

большое количество допущений, упрощающих данный процесс. Новый, предлагаемый в данной статье подход позволяет учесть вклад неоднородностей упругих свойств материалов на распределение давления по всей контактной зоне.

Список литературы

1. Пиотух И. Г., Кулак М. И., Боброва О. П. Влияние фрактальных особенностей структуры на физико-механические свойства печатной бумаги // Труды БГТУ: Физико-математические науки. — Минск, 2000. — Вып. 8. — С. 73—81.
2. Кулак М. И. Влияние структурных неоднородностей на упругие свойства фрактальных дисперсных систем // Доклады Академии наук БССР. — 1991. — Т. 35, № 8. — С. 704—707.
3. Кулак М. И. Фрактальная механика материалов. — Мн.: Выш. шк., 2002. — 304 с.
4. Лиштван И. И., Богатов Б. А., Кулак М. И. Фрактальные аспекты физико-химии дисперсных систем // Изв. Академии наук Беларуси: Сер. хим. наук. — 1992. — № 5—6. — С. 13—20.
5. Митрофанов В. П., Тюрин А. А., Бирбраер Е. Г. Печатное оборудование. — М.: Издательство МГУП, 1999. — 443 с.
6. Кулак М. И., Старченко О. П. Расчет упругих свойств декаля с учетом фрактальной неоднородности поверхностей печатного контакта // Труды БГТУ. Сер. IX. Издательское дело и полиграфия. — Минск, 2002. — Вып. X. — С. 55—60.
7. Старченко О. П. Расчет упруго-прочностных свойств декельных композиций. // Труды БГТУ. Сер. IX. Издательское дело и полиграфия. — Минск, 2003. — Вып. XI. — С. 59—64.
8. Пиотух И. Г., Кулак М. И., Боброва О. П. Влияние фрактальных особенностей структуры на физико-механические свойства печатной бумаги // Труды БГТУ: Физико-математические науки. — Минск, 2000. — Вып. VIII. — С. 73—81.
9. Терминологический справочник по резине. Ф. А. Махлис, Д. Л. Федюкин. — М.: Химия, 1989. — 400 с.
10. Справочник резинщика. Материалы резинового производства. П. И. Захарченко, Ф. И. Яшунская, Ф. В. Евстафьев. — М.: Химия, 1971. — 608 с.
11. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. — М.: Мир, 1982. — 334 с.

УДК 621.791.92

ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Поболь И. Л., Куликов Г. П.

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь
beloto@user.unibel.by

ВВЕДЕНИЕ

Современные конструкционные керамики и композиционные материалы все шире применяются для производства деталей машин и оборудования. В настоящее время все большие объемы перекачиваемых жидкостей приходится на химически активные, агрессивные и абразивосодержащие среды. При изготовлении насосов, служащих для перекачивания таких сред, используются торцовые уплотнения с элементами из керамики. По сравнению с традиционными материалами для изготовления пар трения керами-

керамика обладает комплексом более высоких характеристик – коррозионной стойкостью, износостойкостью, долговечностью и др. Ведущие мировые фирмы-изготовители насосов, а также белорусские предприятия ЗАО «Гидродинамика» и СКБ «Академическое» применяют для этих целей силицированный графит и карбид кремния.

Из-за высокой твердости керамические материалы плохо обрабатываются резанием. Шлифование с использованием алмазных кругов в настоящее время является основным способом финишной обработки деталей из подобных материалов. Производство керамических деталей по традиционной технологии связано с высокой трудоемкостью изготовления этих деталей. Доля шлифования в стоимости детали достигает 60%.

Для обработки металлов и сплавов повышенной твердости широко применяется инструмент, оснащенный элементами из сверхтвердых материалов (СТМ) – поликристаллического алмаза (ПКА) и кубического нитрида бора (КНБ). Этим материалам свойственны высокие износостойкость, рабочий ресурс, надежность и долговечность.

