

УДК 621.9.048.4

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ РАСПИЛИВАНИИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

М.Г. КИСЕЛЕВ, Г.А. ГАЛЕНЮК, А.В. ДРОЗДОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Дано описание механизма формирования шероховатости поверхности как в обычных условиях, так и при введении в зону обработки ультразвуковых колебаний. Представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований, отражающие влияние технологических и акустических параметров обработки на значение высоты микронеровностей распиленной поверхности образцов.

Введение. Операция механического распиливания предназначена для разделения на части исходных заготовок из драгоценных камней и различных монокристаллов, представляющих собой хрупкие, твердые и сверхтвердые материалы. Наиболее широко она применяется при распиливании монокристаллов алмаза при изготовлении из них бриллиантов и других изделий. Наряду с высокой производительностью эта операция обязательно должна обеспечивать высокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, что продиктовано требованием минимизации потерь алмазного сырья на последующей операции их подшлифовки [1, 2].

Цель данной работы – оценка степени влияния ультразвука на шероховатость обработанной поверхности в процессе механического распиливания хрупких, твердых материалов. Как показали предшествующие исследования [3, 4], за счет введения в зону обработки ультразвуковых колебаний можно значительно интенсифицировать процесс механического распиливания хрупких материалов. Вместе с тем чрезвычайно важно оценить влияние ультразвуковых колебаний на качество распиленной поверхности, и в первую очередь на ее шероховатость.

Методы исследований. Для достижения поставленной задачи были проведены сравнительные эксперименты по распиливанию образцов в обычных условиях и с ультразвуком путем сообщения колебаний заготовке в направлении, перпендикулярном торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска, как показано на рис. 1.

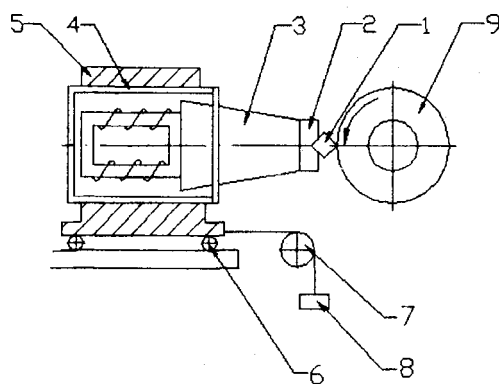


Рис. 1. Схема механического распиливания при сообщении заготовке ультразвуковых колебаний

Образец 1 в виде кубика с стороной 5 мм, изготовленный из стекла К8, с помощью клея закреплялся «на ребро» на сменной оправке 2. Последняя посредством резьбового соединения закреплялась на выходном торце концентратора 3 ультразвукового преобразователя 4. Корпус преобразователя 5 устанавливался на шариковых направляющих 6 и посредством трособлочной системы 7 и аттестованных грузов 8 обрабатываемая заготовка прижималась с заданной статической нагрузкой к торцевой поверхности вращающегося алмазного распиловочного диска 9. На заданной установке производилось распиливание образцов как в обычных условиях обработки, так и при сообщении им ультразвуковых колебаний.

После распиливания на требуемых режимах образец снимался с оправки, тщательно промывался и обезжиривался ацетоном. Затем с помощью профилографа-профилометра мод. 252 измерялась шерохо-

ватость поверхности площадок распиленного образца. При этом измерения проводились в направлении, перпендикулярном следам обработки, и в трех – по глубине пропила участках.

На рис. 2 представлены зависимости высоты микронеровностей распиленной поверхности образцов по глубине пропила при обработке в обычных условиях и с ультразвуком.

