

**Ключевые слова:**

квазипластичная обработка, хрупкий материал, поликристаллический алмаз, лейкосапфир, акустический сигнал, осциллограмма

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КВАЗИПЛАСТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Татьяна ТЕПЛОВА

Показано, что формирование нанометрового рельефа поверхности возможно при различной крупности зерна шлифовального круга, так как доля хрупкого разрушения при правильно подобранных режимах обработки минимальна. Рассмотрено использование акустического сигнала, генерируемого в процессе квазипластичной обработки поверхности минералов, для контроля качества обрабатываемой поверхности и управления процессом обработки.

Посвящается памяти моих учителей Анатолия Сергеевича Коньшина и Олега Михайловича Гридина

Перспективным способом получения высококачественной поверхности твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности [см.: СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2021, № 1–2].

Стоит напомнить, что квазипластичность – проявление пластичных свойств поверхностным слоем твердых хрупких материалов при обработке. Технология квазипластичной обработки твердых материалов основана на обеспечении механического воздействия на обрабатываемую поверхность материала при подаче шлифовального круга, составляющей доли мкм/ход. При этом поверхностный слой хрупких твердых материалов проявляет пластичные свойства и преобладающим механизмом

становится не хрупкое разрушение, а удаление поверхностного слоя материала в режиме квазипластичности. При данных подачах контактное взаимодействие зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью создает переменное механическое поле, под воздействием которого происходит направленное (квазипластичное) удаление поверхностного слоя с формированием поверхности нанометровой шероховатости и с минимальными дефектами (не более 50 нм), внесенными процессом обработки.

Встречающиеся в статьях термины «квазипластичная обработка», «квазипластичная поверхностная обработка», «шлифование в режиме квазипластичности», «микрошлифование», «размерно-регулируемое микрошлифование», «шлифование



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

в мезообъемах» и «размерно регулируемое шлифование» – практически идентичны.

При поверхностной обработке твердых хрупких минералов в режиме квазипластичности возможно проводить постоянный активный бесконтактный контроль процесса поверхностной обработки, на основе которого можно автоматизировать процесс. В результате появляется возможность получения большого количества изделий из твердых хрупких минералов (в том числе кристаллов) со стабильным качеством поверхностного слоя нанометровой шероховатости [3]. Возможность проведения постоянного контроля процесса обработки основана на том, что процесс квазипластичной обработки сопровождается автоколебаниями определенной частоты, что прослеживается при анализе осциллограмм. Были проведены эксперименты по выявлению частот автоколебаний, сопровождающих процесс поверхностной обработки в режиме квазипластичности. Общий вид установки для проведения эксперимента приведен на рис. 1. Она состоит из станочного модуля АН15Ф4 с ЧПУ, осциллографа, пьезоэлектрического датчика силы, усилителя сигнала датчика силы и компьютера. Структурная схема установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Для компьютерной записи осциллограмм процесса шлифования в режиме квазипластичности применялся осциллограф Gellman PCS64. Для фиксации момента касания шлифовальным кругом обрабатываемой поверхности образца применялся осциллограф С1-73.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (ДАТЧИК) СИЛЫ

Измерительный преобразователь (датчик) силы применялся для определения нормальной составляющей силы резания и формирования соответствующих команд для управления системой ЧПУ.

Пьезодатчик был изготовлен по специальному заказу: максимально допустимая нагрузка 20 кг/см^2 , имеет два диапазона измерений – $0 \dots 10 \text{ кГц}$ и $10 \text{ кГц} \dots 3 \text{ мГц}$, положительную полярность и выходное сопротивление 1 кОм .

Датчик встроен в винт $M16 \times 1,5$, который ввинчивается в резьбовое отверстие поворотного устройства шпинделя изделия (рис. 3). Шпиндель изделия опирается на пьезопреобразователь, который фиксирует изменение нормальной составляющей силы резания в процессе обработки. Датчик силы обладает высоким быстродействием и чувствительностью, достаточными для регистрации динамики процесса поверхностной обработки твердых хрупких минералов (в том числе кристаллов). Так как сигнал датчика является импульсным, то на осциллограммах прослеживается запись возвращения значения импульса в ноль. Для усиления электрического сигнала с пьезопреобразователя используется электронный усилитель.

