

УДК 679.8

О.М. Гридин, Т.Б. Теплова, А.А. Гоготов, М.А. Доронин

ПРИМЕНЕНИЕ АЛМАЗОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Алмаз известен человеку с древних времен. Со временем совершенствовалась технология обработки алмазов и расширялась область применения этого минерала. В настоящее время известны несколько методов обработки алмазов, использующие механическое, химическое или тепловое воздействие, позволяющие достигать нанометровых показателей шероховатости поверхности R_a .

В статье приводится описание этих методов с перечислением особенностей каждого метода и результаты обработки поверхности алмазов.

Ключевые слова: алмаз, метод обработки, шероховатость поверхности нанометрового уровня.

Твердость алмаза была хорошо известна еще в древности. Инструменты с алмазными наконечниками и ножи с алмазными режущими краями изготавливались в Индии в начале нашей эры. Алмаз применяли в Древнем Египте для бурения пород.

В середине XIX века в России алмаз использовали при резке стекла и других твердых материалов. С конца XIX века алмазы начали применять на производстве, главным образом, в качестве абразивного материала, стеклорезного инструмента и для изготовления фильтров в волочильном деле.

В общем мировом производстве и потреблении алмазного сырья, включая природные и синтетические алмазы, доля технических составляет 80–90 %. Среди технических алмазов доля природных составляет в разных странах от 10 до 20 %.

Алмазы технического назначения являются стратегическим сырьем для следующих отраслей:

- горнодобывающая, геологоразведочная, нефтедобывающая промышленность;
- машиностроение и металлургия;

- камнеобработка и стройиндустрия;
- приборостроение, радиоэлектроника, аэрокосмическая и оптико-механическая промышленность;
- производство медицинского оборудования [6].

Для применения алмаза в различных отраслях промышленности использовали традиционную механическую обработку. С развитием науки и технологии появились новые методы и способы обработки твердых хрупких материалов, включая алмазное сырье.

Методы обработки, использующие механическое, химическое или тепловое воздействие:

- механическая обработка;
- обработка в режиме квазипластичности;
- химико-механическая обработка;
- термохимическая обработка;
- динамическое полирование трением;
- обработка высоким энергетическим лучом (луч лазера/плазмы/иона).

Механическая обработка

Традиционным способом обработки твердых хрупких материалов (в том числе кристаллов) является механическое шлифование свободным и связанным абразивом [3]. Для шлифования используется диск из чугуна шаржированный алмазным порошком (абразив).

Скорость удаления материала во время алмазного полирования, увеличивается со скоростью вращения инструмента и с увеличением давления на него. Уровень снятия слоя алмаза во время полирования зависит от кристаллографического направления.

Метод используется в течение длительного времени и широко применяется в промышленности. Недостатком метода являются большие затраты на абразивный (обрабатывающий) материал и дорогостоящие алмазные диски. Анизотропия кристаллов алмаза создает трудность обработки по «твёрдому» кристаллографическому направлению {111}, достижение шероховатости нанометрового уровня осложняется.

Механически обрабатываются не только природные кристаллы алмаза, но и синтетические. Существуют два основных метода синтеза алмаза в виде монокристаллов и поликристаллов:

Традиционным методом HPHT (High Pressure High Temperature) синтеза алмаз выращивают из графита в присутствии металлов-катализаторов при высоких давлениях и высокой температуре ($P > 4$ ГПа, $T > 1100^\circ\text{C}$).

В последнее время активно развивается технология осаждения алмаза из газовой фазы (ХГФО – химическое

