроники

© А. В. Балыков, С. И. Сухонос, 2012

Приведены результаты работ по внедрению алмазных инструментов в производстве изделий ЭВМ и системы ПВО С-300 в 1960–80 гг. Показаны основные направления применения инструментов из сверхтвёрдых материалов в настоящее время. Обоснованы особенности обработки деталей из хрупких неметаллических материалов. Описаны преимущества инструмента «МонАлиТ» и его роли в создании «совершенных» производств. Предложены меры по организации применения инструментов из алмаза и эльбора.

**Ключевые слова:** алмаз, кубический нитрид бора – эльбор, хрупкие неметаллические материалы, детали радиоэлектронной аппаратуры, производительность, работоспособность, износостойкость инструмента, технологический уровень.

### Введение

Развитие радиопромышленности в 1960-х гг. было связано [1] с расширением применения новых конструкционных материалов (кварца, керамики, ферритов, ситаллов, стекла и др.), с существенным ростом требований к точности и качеству обработки поверхностей деталей, повышением скоростей и нагрузок, ужесточением требований к работоспособности машин и приборов. Решение этих задач было невозможно без эффективных методов алмазной обработки. История развития этого направления начинается с того момента, когда в 1963 г. в Центральном научно-исследовательском технологическом институте МРП был создан отдел алмазной обработки, экспериментальная мастерская которого была оснащена самым современным оборудованием таких стран, как Япония, Англия, Германия и Швейцария.

В результате проведения исследований были получены новые решения в области технологии алмазной обработки накопителей повышенной плотности ЭВМ типа «Ряд» и «Эльбрус», системы ПВО С-300, кварцевых резонаторов и фильтров, оптоволоконных систем связи и звукозаписывающей аппаратуры специального и бытового назначения.

Так, в начале 1970-х гг. успешно была решена проблема серийного изготовления феррито-ситалловых фазоинверторов для ФАР системы С-300П. Разработана технология серийного производства сборных стержней из ситалла Ø8 мм, длиной 280 мм с нелинейностью по оси

детали не более 0,01мм. Были созданы новые алмазные бесцентровшлифовальные круги Ø400мм, спроектирован станок для алмазной резки стержней [4], межоперационные транспортные средства и средства активного СВЧ-контроля. В условиях Рязанского радиозавода «Красное знамя» производительность увеличилась в 20–25 раз, брак сократился на 50%.

Дальнейшим продолжением работ в рамках системы ПВО С-300 явились исследования по формообразованию отверстий в подложках микросхем из ситалла и поликора. В подложках микросхем в условиях серийного производства обрабатываются отверстия Ø1–6 мм с точностью по 11–12 качеству. Шероховатость поверхности обработанных поверхностей отверстий  $R_a=0,63–1,25$  мкм, сколы не более 0,1 мм. Специальный алмазный инструмент и оборудование отечественной промышленностью и за рубежом не выпускались. При обработке малых диаметров кольцевыми сверлами, даже с внутренним охлаждением, в большинстве случаев керн застревает в полости сверла, поэтому применение кольцевых сверл при обработке отверстий малых диаметров на автоматическом оборудовании неприемлемо.

Для формообразования отверстий Ø1–6 мм были разработаны конструкции и технология изготовления подковообразных алмазных сверл [3] (рис. 1). Сверло [4] с внутренним подводом СОЖ (рис. 1а) состоит из стального корпуса 1 и алмазной части 2. При сверлении (рис. 1б) образуется керн 4, диаметр которого

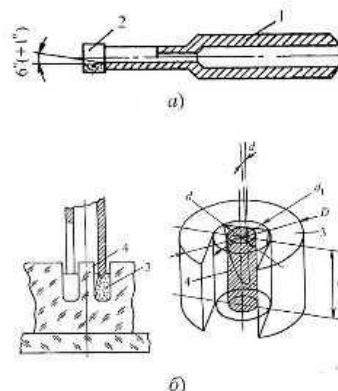


Рис. 1. Оригинальное подковообразное сверло с внутренним подводом СОЖ: а) общий вид; б) схема сверления

меньше внутреннего диаметра сверла. За счет этого керн не заклинивается в сверле, улучшается циркуляция СОЖ, повышается производительность и надежность процесса обработки.

