

УДК 621.9.048.4

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., инженеры ГАЛЕНЮК Г. А., ДРОЗДОВ А. В.

*Белорусский национальный технический университет,
Белорусский аграрный технический университет*

Цель данной работы – экспериментальная оценка степени влияния ультразвуковых колебаний, вводимых в зону обработки, на интенсивность (производительность) распиливания хрупких материалов и качество поверхности распила. Как аналог, применительно к которому прогнозируется использовать полученные результаты, рассматривается процесс механического распиливания кристаллов алмаза [1, 2]. Поэтому с учетом особенностей выполнения этой операции, применяемого оборудования и оснастки была создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать процесс распиливания кристаллов алмаза как в обычных условиях, так и с введением в зону обработки ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска.

Принципиальная схема установки показана на рис. 1. Обрабатываемый образец 1 с помощью специального клеящего состава устанавливался на сменной оправке 2. Последняя посредством резьбового соединения закреплялась на выходном торце волновода ультразвукового преобразователя 3, образуя с ним резонансную акустическую систему. Цилиндрический корпус 4 преобразователя в требуемом положении фиксировался во втулке 5 с помощью винта 6. Втулка жестко закреплялась на подвижной части шариковых направляющих 7. Посредством тросочной системы 8 и аттестованных грузов 9 испытуемый образец прижимался с заданным статическим усилием к поверхности алмазного распиловочного диска 10. Последний устанавливался на валу электродвигателя постоянного

тока, питание которого осуществлялось от специального выпрямителя с регулятором выходного напряжения.

Для измерения глубины резания в процессе распиливания образцов применен реохордный преобразователь, движок которого жестко связывался с подвижной частью шариковых направляющих. Преобразователь был включен по схеме делителя постоянного напряжения таким образом, что коэффициент деления, а следовательно, и выходное напряжение зависели от перемещения движка реохорда, которое регистрировалось с помощью самопишущего прибора Н-307-1.

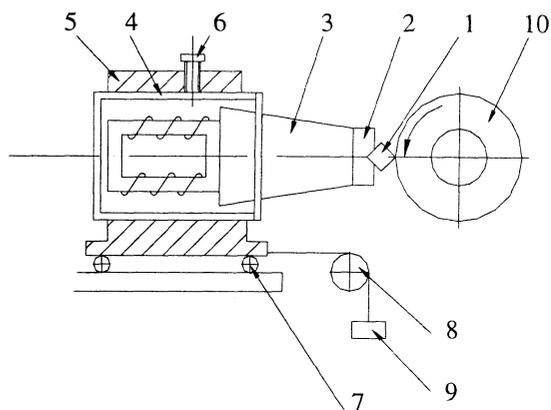


Рис. 1

В качестве обрабатываемого материала в исследованиях использовалось стекло марки К8, из которого изготавливались образцы в виде кубиков со стороной ребра 5 мм. По аналогии с распиливанием кристаллов алмаза образцы наклеивались на «ребро» оправки, для чего в ней был

выполнен V-образный паз с углом при вершине 90°.

Для распиливания использовался стальной алмазный отрезной диск толщиной 0,5 мм с размером алмазного микропорошка 28/20. В ходе экспериментов каждый образец распиливался как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии. Для получения нескольких резов на образце распиловочный диск с электродвигателем имел возможность соответствующего относительного перемещения.

В ходе выполнения экспериментов варьировались следующие технологические параметры: статическая нагрузка $P_{ст} = 0,45...1$ Н; скорость резания $V = 5,5...8,8$ м/с; амплитуда ультразвуковых колебаний $A_0 = 2...7$ мкм при фиксированной их частоте, равной 21,6 кГц.

На рис. 2а приведены экспериментальные зависимости глубины распила h от времени обработки t при распиливании образцов в обычных условиях и с введением в зону обработки ультразвуковых колебаний (УЗК) при различных значениях их амплитуды ($P_{ст} = 0,6$ Н; $V = 7,9$ м/с).

Из анализа этих зависимостей видно, что по сравнению с обработкой в традиционных условиях введение ультразвуковых колебаний во всех случаях повышает скорость распиливания.

При этом по мере увеличения амплитуды колебаний интенсифицирующее воздействие ультразвука на скорость распиливания возрастает.

Вместе с тем в обоих случаях зависимости $h(t)$ имеют три характерных участка. Так, в начале обработки (от момента врезания) глубина распила h растет практически прямо пропорционально времени t . Затем, в зависимости от режимов обработки, наступает момент, при котором скорость распиливания начинает снижаться, что приводит к появлению на кривых второго, более пологого участка, который сменяется третьим участком, на котором скорость распиливания несколько возрастает вплоть до окончательного разделения образца.