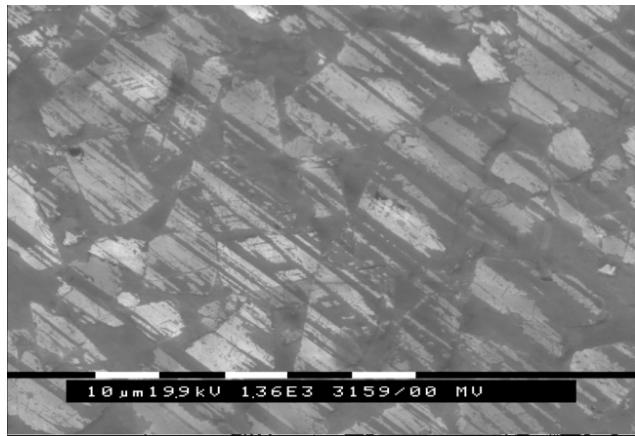


Рис. 1. Поверхность поликристаллического алмаза после механической обработки

газофазное осаждение, или CVD-Chemical Vapor Deposition), в котором реакционной средой служат, как правило, смеси метана и водорода. Поликристалический ХГФО алмаз получают в виде пленок и пластин большого диаметра (> 50 мм). Монокристаллические пленки алмаза синтезируются в СВЧ плазме на подложках из монокристаллов HPHT-алмаза.

Выращенные из газовой среды алмазные пленки и кристаллы являются труднообрабатываемым материалом, который имеет свою специфику обработки:

Механическая полировка монокристаллического алмаза обеспечивает шероховатость поверхности $R_a = 4-12$ нм, а внедрение в технологический процесс дополнительной вибрационной полировки в течение 100 ч позволяет существенно (на порядок) ее снизить, до $R_a = 0,4-0,8$ нм;

характерной особенностью механически полированной поверхности поликристаллического алмаза является практически неизбежное наличие наноступенек между соседними разориентированными зернами из-за различия в их скорости полировки. В случае полировки при фиксирован-

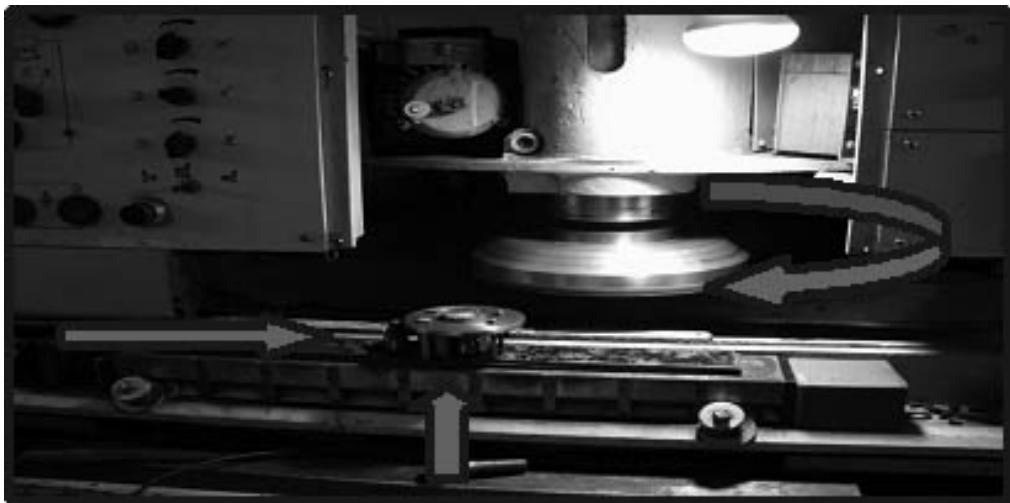


Рис. 2. Станочный модуль АН15ф4

ном направлении образца относительно вектора скорости эти ступеньки могут быть достаточно высокими (~ 50 нм) при средней шероховатости поверхности ~ 10 нм. Последующая финишная полировка (доводка) путем периодической смены направления полировки позволит получить чистовую шероховатость $R_a=1,2$ нм, что лишь немного хуже, чем для монокристаллов [1].

Обработка в режиме квазипластичности

Квазипластичность – проявление пластичных свойств поверхностным слоем твердых хрупких материалов при обработке.

Технология квазипластичной обработки твердых материалов основана на обеспечении механического воздействия на обрабатываемую поверхность (ОП) материала при глубине шлифования, составляющей доли мкм.

При этом поверхностный слой (ПС) хрупких твердых материалов проявляет пластичные свойства, таким образом, происходит не хрупкое разрушение, а квазипластичное удаление материала с формированием поверхности нанометровой шероховатости и с минимальными дефектами (не более 50 нм), внесенными процессом обработки. Квазипластичное удаление происходит при данных глубинах резания под воздействием контактного взаимодействия зерен шлифовального круга (ШК) с ОП, создающего периодическое переменное механическое поле.

