

Перспективы применения режима квазипластичности для обработки актуальных высокотехнологичных изделий из твердых хрупких материалов

А. А. Панкратов

Рассмотрены различные аспекты применения алмазных материалов для производства инновационных высокотехнологичных продуктов и изделий для приборостроительной, атомной, авиационно-космической и других отраслей промышленности. С целью повышения эффективности обработки твердых хрупких материалов предложено создание устройства или оснастки к действующим серийным шлифовальным станкам, воспроизводящим элементы квазипластичной обработки.

Ключевые слова:

квазипластичность, обработка твердых хрупких кристаллических материалов, синтетический алмаз, шлифовальный станочный модуль

УДК 621.74 | ВАК 05.02.07

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.72.80

Перспективным способом получения высококачественной поверхности нанометрового рельефа твердых хрупких кристаллических материалов является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности (см. СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2021, № 1, 2, 3).

Стоит напомнить, что квазипластичность – проявление пластических свойств поверхностным слоем твердых хрупких материалов при обработке. Технология квазипластичной обработки твердых материалов основана на обеспечении механического воздействия на обрабатываемую поверхность (ОП) материала при подаче шлифовального круга (ШК), составляющей доли мкм/ход. При этом поверхностный слой твердых хрупких материалов проявляет свойство пластичности и преобладающим механизмом становится не хрупкое разрушение, а квазипластичное удаление поверхностного слоя материала.

Обработка в режиме квазипластичности достигается при обеспечении жесткости конструкции упругой обрабатывающей системы и относительной изоляции от внешних возмущений. Таким образом, заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме с получением обработанной поверхности нанометрового рельефа.

Обработка в режиме квазипластичности основана на применении известных разработок в шлифовании металлов, твердых и хрупких материалов, реализована посредством упругой обрабатывающей системы станочного модуля АН15ф4 с числовым программным управлением (ЧПУ), который был создан в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМСе, Москва) (рис. 1).

В основе конструкции лежат известные принципы адаптивного управления станков для шлифования

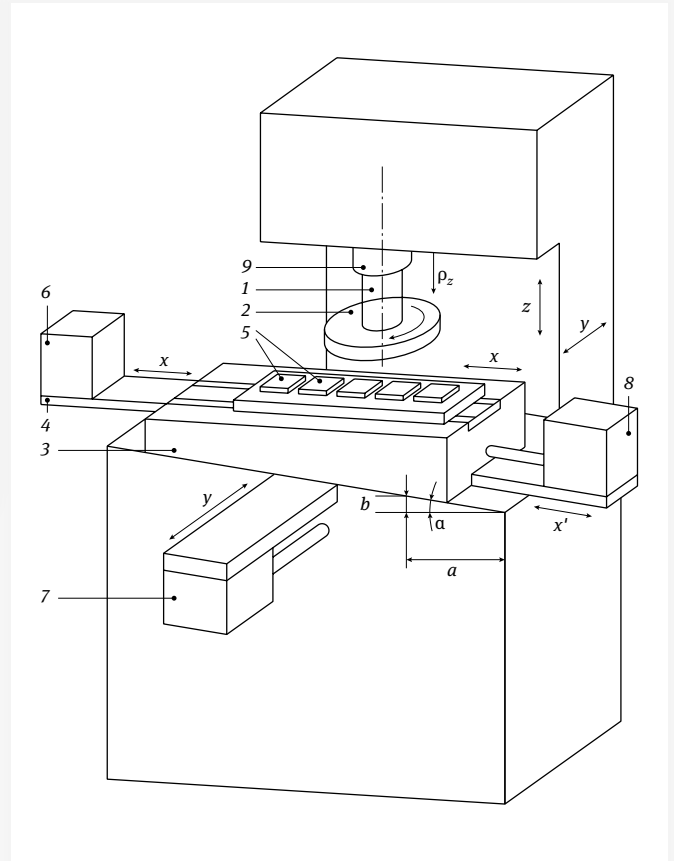


Рис. 1. Станочный модуль АН15ф4 с ЧПУ: вверху – общий вид, справа – схема станочного модуля

металлов [1] и ноу-хау разработчиков. Упругая обрабатывающая система обеспечивает достаточную жесткость, высокую разрешающую способность и стабильность дискретного перемещения исполнительных органов. В станочном модуле с ЧПУ модели АН-15ф4 реализована принципиально новая технология на основе информации об упругих деформациях в обрабатывающей системе.