В ходе поверхностной обработки в режиме квазипластичности кристаллов поликристаллических

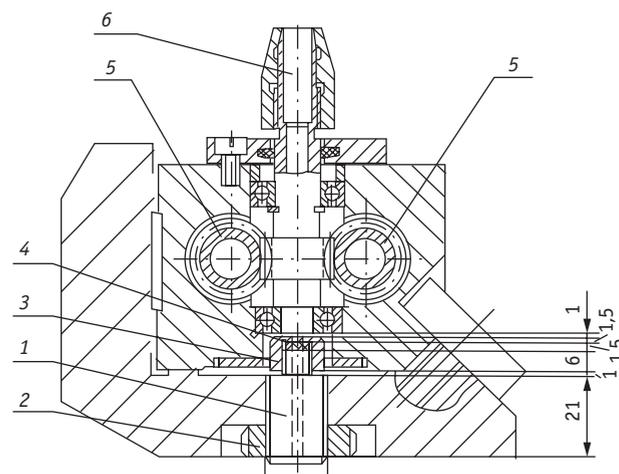


Рис. 3. Расположение датчика силы в корпусе поворотного устройства: 1 – винт датчика, 2 – гайка с шайбой, 3 – колпачок датчика, 4 – датчик силы, 5 – винт-рейка, 6 – шпиндель изделия

алмазов, выращенных из газовой фазы, монокристаллов натуральных алмазов и монокристаллов искусственно выращенного лейкосапфира производились лабораторные измерения амплитудно-частотных характеристик акустического сигнала, сопровождающего процесс поверхностной обработки образцов. Зафиксированный пьезодатчиком и усиленный акустический сигнал записывался осциллографом. В процессе обработки каждого кристалла были записаны серии осциллограмм, которые впоследствии анализировались.

Измерялись амплитуда и период колебаний генерируемого сигнала. Амплитуда сигнала, записанная в вольтах, после тарирования датчика пересчитывалась в Паскали (Па). По периоду колебаний, полученному в единицах времени, вычислялась частота генерируемого сигнала в герцах (Гц). Все средства измерения, входящие в измерительную систему, фиксирующую акустический сигнал, проходили метрологическую поверку. Измерения проводились по стандартным методикам (ГОСТ).

Серии экспериментов по исследованию квазипластичного удаления поверхностного слоя твердых хрупких материалов (алмаз, лейкосапфир) проводились при следующих условиях:

- 1. Тримя шлифовальными кругами (ШК):** первый круг изготовлен на керамической связке со 150%-ной концентрацией синтетического алмазного микропорошка фракции 20/14 (маркировка круга 12A2-45° (АЧК) АСМ20/14 150% КПП 250 × 20 × 5 × 25 мм, ГОСТ 16172-80); второй круг изготовлен на керамической связке со 150%-ной концентрацией синтетического алмазного микропорошка фракции 8/5 (маркировка круга 12A2-45° (АЧК) АСМ8/5 150% КПП 250 × 20 × 5 × 25 мм, ГОСТ 16172-80); третий круг изготовлен на связке из костной муки со 150%-ной концентрацией синтетического алмазного микропорошка фракции 3/2 (маркировка круга 12A2-45° (АЧК) АСМ3/2 150% ВФ1 250 × 20 × 5 × 25 мм, ГОСТ 16172-80).
- 2. При трех скоростях продольного перемещения** стола станочного модуля: $V_1 = 41$ мм/с, $V_2 = 58$ мм/с, $V_3 = 61$ мм/с.
- 3. При двух значениях перемещения стола станочного модуля** от реверса до реверса: $L_1 = 13$ мм, и $L_2 = 22$ мм.
- 4. При постоянной скорости вращения ШК:** 3000 об/мин.

При пяти значениях врезных подач: $\delta_1 = 0,5$ мкм, $\delta_2 = 0,1$ мкм, $\delta_3 = 0,05$ мкм, $\delta_4 = 0,03$ мкм, $\delta_5 = 0$ (квазипластичная поверхностная обработка осуществляется за счет теплового расширения образца).

Для первой серии экспериментов обработки в режиме квазипластичности был выбран образец –

монокристалл искусственного лейкосапфира цилиндрической формы диаметром 31,5 мм и высотой 16,8 мм. Целью эксперимента было определение взаимосвязи параметров шлифования для выбора рациональных режимов обработки в режиме квазипластичности поверхности лейкосапфира при различных скоростях движения стола станочного модуля и различных величинах врезной подачи. Результаты эксперимента с полученными осциллограммами подробно изложены в работе [22].