Впервые был разработан станок с ЧПУ [5] для алмазной сверления подложек микросхем (рис. 2). В станке реализованы гравитационный и адаптивный способы подачи инструмента, при которых обеспечивается постоянно осе-



Рис. 2. Общий вид станка мод. УАС-6 для алмазного сверления

вой силы резания при сверлении. Применен высокоскоростной электрошпиндель марки АС-72 на азростатических опорах, отвечающий требованиям высокой частоты вращения и ее стабильности, точности и допущенности, виброустойчивости, жесткости при частоте вращения шпинделя до 72000 об/мин. Станок имел жесткую сварную станину прямоугольной формы. В станине размещены станция подготовки воздуха, станция подачи СОЖ, вакуумная станция, электрооборудование. На станине установлен стол, к литому основанию которого крепится литая траверса. Каретки траверсы и стола перемещаются во взаимно-перпендикулярных направлениях (Y, X) с помощью высокоточных шариковых приводов. Следящие приводы с фотоимпульсными датчиками обратной связи типа ВЕ-178 обеспечивали точность позиционирования не хуже  $\pm 0,01$ мм. Станок был собран полностью из отечественных комплектующих, оснащён системой управления «СФЕРА», системами автоматической настройки по реперным знакам и магазином для автоматической смены инструментов. Награждён двумя золотыми медалями Лейпцигской ярмарки.

На базе разработок по технологии механической алмазной обработки прецизионных деталей радиоаппаратуры были разработаны РТМ и впоследствии ОСТы на следующие технологические операции: точение, выплачивание, резку, сверление, шлифование, доводку и полирование и др., что позволило при создании новейших образцов техники широко применять новые конструктивно-технологические решения. Основной целью дальнейших работ стал полный перевод в последующие годы на алмазную обработку деталей радиоаппаратуры из труднообрабатываемых материалов: кварца, керамики, ферритов, ситалла, деталей из твердых сплавов и закаленных сталей.

Применение алмазов на предприятиях радиопромышленности за 1963–70 гг. возросло более чем в 50 раз.

С распадом СССР рассылались основные технологические оборонные министерства: радиопромышленности, электронной техники и промышленности средств связи. Утрачен потенциал учёных, разработчиков и высококвалифицированных рабочих.





Серьёзно пострадала и станкоинструментальная промышленность. Сегодня производство станков осталось на 3–5 заводах, еле сводящих концы с концами из-за отсутствия заказов. Основной упор делается на поставку импортного оборудования. Это, безусловно, способствует окончательному развалу отечественного станкостроения.

Существенно снизили объёмы основные заводы РФ по производству инструмента из алмазов и кубического нитрида бора, многие крупные заводы оказались за пределами России.

**Основные направления применения алмазных инструментов**

Потребности в абразивных инструментах из алмаза и эльбора в России растут. В общем объёме механической обработки материалов удельный вес обработки неметаллических материалов составляет около 15–20%.

Основными областями применения алмазно-абразивного инструмента при обработке хрупких неметаллических материалов в настоящее время являются:

- радиоэлектроника – пассивные и активные подложки полупроводниковых и функциональных микросхем из ситалла, поликора, кварца, германия, кремния, ниобата лития; резонаторы оптических квантовых генераторов и лазерных гироскопов из ситалла, стержни фазовращателей из феррита и ситалла;
- авиационно-космическая и ракетная техника – головные антенные обтекатели из кварцевой керамики;
- промышленность связи – волоконно-оптические разъемы из стекла и керамики;
- электротехническая промышленность – оболочки приборов, герметичные выключатели, вакуумные разъемы и т. п.;
- атомная энергетика – детали ядерных энергетических установок и газовых турбин;
- приборостроение – датчики, резонаторы и фильтры из кварца, керамики, стекла и ситалла, магнитные головки из феррита и керамики, реакционного кремния.
- нефтегазовое машиностроение – подшипники, уплотнители насосов распределительных станций из силицированного графита и реакционного кремния;

– машиностроение – станины из мрамора и гранита, эталоны из керамики и мрамора, подшипники, гильзы и поршни из керамики, рубина, силицированного графита и композитов и многие другие.