Рассмотрим принцип работы станочного модуля АН15ф4 с ЧПУ [2]. Основные конструктивные узлы и детали станочного модуля приведены на рис. 1 и 2. Стол 1 станка перемещается в продольном (ось X) направлении по направляющим 2 крестового суппорта 3 посредством ременной передачи 4 от двигателя ДК-1-5.2-П постоянного тока и червячного редуктора 5 с передаточным числом 1:18. Скорость перемещения стола регулируется бесступенчато, изменением числа оборотов двигателя привода стола.

Реверс стола осуществляется при помощи бесконтактных путевых выключателей. Крестовый суппорт имеет поперечное перемещение вдоль оси Y . По направляющим 6 и 7 крестовый суппорт перемещается за счет механизма поперечного перемещения в виде червячного редуктора 8 с передаточным числом 50 от шагового двигателя ШД5Д1М. Вертикальная подача вдоль оси Z осуществляется перемещением крестового суппорта по поперечным направляющим 6, расположенным с наклоном 1:10 относительно направляющих стола (ось X) по крестовой шпонке 9. Привод вертикальной подачи осуществляется от шагового двигателя ШД5Д1М через механизм вертикальной подачи в виде червячного редуктора 10 с передаточным числом 1:50 и винтовой парой качения 11 с шагом 6 мм. Величина вертикального



перемещения стола относительно инструмента составляет 10 мм. Три шлифовальных шпинделя 12 размещены в расточках револьверной головки 13 и поочередно перемещаются в зону обработки ее поворотом на 120° в обе стороны от начального положения. Компонентное решение и конструкция 6-координатного станочного модуля позволяет обеспечить жесткость упругой обрабатывающей системы в направлении нормали к обрабатываемой поверхности – 120 (Н·мкм), диапазон изменения врезных подач – 10...1250 нм/об, биение режущей поверхности шлифовального круга – менее 0,1 мкм. Станочный модуль содержит три шлифовальных шпинделя с аэростатическими опорами вращения в каждом из них. Частота вращения каждого шпинделя регулируется в диапазоне 3000–6000 об/мин. Основные параметры станочного модуля приведены в статье [3].

Проводились следующие испытания макетного образца станочного модуля с числовым программным управлением:

1. станок эксплуатировался в течение трех лет на предприятии КБ «Гюйс» (г. Рыбинск) при обработке керамических видеоголовок с твердостью 9 единиц по шкале Мооса;
2. обрабатывалось большое количество изделий из фианитов с 57, 33 и 17-ю гранями;

3. обрабатывалось изделие из сапфира (312 граней);
4. в сентябре 1999 года была произведена обработка натуральных алмазов, ориентированных только в «твердом» направлении по специальному заданию фирмы ILC (Ирландия).

Во всех случаях были получены положительные результаты. Поверхности после процесса обработки не имели дефектов хрупкого разрушения, привнесенных процессом обработки. Заданные выходные параметры были

получены в соответствии с техническими заданиями на изготовление. Несмотря на имеющиеся недостатки обработки изделий при этих испытаниях (невысокая производительность), были сделаны выводы о перспективности развития способа поверхностной обработки в режиме квазипластичности и возможности его применения для автоматизации процесса поверхностной обработки изделий твердых хрупких материалов при индивидуальном и групповом производстве изделий.