Способ шлифования в режиме квазипластичности является перспективным для автоматизации и серийного изготовления деталей из алмаза с высококачественной поверхностью, востребованных в области нанотехнологий в машино- и приборостроении, микроэлектронике, оптике, энергетике, медицине и многих других отраслях промышленности. Однако при достижении высокого качества поверхности нанометровой шероховатости метод имеет низкую производительность.

Химико-механическая обработка

Химико-механическая (или тепловое окисление) обработка сначала

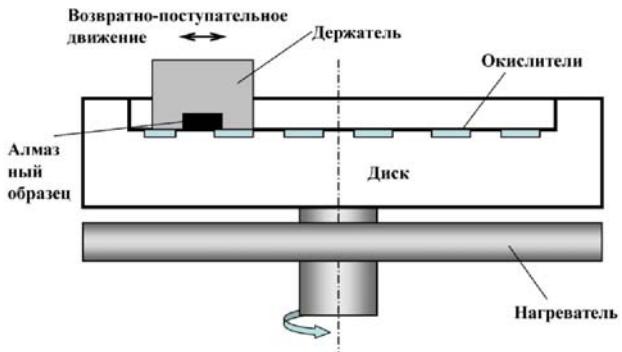


Рис. 3. Схема химико-механической обработки

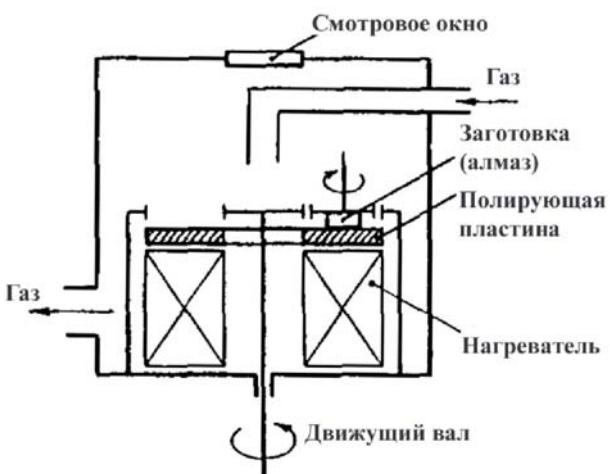


Рис. 4. Схема термохимической обработки

использовалась в алмазном производстве для проведения сверхтонкой поверхностной обработки [7,9]. Метод сочетает использование механической обработки с использованием химиков для увеличения скорости снятия слоя материала (рис. 3). Этот метод основан на окислении алмаза при высокой температуре. При обработке алмаза, под грузом, алмаз приходит в соприкосновение с полирующей пластиной в присутствии окисляющих химикатов при повышенных температурах (немного выше точки плавления окислителя). Диски для полирования

изготавливаются из чугуна или на основе керамических пластин (например, глинозем Al_2O_3). Окислители, такие как NaNO_3 , KNO_3 и KOH (температуры плавления 308, 324 и 360 °C соответственно) используются для химико-механического полирования. При полировании используются окислители, для уменьшения рабочей температуры и увеличения уровня удаления материала, такие как KMnO_4 H_2SO_4 (полируют при температуре 70 °C), LiNO_3 KNO_3 (от 130 °C и до 350 °C). Кроме того, алмазный абразивный порошок может использоваться, для облегчения полирования и увеличения глубины удаления слоя материала. При этом методе полирования скорость составляет приблизительно 40 мм/с, давление 1.4 МПа, и глубина полирования составляет примерно 0,5 мкм/ч. При использовании этого метода в присутствии перманганата калия (KMnO_4) и алмазных

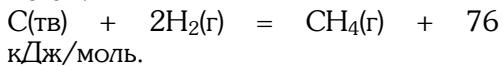
порошков и полировании при температуре 70 °C, можно получить шероховатость поверхности обрабатываемого алмаза менее чем 20 нм.

Этот метод может обеспечить более высокую скорость удаления материала, лучшие показатели шероховатости поверхности и менее поврежденную поверхность, чем механическая полировка. Тем не менее, продукты реакции, как правило, скапливаются на полирующем диске, поэтому для поддержания непрерывного процесса полировки требуется удаление продуктов реакции.