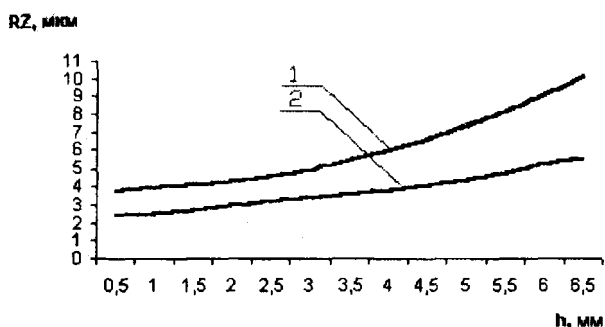


Рис. 2. Зависимость высоты микронеровностей R_z распиленной поверхности образцов от глубины пропила h при статической нагрузке 0,6 Н и скорости резания 7,9 м/с: 1 – при обработке в обычных условиях; 2 – при обработке с ультразвуком с амплитудой колебаний 4 мкм

Из рисунка видно, что значение высоты микронеровностей распиленной поверхности образцов не остается постоянным по глубине пропила. Как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии минимальное значение параметра R_z имеет место в начале распиливания, а по мере увеличения глубины пропила h оно возрастает, достигая своего максимального значения на стадии разделения образца. При этом введение в зону обработки ультразвуковых колебаний приводит к снижению высоты микронеровностей поверхности образцов, по сравнению с их распиливанием в обычных условиях.

По мере заглубления диска в заготовку эти участки пропиленной заготовки вступают в контакт с его боковыми поверхностями и подвергаются изнашиванию в результате трения скольжения взаимодействующих поверхностей. Это сопровождается изменением первоначальной шероховатости поверхностей пропиленных участков заготовки на протяжении всего времени выполнения операции. При этом характер изменения шероховатости, т.е. ее увеличение или уменьшение, будет определяться доминирующим видом изнашивания трущихся поверхностей, условиями трения (давление на площадках контакта и скорость скольжения) и продолжительностью их взаимодействия, что равносильно пути относительного скольжения поверхностей. Отсюда очевидно, что при прочих равных условиях путь относительного скольжения участков контактирующих поверхностей по глубине пропила не остается постоянным. Так, участки пропиленной поверхности заготовки, находящиеся на входе распиловочного диска, подвержены максимальному по длительности трению-изнашиванию, а участки, расположенные на выходе распиловочного диска, – минимальному. Если принять, что доминирующим видом износа в процессе трения стеклянной заготовки о боковую поверхность диска является окислительный [5], можно утверждать, что по мере увеличения продолжительности их относительного скольжения шероховатость поверхности будет уменьшаться за счет проявления полирующего эффекта, свойственного этому виду изнашивания. С этих позиций можно объяснить характер зависимостей $R_z(h)$, приведенных на рис. 2. Участки поверхности, находящиеся в начале распила, в силу максимальной продолжительности их изнашивания имеют минимальное значение высоты микронеровностей, которое по мере увеличения глубины пропила возрастает, достигая максимальной величины на участках поверхности, соответствующих стадии разделения заготовки.

Теперь проанализируем влияние ультразвуковых колебаний на условия формирования шероховатости распиленной поверхности заготовки. Вначале отметим ряд особенностей протекания процесса в условиях ультразвукового воздействия, влияющих на условия формирования микронеровностей распиленной поверхности заготовки.

Во-первых, взаимодействие торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска с материалом заготовки протекает в высокочастотном виброударном режиме, что обуславливает скалывание частиц, меньших, по сравнению со статическим нагружением размеров. В результате величина микронеровностей поверхности пропиленной заготовки на участках, прилегающих к кромкам диска (первоначальная шероховатость), будет меньше в сравнении с распиливанием в обычных условиях.

Во-вторых, процесс трения-скольжения пропиленной поверхности заготовки с боковыми поверхностями диска протекает при наличии высокочастотных колебательных микросмещений, действующих в направлении, параллельном поверхности их контакта, и перпендикулярно вектору скорости резания. Как известно [6], это приводит к интенсификации процесса изнашивания за счет приращения, по сравнению с обычной обработкой пути относительного скольжения поверхностей, проходимого в единицу времени.

При прочих равных условиях это приращение определяется скоростным коэффициентом $k_v = V_{\text{оак}}/V_0$, где $V_{\text{оак}}$ – амплитудное значение колебательной скорости; V_0 – скорость резания, с уменьшением которого приращение пути снижается.