С целью количественной оценки степени влияния ультразвука на повышение скорости распиливания образцов на различных по глубине их распила участках воспользуемся коэффициентом эффективности η_h , который определяется по формуле

$$\eta_h = \left(1 - \frac{h_{ст}}{h_{ак}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $h_{ст}$ и $h_{ак}$ – соответственно глубина распила на образце в обычных условиях и при ультразвуковом воздействии за одинаковое время распиливания.

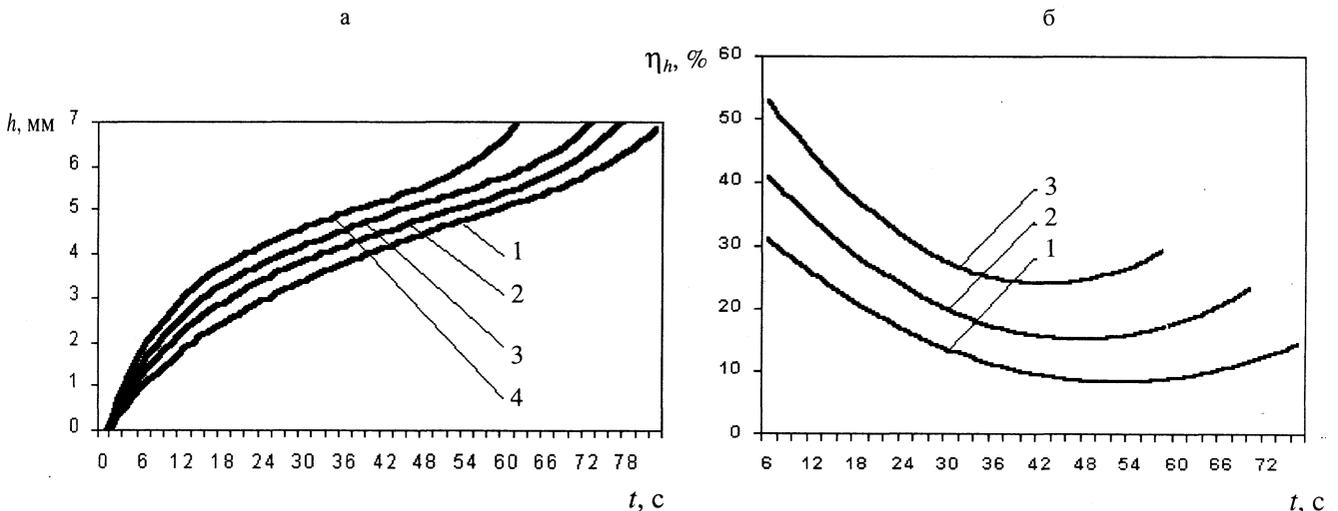


Рис. 2. а – зависимость глубины распила от времени обработки: 1 – без УЗК; 2 – с УЗК $A_0 = 2$ мкм; 3 – с УЗК $A_0 = 4$ мкм; 4 – с УЗК $A_0 = 7$ мкм; б – зависимость коэффициента эффективности воздействия ультразвука на повышение скорости распиливания от времени обработки при различных значениях амплитуды колебаний: 1 – $A_0 = 2$ мкм; 2 – $A_0 = 4$ мкм; 3 – $A_0 = 7$ мкм

Характер изменения степени влияния ультразвука на повышение скорости распиливания образцов в течение времени обработки при различных значениях амплитуды колебаний отражают зависимости, приведенные на рис. 2б ($P_{ст} = 0,6 \text{ Н}$; $V = 7,9 \text{ м/с}$).

Отсюда видно, что максимальное влияние на повышение скорости распиливания ультразвук оказывает в начале обработки (на участке врезания), а по мере заглупления диска в заготовку значение η_h существенно снижается, достигая минимального значения, совпадающего с окончанием второго участка на зависимости $h(t)$. На завершающей стадии обработки (разделения), соответствующей третьему участку зависимости $h(t)$, степень ультразвукового воздействия на повышение скорости распиливания несколько возрастает. С увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний степень их интенсифицирующего воздействия на скорость распиливания пропорционально повышается, хотя характер зависимостей $\eta_h(t)$ остается неизменным.

Очевидно, такая ситуация связана с тем, что по мере заглупления распиловочного диска в заготовку происходит возрастание площади контакта его торцевой поверхности с обрабатываемым материалом, а также его боковых поверхностей с пропиленными площадками заготовки.

Так как образцы распиливались на «ребро», после разрезания образца до половины площадь контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым материалом начинает уменьшаться, в то время как поверхность контакта с его боковыми сторонами продолжает возрастать. При этом важно отметить еще одно обстоятельство, касающееся проявления внутренних напряжений, возникающих в процессе распиливания заготовки. По мере увеличения глубины распила эти напряжения постепенно нарастают и стремятся сжать пропиленные участки заготовки, вызывая тем самым возрастание сил, действующих нормально боковым поверхностям распиловочного диска, приводя к его заклиниванию. И только при достижении критической глубины распила (рис. 2а), соответствующей на зависимости $h(t)$ началу третьего участка (разделения), действие внутренних напряжений резко снижа-

ется, чем и обуславливается некоторое повышение скорости распиливания на завершающей стадии обработки.