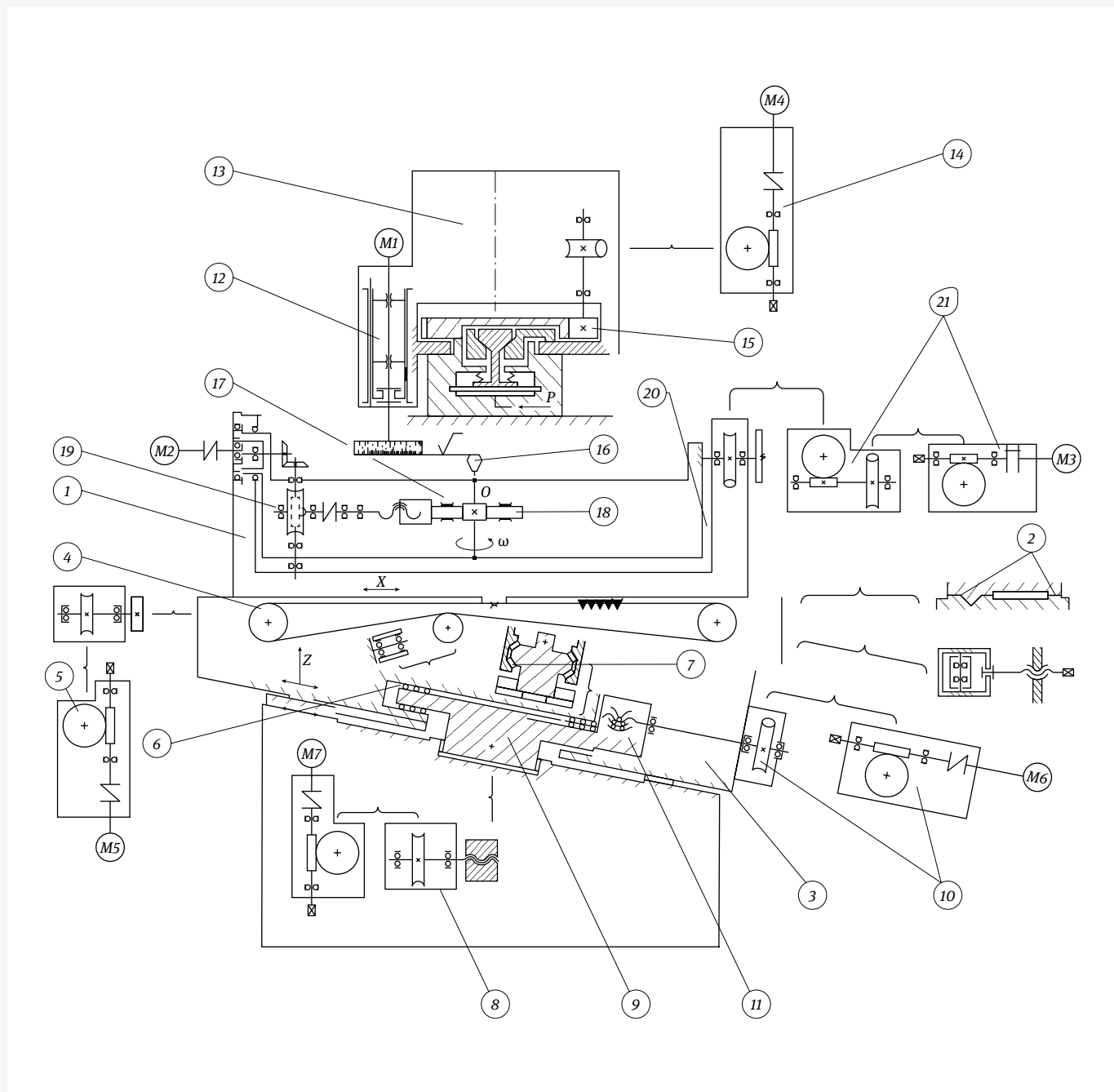


Рис. 2. Кинематическая схема станочного модуля АН15φ4 с ЧПУ

Проведенные Тепловою Т. Б. исследования тепловых процессов, сопровождающих квазипластичную обработку [4], и частотного анализа колебаний, сопровождающих квазипластичную обработку [5], позволяют сделать выводы об актуальности квазипластичной обработки твердых хрупких материалов в интересах современных высокотехнологичных отраслей промышленности: микроэлектроники, светотехники, оптики и др.

