

УДК 621

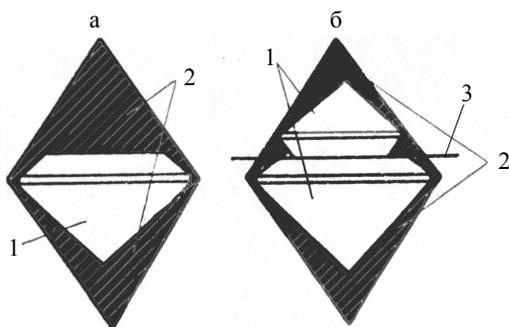
## ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И КАЧЕСТВА РАСПИЛИВАНИЯ ТВЕРДЫХ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ СООБЩЕНИЯ ЗАГОТОВКЕ ДВУХМЕРНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г.,  
канд. техн. наук, доц. ДРОЗДОВ А. В., магистрант ЯМНАЯ Д. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

Технологическая операция механического распиливания заготовок из твердых и сверхтвердых неметаллических материалов, включая монокристаллы алмаза, находит широкое применение в оптико-электронном приборостроении, инструментальном и ювелирном производствах.

Распиливание монокристаллов при производстве из них бриллиантов и других изделий выполняется с целью рационального использования дорогостоящего сырья, что наглядно иллюстрируется на рис. 1, где показано изменение безвозвратных потерь алмазного сырья при изготовлении бриллиантов без распиливания монокристалла алмаза и с применением операции его распиливания на части (полуфабрикаты).



*Рис. 1.* Схема, поясняющая изменение безвозвратных потерь алмазного сырья при изготовлении бриллиантов: а – без распиливания монокристалла алмаза; б – с применением его распиливания; 1 – контуры заготовки будущего бриллианта; 2 – безвозвратные потери алмазного сырья; 3 – плоскость распиливания монокристалла алмаза

Высокие требования предъявляются к качеству поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, так как наличие на ней глубоких

рисок, сколов и других дефектов обуславливает увеличение снимаемого для их удаления припуска на последующей операции подшлифовки площадок, что повышает процент безвозвратных потерь алмазного сырья.

В качестве инструмента используются тонкие (0,05–0,09 мм) бронзовые распиловочные диски, имеющие на боковых поверхностях алмазосодержащее покрытие, полученное методом шаржирования. Применение такого инструмента позволяет минимизировать безвозвратные потери алмазного сырья непосредственно в процессе распиливания монокристаллов алмаза.

Недостатками традиционного способа распиливания монокристаллов алмаза являются весьма низкая производительность процесса и невысокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. В этой связи совершенствование технологии распиливания монокристаллов алмаза с целью устранения указанных недостатков представляет актуальную задачу для алмазообрабатывающего производства.

Одно из перспективных направлений ее решения связано с применением в процессе распиливания вынужденных колебаний, обеспечивающих виброударный режим взаимодействия инструмента (распиловочного диска) с обрабатываемой алмазной заготовкой. В предшествующих исследованиях [1, 2] с помощью центробежного вибратора заготовке сообщалось одномерное колебательное движение, направленное перпендикулярно торцевой (ре-

жушей) поверхности распиловочного диска. В результате процесс распиливания протекает в условиях периодического, дискретного, ударного взаимодействия заготовки с торцевой поверхностью диска, благодаря которому обеспечивается повышение интенсивности ее распиливания. Следует подчеркнуть, что в этом случае реализуются условия прямого, центрального удара контактирующих поверхностей, в то время как при их косом соударении становится возможным влиять на процесс распиливания не только величиной ударного импульса, но и направлением его действия относительно поверхности диска. Очевидно, такие условия распиливания могут быть обеспечены путем придания заготовке двухмерного циркуляционного движения, совершаемого ею в плоскости распиливания по замкнутой траектории. Изменяя вид и параметры траектории, можно целенаправленно влиять на условия и режим виброударного взаимодействия заготовки с поверхностью распиловочного диска. Однако в литературных источниках отсутствуют сведения, отражающие эффективность применения такой технологической схемы обработки с целью повышения интенсивности и качества распиливания заготовок из твердых и сверхтвердых материалов.

В этой связи цель данных исследований состояла в количественной оценке влияния сообщаемого заготовке двухмерного циркуляционного движения на интенсивность ее распиливания и качество обработанной поверхности.

**Методика проведения исследований.** Эксперименты по распиливанию образцов проводились на модернизированной распиловочной секции (рис. 2) станка модели ШП-2, предназначенного для распиливания монокристаллов алмаза.