Приняв, что приращение пути относительного скольжения поверхностей сопровождается пропорциональным усилением полирующего эффекта, можно отметить следующее обстоятельство, касающееся влияния ультразвука на формирование шероховатости поверхности распиленной заготовки. Оно связано с тем, что скорость относительного скольжения боковой поверхности диска с пропиленной поверхностью заготовки по глубине пропила не остается постоянной. При фиксированной частоте вращения диска ее максимальное значение имеет место на участках, расположенных в непосредственной близости к его торцевой поверхности, т.е. в зоне распиливания, а на участках, примыкающих к началу распила, ее значение оказывается минимальным. При этом по мере увеличения глубины распила разность между ними возрастает. Поэтому при постоянной амплитуде колебаний A_0 , а соответственно и амплитуде колебательной скорости, значение скоростного коэффициента k_v на периферии диска всегда будет меньше его значения на участках, соответствующих началу распиливания. В результате наибольшее интенсифицирующее воздействие на процесс изнашивания, а соответственно и на полирующий эффект, ультразвуковые колебания будут оказывать на участки пропиленной заготовки, расположенные в начале распила, а по мере его увеличения оно будет снижаться.

Таким образом, по сравнению с традиционной обработкой при распиливании с ультразвуком за счет интенсификации процесса изнашивания контактирующих поверхностей, обусловленного приращением пути трения, в значительной степени усиливается проявление полирующего эффекта, что приводит к снижению шероховатости распиленной поверхности заготовки. При этом в наибольшей степени на снижение высоты микронеровностей ультразвук оказывает воздействие на участки поверхности заготовки, расположенные в начале распила, а по мере его увеличения оно снижается.

В-третьих, согласно данным [3, 4], под действием ультразвука существенно повышается интенсивность распиливания, а соответственно сокращается время выполнения операции. Это приводит к сокращению продолжительности процесса изнашивания пропиленной поверхности заготовки о боковые поверхности распиловочного диска, что снижает время проявления полирующего эффекта, что должно вызвать повышение шероховатости распиленной поверхности заготовки.

Таким образом, на условия формирования микрогеометрии распиленной поверхности заготовки при ультразвуковом воздействии комплексно будут влиять все вышеотмеченные факторы. Причем, если первые два вызывают снижение шероховатости, то третий обуславливает ее повышение. Следовательно, конечное состояние распиленной поверхности заготовки будет определяться степенью влияния или вкладом каждого из этих факторов на условия формирования ее микрорельефа.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований, отражающие влияние технологических и акустических параметров обработки на значение высоты микронеровностей распиленной поверхности образцов. В этом случае приведены средние арифметические значения параметра R_z , полученные по результатам измерений шероховатости распиленной поверхности в трех по длине пропила участках. В ходе эксперимента варьировались значения следующих технологических и акустических параметров: статическая нагрузка $P_{\text{ст}}$ от 0,4 до 1 Н; скорость резания V_0 от 5,5 до 8,8 м/с; амплитуда ультразвуковых колебаний A_0 от 2 до 7 мкм.

Из анализа данных (рис. 3, а) видно, что с увеличением статической нагрузки значение параметра R_z как при распиливании при обычных условиях, так и с ультразвуком возрастает, но в последнем случае высота микронеровностей распиленной поверхности остается существенно ниже. Увеличение значения параметра R_z с повышением статической нагрузки в обоих случаях связано в возрастанием давления в зоне контакта торцевой поверхности диска с заготовкой, что вызывает увеличение размера частиц скалываемого материала, обуславливая тем самым повышение первоначальной шероховатости пропиленной поверхности образца. Вместе с тем, по сравнению с традиционным процессом, при распиливании с ультразвуком, благодаря интенсификации полирующего эффекта, высота микронеровностей распиленной поверхности оказывается меньше.