Однако в литературе имеется ограниченное количество публикаций касательно лезвийной обработки керамик. Например, в [1] проводили сравнительные испытания инструмента при точении керамики ВК94-1. Стойкость инструмента из синтетического алмаза АСПК и АТП составляла не менее 4 минут с преимуществом у АТП, шероховатость обработанной поверхности керамики не превышала 2,5 мкм. Инструментом, оснащенным твердосплавными пластинами ВК8, обрабатывать керамику ВК94-1 невозможно. Насколько нам известно, не имеется опубликованных работ, посвященных лезвийной обработке деталей из силицированных графитов и карбида кремния SiC. Между тем, во время точения, фрезерования и сверления керамик механизм изнашивания инструментальных материалов очень сложен и практически не изучен.

Для фиксации СТМ в инструменте применяются различные методы, в том числе, механическое прижатие, заливка расплавленным металлом и др. Наиболее надежным методом является активная пайка. Для этого проводится закрепление СТМ к основе адгезионно-активными припоями. Нами показано, что весьма удобным методом является электронно-лучевая пайка СТМ с основой из сталей и твердых сплавов, обеспечивающая высокую локальность воздействия и возможность подачи строго ограниченного количества энергии в зону нагрева [2-6]. Особенностью электронно-лучевого нагрева являются высокий КПД, непосредственное воздействие потока электронов на обрабатываемый участок поверхности заготовки, простота управления лучом и автоматизации, выбора требуемой скорости нагрева и последующего охлаждения заготовки, экологическая чистота.

Наши экспериментальные данные показали, что вместо низкоэффективного шлифования для окончательного формообразования изделий из керамик может применяться высокопроизводительная лезвийная обработка резами из СТМ. В работе проведена проверка возможности применения резцов, оснащенных ПКА, для лезвийной обработки ряда керамических материалов, выбраны оптимальные параметры эксплуатации инструмента. Рассмотрен механизм изнашивания рабочего лезвия реза.

1. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.1. Требования к инструменту, используемые материалы

Поликристаллические материалы на основе алмаза по своим физико-механическим свойствам могут быть близкими к монокристаллическим алмазам, а по некоторым и превосходить их. Так, большинство алмазных поликристаллов обладает

анизотропией свойств, отличается высокой износостойкостью и превосходит монокристаллы по трещиностойкости.

К лезвийному инструменту, предназначенному для точения труднообрабатываемых материалов, предъявляются специфические требования.

* Необходимы резыцы различного типа и назначения. В промышленно развитых странах мира используются, в основном, стандартные сменные неперетачиваемые вставки с впаянными элементами СТМ. На предприятиях Беларуси, России и Украины применяются, в основном, резыцы с элементами СТМ, подвергаемые многократной переточке.

* Важны режимы заточки и доводки инструмента, особенно для резов с высокими требованиями по точности и отклонениям по допускам. Для разных типов керамик необходимо выбирать оптимальные геометрические параметры реза.

* Возможные режимы лезвийной обработки керамики других труднообрабатываемых материалов находятся в достаточно узком диапазоне.

В качестве режущих элементов нами используются ПКА АТП производства *ИСМ НАН Украины*, «Сотрах» (*GE Superabrasives*) и «Syndite» (*De Beers*), а также КНБ плотной модификации марки «Светланит» (*ИФТП НАН Беларуси*). Перед пайкой материалы ПКА в виде алмазно-твердосплавных пластин диаметром от 12,5 до 60 мм разрезают на электроэрозионном проволочном станке на элементы требуемого размера.

В качестве подложек инструмента использовались сталь 45 и твердые сплавы на основе WC-Co - стандартные сменные вставки из твердых сплавов BK8 и H10S/K10 (91%WC; 4,5 Co; 4,5% (TaC + NbC)).

Одним из условий сохранения физико-механических свойств алмазосодержащего слоя является предохранение его от перегрева путем правильного выбора припойного сплава. Для обеспечения качественного и надежного соединения ПКА с металлической державкой припой должен отвечать следующим требованиям: температура плавления припоя должна быть ниже температуры начала графитизации СТМ (800-1000 °С в вакууме); обладать хорошей текучестью, смачивать и диффундировать в соединяемые материалы; иметь достаточно хорошую пластичность и высокую ударную прочность. Припоями для получения соединений СТМ со сталями и твердыми сплавами, удовлетворяющими вышеуказанным требованиям, являются многокомпонентные сплавы на основе серебра и меди с добавками адгезионно-активных элементов (Ti, Cr, Mn и др.). Достоинством используемых припоев являются высокие пластичность, механическая прочность, хорошая коррозионная стойкость.