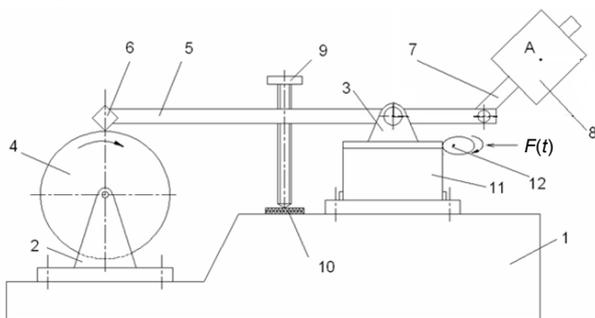


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированной распиловочной секции, примененной в исследованиях

Она состоит из массивной чугунной плиты 1, на которой закреплены две пары стоек 2 и 3. В паре стоек 2 устанавливается шпиндель с закрепленным на нем распиловочным диском 4. Вращение шпинделю с частотой  $10000 \text{ мин}^{-1}$  передается от вала асинхронного электродвигателя с помощью плоскоременной передачи. В паре стоек 3 смонтирован узел опоры рычага 5 (стрелы), обеспечивающий его качание с минимальным трением. На одном конце стрелы в специальном приспособлении закреплен обрабатываемый кристалл алмаза 6, а на другом – смонтирован узел противовеса, включающий поворотный рычаг 7, на котором установлен груз 8.

Статическое усилие прижатия обрабатываемой заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска обеспечивается путем придания стреле неуравновешенного состояния за счет соответствующего изменения положения груза на поворотном рычаге. В рабочем положении стрела поддерживается с помощью регулировочного винта 9, который опирается на резиновую прокладку 10, благодаря чему достигается плавное изменение усилия прижатия заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска. По мере увеличения глубины пропила винт периодически выворачивается, в результате чего обеспечивается врезная подача в процессе распиливания.

Принципиальное отличие данной конструкции распиловочной секции от традиционной состоит в том, что узел качания стрелы (пара стоек 3) установлен на плоских пружинах 11, образующих параллелограмный подвес, допускающий перемещение оси качания стрелы вдоль горизонтальной оси. Для сообщения этому узлу вынужденных колебаний применен механический (эксцентриковый) вибратор 12 с приводом от электродвигателя постоянного тока (на рис. 2 он не показан).

С помощью цифровой фотокамеры, работающей в режиме киносъемки (с последующей разбивкой фильма на 25 кадров в секунду), были экспериментально определены траектории движения точки, принадлежащей заготовке, при сообщении узлу качания стрелы вынужденных синусоидальных колебаний частотой 6,6 Гц и амплитудой 6 мм при различных положениях центра тяжести узла противовеса от-

носителю оси качания стрелы. Установлено, что точка, принадлежащая заготовке, перемещается в плоскости распиливания по замкнутой траектории с образованием фигур Лиссажу, т. е. совершает в плоскости распиливания периодическое циркуляционное движение.

В качестве обрабатываемых заготовок использовались специально подготовленные образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером  $5 \times 5 \times 10$  мм. Они изготавливались из яшмы, кварцевого стекла, синтетического корунда, которые имеют твердость по шкале Мооса соответственно 6,5; 7,0 и 9,0 ед. Образцы из указанных материалов распиливались с фиксированием времени обработки как в обычных условиях, так и при сообщении им периодического циркуляционного движения, траектория которого имела форму, близкую к эллипсу. После разделения образцов на полуфабрикаты измеряли размеры сторон квадратного сечения и определяли фактическую площадь распиливания образца. На основе полученных экспериментальных данных вычисляли интенсивность распиливания образцов по формуле

$$i = \frac{S}{t} \text{ (мм}^2\text{/мин),}$$

где  $S$  – фактическая площадь распиливания;  $t$  – время распиливания.

С помощью профилометра-профилографа Taylor Hobson измеряли шероховатость распиленной поверхности образцов в направлении, перпендикулярном направлению следов обработки на ней, т. е. перпендикулярно вектору окружности скорости распиловочного диска.

В ходе выполнения экспериментов с помощью клейкой ленты, расположенной в непосредственной близости от зоны распиливания, были собраны продукты разрушения, форму и размеры которых затем визуально анализировали и оценивали под микроскопом.

**Результаты экспериментальных исследований.** На рис. 3 представлена диаграмма зависимости интенсивности распиливания образцов при их обработке в обычных условиях и с применением колебаний.

Из представленных данных следует, что во всех случаях сообщение заготовке периодического циркуляционного движения позволяет существенно повысить интенсивность ее рас-

пиливания по сравнению с обработкой в обычных условиях. При этом по мере увеличения твердости обрабатываемого материала степень влияния этого движения на повышение интенсивности распиливания возрастает. Так, для корунда ее значение увеличилось в 3,9 раза, для стекла – в 3,1 раза и для яшмы – в 2,5 раза. Наличие такой закономерности позволяет прогнозировать достаточно высокую эффективность применения исследуемого способа обработки для интенсификации процесса распиливания монокристаллов алмаза (10 единиц твердости по шкале Мооса).

