

**Ю.В. Зиберт**

**Y.V. Zibert**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

### **PROCESSING OF CERAMIC MATERIALS**

Рассмотрены наиболее распространенные виды керамики, их физико-механические свойства. Показана область применения керамики на основе оксида циркония. Описаны методы обработки хрупких материалов, в частности керамики.

**Ключевые слова:** керамика, физико-механические свойства, электроэрозионная, электрохимическая, ультразвуковая, гидродинамическая, лазерная обработка, абразивная обработка, диоксид циркония.

The most common types of ceramics and their mechanical and physical properties. Shows the scope of ceramics based on zirconium oxide. Describes the methods for processing fragile materials, such as ceramics.

**Keywords:** ceramics, phisico-mechanical properties, electroerosion, electrochemical processing, ultrasonic processing, hydrodynamic processing, laser processing, abrasive processing, zirconium dioxide.

Развитие современного машино- и приборостроения связано с разработкой и внедрением новых материалов и прогрессивных технологических процессов их обработки. Керамические материалы находят широкое применение в различных областях техники. Уникальные свойства керамики позволяют использовать ее в качестве режущего инструмента, деталей машин, приборов, радиоэлектронной аппаратуры.

Керамика – это поликристаллические материалы и изделия из них, состоящие из соединений неметаллов III–VI групп периодической системы с металлами или друг с другом и получаемые путем формования и обжига соответствующего исходного сырья. Исходным сырьем могут служить как вещества природного происхождения (силикаты, глины, кварц и др.), так и получаемые искусственно (чистые оксиды, карбиды, нитриды и др.) [1]. Керамические материал состоит из нескольких фаз. Основными фазами являются кристаллическая и стекловидная.

Кристаллическая фаза определяет характерные свойства керамического материала и представляет собой химические соединения или твердые растворы этих соединений. Основные физические свойства керамики – электрические, пьезоэлектрические, магнитные, температурный коэффициент линейного расширения, механическая прочность – во многом зависят от особенностей кристаллической фазы.

Стекловидная фаза находится в керамическом материале в виде прослоек, связывающих кристаллическую фазу. Количество стекловидной фазы и ее состав определяют в основном технологические свойства керамики – температуру спекания, степень пластичности керамической массы при формовании. Количество стеклофазы может достигать 60 об. %. В керамике конструкционного и инструментального назначения наличие стеклофазы недопустимо, так как это приводит к деградации прочностных характеристик материала. Также от содержания стекловидной фазы зависит степень пористости. Поры ухудшают свойства керамики, особенно при повышенной влажности. В то же время в некоторых видах керамики пористость задается и формируется целенаправленно (керамические фильтры). В технологии других керамик, например огнеупорных, допускается определенная пористость, не влекущая за собой заметного снижения эксплуатационных свойств изделий. Преимуществом керамики является возможность получения заданных характеристик путем изменения состава массы и технологии производства.

Свойства изделий из керамики определяются составом и структурой материалов, режимами технологического процесса изготовления, причем набор показателей материала служит основой при выборе области применения. Рассмотрим классификацию керамики в зависимости от химических признаков, области применения и технологии изготовления. По признаку преобладающей кристаллической фазы керамика подразделяется на следующие классы [2]:

- оксидная керамика (корундовая, циркониевая, бериллиевая, кальциевая) обладает повышенными термостойкостью, теплопроводностью и механической прочностью. Диэлектрические свойства керамики вплоть до сверхвысоких частот стабильны, а диэлектрические потери весьма малы;

- силикатная и шпинельная керамики применяются в электротехнической промышленности для изоляционных конструкций (магнезиальная, циркониевая);

- титаносодержащая керамика (на основе двуокиси титана и титанита бария) нашла широкое применение в радиоэлектронике для конденсаторов и полупроводниковых приборов, использующих высокую диэлектрическую проницаемость, низкие потери и удовлетворительную температурную зависимость диэлектрических свойств;

– бескислородная керамика (карбиды, нитриды, бориды, силициды) очень устойчива к окислению при высоких температурах;

– стеклокристаллическая керамика (ситаллы и сиконды).

