

УДК 621.9.048.4

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, Г.А. ГАЛЕНЮК, А.В. ДРОЗДОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложена математическая модель процесса механической обработки монокристаллов алмаза, позволяющая исследовать интенсивность процесса резания как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии. Получены аналитические зависимости, описывающие закон перемещения режущей кромки диска относительно обрабатываемой заготовки. На их основе получено выражение, позволяющее производить количественную оценку степени влияния ультразвуковых колебаний на повышение производительности обработки монокристаллов алмаза с учетом влияния акустических параметров.

Введение. В процессе изготовления изделий из драгоценных камней и различных монокристаллов широко применяется операция их механического распиливания, т.е. разделения заготовок на части, которая характеризуется весьма низкой производительностью. С целью ее повышения было предложено вводить в зону распиливания ультразвуковые колебания [1,2], сообщая их обрабатываемой заготовке в направлении перпендикулярной торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска, как показано на рис. 1.

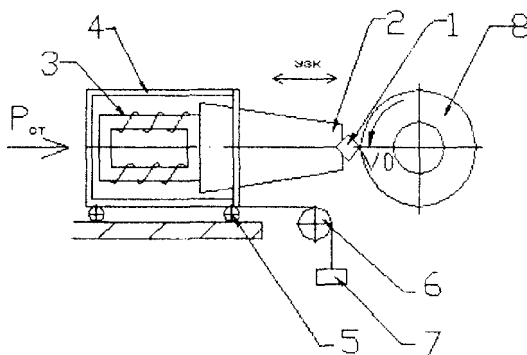


Рис. 1. Схема механического распиливания при сообщении заготовке ультразвуковых колебаний

Заготовка 1 жестко закрепляется на выходном торце волновода 2 ультразвукового преобразователя 3, образуя с ним резонансную акустическую систему. Последняя посредством резьбового соединения закрепляется на выходном торце волновода ультразвукового преобразователя 3, образуя с ним резонансную акустическую систему. Корпус 4 преобразователя установлен на шариковых направляющих 5 посредством тросовочной системы 6 и аттестованных грузов 7 обрабатываемая заготовка прижимается к торцевой поверхности вращающегося распиловочного диска 8. Следует подчеркнуть, что в предложенном варианте реализована практически традиционная схема распиливания, применяемая на специальных станках модели ШП-2. При этом такая установка позволяет производить распиливание заготовок как в обычных условиях, так и при воздействии ультразвуковых колебаний.

Методы исследований. Для теоретической оценки степени влияния ультразвука на производительность механической обработки хрупких сверхтвердых материалов, к примеру монокристаллов алмаза, обратимся к математической модели процесса распиливания.

Обрабатываемый кристалл алмаза за счет приложенной статической нагрузки $P_{ст}$ прижимается к торцевой поверхности вращающегося распиловочного диска, в результате чего осуществляется процесс резания в обычных условиях. Плоскость резания кристаллов алмаза представляет собой квадрат со стороной a . Для удобства последующего анализа представим распиловочный диск радиуса R в виде прямоугольного полотна ($R = \infty$) той же толщины, режущая кромка которой имеет ту же скорость, что и точка режущей кромки распиловочного диска, что допустимо, поскольку размер контакта весьма мал в сравнении с радиусом R .

Определим время распиливания кристалла алмаза в обычных условиях обработки ($\tau_{ст}$) и при ультразвуковом воздействии ($\tau_{ак}$), а количественно степень влияния колебаний на повышение интенсивности распиливания будем оценивать по соотношению

$$\eta = \left(1 - \frac{\tau_{ак}}{\tau_{ст}}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

в предположении, что $\tau_{ст} > \tau_{ак}$.

Свяжем систему координат x, y с образцом. Исходя из теории механического разрушения хрупких тел [3, 4], работу, затрачиваемую установкой на резание образца в обычных условиях обработки за время Δt , можно представить в виде

$$\Delta W_{y_{cm}} = \alpha \cdot j_{cm} \cdot V_0 \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где V_0 – скорость кромки диска (скорость резания); j_{cm} – импульс, сообщаемый образцу вдоль оси x за единицу времени (среднее усилие взаимодействия); α – коэффициент, характеризующий долю работы силы резания, затрачиваемую на разрушение кристалла алмаза ($\alpha < 1$).