Поверхностная обработка твердых хрупких материалов в режиме квазипластичности актуальна для получения поверхностей материалов электронной техники с нанометровым рельефом поверхности без дефектов, привнесенных процессом обработки. Особенно это важно для перспективных или вновь созданных материалов, имеющих сложности в обработке из-за их твердости и хрупкости.

Фундаментальной базой развития всех современных систем радиоэлектронной аппаратуры являются интегральная и функциональная микроэлектроника. Рабочие характеристики электронных компонентов, а следовательно выходные параметры аппаратуры определяются свойствами используемых материалов. Растущие требования к современной электронной аппаратуре требуют создания и исследования новых материалов для изготовления компонентов. Одними из самых перспективных материалов являются широкозонные материалы, такие как карбид кремния и алмаз.

При этом имеются наработки по применению алмаза в качестве эпитаксиальной подложки для выращивания функциональных полупроводниковых слоев из SiC, GaN, GaP и др.

Алмаз, помимо ювелирной промышленности, может применяться в микроэлектронике и других отраслях промышленности благодаря своим исключительным свойствам. Алмаз является одним из лучших изоляторов, в отличие от кремния, который даже в особо чистом виде является полупроводником. В качестве изолятора алмаз характеризуется чрезвычайно высокой сопротивляемостью электрическому пробоему, поэтому на его основе можно изготавливать более миниатюрные электронные устройства, чем по кремниевой технологии. При легировании бором, азотом или фосфором алмаз превращается в полупроводник. В мире постоянно расширяется использование алмазных материалов для производства целого ряда инновационных высокотехнологичных продуктов и изделий для приборостроительной, атомной, авиационно-космической и других отраслей промышленности.

К таким изделиям относятся прецизионные подложки и приборные заготовки для микроэлектроники и оптоэлектроники, конструкционные элементы мощных СВЧ-транзисторов и теплоотводов для

силовой электроники, светодиодов и лазеров голубого и УФ-диапазона, фотоприемников УФ-диапазона, детекторов ядерных и ионизирующих излучений, датчиков ионизирующих излучений для горнодобывающей промышленности, МЭМС-структур и ряда других.

В микроэлектронике подложка выполняет роль механического носителя и отводит тепло от микросхемы в процессе ее работы. Поэтому для изготовления подложек применяются кристаллические материалы, обладающие большой твердостью и высокой теплопроводностью (кремний, лейкосапфир, алмаз). В микроэлектронике приборы изготавливаются путем последовательного осаждения функциональных слоев на подложки. Эпитаксия – это метод послойного выращивания одного кристаллического твердого тела на поверхности другого (подложки), при котором растущий кристалл наследует кристаллографическую структуру подложки. На подложку после эпитаксии наносят элементы микросхем. В связи с этим важной задачей является обработка твердых и новых материалов для применения изделий из них в микроэлектронике. В настоящее время точность геометрической формы и разброс размеров по толщине пластины при изготовлении электронных компонентов лежит в пределах 5–10 мкм.

Практикой установлено, что чем выше размерная и геометрическая точность обработки, тем выше процент выхода годных полупроводниковых приборов. Изготовление подложки является первым этапом в создании микросхем и приборов на их основе. От качества подложки зависит надежность работы микросхем. Дефекты поверхностного и подповерхностного слоев подложки прорастают в выращенную на ней микросхему и могут привести к ее отказу и сбою в работе прибора, в состав которого входит эта микросхема. Следовательно, особую актуальность приобретают задача обработки поверхности алмазных пластин с достижением требуемых для дальнейшего применения в микроэлектронике и технике выходных качественных параметров.