Качество обрабатываемой поверхности оценивалось на оптическом профилометре, а качество подповерхностного слоя – на ультразвуковом микроскопе. Начало процесса шлифования в режиме квазипластичности в стационарном режиме определялось по наличию автоколебаний. Установившийся режим обработки сопровождается автоколебательным характером удаления припуска. Амплитуда и частота колебаний динамической составляющей силы резания зависят от скорости съема припуска (скорости продольного перемещения стола станочного модуля вдоль оси X и врезной подачи) и тепловых факторов обработки.

В результате обработки была получена поверхность с нанометровым микрорельефом и с ненарушенным подповерхностным слоем [12]. Фотография обработанной поверхности желтого кристалла лейкосапфира приведена на рис. 4. На обведенном черной чертой участке было проведено измерение шероховатости поверхности и определение качества подповерхностного слоя. Были выбраны рациональные режимы обработки лейкосапфира в режиме квазипластичности с получением поверхности нанометровой шероховатости [7].

После проведения шлифования алмазным кругом диаметром 250 мм на связке из костной муки с зернистостью 3–2 мкм было проведено исследо-



Рис. 4. Образец лейкосапфира (обведен участок на котором производилось исследование подповерхностного слоя и шероховатости поверхности)

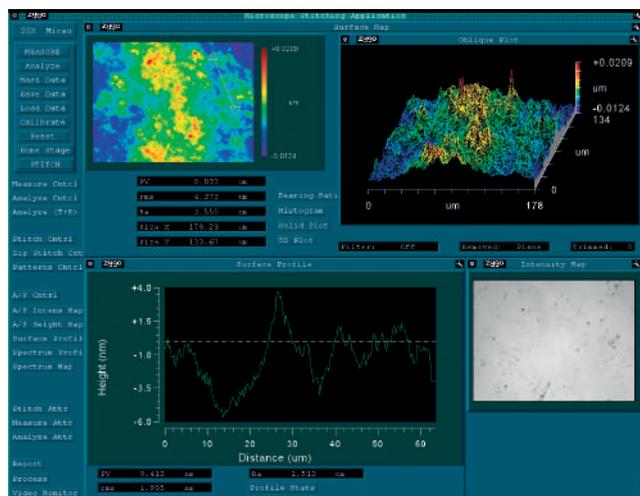


Рис. 5. Результаты измерения шероховатости образца лейкосапфира

вание поверхности и измерение шероховатости. Измерения проводились в ЦЕНИ ИОФ им А.М. Прохорова РАН на интерферометре белого света Zigo NewView 5000, разрешение в плоскости объекта 0,45 мкм по оси Y – 1 А (рис. 5) [2].

Исследования поверхности показали, что при отсутствии следов хрупкого разрушения получен нанометровый рельеф. На обработанной поверхности наблюдается градиент микронеровностей с минимумом на периферии. Шероховатость поверхности на периферии в среднем имеет величину $R_a = 8,08$ нм. Имеются участки с шероховатостью $R_a = 1,946$ нм.

Исследования шероховатости поверхности образцов косвенно подтверждают модель квазипластичной обработки. Как показано на рис. 6, профиль поверхности образца лейкосапфира при разных шероховатостях подобен. На фотографиях не заметны следы хрупкого разрушения и следы обработки, оставленные обрабатывающим инструментом. Полученные результаты позволяют объективно измерять параметры процесса квазипластичной обработки (микрошлифования) образца искусственно выращенного лейкосапфира. Обеспечивается повторяемость и воспроизводимость результатов обработки [13].

Следующая серия экспериментов по разработанной методике проводилась на кристаллах поликристаллического алмаза. Эксперимент проводился на двух образцах поликристаллического алмаза, выращенного из газовой фазы:

- в виде квадрата 10×10 мм толщиной 0,8 мм с трещиной посередине;
- в виде цилиндра диаметром 18 мм и толщиной 0,5 мм.