Отмеченные обстоятельства позволяют также объяснить характер зависимостей $\eta_h(t)$ на рис. 2б. При неизменной интенсивности ультразвука в процессе распиливания, что имело место в проводимых экспериментах, по мере увеличения глубины распила за счет возрастания сил сопротивления (силы трения плюс действие внутренних напряжений), действующих в зоне обработки, повышается степень демпфирования в акустической колебательной системе. Это в свою очередь приводит к снижению амплитуды колебаний, а соответственно и степени их влияния на повышение скорости распиливания.

Вместе с тем, с практической точки зрения, важно оценить интенсифицирующее влияние ультразвука на повышение производительности выполнения всей операции распиливания. По аналогии с алмазобработкой в качестве показателя производительности примем значение интенсивности распиливания I , которая определяется отношением площади обработанной заготовки S к времени распиливания T_0 :

$$I = \frac{S}{T_0}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2)$$

Для количественной оценки степени влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания воспользуемся коэффициентом эффективности η_I , определенным по формуле:

$$\eta_I = \left(1 - \frac{I_{ст}}{I_{ак}}\right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $I_{ст}$ и $I_{ак}$ – соответственно значения интенсивности распиливания при обработке в обычных условиях и при ультразвуковом воздействии.

В табл. 1 приведены обобщенные экспериментальные значения интенсивности распиливания образцов, полученные при различных условиях и режимах обработки, а также даны рассчитанные значения коэффициента η_I , характеризующего степень влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания при различных режимах обработки.

Таблица 1

Значения интенсивности распиливания I и коэффициента эффективности η_f при различных условиях и режимах обработки образцов

Режимы распиливания	Статическая нагрузка, Н, при $A_0 = 4$ мкм; $V_0 = 7,9$ м/с					
	0,45		0,6		1,0	
	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК
Интенсивность распиливания, мм ² /с	0,25	0,19	0,36	0,3	0,45	0,41
Значение коэффициента эффективности η_f , %	31,6		20		9,7	
Режимы распиливания	Скорость резания, м/с, при $A_0 = 4$ мкм; $P_{ст} = 0,6$ Н					
	5,5		7,9		8,8	
	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК
Интенсивность распиливания, мм ² /с	0,21	0,16	0,36	0,3	0,46	0,41
Значение коэффициента эффективности η_f , %	31,2		20		12,2	
Режимы распиливания	Амплитуда УЗК, мкм, при $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с					
	0		2		7	
Интенсивность распиливания, мм ² /с	0,3		0,33		0,41	
Значение коэффициента эффективности η_f , %	-		10		36,6	

Из их анализа следует, что в исследованном диапазоне изменения статической нагрузки, скорости резания и амплитуды колебаний введение в зону обработки ультразвуковых колебаний позволяет повысить в сравнении с обычными условиями обработки интенсивность распиливания, т. е. производительность выполнения операции. При этом с увеличением скорости резания и статической нагрузки степень влияния ультразвука на повышение производительности операции распиливания снижается, а с повышением амплитуды колебаний ее значение возрастает. Для среднего уровня варьируемых параметров ($P_{ст} = 0,6$ Н; $V = 7,9$ м/с; $A_0 = 4$ мкм) повышение производительности процесса распиливания за счет ультразвукового воздействия составляет порядка 20 %.

Важнейший показатель процесса механического распиливания кристаллов алмаза – качество площадок распиленных полуфабрикатов.

Именно состояние этих поверхностей (шероховатость, наличие глубоких рисок и дефектов) является доминирующим фактором, определяющим выход годного алмазного сырья после распиливания и подшлифовки площадок распиленных полуфабрикатов. Поэтому принципиально важно обеспечить в процессе распиливания с ультразвуком высокое качество распиленных поверхностей и в первую очередь минимальное значение их шероховатости. После распиливания с помощью профилографа – профилометра мод. 252 измерялась шероховатость площадок распиленных образцов.

В результате выполненного комплекса сравнительных экспериментальных исследований по распиливанию образцов в обычных условиях и с ультразвуком получены данные, отражающие влияние технологических ($P_{ст}$, V_0) и акустических (A_0) параметров процесса на шероховатость их площадок, в частности на значение параметра R_z .