Помимо перспектив использования в изделиях отечественной промышленности, алмазные материалы данного типа обладают высокой конкурентоспособностью на внешних рынках и имеют значительный экспортный потенциал.

В настоящее время ведется интенсивная разработка технологии изготовления пассивных и активных приборов на основе алмаза. Уникальные свойства алмаза делают целесообразным его применение при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС), к которым относится множество микроустройств различного назначения, производимых сходными методами с использованием модифицированных групповых технологических приемов микроэлектроники – гидравлические и пневмоклапаны, сопла, пружины,

микродатчики и исполнительные устройства, инструменты (скальпели, пинцеты, аналитические лаборатории на чипе).

Использование алмазного сырья для создания высокотехнологичных продуктов и изделий позволит в десятки раз увеличить рентабельность производства по сравнению с алмазо-бриллиантовой отраслью, и в тысячи и более раз – по сравнению с производством алмазных абразивных порошков, а также диверсифицировать отечественную промышленность, найти новые рынки и направления сбыта продукции.

До недавнего времени использование алмазного сырья для высокотехнологичной продукции было ограничено добычей природных алмазов и их качеством, не позволяющим применять их для серийного изготовления изделий микроэлектроники, оптоэлектроники, светотехники и других отраслей промышленности, требующих высококачественного алмазного сырья.

В настоящее время широкое развитие получил синтез искусственных алмазов. Промышленные синтетические алмазы также широко известны как HPHT-алмазы или CVD-алмазы, названные так в честь двух популярных методов их производства. HPHT-процесс (High Pressure High Temperature) – при высоких давлении и температуре, а CVD-процесс (Chemical Vapor Deposition) – химическое осаждение из пара.

Впервые искусственный рост алмаза был выполнен методом HPHT в 1953 году. Начиная с 1980-х годов активно развивается метод синтеза из газовой фазы (CVD), позволяющий получать алмазы, пригодные для создания электронных приборов. В 2003 году на рынок вышла первая волна искусственных алмазов ювелирного качества. В основном их производством занимались компании Gemesis во Флориде и Apollo Diamond в Бостоне. На данный момент производство синтетических алмазов стремительно набирает обороты. CVD-метод позволяет выращивать монокристаллические алмазы на подложках площадью до $10 \times 10 \text{ мм}^2$ со скоростью порядка 20 мкм/ч [6]. В настоящее время доминирующее положение в мире в области синтеза алмазов электронного качества занимает фирма Element Six (Великобритания), являющаяся дочерним предприятием фирмы-монополиста De Beers. Достигнутые результаты позволяют воспроизводимо получать монокристаллический алмаз электронного качества. Разработки приборов на синтетических монокристаллических алмазах ведутся на протяжении многих лет. На природных и синтетических монокристаллах алмаза уже удалось создать СВЧ-транзисторы, диоды Шоттки, «слепые» к солнечному свету фотоприемники, датчики рентгеновского излучения и т. п. [7, 8].

Однако по политическим причинам с 2019 года алмазный материал электронного качества попал

в санкционные списки и запрещен к поставкам на территорию России для промышленных предприятий и научных учреждений.

Общий объем годового производства синтетических алмазов (с учетом технических алмазов) в 2020 году оценивался в 7–12 млрд карат.

Последнее десятилетие объемы рынка росли на 10–15% в год: рост обеспечивался активным спросом со стороны отраслей строительства и высоких технологий. Области применения продукта в основном являются высокотехнологичные приборы и научные исследования:

- полупроводники, датчики, дозиметры, детекторы ионизирующих излучений, высоковольтные переключатели, окна для клистронов и гиротронов мегаваттной мощности, элементы конструкций в лампах бегущей волны;
- акустические системы, СВЧ-приборы акустоэлектроники;
- приборы рентгеновской дифракционной оптики и лазерная техника;
- теплоотводящие пластины для электронных приборов;
- алмазные электроды (для очистки питьевой воды);
- СВЧ-транзисторы;
- алмазные линзы, алмазные окна и кюветы, монокроматоры;
- алмазные иглы и кантилеверы для сканирующей зондовой микроскопии и создания наноструктур;
- ультра-нанокристаллические алмазные покрытия с контролируемой проводимостью.