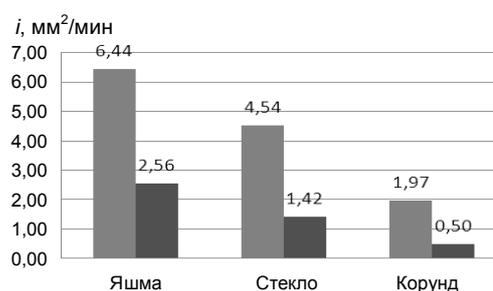


Рис. 3. Значения интенсивности распиливания образцов при их обработке в обычных условиях и с колебаниями: ■ – распиливание с колебаниями; ■ – распиливание в обычных условиях

На рис. 4 представлены значения параметра  $Ra$  шероховатости распиленной поверхности образцов, полученные при обработке по традиционной технологии и при сообщении им периодического циркуляционного движения.

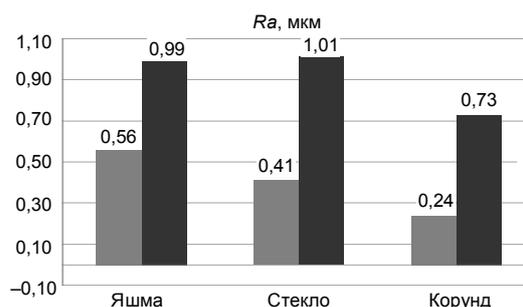


Рис. 4. Значение параметра  $Ra$  шероховатости распиленной поверхности образцов при их обработке в обычных условиях и при сообщении им периодического циркуляционного движения: ■ – распиливание с колебаниями; ■ – распиливание в обычных условиях

Из анализа этих данных следует, что при распиливании образцов из всех исследуемых материалов сообщение им периодического циркуляционного движения приводит к суще-

ственному снижению значения параметра  $Ra$  шероховатости обработанной поверхности по сравнению с его величиной, полученной в традиционных условиях выполнения операции. В обоих случаях с увеличением твердости обрабатываемого материала значение параметра  $Ra$  шероховатости распиленной поверхности уменьшается. При этом наибольшее снижение параметра  $Ra$  под действием циркуляционного движения заготовки наблюдается при распиливании корундового образца (в 3,0 раза), меньшее – при распиливании яшмы (в 2,4 раза) и еще меньшее – при распиливании стекла (в 1,9 раза).

Результаты исследований продуктов разрушения показали, что они представляют собой отколовшиеся твердые частицы обрабатываемого материала, имеющие в зависимости от принятых условий выполнения операции различные размеры. Проведенными измерениями установлено, что при распиливании образцов по предлагаемой технологии размер этих частиц оказывается значительно больше по сравнению с обработкой в обычных условиях. Так, для яшмы их соотношение составило порядка 4,0–5,0; для стекла – 2,5–3,0 и для корунда – 2,0–2,5. То есть с увеличением твердости распиливаемого материала отношение размера частиц, образующихся при обработке с периодическим циркуляционным движением образца, к их размеру, получаемому в обычных условиях выполнения операции, уменьшается.

На основе сопоставления и анализа полученных экспериментальных данных можно выделить положительные эффекты, связанные с применением в процессе распиливания периодического циркуляционного движения заготовки, и качественно представить механизм его влияния на повышение интенсивности распиливания хрупких материалов и качества обработанных поверхностей.

Во-первых, благодаря периодическому ударно-фрикционному взаимодействию заготовки с торцевой (режущей) поверхностью диска интенсифицируется протекание процесса хрупкого разрушения ее материала. Это происходит за счет увеличения глубины предразрушенного слоя на поверхности заготовки, что при повторных ударных нагружениях вызывает отделение частиц материала, имеющих больший,

чем при обычных условиях распиливания, размер. Именно с этим связано положительное влияние предлагаемой технологии обработки на повышение интенсивности распиливания заготовок из хрупких материалов.

Во-вторых, наличие периодического циркуляционного движения заготовки по сложной траектории приводит к тому, что ее пропиленные участки взаимодействуют с боковыми поверхностями диска в условиях, когда на площадках фрикционного контакта действует переменная по величине и направлению скорость относительного скольжения, а соответственно и переменные силы трения. В обычных условиях обработки взаимодействие этих поверхностей протекает при неизменном направлении скорости их относительного скольжения, в результате чего распиленная поверхность образца характеризуется наличием на ней однонаправленных следов (рисок) обработки (рис. 5а). При выполнении операции с использованием периодического циркуляционного движения заготовки на ее распиленной поверхности полностью отсутствуют однонаправленные следы обработки и она приобретает более равномерный по структуре микрорельеф (рис. 5б).