По области применения можно разделить керамику на следующие виды:

– конструкционная керамика для огнеупорных, химически и радиационно стойких деталей, изделий машино- и приборостроения;

– электротехническая керамика (для изоляторов и других изделий электротехники);

– радиоэлектронная (для установочных деталей, конденсаторов, магнитных элементов изделий радиоэлектроники и радиотехники).

Производительность процесса обработки (шлифование и доводка), точность и качество полученной поверхности деталей в значительной степени зависит от физико-механических свойств керамических материалов. К числу этих свойств относятся твердость, хрупкость, упругость, прочность, термостойкость и пористость [3].

В таблице представлены в обобщенном виде некоторые физико-механические свойства керамики по данной классификации [4].

Физико-механические свойства керамики

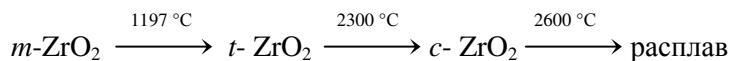
Параметры	Оксидная керамика	Силикатная керамика	Титанатная керамика	Шпинели	Бескислородная керамика	Ситаллы
Предел прочности, кгс/см <sup>2</sup> : при статическом изгибе	1100–4000	700–2800	500–2000	1200–1500	1500	800–2000
при растяжении	1000–1700	3500–700	–	1500	–	–
при сжатии	12 000–21 000	2000	2000–4000	20 000	22 500	–
Предел прочности при ударном изгибе, кгс·см/ см <sup>2</sup>	2,2–5,0	1,5–3,5	0,8–1,2	1,0–1,5	2–4	–
Модуль упругости $E \cdot 10^{-6}$ , кгс/ см <sup>2</sup>	1,7–4,0	0,7–1,1	0,8–1,8	2,8–2,5	2,0–3,5	0,7–1,5
Термический коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1 <sup>-6</sup> /°C	5,5–13,8	0,5–9,5	3–12	5–10	2–5	3–10
Термостойкость, °C	850–1500	150–1000	100–250	200–450	800–1600	100–300
Удельная теплопроводность $c \cdot 10^3$ , кал/(см·с·°C)	4–500	4–45	3–25	15–36	–	5–13

Окончание таблицы

Параметры	Оксидная керамика	Силикатная керамика	Титанатная керамика	Шпинели	Бескислородная керамика	Ситаллы
Огнеупорность, °С	2000–2400	1600	1500	2600	1700–3880	1000
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	$10^{15}$	$10^{13}$ – $10^{15}$	$10^{12}$ – $10^{13}$	$10^{12}$ – $10^{14}$	–	$10^{12}$
Диэлектрическая проницаемость	6,5–10	6,5–8	12–50 000	7,5–8,0	–	10–1000
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	70–130	100	300–3000	–	–	–
Пробивная прочность, кВт/мм	50	30–40	2–20	10–20	–	50–200
Твердость по Моосу, баллы	8–9	4,5–6	5–8	4–7	9,2–9,5	6

Керамику на основе диоксида циркония до настоящего времени применяли для получения твердых электролитов, сталеразливочных стаканов, огнеупорных теплоизоляционных материалов. Модуль упругости этой керамики меньше, чем у прочих оксидных материалов. Ее спецификация в связи с этим заключается в высоких сопротивлениях разрыву и тепловому удару, в химической стабильности при высоких температурах. В настоящее время расширяется область применения этой керамики [5].

Диоксид циркония представляет собой солеобразующий оксид, проявляющий амфотерность, валентность III–IV, бесцветные кристаллы,  $t_{\text{пл}} = 2715^{\circ}\text{C}$ . Нерастворим в воде и водных растворах, большинстве кислот и щелочах, однако растворяется в плавиковой, концентрированной серной кислотах, в расплавах щелочей и расплавах стекол [6]. Особенностью диоксида циркония является его полиморфизм. Чистый  $\text{ZrO}_2$  при комнатной температуре находится в моноклинной фазе и при нагреве испытывает фазовые превращения:



( $m$ -,  $t$ -,  $c$ - $\text{ZrO}_2$  – моноклинная, тетрагональная, кубическая модификации  $\text{ZrO}_2$ )

Керамические материалы на основе  $\text{ZrO}_2$  обладают уникальным комплексом свойств: высокой температурой плавления, стойкостью к коррозии,

износу, низкой теплопроводностью, высокими прочностью и вязкостью разрушения, что обусловлено эффектом трансформационного упрочнения. В настоящее время данному виду керамики посвящено большое количество публикаций. Это вызвано тем, что оксид циркония в зависимости от метода синтеза порошка, исходных материалов, вида стабилизирующей добавки, способа консолидации может значительно изменять свои свойства [7, 8]. Использование его в качестве упрочняющей добавки в другие керамические материалы позволяет получить композиционные материалы с повышенной вязкостью, что особенно актуально для керамики [9, 10]. Применение наноразмерных порошков диоксида циркония дает возможность не только снизить температуру спекания керамики по сравнению с обычными порошками и сохранить наноструктуру, но и получить изделия из керамики в условиях сверхпластической деформации.

Керамика на основе оксида циркония достаточно давно применяется в космической и оборонной технике, а в настоящее время такую керамику стали широко применять в химической и нефтегазовой промышленности, в авиационной и ракетной технике, для нанесения теплозащитных покрытий, в изготовлении эндопротезов тазобедренного сустава, в стоматологии [11, 12]. Из такой керамики изготавливают огнеупорные изделия, конструкционные детали, термопокрытия, светопроницаемую керамику, вариаторы в области сильных токов (грозоразрядники), нагревательные элементы, которые можно применять при высокой температуре, несмотря на окисление и открытую окружающую рабочую среду.

В настоящее время существует несколько способов механической обработки керамики: электроэрозионная и электрохимическая, ультразвуковая, гидродинамическая и лазерная обработка, но основным видом механической обработки является абразивная обработка (алмазное шлифование) [13].

Применение алмазного шлифования целесообразно для обработки германия, кремния, стекла, кварца, керамики и твердых сплавов. Особенность алмазного шлифования состоит в малом износе и высокой стойкости инструмента [14]. Механическая обработка, особенно доводка, зависит от свойств керамики, таких как твердость, хрупкость, прочность, пористость, состояние поверхности, термостойкость, и от свойств абразивного материала и инструмента. Механическую обработку керамики путем шлифования (доводки) часто выполняют в три стадии: черновая, чистовая и доводочная (рис. 1).

Эти стадии отличаются количеством сошлифованной керамики и состоянием ее поверхности [2]. На первой стадии сошлифовывается до 80 % подлежащего удалению материала, причем обработка ведется на повышенных скоростях крупнозернистым инструментом, в результате чего на поверхности остаются глубокие риски и сколы. Припуск в размере детали может

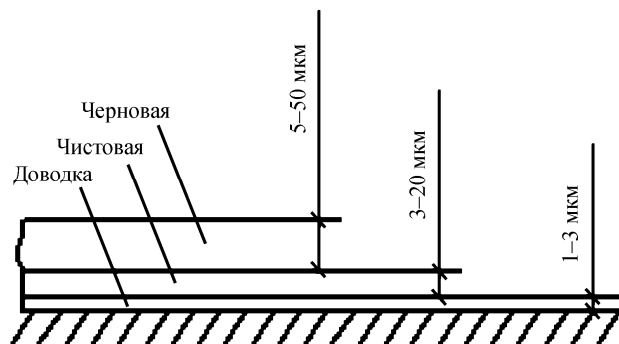


Рис. 1. Стадии механической обработки керамики

составлять 0,3–0,5 мм, бывает одно- и двухсторонним и зависит от размеров детали.

На второй стадии шлифования объем сошлифованного материала уменьшается, шероховатость поверхности также уменьшается, так как вторая стадия обработки ведется абразивным инструментом с более мелким зерном.

Третья стадия – доводка до номинального размера – обычно производится шлифовальными алмазными микропорошками нужной зернистости. Часто после операции доводки, если необходимо, проводят полирование поверхности, при котором достигается класс точности 1–3 и низкая шероховатость.