Реализация разработанной программы обработки, учитывающей тепловое расширение конкрет-

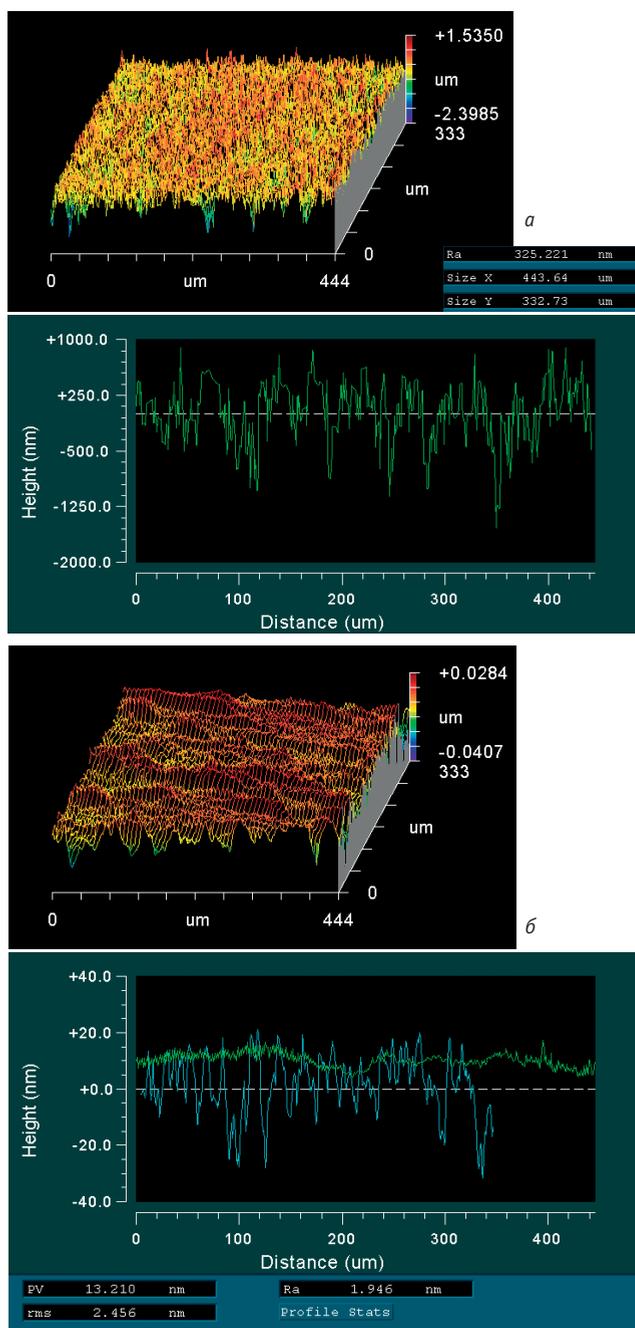


Рис. 6. Трехмерное изображение и профиллограмма: а – срез поверхности опытного образца лейкосапфира до обработки (шероховатость $R_a = 325$ нм, размер кадра 443×333 мкм); б – срез поверхности опытного образца лейкосапфира после обработки (шероховатость $R_a = 1,946$ нм, размер кадра 443×333 мкм)

ного образца, позволила сформировать поверхностные структуры с нанометровой шероховатостью без макроскопических дефектов, внесенных процессом обработки [5]. В ходе эксперимента определялись средние значения частот и амплитуд акустического

сигнала, сопровождающего процесс поверхностной обработки, по каждой осциллограмме и по всем осциллограммам, полученным во время обработки.

При этом в таблицы были включены только наиболее полные серии экспериментов съема припуска, так как в каждую серию экспериментов оформлялись результаты опытов съема припуска, соответствующие одному циклу обработки до отвода ШК. Если во время цикла происходило осыпание круга, то экспериментальные данные, полученные после осыпания круга, не включались в таблицу. По результатам эксперимента было проанализировано 377 осциллограмм, полученных при поверхностной обработке в режиме квазипластичности твердых хрупких материалов (лейкосапфира и поликристаллического и натурального алмаза) [22].

Анализ осциллограмм колебаний, генерируемых при обработке поверхностей образцов кристаллов алмаза и лейкосапфира, позволил установить взаимосвязь упругих свойств кристалла и собственных частот. Установлено, что частоты акустического сигнала, генерируемого образцом при обработке, не зависят от размеров образца, а связаны со свойствами обрабатываемого материала [17].

Контроль частоты колебаний, генерируемых заготовкой при поверхностной обработке в режиме квазипластичности, может служить вспомогательным средством контроля качества обработанной поверхности [14]. На начальных этапах поверхностной обработки происходит выравнивание шероховатости, сила давления инструмента на заготовку распределяется на большее количество выступов, в результате удельное усилие прижима уменьшается, поэтому врезную подачу на начальном этапе обработки можно увеличить.