Для обеспечения растущих потребностей в изделиях различного назначения из неметаллических материалов необходимо создание мощной отечественной базы по их механической обработке.

**Особенности обработки хрупких неметаллических материалов**

По сравнению с пластической обработкой металлов при обработке хрупких неметаллических материалов согласно закону Гука преобладает процесс хрупкого разрушения.

В настоящее время Теория Гриффитса – Ирвина является основной для описания процессов трещинообразования при механической обработке хрупких неметаллических материалов, однако существуют и разрабатываются новые критерии трещинообразования и показатели процесса хрупкого разрушения.

Мерой трещиностойкости является [6] критический коэффициент интенсивности напряжений  $k_{IC}$ , который пропорционален критическому напряжению, при котором происходит образование трещины длиной  $C_I$ :

$$k_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi \cdot C_I},$$

где  $\sigma_c$  – критическое напряжение образования трещины. Для определенного материала  $k_{IC}$  – величина постоянная, устанавливаемая экспериментально.

Исследования [7] по изучению разрушения хрупких неметаллических материалов проводились на пластинах из монокристаллического кварца (рис. 3), шлифованных алмазными кругами. Образцы, полученные методом оптического контакта, просматривали на микроскопе МБИ-6 и электронном микроскопе «GEM 6A». Показано, что в основе хрупкого разрушения кварца связанным абразивом лежит образование микротрещин, выявляющихся концентраторами напряжений.

В результате сравнений данных рентгенографических исследований, растровой

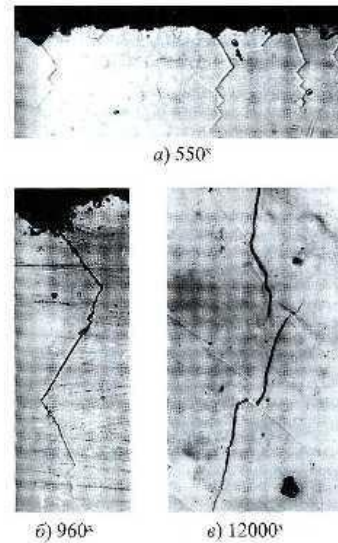


Рис. 3. Профиль поверхности кварцевой пластины среза  $\alpha\text{-SiO}_2$  (а), микроструктурная микротрещина (б), электронная фотография ближней части трещины (в)

и трансмиссионной электронной микроскопии можно сделать следующие выводы о строении нарушенного слоя. Во время шлифования на поверхности возникает рельеф с поликристаллической структурой. Его толщина определяет высоту микронеровностей  $R_a$ . Непосредственно под рельефом находятся трещины и дислокационные скопления, которые определяют толщину трещиноватого слоя. Второй слой гораздо более протяженный, чем первый. Кристаллографическая структура трещиноватого слоя – мозаичная. Плотность и размер трещин уменьшаются с глубиной.

Ниже трещиноватого слоя находится микропластичный слой, окружающий каждую трещину и распространяющийся на расстояние 1–2 мкм.

Для условий контактных деформаций упругих тел Герцем был разработан закон [8], экспериментально подтвержденный Ауэрбахом, согласно которому

$$P_{кр} = B \cdot r,$$

где  $P_{кр}$  – критическая нагрузка при образовании микротрещины в хрупком материале;  $r$  – радиус вдавливаемого индентора (зерна);  $B$  – постоянная Ауэрбаха.