Для операций доводки керамики в зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности, применяют главным образом синтетические алмазные микропорошки в виде паст различной зернистости и притиры из различных материалов. По ГОСТ 16877–71 выпускают пасты зернистости от 60/40 до 1/0 мкм. Более крупная зернистость для доводки неэффективна, так как не обеспечивает повышения производительности. Компоненты неабразивной части пасты ГОСТом не регламентированы, чаще всего применяют стеарин (15–30 %), олеиновую кислоту (30–60 %), веретенное масло, являющиеся поверхностно активными веществами. В состав пасты входят также связующие вещества. Последние не должны иметь резко неприятного запаха и не должны быть токсичными. Пасты по консистенции изготавливают мазеобразными (М) и твердыми (Т). По смываемости основы пасты различают: смываемые водой (В), органическими растворителями (О), водой и органическими растворителями (ВО). Для обработки керамики оптимальными являются высокие концентрации алмаза в пастах (П) по той причине, что керамика является твердым, труднообрабатываемым материалом. Пасты для обработки керамики следует применять водорастворимые, чтобы обеспечить пожарную безопасность [4].

Доводочные станки обеспечивают рабочее движение путем комбинации двух-трех вращательных или поступательных движений. По кинематическому признаку и связанной с ним степени универсальности плоскодоводочные станки можно разделить на три группы:

- 1) станки с неподвижными притирами,
- 2) станки с вращательным движением притира,
- 3) станки с колебательным движением притира.

Станки с неподвижными притирами в основном применяются при доводке плоскопараллельных концевых мер длины. К ним относятся: двухдисковый станок конструкции завода «Калибр» и станок конструкции Д.С. Семенова.

Станки с вращательным движением притира более универсальны и могут применяться как для доводки, так и для полировки, поэтому получили широкое распространение. До сих пор в промышленности находят применение несколько схем плоской доводки (рис. 2) с использованием свободного и связанного абразива.

Наиболее простой по кинематике является схема доводки на станке типа ЖК 1409 (рис. 2, а). Принудительно вращается лишь притир 1, а планшайба 2 приводится во вращение только за счет сил трения [4].

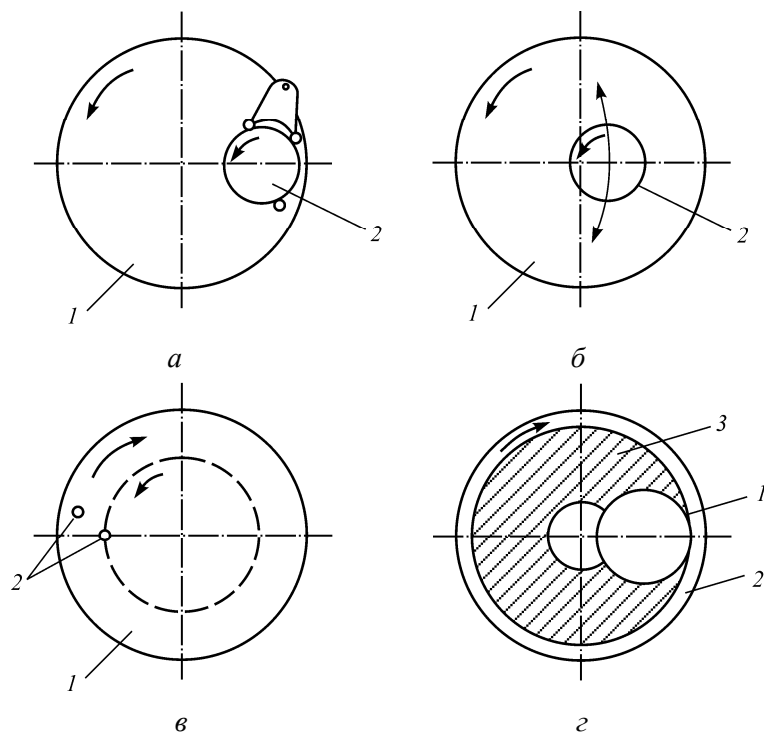


Рис. 2. Схема доводки заготовок керамики на станках:  
а – ЖК-1409; б – ШП; в – С-15; г – СПШ-1