При выравнивании шероховатости и ведении процесса обработки в полном контакте инструмента с поверхностью обрабатываемой заготовки врезная подача должна уменьшаться, либо задаваться постоянной для обрабатываемого материала в зависимости от свойств материала (коэффициента упругости, коэффициента Пуассона, коэффициента теплопроводности), условий отвода тепла, жесткости системы «инструмент – заготовка» при постоянном осциллографическом контроле.

При постоянном усилии прижима частота сигналов, генерируемых образцом материала при его шлифовании, характеризует качество обрабатываемой поверхности. Результаты экспериментальных исследований поверхностной обработки твердых минералов в режиме квазипластичности показали, что ненарушенная поверхность лейкосапфира с шероховатостью $R_a = 1,95$ нм была получена при увеличении частоты акустического сигнала и уменьшении амплитуды сигнала. При обработке образца поликристаллического алмаза перед появлением трещины

в образце наблюдались падение частоты сигнала и одновременно рост амплитуды сигнала [16]. Частотный контроль акустического сигнала производится путем анализа осциллограмм за вычетом собственных колебаний системы, выходящих за пределы собственных колебаний элементов поверхностного слоя. Для идентификации автоколебаний, относящихся к воздействию на мезообъемы поверхностного слоя, необходимо учесть технические «шумы», не относящиеся к процессу обработки [21].

Для осуществления процесса обработки в режиме квазипластичности после достижения полного контакта заготовки с шлифовальным кругом контактные напряжения поддерживаются постоянными в пределах $(0,1-10) \cdot 10^5$ МПа в зависимости от свойств, условий отвода тепла, жесткости системы «инструмент – заготовка».

Проведенные экспериментальные исследования косвенно подтвердили модель квазипластичной поверхностной обработки. При квазипластичной обработке формирование нанометрового рельефа поверхности возможно при различной крупности зерна шлифовального круга, так как доля хрупкого разрушения при правильно подобранных режимах обработки минимальна.

Акустический сигнал, генерируемый в процессе квазипластичной обработки поверхности минералов, может использоваться не только для контроля качества обрабатываемой поверхности, но и для управления процессом обработки [9]. Возможность адаптивного управления процессом основывается на классических теориях управления [1, 4], исследованиях возможности групповой обработки изделий из твердых, хрупких материалов [6] и диагностировании процесса обработки [8].

При изменении кристаллографического направления обрабатываемой поверхности управление врезной подачей может производиться в соответствии с изменением частоты акустического сигнала, генерируемого заготовкой при поверхностной обработке. Как только в процессе обработки происходит падение частоты акустического сигнала, необходимо осуществлять управляющее воздействие по снижению усилия прижима. Увеличение частоты акустического сигнала, генерируемого в процессе шлифования обрабатываемым материалом, после дополнительной тарировки по величине заданной шероховатости в соответствии с техническими возможностями оборудования, может служить сигналом к окончанию процесса шлифования при достижении заданной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Осциллографический контроль процесса обработки позволяет осуществлять контроль тепловых параметров. Увеличение врезной подачи повышает силу трения и, как следствие, вызывает повышение температуры в зоне резания, что отражается



Рис. 7. Концептуальная модель квазипластичной поверхностной обработки твердых материалов

в осциллограммах процесса [20]. Путем измерения импеданса системы, являющегося функцией температуры, можно контролировать тепловые процессы, сопровождающие шлифование твердых кристаллических материалов.

Осциллографический контроль процесса обработки, а также совмещение его с тестовыми методами дают возможность косвенного контроля тепловых параметров. Тестовые методы увязывают статическую (характеризующую выходные размерные параметры) и динамическую (характеризующую шероховатость обрабатываемой поверхности) составляющие упругой деформации в упругой обрабатывающей системе путем проведения вычислений соответствующих параметров. В основу диагностирования обработки твердых хрупких материалов электронной техники были положены зависимости процесса микрошлифования металлов, изложенные в работах А.С. Чубукова [23, 24], в которых основным параметром для диагностирования процесса микрошлифования рассматривается время переходных процессов резания в упругой обрабатывающей системе. Время переходных процессов резания $T_{\text{п}}$ характеризует время перехода из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние и является параметром, характеризующим факторы воздействия на упругую обрабатывающую систему: площадь контакта режущего инструмента и изделия, изменение режущей способности шлифовального круга, свойства обрабатываемого и обрабатываемого материалов, жесткость упругой обрабатывающей системы. Время

переходных процессов $T_{\text{п}}$ характеризует поведение упругой обрабатывающей системы как в статике, так и в динамике. Идентифицируя $T_{\text{п}}$, в любой момент можно контролировать фактические выходные параметры обработки (размер и шероховатость) в реальном масштабе времени [10].