Закономерности упругой деформации Ауэрбаха без видимых пластических последствий действительно для инденторов с радиусами от 10 мкм до 1 см, то есть находится в области диапазона зернистостей алмазных инструментов, применяемых для изготовления деталей из неметаллических материалов, потому действие этого закона можно распространить на процессы механической размерной обработки неметаллических материалов. Величина силы резания зависит от размера абразивного зерна. Чем больше радиус абразивного зерна, тем большую силу надо приложить для скалывания (диспергирования) микроэлиты с поверхности, тем больше будет величина микроскопов и глубина трещиноватого слоя.

Процесс работы единичного зерна (рис. 4) можно представить следующим образом. Зерно, заглубленное в металлическую связку на определенную глубину, совершает сложное движение вглубь обрабатываемого материала.

Основным действующим фактором, обеспечивающим диспергирование поверхности, является осевая сила резания  $P_y$ , которая создаст напряжения в материале, зерне и связке. Исследованиями установлено, что в начальный момент времени алмазное зерно скользит по материалу детали, затем наблюдается упругая деформация. Так как процесс деформирования поверхности представляет собой хрупкое разрушение, то, как только напряжения в материале детали достигают критической величины, происходит скалывание некоторой части материала.

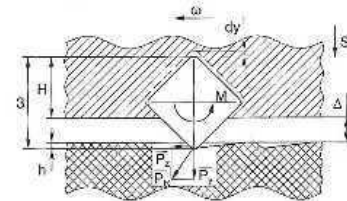


Рис. 4. Схема, поясняющая работу единичного зерна







В дальнейшем процесс повторяется, имеет циклический характер с частотой, определяемой несколькими факторами: размером единичного скола, прочностью обрабатываемого материала, наличием поверхности раздела фаз материала детали (дислокаций на пути движения зерна), скоростью резания и величиной подачи.

На основании выполненных исследований и законов Гука, Гриффитса и Герца следует вывод, что размерная обработка неметаллических материалов без разрушения детали возможна только совокупностью мелкоразмерных частиц, каковыми и являются абразивные инструменты в виде свободного (паст и суспензий) и связанного (кругов) абразивов. Причём при всех видах абразивной обработки на поверхности любой детали из хрупких неметаллических материалов будет существовать нарушенный (дефектный) слой.

Характер и величина нарушенного слоя будет зависеть от зернистости и марки абразива, кинематики процесса обработки и физико-механических свойств материала.

Подтверждением зависимости диспергирования поверхности хрупких неметаллических материалов от силы резания являются опыты [9], проведенные на специальном стенде со стабилизацией осевой силы резания. На рис. 5 представлены записи сигналов акустической эмиссии (АЭ) для частот 100 и 200 кГц, величины подачи и осевой силы резания при сверлении плат из ситалла толщиной 1 мм подковообразными сверлами Ø3 мм из алмазов АС20, зернистостью 100/80, концентрацией 100%, изготовленными методом порошковой металлургии. Процессы реализованы в условиях адаптивной системы управления с рабочими стабилизируемыми осевыми силами резания  $P_{\text{з}}$ , равными 35 Н и 50 Н.

Величина вертикальной подачи регулируется от 0 до 10 мм/мин. На графиках прослеживается изменение сигналов АЭ во времени, причем эти изменения различны для частот 100 и 200 кГц. В первом случае (рис. 5а) при осевой силе 50 Н процесс сверления обеспечивается при постоянной подаче, равной для установившегося режима 10 мм/мин, постоянной силе резания и постоянной амплитуде АЭ. Во втором случае (рис. 5б) при осевой силе 35 Н отсутствует сьем, идет флуктуация силы резания, наблюдается затухание параметров АЭ вследствие отсутствия

процессов микрорезания. Такой ход процессов создан искусственно. Он вполне закономерен, так как во втором случае величина стабилизирующей силы резания  $P_{\text{зд}}$  меньше критической расчетной силы резания  $P_{\text{ур}}$ , вызывающей разрушение материала, равной для данного случая 40 Н. Для обеспечения диспергирования поверхности обрабатываемого материала стабилизируемая осевая сила резания должна быть больше критической силы резания, соответствующей порогу хрупкого разрушения материала.