Наиболее распространенной является схема доводки на станке типа ШП (рис. 2, б). Дисковый притир 1 имеет принудительное вращение, а планшайба 2 с наклеенными заготовками вращается за счет сил абразивного трения и совершает колебания относительно оси, находящейся за пределами притира. Прижим планшайбы к притиру регулируется. Данная схема широко распространена в оптической промышленности и является в некотором смысле классической. Недостаток ее – низкая производительности вследствие малых скоростей доводки, что является даже преимуществом при необходимости мягких режимов.

Производительной является схема доводки на широко применяемом в часовой промышленности станке типа С-15 (рис. 2, в). Дисковый притир 1, как и в первом случае, вращается принудительно. Планшайбы с деталями 2 имеют возможность вращаться вокруг некоторой оси, находящейся в пределах площади притира, и вращаться за счет абразивного трения вокруг собственной оси. Наибольшая производительность доводки достигается на станках типа СПШ-1 или СПШП-1 (рис. 2, г). Планшайба 2 с заготовками 3 устанавливается на шпинделе стола, а сверху на детали опускается вращающийся притир 1.

Станки с вращающимися притирами в силу простоты конструкции и универсальности получили более широкое распространение. Основными достоинствами данной кинематики является возможность обеспечения повышенных скоростей обработки при равномерном распределении абразивного материала. К недостаткам можно отнести неравномерность износа вследствие неравенства линейных скоростей и использование только 1/3 диаметра инструмента из-за нулевой скорости в центре притира.

Одним из направлений повышения эффективности абразивной обработки является усложнение траектории относительного движения инструмента и детали. Установлено, что сложное рабочее движение способствует повышению качества и производительности обработки, так как создает благоприятные условия для более полного использования режущей способности и равномерного износа инструмента [15].

Станки с колебательным движением притира наиболее универсальны, на них можно обрабатывать детали любой конфигурации и с размерами, соизмеримыми с диаметром притира. К такой группе относятся станки с циклоидальной и растровой траекторией рабочего движения инструмента, опытные образцы которых разработаны и изготовлены в ПНИПУ. Станки предназначены для односторонней доводки методом намазки абразивной смеси прецизионных плоских поверхностей. Они позволяют обрабатывать как отдельные детали, так и партии деталей в многоместных приспособлениях и кассетах, а также осуществлять взаимную правку притиров [16–18].



Электроэрозионная обработка (ЭЭО) позволяет обрабатывать материалы высокой прочности и твердости, как электропроводящую керамику, так и неэлектропроводную. Электроэрозионная обработка наиболее эффективна при следующих операциях: прошивание глухих и сквозных сложнопрофильных отверстий и образование на поверхности деталей лунок, выемок и канавок различной формы. Эти операции проводятся на копировально-прошивных станках. Обработка сложнопрофильных и прецизионных деталей производится проволочным электродным инструментом (ЭИ) на вырезных станках. В качестве ЭИ используется латунная (ЛБЗ), медная (ММ), молибденовая (М4-1-А), вольфрамовая (ВА-1-А) и другие проволоки диаметром 0,05–0,5 мм. Собственно вырезка обрабатывается либо по копиру, либо с использованием числового программного управления.

Близкой процессу ЭЭО по своему воздействию на керамические материалы является и электрохимическая обработка (ЭХО), которая характеризуется наложением электрического поля в процессе химической обработки в водном растворе электролита (рис. 3).