Термохимическая обработка

Сущность термохимического способа обработки алмаза заключается в растворении алмаза металлами переходной группы или сплавами этих металлов при температурах выше 600 °C.

При указанной температуре обработки алмаз не реагирует непосредственно с водородом, но последний хорошо реагирует с растворенным в металле углеродом алмаза, образуя метан:



Таким образом, достигается сохранность кристалла алмаза в не подлежащих обработке участках и непрерывная регенерация алмазообрабатывающего металла.

При обработке алмаза неподвижным относительно него инструментом обработанная поверхность кристалла принимает рельеф поверхности металла. Для полирования и расширения числа операций обработки, а также для повышения скорости процесса алмаз обрабатывают движущимся относительно обрабатываемой поверхности инструментом (диском).

Качественно новые результаты достигнуты при шлифовании алмаза. В традиционном механическом способе шлифования удаление массы алмаза происходит за счет механического соударения с частицами абразива при быстром вращении алмазного диска. При термохимическом способе алмаз контактирует при минимальной нагрузке с медленно вращающимся нагретым диском. Удаление массы алмаза происходит за счет растворения углерода алмаза металлическим диском. Все это позволяет получать при применении термохимического способа шлифования высокую чистоту обработанной поверхности.

Лабораторные испытания способа показали следующее:

- максимальная производительность термохимического способа распиливания составляет 3 мм/мин, что примерно в десять раз выше механического способа;

- термохимическим способом можно производить распиливание по любому кристаллографическому направлению, в то время как механически это возможно только по «мягким» направлениям;

- термохимическим способом можно проделывать одновременно несколько параллельных разрезов на одном кристалле [5].

Динамическое трение полирования

В этом методе, полирование алмазной заготовки производится без использования абразивных материалов, при контактном взаимодействии алмаза и металлического диска вращающийся с большой скоростью в атмосфере (рис. 5).

Физическая сущность полирования динамическим трением состоит в быстрой диффузии углерода из алмаза на диск, а затем испарения окисленного углерода на основе эффективного полирования в различных средах. Рентгеновский анализ загрязнений на поверхности инструмента (металлического диска) не обнаружил следы графита в отходах полирования или на металлической поверхности диска после полирования, что исключает возможность графитизации алмаза.

Для динамического трения полирования были использованы металлические диски, изготовленные из никеля и нержавеющей стали. При этом диски из нержавеющей стали обеспечили большую скорость полирования.

Благодаря проведенным экспериментам по обработке монокристаллических образцов были достигнуты следующие результаты по режимам обработки:

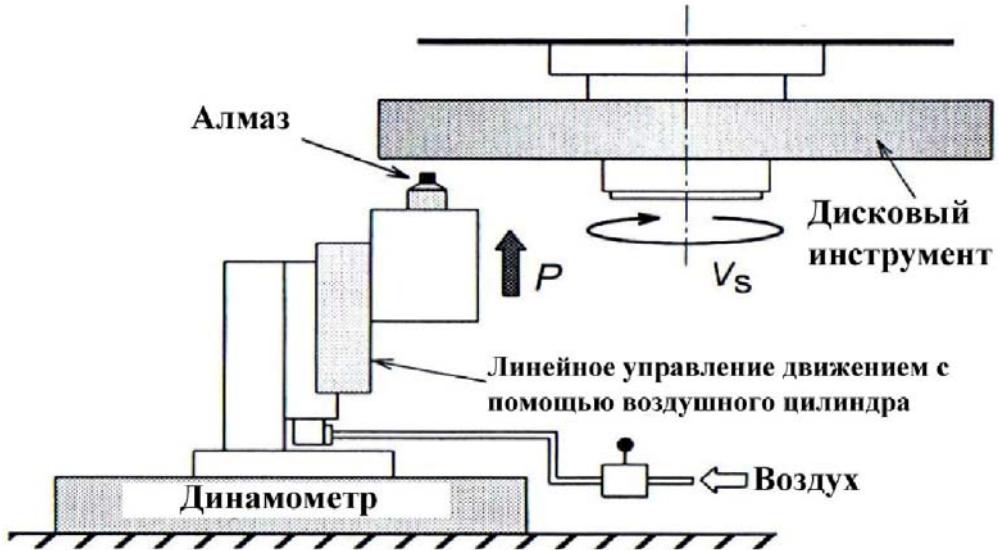


Рис. 5. Схематическое изображение динамического трения полировки

- при обработке квадратного монокристаллического образца (поверхность 0,6 мм Ч 0,6 мм) на высокой скорости 66,7 м/с и при давлении 114 МПа достигнут высокий уровень полирования, вплоть до 2600 мкм / мин (0,94 мм³/мин);