В результате исследований выявлены закономерности диспергирования поверхности обрабатываемого материала и изнашивания режущей поверхности алмазных кругов, и установлены связи между их физико-механическими свойствами и силой резания. Для обеспечения диспергирования поверхности детали и повышения износостойкости алмазного инструмента необходимы следующие условия.

Величины напряжений резания, создаваемые единичным алмазным зерном в обрабатываемом материале, должны быть больше его

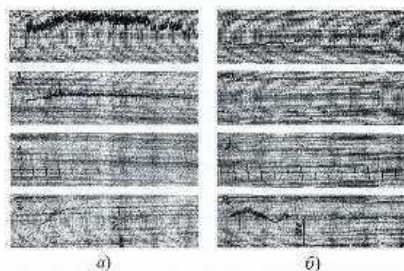


Рис. 5. Записи силы резания, величины подачи и акустикограмм: а) при  $P_{\text{з}}=50$  Н, б) при  $P_{\text{з}}=35$  Н

предела прочности при хрупком разрушении. Это соотношение с учетом сил резания и площадей контакта может быть записано в следующем виде:

$$\sigma_{\text{д}} \geq \sigma_{\text{р}} \rightarrow \sigma_{\text{д}} \cdot F_{\text{к}} \geq \sigma_{\text{р}} \cdot F_{\text{к}} \rightarrow P_{\text{зд}} \geq P_{\text{ур}}$$

где  $\sigma_{\text{р}}$  – предел прочности хрупкого разрушения материала;  
 $\sigma_{\text{д}}$  – напряжения, создаваемые на материале и зерне;

$P_{\text{д}}$  – действующая сила резания;  
 $P_{\text{ур}}$  – критическая сила резания, соответствующая порогу разрушения материала.

### Новый алмазный инструмент «МонАлиТ»

Конструкционные хрупкие неметаллические материалы – кварц, керамика, ферриты, ситаллы, стекло, драгоценные и полудрагоценные камни, граниты и мрамор – отличаются высокой твердостью, прочностью, износостойкостью, повышенной хрупкостью и плохой обрабатываемостью.

Процессы механической обработки деталей из неметаллических материалов: резка, сверление и зенкерование отверстий, глубинное шлифование по целому (фрезерование), координатное и профильное шлифование кромки и факета, гравирование – проходят в экстремальных условиях полного контакта режущей поверхности с обрабатываемой деталью, в которых традиционные алмазные инструменты типа «Sinter» в ряде случаев исчерпали свои возможности.

Отсутствие необходимых алмазных и алборовых инструментов создает проблемы при обработке новых материалов, что становится существенным препятствием к их внедрению.

Решение этой проблемы лежит на пути внедрения новейших технологий изготовления алмазного инструмента, в частности, инструмента нового поколения «МонАлиТ» [10], имеющего оптимальное соотношение цена-ресурс. Отечественное производство было создано в 1992 г., освоено и внедрено более 1000 новых видов инструмента и в настоящее время «МонАлиТ» имеет постоянных заказчиков в таких странах, как Германия и Испания.

Традиционно при изготовлении сложно-профильных изделий из неметаллических материалов в большинстве случаев применяют только металлические связки как наиболее прочные, износостойкие и обладающие хорошей теплопроводностью.

На рис. 6 для сравнения представлены основные особенности и возможности металлических связок, широко применяемых для изготовления алмазных профильных кругов и головок. Круги на гальванической связке имеют 1 слой алмазов. Расчет количества слоев алмазов для

связок М1 и М произведен для высоты алмазосодержащего кольца, равной 3 мм.

Алмазные круги, известные как гальванические, изготавливают на связке, основу которой составляет никель, методом гальваностегии и гальванопластики. Они имеют развитый рельеф, но низкую стойкость и все реже применяются на практике.