С увеличением скорости резания (рис. 3, б) значение параметра R_z распиленной поверхности в обоих случаях обработки уменьшается. При этом в условиях ультразвукового воздействия высота микронеровностей остается меньше, чем при обычном распиливании. Для условий традиционной обработки такая закономерность объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, с увеличением скорости резания сокращается время воздействия единичного алмазного зерна на обрабатываемый материал со стороны торцевой поверхности распиловочного диска, что приводит к уменьшению глубины разрушения поверхности заготовки и, как следствие, к снижению ее первоначальной шероховатости. Во-вторых, за счет возрастания скорости скольжения боковых поверхностей диска относительно пропиленной заготовки усиливается проявление полирующего эффекта, ответственного за окончательное состояние обработанной поверхности.

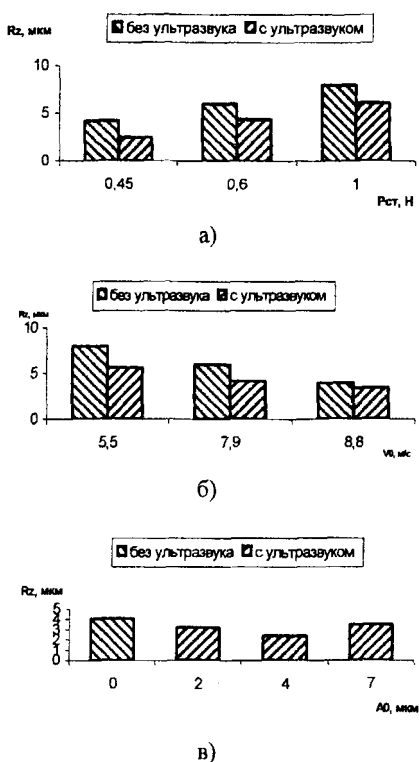


Рис. 3. Данные, отражающие влияние способов и режимов распиливания образцов на высоту микронеровностей образованных поверхностей: а – влияние статической нагрузки ($V_0 = 7,9$ м/с; $A_0 = 4$ мкм); б – влияние скорости резания ($P_{ст} = 0,6$ Н, $A_0 = 4$ мкм); в – влияние амплитуды ультразвуковых колебаний ($P_{ст} = 0,45$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с)

При распиливании с ультразвуком по мере увеличения скорости резания также уменьшается уровень динамического воздействия единичного алмазного зерна на обрабатываемый материал заготовки в момент ее контакта с торцевой поверхностью диска, что, в конечном итоге, приводит к снижению первоначальной шероховатости. Однако, как указывалось выше, ее последующее уменьшение за счет изнашивания о боковые поверхности диска существенным образом зависит от отношения амплитуды колебательной скорости и скорости скольжения. Поэтому при постоянной амплитуде ультразвуковых колебаний по мере увеличения скорости резания (скольжения) степень влияния ультразвука на проявление полирующего эффекта снижается, а соответственно и на уменьшение первоначальной шероховатости. Подтверждением сказанного служат результаты экспериментальных исследований по распиливанию образцов с ультразвуком при постоянной амплитуде колебаний, равной 4 мкм (рис. 3, б).

Так, при $V_0 = 5,5$ м/с значение параметра R_z распиленной поверхности снижается под действием ультразвука на 28 %, при $V_0 = 7,9$ м/с – на 30, а при $V_0 = 8,8$ м/с – на 15 %. Влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на значение параметра R_z распиленной поверхности образца отражают данные, приведенные на рис. 3, в. Их анализ показывает, что по мере увеличения A_0 вначале происходит снижение параметра R_z , который достигает своего минимального значения при амплитудах колебаний порядка 3...5 мкм. При распиливании с большими значениями A_0 высота микронеровностей распиленной поверхности начинает возрастать, хотя значение параметра R_z остается ниже, чем при обработке в обычных условиях. Такая ситуация объясняется следующими обстоятельствами.