- алмаз не может быть отполирован при скорости ниже 25 м/с под давлением 100 МПа. Эффективная полировка выполняется только когда давление превышает 75 МПа при скорости 42 м/с;

- при увеличении скорости, полировка может осуществляться при более низких давлениях. В диапазонах скорости от 42 до 167 м/с, давление составляет от 114 до 25 МПа.

Также метод динамического трения полирования был применен для обработки PCD (компактный спеченный алмаз), и были получены следующие результаты по режимам обработки:

- PCD не могут полироваться при давлении ниже, чем 27 МПа и при скоростях ниже, чем 10,5 м/с.

При более высоких скоростях, качество обработки улучшилось с увеличением скорости скольжения при этом давлении;

- достаточно высокий уровень снятия материала (скорость 1,12 мм³/мин) был достигнут при скорости диска 53,3 м/с и давлении 27 МПа для поверхности PCD (3 мм × 1 мм);

- используемые параметры полирования находятся в следующих пределах: скорость скольжения от 10,5 до 53 м/с и давление от 3 до 27 МПа. При этом шероховатость поверхности $R_{max} = 0,06$ мкм была достигнута для монокристалла алмаза и 0,45 мкм для PCD.

Существенные особенности метода динамической полировки трением (DFP), которые обеспечивают его потенциальное превосходство над другими существующими методами, включают в себя:

- полирование производится созданием давления на металлический диск, вращающийся с высокой скоростью, без использования абразивов;

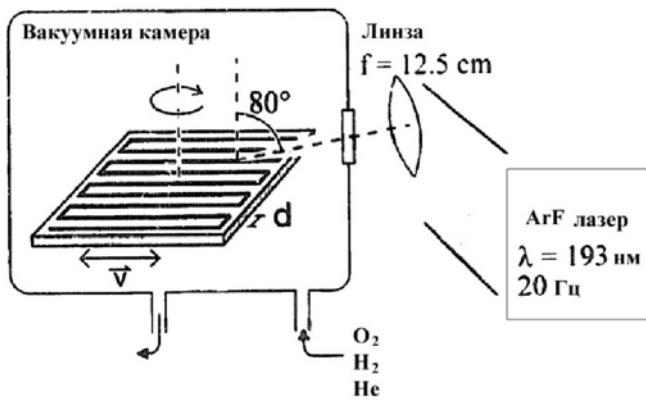


Рис. 6. Схема осуществления лазерной обработки

- короткое время полирования (от нескольких десятков секунд до нескольких минут);
- обработка может производиться при комнатной температуре и не требует специального оборудования для нагрева полирующего диска и алмазного образца;
- для обработки не требуется контролируемой среды или вакуумной камеры.

Благодаря методу динамического трения полированием можно получить:

- для монокристаллического алмаза – шероховатость поверхности R_{\max} порядка 60 нм при скорости удаления материала – 0,94 $\text{мм}^3/\text{мин}$;
- для PCD алмаза – шероховатость поверхности 450 нм при скорости – 1,12 $\text{мм}^3/\text{мин}$.

Полировка пучком высокой энергии

Методы высокой энергии пучка включают плазменный /ионного пучка и лазерные [8]. Ионным /плазменным пучком и лазерная обработка являются бесконтактными методами полирования, которые обычно не требуют усилия, приложенного к образцу или нагрева массивного образца, поэтому возможно полирование объемной поверхности и локальное полирование небольших участков (рис. 6).

В плазменном и ионно-лучевом полировании неровности поверхности удаляются путем напыления и травления кислородом ионов плазмы или ионного пучка.