Однако, несмотря на то, что алмаз является наиболее предпочтительным материалом для применения в высокотехнологичных областях промышленности, применение природных и синтетических алмазов ограничено сложностью их поверхностной обработки.

Искусственно выращенные алмазные пластины, полученные после разрезания слитка, обладают рядом нарушений, к которым относятся:

- наличие механически нарушенного слоя;
- неплоскостность и неплоскопараллельность сторон;
- изгиб и большой разброс по толщине.

Глубина механически нарушенного слоя является основной характеристикой качества обработки полупроводниковых пластин. Этот слой распространяется от обработанной поверхности в глубину объема полупроводникового материала. Общая толщина дефектного слоя зависит от способа обработки поверхности пластины. Причинами появления дефектного слоя являются упругие и пластические деформации, а также деформации разрушения, которые возникают в процессе обработки.



www.prombvk.ru

РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

12-14.04.2022

Специализированные выставки

- Машиностроение. Металлообработка
- Инновационный потенциал Уфы

ВДНХ **ЭКСПО** УФА




МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКИ
И ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



АДМИНИСТРАЦИЯ
ГОРОДСКОГО ОКРУГА г. УФА РБ



БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

 Мероприятия проводятся с учетом всех
требований Роспотребнадзора



ОРГКОМИТЕТ:
+7 (347) 246 41 80, 246 41 77
promexpo@bvkeexpo.ru

Facebook / [prombvk](https://www.facebook.com/prombvk)
Instagram / [promexroufa](https://www.instagram.com/promexroufa)
#рпфуфа #промфорумуфа

Анализ существующих методов поверхностной обработки изделий из твердых хрупких материалов для изделий нанoeлектроники показал, что в настоящее время единственным универсальным и наиболее употребимым методом поверхностной обработки таких материалов является алмазoабразивная механическая обработка. Применяемая в изготовлении электронных компонентов на основе кремния, арсенида галлия и других традиционных материалов химико-механическая полировка (Chemical Mechanical Planarization, CMP) не может быть использована в случае прецизионной обработки поверхностей сверхтвердых материалов, так как ключевым фактором является химическое воздействие рабочей среды на поверхность. Хотя ввиду химической инертности алмаза и карбида кремния такой вид полировки малоэффективен, химическое воздействие на поверхность приводит к диффузированию неконтролируемых примесей в приповерхностный слой полируемого материала, что значительно затрудняет дальнейшее применение полированных пластин в микроэлектронике. С экономической точки зрения химико-механическая полировка в течение 4–5 ч в чистой комнате, а затем алмазная полировка в чистой комнате в течение получаса ведут к значительному удорожанию стоимости готовой подложки и делает ее неконкурентной по сравнению с подложкой зарубежных стран.

При традиционном способе обработки твердых хрупких материалов (в том числе кристаллов), которым является механическое шлифование свободным и связанным абразивом, получают заготовки с шероховатостью поверхности около 200 нм и нарушенным поверхностным и подповерхностным слоем.

Среди перспективных способов обработки анизотропных поверхностей и получения высококачественной поверхности твердых хрупких кристаллических минералов нанометрового рельефа является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности, который является альтернативным традиционному механическому шлифованию.

Суть способа состоит в том, что при обработке кристаллического материала в определенном интервале контактных напряжений происходит не хрупкое разрушение, а пластичное удаление нанослоя обрабатываемого материала. Обработанная поверхность имеет нанометровый рельеф и практически не нарушенный подповерхностный слой.