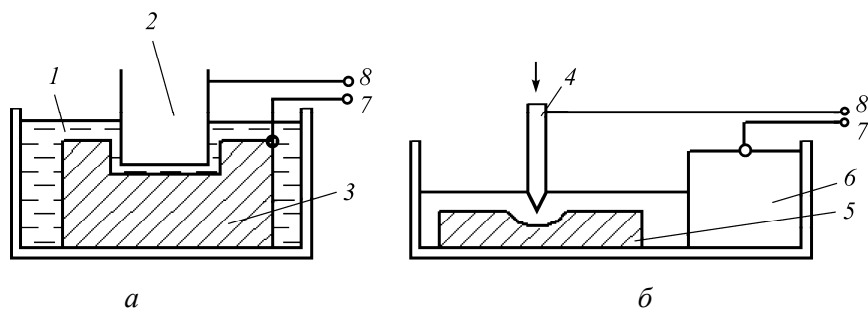


Рис. 3. Схема обработки электрохимическим разрядом: *а* – обработка электропроводных материалов; *б* – обработка диэлектрических материалов; 1 – электролит; 2 – электрод-инструмент; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – штывевой электрод-инструмент; 5 – диэлектрический материал; 6 – вспомогательный электрод; 7 – постоянный ток; 8 – переменный ток

В отличие от электроэрозионной обработки, когда процесс обработки происходит за счет локального термического плавления, в случае ЭХО причиной обработки являются высокотемпературные физико-химические реакции, обусловленные процессами окисления-восстановления керамики. При применении метода электрохимической обработки обеспечивается хорошее качество обработки поверхности, но возможно снижение прочностных свойств керамического материала из-за растравливания межкристаллического слоя.

Универсальным методом обработки как токопроводящих, так и диэлектрических керамических материалов является ультразвуковой способ обработки (рис. 4).

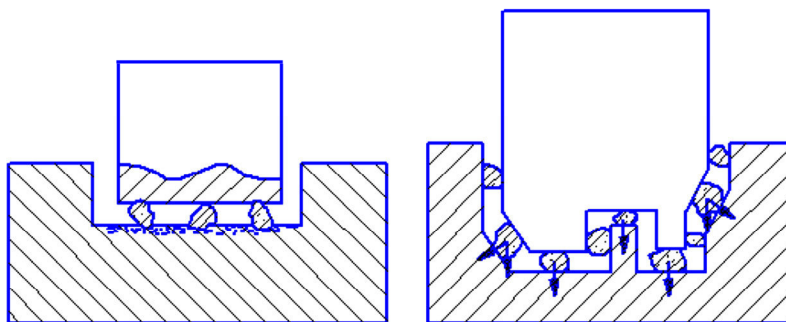


Рис. 4. Ультразвуковая обработка

Такая обработка основана на частичном и последовательном отрыве частиц керамики под влиянием колеблющихся с ультразвуковой частотой частиц абразива, генерируемых соответствующим инструментом. Абразив в виде суспензии подается в место контакта рабочего инструмента с обрабатываемой керамикой. Ультразвуковая обработка позволяет обрабатывать поверхности различного профиля.

Универсальным методом обработки керамических материалов является гидродинамическая обработка, которая основана на размывании материала высокоскоростной струей жидкости. Этот метод используется в основном для разрезания изделий, получения прорезей и отверстий. Разновидностью этого вида обработки является струйно-абразивная обработка, при которой струя жидкости, содержащая абразив – кварцевый песок, режет стекловидные и мягкие керамические материалы (в жидкость добавляется карбид кремния и оксид алюминия – в случае резки твердых материалов). Важным моментом является то, что обработка абразивной струей не сопровождается какими-то изменениями микроструктуры и не влияет на поведение материала под нагрузкой.

Одним из видов безабразивной обработки керамики, который находит все большее применение, является лазерная обработка. Преимуществом этого метода (рис. 5) является то, что он не лимитируется твердостью материала и позволяет обрабатывать хрупкие и сложные изделия независимо от их формы и размеров. Кроме того, подповерхностных повреждений, образующихся при механической обработке, при лазерной обработке в значительной мере удастся избежать. Керамические детали большой толщины могут быть обработаны этим методом в сыром виде или в нагретом перед обработкой состоянии, детали малой толщины из прочной керамики могут быть обработаны более качественно, чем алмазным инструментом.

Однако в силу малой теплопроводности керамики при лазерной обработке могут возникнуть трещины и сколы, поэтому для каждого конкретного

случая необходим подбор оптимальных значений толщины обрабатываемого материала, требуемой скорости перемещения лазерного луча в пределах обрабатываемой зоны.