Большое распространение в производстве алмазных кругов получил метод порошковой металлургии, заключающийся в прессовании, спекании и горячей допрессовке алмазосодержащей смеси. Широко применяющаяся связка М2-01 (М1) состоит из олова и меди. Температура спекания этой связки составляет 660–680°C. В связке М1 зерна механически удерживаются до их затупления. Круги, изготовленные методом порошковой металлургии, имеют хорошую работоспособность, но относительно невысокую кромчостойкость. Производительность ограничена из-за возможности возникновения потери формы.

Причинами низкой стойкости и, особенно, кромчостойкости кругов на связке М2-01 является недостаточная сила удержания алмазных зёрен в матрице инструмента.

На фирме «РусАтлант» разработана технология изготовления инструмента на связке «МонАлиТ» М с концентрацией алмазов до 200–250% (около 62,5% объемной концентрации). Алмазные инструменты «МонАлиТ» производятся методом пропитки в неметаллических пресс-формах в ва-



Рис. 6. Ресурс алмазных кольцевых сверл Ø6 мм, изготовленных с примесью различных типов связок





кууме. Сущность метода заключается в соединении металлизированных алмазных зёрен расплавом связки. Алмазные зёрна предварительно металлизуются никелем Ni, титаном Ti или молибденом Mo. Известно, что эти металлы обладают высокой адгезионной способностью к алмазу и их соединение приводит к образованию карбидов. Далее эти покрытия взаимодействуют с элементами связки: медью, никелем, марганцем, в результате чего происходит образование новых фаз на контактных границах и способствует существенному повышению эксплуатационных свойств алмазно-абразивного инструмента.

Форма с засыпанными алмазами помещается в вакуумную печь, где при температуре свыше 1000°C происходит заполнение оставшегося свободного пространства сплавом и диффузионная сварка металлизированных зёрен друг с другом (рис. 7).

При сварке алмазных зёрен в вакуумной среде при температуре около 1000°C между зёрнами и связкой возникают хорошие адгезионные связи, повышается термостойкость. Предельная, до 250%, концентрация и монолитная упаковка алмазов, особенности технологии позволяют изготавливать инструмент любой формы с размерами от 0,8 мм и больше. Технология изготовления обеспечивает одинаковую работоспособность инструмента «МонАлиТ» по всему объёму режущей части.

Созданный таким образом алмазный инструмент на связке «МонАлиТ» сочетает в себе не только хорошие режущие свойства гальванического инструмента и долговечность пресованного, но и имеет ряд преимуществ:

- высокую кромкостойкость и износостойкость;
- стабильность режущих свойств за счет многократного обновления алмазного слоя (эффект самозатачивания);
- возможность кратковременной работы без охлаждения.

#### Примеры применения инструментов «МонАлиТ»

Одним из важнейших элементов современных скоростных ракет, управляемых методом радиолокационного наведения на цель, является головной радиопрозрачный антенный обтекатель из кварцевой керамики, имеющий форму сложнопрофильной оболочки вращения двойной кривизны.

Пеленгационные ошибки антенна-обтекатель обусловлены влиянием точности формы, разнотолщинности стенок, стабильности номинальных размеров, качества поверхности обтекателя. При механической обработке обтекателя на Обнинском научно-производственном предприятии «Технология» возник ряд проблем:

- быстрый износ алмазных кругов и, особенно, «головных» алмазных головок с радиусом сферы R 4,5 мм;
- низкая производительность шлифования;
- появление магистральных трещин на поверхности оболочки;
- неравномерность сил резания в процессе обработки, что являлось причиной разрушения заготовки при механической обработке.