Современные требования различных отраслей промышленности (микро-, нанoeлектроники, медицины) к качеству, а также к повторяемости выходных параметров обрабатываемых твердых материалов диктует необходимость автоматизации процесса обработки этих материалов с обязательным применением

диагностирования параметров этого процесса. Для растущих объемов применения высокотехнологичных изделий в области нанотехнологий требуется серийная обработка, которая может быть обеспечена автоматизацией процесса формирования поверхности в режиме квазипластичности. Режим квазипластичного удаления поверхностного слоя твердых хрупких минералов можно обеспечить при специальном подборе таких параметров, как усилие прижима и скорость движения инструмента параллельно поверхности кристалла, подвергаемой механическому воздействию.

В ранее проведенных исследованиях [9, 10] сделано предположение о том, что элементы способа квазипластичной поверхностной обработки могут быть реализованы практически на любом специализированном оборудовании при оснащении его дополнительными приспособлениями, обеспечивающими контролируемое усилие прижима и жесткость обрабатываемой системы. Возможна также автоматизация процесса [11].

Считая способ квазипластичности перспективным для обработки подложек из синтетического алмаза с получением заданных параметров по шероховатости поверхности и малодефектности подповерхностного слоя, стоит задача продолжить исследования этого способа и создания устройства или оснастки к действующим серийным шлифовальным станкам, воспроизводящим элементы квазипластичной обработки. Поскольку станок АН15ф4 с ЧПУ, на котором проводились эксперименты по отработке режимов квазипластичности, многофункциональный, многокоординатный и имеется в единичном экземпляре, для получения плоских поверхностей алмазных подложек не имеет смысла его воспроизводство в первоначальном виде.

Для осуществления прецизионной обработки в режиме квазипластичности планируется разработка конструкции и изготовление специальной оснастки к серийным шлифовальным станкам, позволяющей на серийном оборудовании достигать режима квазипластичной обработки с получением плоских поверхностей синтетического алмаза нанометровой шероховатости и минимальными нарушениями подповерхностного слоя, внесенными процессом обработки. Для крепления обрабатываемых подложек эффективно применение вакуумного удерживающего устройства, обеспечивающего равномерный прижим всей поверхности обрабатываемой подложки. Разрабатываемая оснастка обеспечит равномерный контролируемый прижим изделия к шлифовальному кругу, возможность изменения усилия прижима в процессе обработки, температурный и частотный контроль процесса обработки. После проведения исследований зависимости качества обработанных алмазов от технологических параметров (зернистость шлифовального круга (ШК),

07-09
июня 2022

Москва
ЦВК «Экспоцентр»
Павильон 8



При поддержке:

АРСС

Ассоциация развития
стального строительства



Российский союз
поставщиков
металлопродукции

7-я Международная
специализированная выставка

Металло Конструкции 2022



12+

Место проведения:



Генеральный
информационный партнер:



Организатор:



www.mc-expo.ru

+7 (495) 734-99-66

скорость вращения ШК, связки ШК коэффициента заполнения абразивных зерен в связке ШК, и др.), температурного фактора, усилия прижима, а также ряда других параметров будет выбран рациональный режим обработки и произведена доработка оснастки и дополнительных элементов к серийным шлифовальным станкам. Это позволит использовать специализированное оборудование (шлифовальные станки), оснатив их дополнительными элементами для получения подложек из синтетического алмаза, что значительно удешевит производственное получение больших партий таких подложек и ускорит массовый выпуск высокотехнологичных изделий (подложек для микроэлектроники и др.) на их основе. Развитие данной технологии предполагает:

- возможность обработки натурального и синтетического алмаза, карбида кремния и других материалов;
- возможность автоматизации отдельных процессов, а со временем и полного цикла обработки;
- возможность автоматизированного производства высокотехнологичных микроэлектронных, медицинских и эксклюзивных ювелирных изделий;
- возможность получения поверхности нанометровой шероховатости на этапе алмазного шлифования без химического травления в чистых комнатах;
- повышение конкурентоспособности продукции за счет повышения качества обработанной поверхности.