Величина (2) должна совпадать с работой разрушения образца, равной

$$\Delta W_{раз} = \gamma_{cm} \cdot h \cdot l(t) \cdot \dot{x}(t) \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где $\gamma_{ст}$ – удельная (на единицу объема) работа разрушения-образования малых частиц материала образца; h – ширина распила; $l(t)$ – размер запила вдоль оси y , равный для выбранной формы кристалла при $0 < x(t) < b/2$; b – глубина пропила.

Из (2) и (3) следует дифференциальное уравнение

$$x(t) \cdot \dot{x}(t) = \frac{\alpha \cdot j_{cm} \cdot V_0}{2 \cdot \gamma_{cm} \cdot h}. \quad (4)$$

Считая величину $\gamma_{ст}$ постоянной и интегрируя (4) с начальным условием $x(0) = 0$, получим закон движения линии распила относительно кристалла алмаза:

$$x(t) = \beta_{cm} \cdot \sqrt{t}; \quad \text{где } \beta_{cm} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot j_{cm} \cdot V_0}{\gamma_{cm} \cdot h}}. \quad (5)$$

Зависимость (5) справедлива для интервала $0 < t < \tau$, где τ – время распиливания половины кристалла алмаза.

Оно определяется в виде

$$x(t) = \frac{b}{2} = \frac{a}{\sqrt{2}}; \quad \tau = \frac{a^2}{2 \cdot \beta_{cm}^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{\omega}, \quad (6)$$

где N – количество оборотов диска за время распиливания; ω – его угловая скорость.

При $t > \tau$ в выражении (3) следует принять

$$l(t) = 2[b - x(t)], \quad (7)$$

откуда следует дифференциальное уравнение:

$$[b - x(t)] \cdot \dot{x}(t) = \frac{\alpha \cdot j_{cm} \cdot V_0}{2 \cdot \gamma_{cm} \cdot h}, \quad \tau < t < \tau_{ст}. \quad (8)$$

Для начального условия $x(\tau) = b/2$ решение (8) запишется

$$x(t) = \frac{b}{2} \cdot \left[2 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \beta_{cm}^2}{b^2} \cdot (t - \tau)} \right], \quad \tau < t < \tau_{ст}. \quad (9)$$

Время полного распиливания кристалла алмаза $\tau_{ст}$ определяется условием $x(\tau) = b$, тогда из (6) находим

$$\tau_{ст} = \tau + \frac{b^2}{4 \cdot \beta_{cm}^2} = \tau + \frac{a^2}{2 \cdot \beta_{cm}^2} = \frac{a^2}{\beta_{cm}^2} = 2 \cdot \tau. \quad (10)$$

Согласно формулам (5) и (9) зависимость $x(t)$ является антисимметричной (нечетной) относительно точки $t = \tau$, $x = b/2$.

Для вычисления работы затрачиваемой на распиливание половины кристалла следует просуммировать выражение (3):

$$W_{раз} = \int_0^{\tau} \gamma_{cm} \cdot h \cdot l \cdot \dot{x}(t) dt = 2 \cdot \gamma_{cm} \cdot h \cdot \int_0^{\tau} x(t) \cdot \dot{x}(t) dt = \gamma_{cm} \cdot h \cdot x^2(\tau) = \frac{\gamma_{cm} \cdot h \cdot a^2}{2}. \quad (11)$$

При распиливании в обычных условиях, когда действует статическая нагрузка P_{cm} , величина импульса за единицу времени, равную периоду ультразвуковых колебаний T , определяется

$$I_{cm} = \frac{j_{cm}}{T} = \frac{\omega_{ок}}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^T P_{cm} \cdot dt = P_{cm}; \quad \beta_{ок} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P_{cm} \cdot V_0}{\gamma_{cm} \cdot h}}, \quad (12)$$

где $\omega_{ок}$ – круговая частота ультразвуковых колебаний.