1.2. Оборудование

Для пайки применяется электронно-лучевое оборудование, созданное в ФТИ НАН Беларуси на основе аппаратуры ЭЛА 15 (производства «СЭЛМИ», Сумы). Для фиксации элементов реза используются специальные приспособления. Пайка проводится в вакууме 10^{-2} Па. Это снижает опасность перегрева и графитизации частиц алмаза в ходе процесса пайки.

Для исследования характера изнашивания резов использовали методы оптической и растровой электронной микроскопии (прибор LEO 1455VP). Испытание инструмента на стойкость проводили на универсальных токарных станках точением заготовок из керамик. Исследование и измерение параметров рабочих лезвий резов в процессе эксплуатации проводили с применением измерительной системы Talysurf-6, включающей процессор Talydata 1000-1 с программой анализа поверхностной структуры.

1.3. Обработываемые материалы и изделия

Свойства керамических материалов, подвергнутых лезвийной обработке, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Оксид алюминия Al_2O_3	Силицированный графит		Карбид кремния SiC
		СГ-Т	СГ-П	
Плотность, г/см ³	3,8	2,5	2,8	3,1
Предел прочности при сжатии, МПа	2100	300-320	430-450	400-430
Модуль упругости, ГПа	360-400	95	127	413
Твердость	16-25 ГПа	HRC 65-78	HRC 65-80	25-27 ГПа
Теплопроводность при 20°C, Вт/м К	29	85	130	87-170
ТКЛР, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	8,1	4,6	4,2	4,0-4,6

В ЗАО «Гидродинамика» (Минск) разработано и освоено производство герметичных гидродинамических насосов ГДМ с приводом вала насоса через магнитную муфту (www.gidrodinamika.ru). Такая конструкция обеспечивает высокую надежность герметичности проточной полости насосов по сравнению с насосами, имеющими приводные валы с каркасными и торцовыми уплотнениями традиционных конструкций. Ответственными узлами в насосах ГДМ являются подшипники скольжения, представляющие собой вкладыш и размещенную в нем втулку, обе детали выполнены из SiC (рис. 1). Для различных по производительности насосов изготавливаются вкладыши с размерами $L_1 = 45 - 70$ мм, $D_1 = 45 - 115$ мм и $d_1 = 36 - 75$ мм и втулки с $L_2 = 50 - 74$ мм, $D_2 = 35,9 - 74,5$ мм и $d_2 = 24 - 45$ мм.

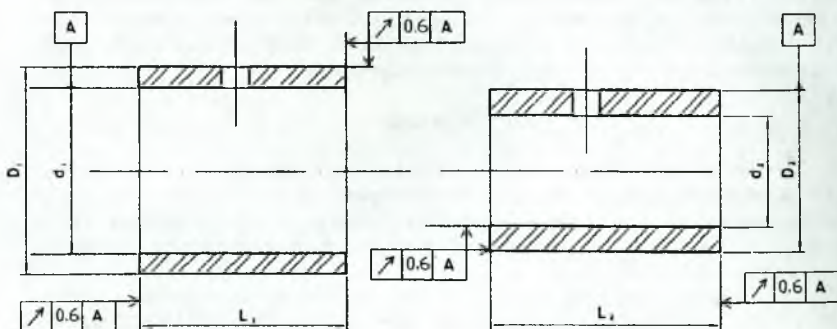


Рис. 1. Вкладыш и втулка подшипника скольжения насоса ГДМ

Изношенная кромка резца (вид со стороны передней поверхности)