Переходя к анализу полученных данных, необходимо отметить общую закономерность в формировании шероховатости поверхности на площадках распиленных образцов. Она заключается в том, что высота микронеровностей R_z не остается величиной постоянной, а возрастает по мере увеличения глубины пропила h . Такое положение объясняется тем, что окончательное формирование шероховатости поверхности площадок происходит за счет их изнашивания (истирания) о боковые поверхности диска. В результате этого происходит сглаживание (затираание) микронеровностей и тем самым достигается эффект полирования пропиленной заготовки. По этой причине участки площадок, расположенные в начале распиливания, более длительное время подвергаются истиранию о боковые поверхности диска, чем участки, находящиеся в конце пропила. В результате этого высота микронеровностей поверхности площадок возрастает по мере увеличения глубины распиливания.

Введение в зону обработки ультразвуковых колебаний приводит к снижению значения параметра R_z , но при этом характер зависимости $R_z(h)$ остается таким же, как и при распиливании в обычных условиях. Эффект снижения высоты микронеровностей поверхностей площадок под действием ультразвука заключается в следующем. Сообщение заготовке ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно тор-

цевой поверхности диска, обуславливает возникновение в зонах ее контакта с боковой поверхностью инструмента дополнительных высокочастотных колебательных микросмещений, действующих параллельно пропиленным площадкам и перпендикулярно вектору скорости резания. В результате этого, во-первых, изменяется направление силы трения, действующей по площадкам контакта, что обуславливает изменение направления и величины касательных напряжений, а, во-вторых, возрастает величина относительного проскальзывания контактирующих поверхностей за счет повышения пути трения. Комплексное действие этих факторов приводит к интенсификации процесса изнашивания поверхности площадки пропиленной заготовки, что сопровождается активным разрушением и сглаживанием имеющихся на ней микронеровностей, и обеспечивается тем самым более выраженный по сравнению с обычным процессом полирующий эффект.

Влияние условий и режимов обработки на значение высоты микронеровностей R_z поверхностей распиленных образцов характеризуют данные, представленные в табл. 2. В ней приведены средние арифметические значения параметра R_z , полученные по результатам измерений шероховатости поверхности в трех по длине пропила участках.

Из анализа представленных данных видно, что под действием ультразвуковых колебаний высота микронеровностей поверхностей площадок распиленных образцов оказывается существенно меньше, чем при традиционной обработке. Обращает на себя внимание характер влияния интенсивности ультразвука на изменение параметра R_z . По мере увеличения амплитуды колебаний вначале происходит снижение величины R_z , которая достигает своего минимального значения при амплитудах колебаний порядка 3...5 мкм. При распиливании с большими значениями A_0 высота микронеровностей поверхности площадок начинает возрастать, хотя значение параметра R_z остается ниже, чем при обработке в обычных условиях. Это связано с тем, что в случае большей интенсивности возбуждения акустической системы ($A_0 > 7$ мкм) в ней, помимо ультразвуковых, возбуждались и низкочастотные колебания. Накладываясь на ультразвуковые, они вызывают возникновение в зоне резания колебательных смещений в широком

амплитудно-частотном диапазоне, действующих в различных направлениях. Это приводит к более интенсивному разрушению обрабатываемой поверхности и возрастанию на ней высоты микронеровностей.

Таблица 2

Значение параметра R_z поверхности распиленных образцов при различных условиях и режимах обработки

Режимы распиливания	Статическая нагрузка, Н, при $A_0 = 4$ мкм; $V_0 = 7,9$ м/с					
	0,45		0,6		1,0	
	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК
Значение параметра R_z , мкм	3,1	4,2	5,1	6,2	6,1	7,9
Режимы распиливания	Скорость резания, м/с, при $A_0 = 4$ мкм; $P_{ст} = 0,6$ Н					
	5,5		7,9		8,8	
	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК
Значение параметра R_z , мкм	6,1	7,8	5,1	6,2	3,3	4,2
Режимы распиливания	Амплитуда УЗК, мкм, при $P_{ст} = 0,6$ Н; $V_0 = 7,9$ м/с					
	0		2		4	
Значение параметра R_z , мкм	6,2		5,3		5,5	

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что введение в зону распиливания ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно торцевой поверхности диска, позволяет в сравнении с традиционной обработкой значительно повысить интенсивность распиливания хрупких материалов, т. е. производительность операции, и одновременно значительно улучшить качество поверхности распиленной заготовки. Это дает основание утверждать, что установленные эффекты могут быть успешно реализованы в процессе механического распиливания кристаллов алмаза с целью повышения производительности и качества их обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елифанов В. И., Песина А. Я., Зыков Л. В. Технология обработки алмазов в бриллианты. – М.: Высш. шк., 1982. – 335 с.
2. Изнашивание монокристаллов алмаза / А. М. Бочаров, А. Ф. Климович, А. С. Старовойтов, В. В. Снежков. – Мн.: Беларуская наука, 1996. – 144 с.