Основной причиной являлась низкая износостойкость и кромкостойкость алмазных кругов и головок. По заданию предприятия были разработаны специальные алмазные круги и головки 6 типов, освоено их серийное производство, проведены исследования [11] по определению максимально-допустимых сил резания с учётом режимов шлифования для разных зон работы инструмента при шлифовании керамических сложнопрофильных оболочек двойной кривизны без разрушения. Разработан процесс изготовления кварцевокерамических обтекателей с применением алмазного шлифования без разрушения и образования микротрещин. Производительность обработки повысилась в 5,5 раза.

По инициативе Раменского приборостроительного завода, начиная с 2009 года,

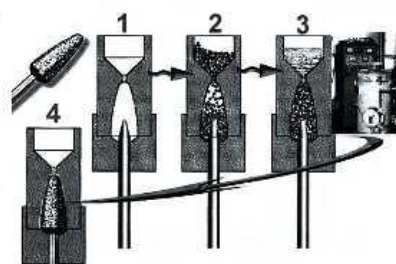


Рис. 7. Технологический маршрут изготовления инструмента «МонАлиТ»

предприятие Рус-Атлант успешно проводит совместные работы по внедрению новых инструментов «МонАлиТ» из алмазов и эльбора.

Разработан и изготовлен комплект в составе 20 специальных инструментов для обработки корпусов лазерных гироскопов из ситалла. Успешно работают высокоскоростные алмазные сверла и фрезы Ø1,3; Ø2,55; Ø3,9 и др. при формообразовании паутины отверстий в ситалле. Разработка новых конструкций кольцевых алмазных сверл диаметром Ø2,58...3,6 мм позволила обрабатывать отверстия на глубину 100 мм. Применение нового инструмента обеспечило повышение стойкости в 20 раз, производительности обработки в 2–5 раз, при высоком качестве получаемых изделий.

Разработаны и внедрены в инструментальном производстве РПЗ кромкостойкие резбозащитные головки из эльбора для внутреннего планетарного шлифования по целому резбовых колец из закаленных сталей ШХ-15 диаметром от 8 мм с различными шагами. Производственные испытания на станке с ЧПУ *Ultramat CNC 650* фирмы *Jones&Shipman* (Англия) показали:

- повышение стойкости инструмента в 16–18 раз;
- повышение производительности обработки в 12 раз;
- отклонение точности обработки профиля калибров-колец по среднему диаметру – 12 мкм.

В настоящее время в радиоэлектронике и приборостроении нашли применение новые



Рис. 8. Установка для исправления угла среза монокристаллов

пьезоэлектрические кристаллы лантангаллиевого силиката (лангасита, ЛГС) и лантангаллиевого танталата (лангатата, ЛГТ), для изготовления на их основе фильтров, резонаторов, датчиков давления и вибрации, работоспособных до температур в 950°C. Разработанные на основе лангасита фильтры на объемных волнах обладают высокой конкурентоспособностью по сравнению с аналогичными фильтрами на основе кварца.

В качестве чувствительных элементов для датчиков давления и вибрации используются диски (рис. 9) с внешним диаметром от 6 до 15 мм, внутренним диаметром от 3 до 6 мм и толщиной от 0,15 мм. Точность по наружному и внутреннему диаметрам составляет 0,01–0,05 мм, отклонение от плоскопаральности не более 0,005 мм. Не допускаются сколы по кромкам.

Одной из трудоемких операций является обработка внутреннего диаметра. Формообразование точных отверстий по целому – весьма трудоемкий процесс и складывается из операций сверления и последующего шлифования. В общем случае при использовании алмазных сверл достигается точность обработки отверстий по 9–12 качеству. При сверлении деталей из стекла, ситалла, феррита с оптимальными условиями резания шероховатость поверхности достигает  $Ra = 1,1–1,9$  мкм. Критериями, по которым оценивается качество поверхности, являются ширина боковых сколов, шероховатость поверхности и связанные с ними характер и глубина нарушений поверхностного слоя. При соблюдении технологических условий величина сколов по краям отверстий ограничена 0,05–0,15 мм. Для получения отверстий без сколов в дисках датчиков давления и вибраций из лангатата по 6–8 качествам применяются финишные операции круглого внутреннего алмазного шлифования.