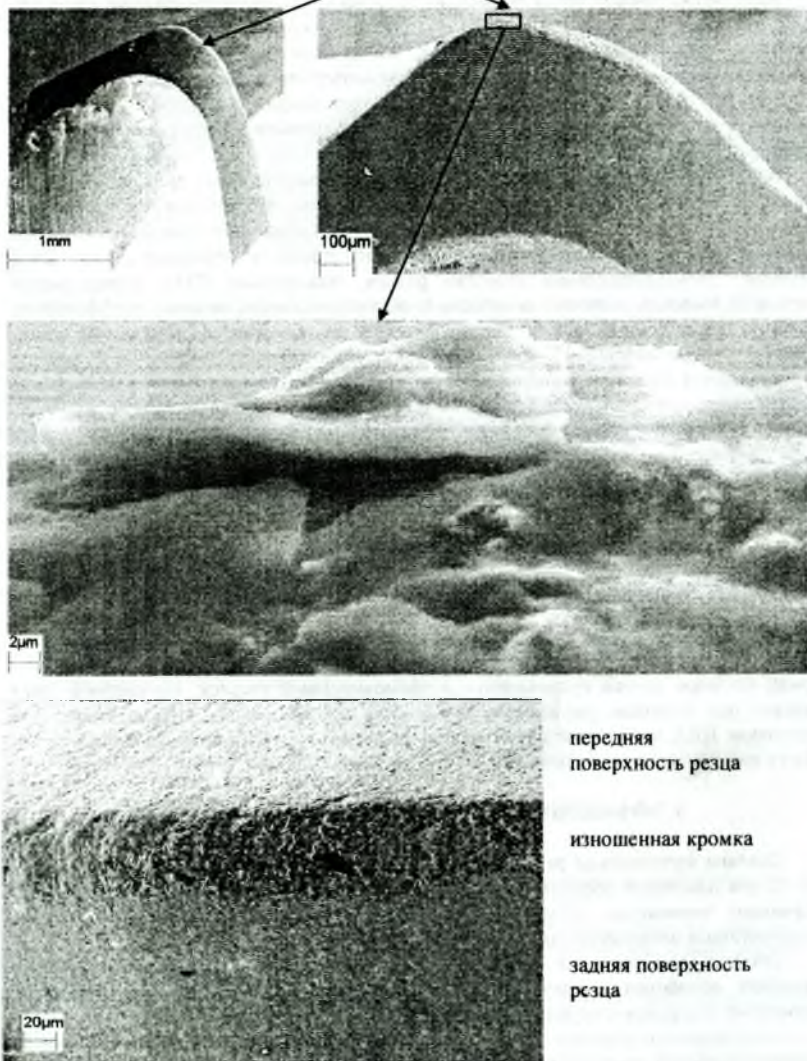


Рис. 2. Изображение режущего лезвия резца, оснащенного ПКА «Сотрах» (получено на РЭМ)

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Электронно-лучевая пайка активными припоями, благодаря протеканию взаимной диффузии элементов в системе СТМ / припой / основа, обеспечивает надежное соединение таких разнородных материалов, как керамические СТМ со сталями (или твердыми сплавами). Нами проведены компьютерное моделирование, комплекс исследований физико-химических процессов, сопровождающих процесс получения неразъемных соединений СТМ с основой, механические испытания прочности соединений [2-6].

Из исследований возможности использования традиционных инструментальных материалов для лезвийной обработки керамик известно, что рабочая часть режущей кромки инструмента из твердых сплавов изнашивается очень интенсивно, практически в течение нескольких секунд, что не позволяет провести обработку даже одной заготовки. Эксплуатационные свойства резцов, оснащенных СТМ, определяются сочетанием высоких значений твердости и теплопроводности, низкого коэффициента трения режущего материала с обрабатываемым материалом и, вследствие этого, высоким сопротивлением абразивному изнашиванию. Соединения хорошо сопротивляются ударным и вибрационным нагрузкам и выдерживают значительные деформации.

На токарных станках выполняли точение втулок, вкладышей и уплотнительных колец диаметром 20-120 мм из силицированных графитов и SiC, а также поддерживающих роликов из Al_2O_3 с наружными размерами \varnothing 12-25 x 40-60 мм. Обработка проводилась резцами, оснащенными ПКА и КНБ, без применения СОЖ. Наилучшие результаты получены с применением ПКА. При этом достигается достаточно высокое качество обрабатываемой поверхности ($R_a = 0,4-1,25$ мкм).