На основании анализа информации о статической и динамической составляющих упругой деформации и времени переходных процессов резания возможно постоянное (в реальном масштабе времени обработки) диагностирование основных технологических параметров поверхностной обработки автономно на каждом отдельном изделии как при индивидуальной, так и при групповой обработке [19]. Анализ температурного и частотного параметров, связанных между собой, позволяет принимать адаптивные действия по смене режимов обработки, препятствующие хрупкому разрушению обрабатываемого изделия. С применением температурного и частотного параметров в качестве управляющих для автоматизации процесса квазипластичной поверхностной обработки была разработана концептуальная модель процесса механической обработки поверхности твердых хрупких минералов в режиме квазипластичности (рис. 7) [18].

Кроме того, поверхностная обработка в режиме квазипластичности позволяет получить подповерхностный слой обрабатываемого образца без внесения дефектов процессом обработки. Для ряда изделий это является важнейшим фактором при их дальнейшей эксплуатации.

Для измерения локальных упругих свойств и визуализации внутренней микроструктуры кристаллов

использовался широкополосный импульсный сканирующий акустический микроскоп (ШИАМ, Лаборатория акустической микроскопии, ИБХФ РАН) [15]. На нем были исследованы поверхности образцов до и после обработки и их подповерхностный слой на глубине 15 мкм до и после обработки. Изображения получены на высокочастотном отражательном акустическом микроскопе фирмы Leica (рабочая частота 1 ГГц, поперечное разрешение 1 нм). В результате исследований обработанных образцов поликристаллического алмаза и лейкосапфира в подповерхностном слое кристаллов после обработки не обнаружено новых привнесенных процессом обработки дефектов, то есть качество подповерхностного слоя после обработки не ухудшилось. Это часто имеет важнейшее значение для обработки высокотехнологичных изделий, требующих пониженную дефектность для обеспечения надежности, точности и бесперебойности работы.

Экономический эффект достигается за счет получения на этапе алмазного шлифования поверхности обрабатываемых твердых материалов шероховатости нанометрового уровня при минимуме дефектов, привнесенных технологическим процессом обработки по сравнению с существующим шлифованием лейкосапфировых пластин свободным и связанным абразивом. Поверхности полученных изделий не нуждаются в полировании в агрессивных средах. Использование предложенной технологии позволяет сократить количество технологических операций, что обеспечивает не только сокращение брака и снижение себестоимости заготовок, но и увеличивает продажную цену заготовок после алмазного шлифования [11].