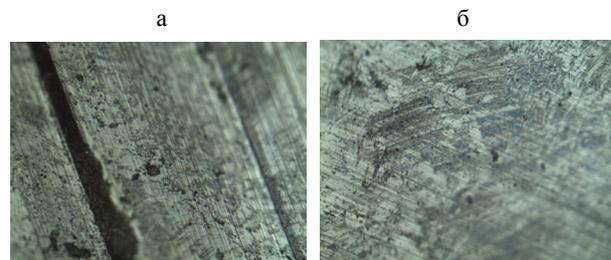


Рис. 5 Фотографии поверхности распиленного корундового образца: а – по традиционной технологии; б – при сообщении ему периодического циркуляционного движения

Объясняется это тем, что за счет действия в зоне фрикционного контакта переменных по величине и направлению сил трения интенсифицируется процесс изнашивания пропиленных участков поверхности заготовки, в результате чего происходит сглаживание (затираание) микронеровностей на ней, а ее шероховатость (в частности, параметр  $Ra$ ) значительно снижается по сравнению с поверхностью, полученной в обычных условиях распиливания.

## ВЫВОДЫ

1. Проведена модернизация распиловочной секции станка модели ШП-2, позволяющая осуществлять операцию распиливания как по традиционной технологии, так и при сообщении заготовке циркуляционного движения, совершаемого ею в плоскости распиливания и имеющего замкнутую траекторию, близкую по форме к эллипсу.

2. Разработана методика проведения сравнительных экспериментальных исследований по количественной оценке влияния сообщаемого обрабатываемому образцу (яшма, стекло, корунд) периодического циркуляционного движения на изменение в сравнении с обычными условиями обработки, интенсивности распиливания и качества поверхности распиленных заготовок.

3. На основе полученных экспериментальных данных установлено, что сообщение образцу периодического циркуляционного движения во всех случаях позволяет существенно повысить интенсивность его распиливания в сравнении с обработкой в обычных условиях. При этом с увеличением твердости обрабатываемого материала степень влияния этого движения на повышение интенсивности распиливания возрастает. Так, для корунда (9,0 ед. по шкале Мооса) ее значение увеличилось в 3,9 раза, для стекла (7,0 ед. твердости) – в 3,1 раза и для яшмы (6,5 ед. твердости) – в 2,5 раза.

4. Установлено, что при распиливании образцов из всех исследуемых материалов сообщение им периодического циркуляционного движения обеспечивает существенное снижение значения параметра  $Ra$  шероховатости обработанной поверхности по сравнению с его величиной, полученной в традиционных условиях выполнения операции. При этом наибольшее снижение параметра  $Ra$  под действием циркуляционного движения заготовки наблюдается при распиливании образца из корунда

(в 3,0 раза), меньшее – при распиливании образца из яшмы (в 2,4 раза) и еще меньшее – при распиливании образца из стекла (в 1,9 раза).

5. На основе результатов измерений продуктов разрушения установлено, что при распиливании образцов по предлагаемой технологии размер образующихся твердых частиц во всех случаях оказывается большим по сравнению с их размерами, полученными в обычных усло-

виях обработки. Так, для яшмы их соотношение составило порядка 4,0–5,0; для стекла – 2,5–3,0 и для корунда – 2,0–2,5, т. е. с увеличением твердости распиливаемого материала отношение размера частиц (продуктов разрушения), образующихся при обработке с циркуляционным движением образца, к их размеру, полученному в обычных условиях выполнения операции, уменьшается.

6. На основе сопоставления и обобщенного анализа полученных экспериментальных данных выявлены положительные эффекты, связанные с применением в процессе распиливания циркуляционного движения заготовки, и качественно раскрыт механизм его влияния на повышение интенсивности распиливания и качества обработанных поверхностей. В частности, показано, что благодаря периодическому циркуляционному ударно-фрикционному взаимодействию заготовки с торцевой (режущей) поверхностью диска интенсифицируется процесс хрупкого разрушения ее материала за счет увеличения глубины предразрушенного слоя, что при повторных его ударных нагружениях вызывает отделение частиц материала, имеющих больший, чем при обычных условиях обработки, размер, обуславливая тем самым повышение интенсивности распиливания заготовок из хрупких материалов. Также показано, что одновременно за счет действия в зоне фрикционного контакта пропиленных участков заготовки с боковыми поверхностями диска переменных по величине и направлению сил трения скольжения интенсифицируется процесс их изнашивания, в результате чего происходит сглаживание (затираение) микронеровностей на пропиленной поверхности заготовки, вызывая тем самым снижение ее шероховатости в сравнении с полученной в обычных условиях распиливания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев, М. Г. Повышение режущей способности распиловочных дисков путем применения виброударного режима обработки / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. С. Словеснов // Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы докладов 6-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2004. – С. 301–303.

2. Киселев, М. Г. Влияние режимов виброударного распиливания сверхтвердых материалов на режущую способность и износостойкость шаржированных алмазами