Осуществление этих исследований является тем более актуальным, поскольку в настоящее время в России предприятия по выпуску традиционных полупроводниковых подложек и конструкционных материалов для электроники практически прекратили свою деятельность, не выдержав конкуренции с зарубежными производителями, а широкое развитие производства алмазных подложек и высокотехнологичных алмазных изделий для микро- и оптоэлектроники обеспечивает технологический рывок для отечественной промышленности и новые перспективы развития ввиду уникальных возможностей предлагаемых алмазными материалами.

Очевидно, что исследования и разработка предлагаемой технологии, а также получение изделий из алмаза, лейкосапфира, карбида кремния, в том числе подложек для опто- и микроэлектроники и приборов на их основе, имеют не только технические, но и социальные последствия, связанные с повышением уровня жизни, созданием новых рабочих мест, оживлением предприятий электронной промышленности и смежников (химическая, машиностроительная, станкостроительная и другие отрасли промышленности).

Это создаст условия для формирования и развития новых направлений приборостроительной и атомной промышленности, авиационно-космической отрасли России на основе совершенно новых подходов – с использованием продвинутых современных технологий, что в перспективе позволит преодолеть один из существенных барьеров на пути модернизации экономики страны.

Литература

1. **Коньшин А. С.** Управление процессом шлифования для повышения производительности и точности при одновременной многоинструментальной обработке. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ЭНИМС, 1987.
2. **Коньшин А. С., Сильченко О. Б., Сноу Б. Д.** Способ микрошлифования твердоструктурных материалов и устройство для его реализации. Патент РФ № 2165837 от 27.04.2001.
3. **Теплова Т. Б.** Поверхностная обработка твердых хрупких минералов в режиме квазипластичности // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 1(022). С. 48–55.
4. **Теплова Т. Б.** Частотный анализ квазипластичной обработки и перспектива адаптивного управления для серийного производства высокотехнологичных изделий // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 3(024). С. 58–65.
5. **Теплова Т. Б.** Исследование тепловых процессов при поверхностной обработке твердых хрупких минералов в режиме квазипластичности // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 2(023). С. 74–80.
6. **Tallaire, et. al.** Growth of large size diamond single crystals by plasma assisted chemical vapour deposition: Recent achievements and remaining challenges // C. R. Physique, 14 (2013), 169–184.
7. **Umezawa H.** Recent advances in diamond power semiconductor devices // Materials Science in Semiconductor Processing, 78 (2018), 147–156.
8. **Bormashov V.S., et. al.** Thin large area vertical Schottky barrier diamond diodes with low on-resistance made by ion-beam assisted lift-off technique // Diamond & Related Materials, 75 (2017), 78–84.
9. **Теплова Т. Б.** Обоснование рациональных режимов шлифования алмазов при их огранке. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МГУ, 2002.
10. **Теплова Т. Б.** Разработка научных основ создания технологии прецизионной обработки твердых хрупких минералов. Дис. на соиск. учен. степ. док. техн. наук. М.: ЭНИМС, 2009.
11. **Гридин О. М., Теплова Т. Б.** Прецизионная обработка поверхностного слоя твердых хрупких материалов в режиме квазипластичности. М.: МГУ, 2012. 211 с.

Автор

Панкратов Алексей Алексеевич – соискатель



21-23 ИЮНЯ
МОСКВА
РОССИЯ

2022

Место проведения:



ЛИТМАШ

Международная выставка литейных технологий, материалов и продукции

МЕТАЛЛУРГИЯ

Международная выставка металлургических технологий, процессов и металлопродукции

Специальная экспозиция



ТРУБЫ
РОССИЯ
2022

12+

N1
в мире



При поддержке
The Bright World of Metals

www.metallurgy-russia.ru
www.litmash-russia.ru

Металл-Экспо
Тел.: +7 (495) 734-99-66

Messe Düsseldorf GmbH
Тел.: +49 (0) 2 11/45 60-77 93