Способ обработки твердых материалов в режиме квазипластичности является перспективным для автоматизации процесса обработки, поскольку имеет возможность осуществления диагностики процесса различными аппаратными средствами, дополнительного контроля качества обрабатываемых изделий и групповой обработки изделий из твердых материалов. Способ может быть применен для серийного производства изделий микро- и нанoeлектроники, медицинских и других технологических изделий в области нанотехнологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1972. 416 с.
2. Ашкинази Е.Е., Коньшин А.С., Теплова Т.Б. и др. Получение лейкосапфировых подложек с критически контролируруемыми параметрами шероховатости нанометровой величины / Международный симпозиум «Образование через науку», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 17–19 мая 2005 г.
3. Коньшин А.С., Сильченко О.Б., Теплова Т.Б. Обработка твердоструктурных минералов резанием на шлифовальных станочных модулях с ЧПУ с применением новой технологии // Горные машины и автоматика. 2001. № 11. С. 31–33.
4. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975, 304 с.
5. Обработка поликристаллических CVD алмазов в упругой обрабатывающей системе. Е.Е. Ашкинази, В.Г. Ральченко, А.С. Коньшин, Т.Б. Теплова и др. / Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технологии его изготовления и применения // Сборник научных трудов. Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля. 2005. Вып. 8. С. 216–220.
6. Сильченко О.Б. Теория и методы размерно-регулируемой и бездефектной обработки твердоструктурных минералов резанием. Дис. докт. техн. наук. М.: НИИ «Научный центр», 2000 г.
7. Соловьев В.В. Повышение эффективности прецизионной обработки заготовок из лейкосапфира. Автореф. дис. канд. техн. наук. Брянск: БГТУ, 2012.
8. Теплова Т.Б., Сильченко О.Б., Коньшин А.С. Технологические аспекты диагностики бездефектной обработки кристаллов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 11. С. 218–220.
9. Теплова Т.Б. Самонастраивающееся управление со стабилизацией выходных параметров обработки на основе диагностирования параметров квазипластичного резания в мезообъемах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 5. С. 157–161.
10. Теплова Т.Б. Обоснование рациональных режимов шлифования алмазов при их огранке. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МГГУ, 2002.
11. Теплова Т.Б. Перспективы технологии размерно-регулируемого шлифования твердых высокопрочных минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 1. С. 90–94.
12. Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Соловьев В.В. Особенности микрошлифования кристаллов лейкосапфира на станочном модуле с ЧПУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 3. С. 52–56.
13. Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Соловьев В.В., Ашкинази Е.Е. О выборе рациональных режимов процесса микрошлифования монокристалла лейкосапфира // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 9. С. 76–83.
14. Теплова Т.Б., Гридин О.М., Коньшин А.С. Осциллографический метод контроля процесса микрошлифования на станочном модуле с ЧПУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 10. С. 84–88.

15. **Теплова Т.Б., Гридин О.М., Петронюк Ю.С., Левин В.М.** О перспективах применения ультразвуковой микроскопии для оценки качества кристаллов после микрошлифования на станочном модуле с ЧПУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 11. С. 124–129.
16. **Теплова Т.Б.** Учет акустических и температурных параметров при определении управляющих параметров обработки твердых материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 1. С. 103–104.
17. **Теплова Т.Б.** Физические процессы при механической обработке твердых минералов на ультразвуковых частотах // Горный журнал. 2007. № 1. С. 45–47.
18. **Теплова Т.Б.** Функциональная управляющая модель процесса механической обработки поверхностей твердых материалов, обеспечивающая получение шероховатости нанометрового уровня // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 1. С. 357–359.
19. **Теплова Т.Б.** Учет упругих постоянных упругой обрабатываемой системы при микрошлифовании твердых материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 3. С. 351–354.
20. **Теплова Т.Б.** Частотные характеристики минералов при поверхностном разрушении под воздействием периодического механического поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 370–373.
21. **Теплова Т.Б.** Контроль качества обрабатываемой поверхности в процессе квазипластичной обработки твердых хрупких минералов // Контроль. Диагностика. 2008. № 9.
22. **Теплова Т.Б.** Разработка научных основ создания технологии прецизионной обработки твердых хрупких минералов. Дис. на соиск. учен. степ. док. техн. наук. М.: ЭНИМС, 2009.
23. **Чубуков А.С.** Разработка и исследование методов самонастройки режимов обработки на крупношлифовальных станках с оперативной системой ЧПУ на основе микро-ЭВМ. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ЭНИМС, 1980.
24. **Чубуков А.С., Ратмиров В.А., Коньшин А.С.** Способ адаптивного управления. Авт. свид. № 878540 М. кл. В 24В 49/00. Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. 1981, № 41.

ТЕПЛОВА Татьяна Борисовна –

доктор технических наук, профессор Центра алмазных технологий и геммологи ГАПОУ КП № 11

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1090 руб.

НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ В СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

Под редакцией В. А. Глазунова

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2021. – 316 с.
ISBN 978-5-94836-537-4

В книге представлены новые механизмы параллельной структуры различных классов, имеющие широкие возможности применения в робототехнических системах для технологических и транспортных процессов в различных отраслях промышленности, а также космической и медицинской робототехнике. Проведены исследования в области кинематики, динамики и управления такими системами.

Рассмотрены механизмы мобильных роботов технологического и медицинского назначения, исследованы вопросы их динамики и управления. Представленные механизмы разработаны и исследованы в Институте машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук.

Книга предназначена для специалистов в области теории механизмов и машин, научных работников и инженеров, чья деятельность связана с созданием новых робототехнических систем, а также студентов, аспирантов и преподавателей.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosfera.ru, sales@technosfera.ru