Тогда время распиливания кристалла алмаза в обычных условиях обработки согласно (10) будет равно

$$\tau_{cm} = \frac{a^2 \cdot \gamma_{cm} \cdot h}{\alpha \cdot P_{cm} \cdot V_0}. \quad (13)$$

Перейдем к определению времени распиливания кристаллов алмаза в условиях ультразвукового воздействия, когда колебания сообщаются ему вдоль оси x . При этом реализуется виброударный режим взаимодействия торцевой (режущей) кромки диска с обрабатываемой поверхностью кристалла алмаза. В этом случае за время, равное периоду ультразвуковых колебаний T , механическое взаимодействие указанных элементов происходит только в некоторой его части t_k , а в оставшееся время $(T - t_k)$ оно отсутствует. Таким образом, разрушение алмаза торцевой поверхностью диска происходит в результате действия повторяющихся с частотой ультразвука импульсов сил, т.е. имеет место режим виброударного (импульсного) резания.

Следовательно, для определения времени распиливания кристалла алмаза при ультразвуковом воздействии необходимо в выражениях, полученных при обработке в обычных условиях, внести следующие изменения. Во-первых, вместо I_{cm} следует принять величину среднего за период колебаний T импульса силы взаимодействия торцевой поверхности распиловочного диска с поверхностью алмаза $I_{ок}$. Во-вторых, вместо значения удельной работы разрушения в обычных условиях $\gamma_{ст}$ принять ее значение, соответствующее распиливанию с ультразвуком $\gamma_{ак}$. При этом значения удельной работы разрушения $\gamma_{ст}$ и $\gamma_{ак}$ определяются для хрупких материалов величиной поверхностной энергии дисперсных частиц, а, следовательно, распределениями размеров этих частиц. Поэтому оправдано считать, что $\gamma_{ст} > \gamma_{ак}$, поскольку развитие трещин в случае ультразвукового воздействия в виброударном режиме взаимодействия инструмента и обрабатываемого хрупкого материала существенно облегчается [5, 6].

С учетом этого выражения (2) и (3) в условиях распиливания с ультразвуком примут вид:

$$\Delta W_{yc,ок} = \alpha \cdot V_0 \cdot j_{ок} \cdot \Delta t; \quad (14)$$

$$\Delta W_{раз,ок} = \gamma_{ок} \cdot h \cdot l(t) \cdot \dot{x}(t) \cdot \Delta t, \quad (15)$$

где $\Delta W_{yc,ок}$ и $\Delta W_{раз,ок}$ – соответственно работа, затрачиваемая установкой на резание, и работа разрушения образца при его распиливании с ультразвуком.

Тогда дифференциальное уравнение (4) и его решение (5) примут вид:

$$x(t) \cdot \dot{x}(t) = \frac{\alpha \cdot j_{ок} \cdot V_0}{2 \cdot \gamma_{ок} \cdot h}; \quad (16)$$

$$x(t) = \beta_{ок} \cdot \sqrt{t}, \quad \text{где } \beta_{ок} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot j_{ок} \cdot V_0}{\gamma_{ок} \cdot h}}. \quad (17)$$

С учетом внесения соответствующих изменений в выражениях (8) и (9) время распиливания кристалла при ультразвуковом воздействии будет равно

$$\tau_{ок} = \frac{a^2 \cdot \gamma_{ак} \cdot h}{\alpha \cdot I_{ок} \cdot V_0}. \quad (18)$$

Внося зависимости для определения $\tau_{ст}$ (13) и $\tau_{ак}$ (18) в (1), получим выражение для определения степени влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристалла алмаза:

$$\eta_{\tau} = \left(1 - \frac{\tau_{ак}}{\tau_{ст}}\right) = \left(1 - \frac{P_{cm} \cdot \gamma_{ак}}{I_{ок} \cdot \gamma_{ст}}\right) = \left(1 - \frac{P_{cm} \cdot T \cdot \gamma_{ак}}{j_{ак} \cdot \gamma_{ст}}\right), \quad (19)$$

где $j_{ак}$ – импульс силы, сообщаемый кристаллу алмаза за время его контакта с распиловочным диском.

Из (19) следует, что при прочих равных условиях степень интенсифицирующего влияния воздействия ультразвука на производительность процесса механического распиливания кристалла алмаза определяется двумя соотношениями: отношением удельных работ разрушения поверхности алмаза при распиливании с ультразвуком и при обычных условиях ($\gamma_{ак} / \gamma_{ст}$), а также отношением импульса силы за период колебаний в обычных условиях распиливания ($P_{см} \cdot T$) к импульсу силы при обработке с ультразвуком за время контакта поверхности алмаза с торцевой поверхностью диска $j_{ак}$.