В лазерной обработке, неровности на алмазной поверхности удаляются в результате высокой температуры окисления в зоне воздействия луча лазера. Но для осуществления этих

методов необходима контролируемая среда, как правило, вакуум, для создания которого требуется дорогостоящее оборудование. Ион/плазменное полирование использует принцип бомбардировки поверхности алмаза реактивным/нереактивным ионным пучком. Чистота полирования зависит от угла падения ионного облучения в отношении поверхности алмаза, типа и энергии облучения ионами. Нереактивное излучение даёт более высокую скорость обработки, чем реактивное ионное распыление, потому что кислород окисляет атомы углерода, но может привести к загрязнению поверхности из-за нагрева плазмы. При скорости обработки около 9,5 $\mu\text{мм}/\text{ч}$, могут быть получены алмазы, с шероховатостью поверхности R_a 0,4 нм. В ионной полировке, механизм удаления материала основан на том, что поверхность алмаза подвергается бомбардировке ионами, и происходит физическое удаление атомов углерода. Ион движется с энергией, достаточной для проникновения сквозь несколько слоев поверхности алмаза, а затем нейтрализуется только после нескольких столкновений с принимающими атомами (алмаз). Кинетическая энергия ионов и энергия ионизации затем преобразуются по рекомбинации в нагрев ок-

ружающей решетки так, что один или более атомов принимающей решетки сублимируются. Кроме того, столкновение ионов может просто сбить с поверхности алмаза атомы распыления.

Существенные особенности метода лазерной обработки, обуславливают его потенциальное превосходство по сравнению с другими существующими методами. Полирование может проводиться при комнатной температуре и занимает короткое время (от нескольких секунд до нескольких минут), это бесконтактный процесс и не существует никаких ограничений на форму полируемой поверхности; могут быть достигнуты значения шероховатости поверхности Ra порядка нескольких нанометров. Лазерная обработка имеет следующие недостатки: химическая неоднородность поверхности после обработки, область полирования ограничивается размером лазерного пятна, также для полирования больших площадей кон-

турных поверхностей необходимо сканирование обрабатываемой поверхности; графитовые слои могут загрязнить поверхность алмаза в процессе обработки.

Методы ионного пучка позволяют достичь окончательной шероховатости поверхности порядка нескольких нанометров, что подходит для многих электронных устройствах, требующих точности полирования на небольших участках. Недостатками метода являются сложность создания экспериментальной установки и большие капитальные затраты, связанные с критическими требованиями к ориентации образца относительно падения пучка ионов. Область обработки поверхности ограничена размерами ионного пучка. Кроме того, этим методом достигается весьма неоднородное полирование, и появляются дефекты в виде выемок на образовавшейся поверхности между границами зерен поликристаллического алмаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкинаиз Е.Е., Заведеев Е.В., Большаков А.П. и др. Осаждение в СВЧ плазме и механическая обработка моно- и поликристаллических алмазных пленок. Физика и химия обработки материалов. – 2013. - №1. С 29-36.
2. Дронова Н.Д., Кузьмина И.Е. Характеристика и оценка алмазного сырья. — М.: МГГУ, 2004. — 74 с.
3. Епифанов В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты: учеб. пособие/В.И. Епифанов, А.Я. Песина, Л.В. Зыков. – 5-е изд., репринтное. – Якутск: Бичик, 2001. – 336 с.
4. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. — М.: Наука, 1984. – 170 с.
5. Шамаев П.П., Григорьева А. С., Богвин В.В. О термохимических методах обработки алмазов с новых позиций. Наука и техника в Якутии. – 2002. - № 1. С 27-29.
6. Шелеменьтьев Ю.Б., Окоёмов Ю.К. Алмазное сырье: учебно-справочное пособие.– М.: Наука, 2007. – 304 с.
7. Интернет источник: <http://www.nanometer.ru>. Проверено: 20.05.2013
8. Интернет источник: <http://st-yak.narod.ru>. Проверено: 20.05.2013
9. Интернет источник: <http://cyberleninka.ru>. Проверено: 25.05.2013. ГИАС

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Гридин Олег Михайлович – профессор, доктор технических наук, кафедра «Физика горных пород и процессов»,
Теплова Татьяна Борисовна – профессор, доктор технических наук, кафедры «Технология художественной обработки материалов»,
Гоготов Антон Александрович – аспирант кафедры «Физика горных пород и процессов»,
Доронин Максим Алексеевич – студент 5 курса факультета ГЭМ, кафедры ТХОМ, ahileska90@mail.ru