Изучен характер изнашивания элемента ПКА при лезвийной обработке керамики (рис. 2). На начальной стадии точения происходит истирание задней поверхности элемента ПКА или КНБ резца, рабочая часть режущей кромки изнашивается микрорывкрашиванием. Участок режущей кромки с радиусом при вершине режущей кромки по мере износа превращается в прямолинейный участок. На среднем фото показана при большом увеличении поверхность кромки резца. Хорошо видно, что разрушение ПКА происходит путем отслоения частиц в виде пластин толщиной около 2 мкм с размерами порядка 20 мкм.

3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Освоено изготовление резцов ряда типоразмеров (некоторые из них показаны на рис. 3) для лезвийной обработки труднообрабатываемых материалов, а также сверл с впадинами элементами СТМ. Имеется решение о выдаче патента Беларуси на конструктивное исполнение гаммы режущего инструмента.

Технико-экономическая эффективность от использования инструмента для лезвийной обработки керамических и других труднообрабатываемых материалов достигается благодаря следующим факторам:

- повышению скорости резания, снижению в 2-10 раза основного машинного времени обработки, по сравнению с операцией шлифования;
- повышению стойкости инструмента, снижению простоев оборудования;
- улучшению качества обработанных поверхностей, повышению надежности и долговечности деталей;
- уменьшению трудоемкости операций (исключению последующих доводочных операций) и высвобождению рабочих-станочников, оборудования и производственных площадей;

Все указанное приводит к тому, что такой инструмент не просто заменяет процесс шлифования, но требует выбора оптимальных условий его эксплуатации и существенного изменения технологического процесса обработки заготовок.

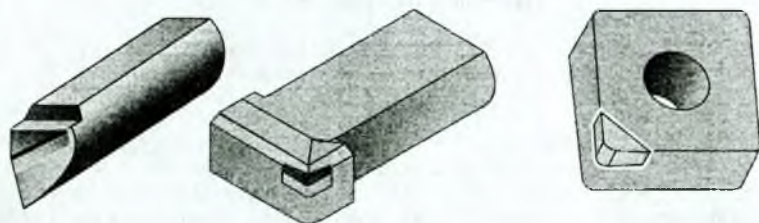


Рис. 3. Некоторые типы изготавливаемых режущих инструментов, оснащенных СТМ

В таблице 2 приведены технические характеристики процесса точения деталей из керамики и достигнутые величины стойкости инструмента. Как видно, последняя величина существенно зависит от типа обрабатываемого материала.

Таблица 2

Обрабатываемый материал	Скорость резания V , м/мин	Глубина резания t , мм	Подача, мм/об	Количество деталей, обработанных одним резцом
SiC, Al ₂ O ₃	10 – 20	0,5 – 3,0	0,07	4 - 6
Силицированные графиты	15 – 40	0,5 – 2,0	0,07	100 - 120

Работа финансировалась в рамках ГНТП освоения новых и высоких технологий, задание 5.5.10 и ГПОФИ «Материал», задание 1.05.

Список литературы

1. Халдеев В.Н., Пашко О.В. Электроэрозионное формообразование алмазно-твердосплавных пластин / Сверхтвердые материалы, 1998, №1, с.64-66.
2. Pobol I.L., Shipko A.A., Nesteruk I.G. Investigation of contact phenomena at the cubic boron nitride - filler metal interface during electron beam brazing / Diamond and Related Materials, 1997, N 6, P. 1067-1070.
3. Felba J., Friedel K.P., Krull P., Pobol I.L., Wohlfahrt H. Electron beam activated brazing of cubic boron nitride to tungsten carbide cutting tools / Vacuum, 2001, V.62, P. 171-180.
4. Knyazeva A.G., Pobol I.L. Theoretical and experimental analysis of ceramic-metal joint formation using electron-beam action / Int. Conf. on Modification of Materials using Particle Beams and Plasma. 23-26 Sept. 2002., Tomsk. P. 319-322.
5. Pobol I.L. Lutowanie supertwardych materiałów narzędziowych z zastosowaniem nagrzewania wiązką elektronów / Biuletyn Instytutu spawalnictwa, N 5, 2003. P. 93-98.
6. Поболь И.Л., Гордиенко А.И., Куликов Г.П. Инструмент для лезвийной обработки керамики / IX международная научно-технической конференция «Машиностроение и техносфера XXI века». 9-15 сентября 2002 г. Севастополь. - Т.2. С. 246-250.