При малых значениях амплитуды ультразвуковых колебаний ($A_0 = 3...5$ мкм) уровень виброударного режима работы акустической колебательной системы относительно невысокий, и для него остаются справедливыми отмеченные выше положения, касающиеся механизма влияния ультразвука на формирование микрорельефа поверхности распиленных заготовок. В случае значительной интенсивности возбуждения акустической системы ($A_0 > 7$ мкм) в ней, помимо ультразвуковых, возбуждались низкочастотные колебания, имеющие широкий амплитудно-частотный диапазон и действующие в различных направлениях. В результате в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой при совместном действии как ультразвуковых, так и низкочастотных колебаний возникают значительные динамические силы, вызывающие интенсивное разрушение поверхности, что приводит к возрастанию на ней высоты микронеровностей, характеризующих первоначальную шероховатость. Поэтому последующее их сглаживание в процессе трения о боковые поверхности диска, несмотря на возрастание скоростного коэффициента k_v , происходит менее интенсивно, чем при распиливании с малым уровнем возбуждения акустической колебательной системы.

Выводы

1. На основании анализа условий взаимодействия диска с обрабатываемой заготовкой в процессе механического распиливания представлен механизм формирования шероховатости ее обработанной поверхности, который включает в себя две последовательные стадии: формирование первоначальной шероховатости в результате скалывания частиц хрупкого материала на участках его контактирования с кромками распиловочного диска и последующего трения-изнашивания пропиленной поверхности заготовки о боковые поверхности инструмента, вызывающие снижение (сглаживание) первоначальной шероховатости поверхности за счет проявления полирующего эффекта, характерного для окислительного вида изнашивания. Показано, что конечное состояние микрогеометрии распиленной поверхности определяется, с одной стороны, параметрами ее первоначальной шероховатости, которые зависят от режимов обработки (статическая нагрузка, скорость резания), а с другой – степенью проявления полирующего

эффекта, которая при прочих равных условиях зависит от пути относительного скольжения участков пропиленной поверхности заготовки с боковыми поверхностями распиловочного диска.

2. Исходя из представленного механизма формирования микрогеометрии распиленной поверхности заготовки показано, что значение ее шероховатости изменяется по глубине пропила. При этом во всех случаях для принятой технологической схемы распиливания минимальное значение шероховатости обработанной поверхности имеет место на участках, соответствующих началу распиливания, а по мере увеличения глубины распила значение высоты микронеровностей возрастает, достигая максимальной величины на участках поверхности, соответствующих разделению заготовки.

3. При распиливании с ультразвуком в условиях виброударного взаимодействия заготовки с торцевой поверхностью распиловочного диска шероховатость распиленной поверхности оказывается ниже в сравнении с традиционной обработкой, что связано со следующими обстоятельствами: во-первых, благодаря высокочастотному ударному взаимодействию заготовки с распиловочным диском уменьшается, в сравнении с обычной обработкой, размер скалываемых частиц материала, что вызывает снижение первоначальной шероховатости; во-вторых, за счет повышения пути относительного скольжения боковых поверхностей диска с пропиленной поверхностью заготовки, обусловленного их высокочастотным колебательным смещением, интенсифицируется степень проявления полирующего эффекта, что, в сравнении с традиционной обработкой, приводит к снижению высоты микронеровностей распиленной поверхности заготовки. Причем степень влияния ультразвука на проявление полирующего эффекта, а следовательно и на снижение шероховатости распиленной поверхности, при прочих равных условиях определяется отношением амплитуды колебательной скорости и скорости резания (скольжения), с уменьшением которой эффективность ультразвукового влияния на снижение шероховатости распиленной поверхности падает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. – М.: Высшая школа, 1982. – 335 с.
2. Изнашивание монокристаллов алмаза / А.М. Бочаров, А.Ф. Климович, А.С. Старовойтов, В.В. Снежков. – Мн.: Беларуская навука, 1996. – 144 с.
3. Патент РБ № 1447. Устройство для обработки алмаза / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Г.А. Галенюк.
4. Экспериментальная оценка интенсифицирующего воздействия ультразвука на производительность механического распиливания хрупких материалов / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Г.А. Галенюк, С.Г. Ермоленко // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. – Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2002. – С. 633 – 637.
5. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
6. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Ибрагимов В.А. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. – Мн.: Тесей, 2001. – 344 с.