#### Заключение

Из рассмотренных примеров видно, что применение новых конструктивных хрупких, твердых, неметаллических материалов стало возможным благодаря внедрению процессов алмазной обработки, разрабатываемых на основе инструментов «МонАлиТ».

В настоящее время радиоэлектронные предприятия ОПК России по уровню своего







Рис. 9. Чувствительные элементы для датчиков расстояния и вибрации из лангата

технологического развития находятся в четвертом технологическом укладе, либо на начальной стадии пятого технологического уклада, а соответствующие отрасли в промышленно развитых странах – на начальной стадии шестого технологического уклада [12].

Для преодоления этого разрыва необходимо принятие инновационных решений при создании современных и перспективных комплексов для ВКО России. В сформированном облике «совершенного» предприятия второстепенно занимает группа «процессы и оборудование». Важнейшей цементирующей частью этой группы является технология, основанная на применении абразивных и лезвийных инструментов из сверхтвёрдых материалов: алмаза и кубического нитрида бора.

#### Список литературы

1. Технология для систем связи и радиотехнических систем // Под ред. В.Д. Житковского, В.В. Жиликова, В.Д. Капуна. М.: ОАО «ЦИТИ «Техномаш», 2008 г.
2. Рура М. А., Бальков А. В., Войнов В. А. Алмазная обработка магнитных головок с керамическими корпусами для дисковых накопителей ЭВМ.// М.: НИИЭИР, «Вопросы радиоэлектроники», сер. ГПУ, вып. 2, 1972 г.
3. Бальков А. В., Кутейников В. Е., Немецлов А. Ф. Оборудование для точения основы

магнитных дисков алмазными резцами // Алмазы и сверхтвёрдые материалы, 1975, вып. 10.

4. Бальков А. В., Сатонкин Л. М. Автомат для резки неметаллических материалов. Авторское свидетельство № 555021, бюл. 15, от 25.04.77.

5. Бальков А. В., Цесарский А. А. Алмазные сверла с подковообразным профилем рабочей части // Алмазы, 1973, № 1, с. 8–10.

6. Батров Е. И., Бальков А. В., Нурмухамедов В. Х. Алмазное сверло. Авторское свидетельство № 1209459 от 08.10.1980.

7. Бальков А. В., Батров Е. И., Миткевич С. Б. Многошпиндельный станок. Патент РФ № 1839745, от 30.12.93 г.

8. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения твёрдых тел // Профессия, 2004.

9. Бальков А. В. О некоторых закономерностях алмазного шлифования хрупких неметаллических материалов.// Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу, ч.2. К.: Наук. Думка, 1977, с. 171–181.

10. Карбат В. И., Борзаков Ю. И. Обработка монокристаллов в микроэлектронике //М.: «Радио и связь», 1988, с.104.

11. Бальков А. В., Алмазное сверление отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов.// М.: Наука и технология, 2003, с. 187.

12. Сухонос С. И. Патент № 2319601 от 14.02.2006 «Абразивный инструмент повышенной концентрации зерен».

13. Меньщиков В. В. Концерн ПВО «Алмаз – Антей» на пути инновационного развития // Вестник Концерна ПВО «Алмаз – Антей», 2011, № 2 С. 3–9.

Поступила: 17.02.2012

**Бальков Александр Викторович** – д-р техн. наук, технический директор ООО «РусАтлант», профессор кафедры инструментальной техники и технологии формообразования МГТУ «Станкин».

Область научных интересов: обработка инструментами из сверхтвёрдых материалов, алмазно-абразивная обработка деталей из хрупких неметаллических материалов, технология радиоэлектронной аппаратуры.

**Сухонос Сергей Иванович** – канд. техн. наук, генеральный директор ООО «РусАтлант», г. Москва.

Область научных интересов: алмазно-абразивная обработка, масштабный эффект, системный анализ.

Алмазный инструмент  
Almaz