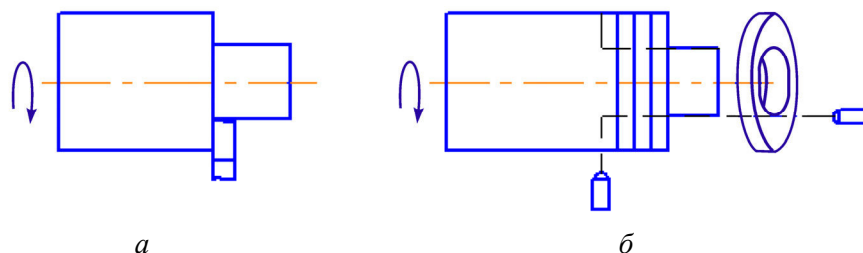


Рис. 5. Способы удаления материала: *а* – традиционное механическое точение; *б* – лазерная обработка

Таким образом, подводя итог краткому обзору методов обработки керамики, отметим, что при выборе оборудования для механизации финишной обработки деталей из керамики необходимо учитывать совокупность различных факторов. Это физико-механические свойства материала, размеры деталей и технические требования к обработанной поверхности, а также условия технического задания по построению нового технологического процесса.

### Список литературы

1. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2004. – 75 с.
2. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
3. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики / под ред. З.И. Кремня. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 131 с.
4. Алмазная обработка технической керамики / Д.Б. Ваксер, В.А. Иванов, И.В. Никитков, В.Б. Рабинович. – Л.: Машиностроение, 1976. – 160 с.
5. Тонкая техническая керамика / под ред. Х. Янагида. – М.: Металлургия, 1986. – 279 с.
6. Циркониевая керамика [Электронный ресурс]. – URL: <http://sarmik.livejournal.com/17046.html>.
7. Шевченко А.В., Рубан А.К., Дудник Е.В. Высокотехнологичная керамика на основе диоксида циркония // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 9. – С. 2–8.
8. Production of Ceramic Material on the Base of Nanocrystalline Zirconium Dioxide Stabilized with Yttrium Oxide / V.N. Antsiferov, S.E. Porozova, V.B. Kulmetyeva // Structural chemistry of partially ordered systems, nanoparticles

and nanocomposites: Topical meeting of the European Ceramic Society, 27–29 June 2006, Saint-Petersburg, Russia. – St-Petersburg, 2006. – P. 155–156.

9. Современная оксидная керамика и области ее применения / Е.С. Лукин [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 1. – С. 3–13.

10. Халтурин В.Г., Кульметьева В.Б., Климов Л.А. Нанокристаллическая керамика системы  $ZrO_2-Al_2O_3-Y_2O_3$ , полученная из ультрадисперсных порошков, синтезированных методом лазерного испарения мишени // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Проблемы современных материалов и технологий. – 1997. – С. 194–202.

11. Керамика на оксиде циркония, керамика на золоте [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.urhim.ru/stati/43-oksidi-czirkoniya-v-protezirovaniizubov.html>.

12. Диоксид циркония. Керамика из диоксида циркония [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.chmz.net/product/keramika>.

13. Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семенов. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 384 с.

14. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

15. Кремень З.И., Павлючук А.И. Абразивная доводка. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1967. – С. 114.

16. Технология и оборудование с растровой кинематикой для формирования шероховатости поверхностей постоянной кривизны в нанометровом интервале / А.М. Ханов, Р.А. Муратов, Е.А. Гашев, К.Р. Муратов // СТИН. – 2010. – № 2. – С. 13–16.

17. Ханов А.М., Муратов К.Р., Гашев Е.А. Управление траекторией рабочего движения при доводке плоскостей // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1 (3). – С. 667–669.

18. Муратов Р.А., Муратов К.Р., Гашев Е.А. Исследование процесса шлифования монокристалла на станках с различной кинематикой // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4 (5). – С. 1270–1272.

Получено 15.02.2013

**Зиберт Юлия Владимировна** – магистрант, ПНИПУ, МТФ, ТМК-11м,  
e-mail: vladimir-zibert@yandex.ru.