Если принять, что $\gamma_{ак} = \gamma_{ст}$, таким образом, заниженная оценка степени влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристалла алмаза может быть произведена по выражению

$$\eta_{\tau} = \left(1 - \frac{P_{см} \cdot T}{j_{ак}}\right). \tag{20}$$

В работе [7] с использованием оригинальной математической модели получено выражение для определения значения $j_{ак}$ при виброударном режиме работы акустической колебательной системы, которое имеет вид:

$$j_{ак} = \frac{8 \cdot P_{см}^2 \cdot \pi}{A_0 \cdot \omega_{ак} \cdot c} \cdot C \cdot D, \tag{21}$$

где $P_{см}$ – статическое усилие прижима заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска; A_0 – амплитуда ультразвуковых колебаний; c – жесткость невесомого виброэлемента, примененного в модели; C и D – безразмерные коэффициенты, которые могут принимать значения от единицы и выше.

Они будут равны единице в безотрывном режиме работы акустической колебательной системы, когда $A_0 = 2x_{см}$, где $x_{см} = P_{см}/c$ – величина предварительного натяга в системе, обусловленная ее статическим нагружением.

Подставляя последнее выражение в (20) и преобразуя, получим

$$\eta_{\tau} = \left(1 - \frac{A_0}{2 \cdot x_{см} \cdot C \cdot D}\right). \tag{22}$$

Данное выражение позволяет производить количественную оценку степени влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристалла алмаза при виброударном режиме работы акустической колебательной системы, т.е., когда $A_0 > 2x_{см}$. Причем с увеличением этого неравенства эффективность влияния ультразвука на повышение производительности распиливания возрастает.

Если в процессе обработки реализуется безотрывный режим взаимодействия обрабатываемого алмаза с торцевой поверхностью диска ($A_0 > 2x_{ст}$), то, коэффициенты C и D в выражении (22) равны единице, а, следовательно, $\eta_{\tau} = 0$, т.е. влияние ультразвуковых колебаний на интенсивность распиливания отсутствует.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведены зависимости глубины пропила от продолжительности распиливания кристалла алмаза в обычных условиях и с ультразвуком, построенные по выражениям (9) и (17). Из них видно, что под действием ультразвука скорость перемещения режущей кромки диска относительно заготовки возрастает, а, соответственно, время распиливания кристалла ($\tau_{ак}$) по сравнению с продолжительностью обработки в обычных условиях ($\tau_{ст}$) сокращается. При этом следует отметить, что характер зависимости $b(t)$ не изменится, т.е. в обоих случаях они являются антисимметричными (нечетными) относительно точки $b/2$.

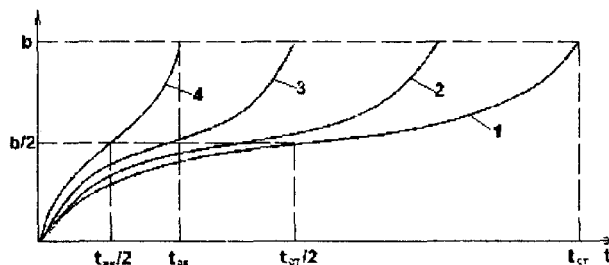


Рис. 2. Зависимость глубины пропила от времени распиливания в обычных условиях и с ультразвуком:

- 1 – без ультразвуковых колебаний; 2 – с ультразвуком при $A_0/2x_{ст} = 2$;
- 3 – с ультразвуком при $A_0/2x_{ст} = 4$; 4 – с ультразвуком при $A_0/2x_{ст} = 10$

Выводы

В результате выполненных исследований получены аналитические зависимости, позволяющие определить время (интенсивность) распиливания кристалла алмаза как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии, учитывающие влияние технологических и акустических параметров. На их основе получено выражение для количественной оценки степени влияния ультразвуковых колебаний на повышение интенсивности распиливания кристаллов алмаза. При этом показано, что их влияние проявляется только при реализации виброударного режима взаимодействия торцевой поверхности диска с обрабатываемым кристаллом алмаза, т.е. когда выполняется неравенство $A_0 > 2x_{cm}$, по мере увеличения которого степень влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. РБ № 1447. Устройство для обработки алмаза / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Г.А. Галенюк.
2. 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.
3. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М., 1974. - 640 с.
4. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамическая механика разрушения. - М.: Машиностроение, 1985. - 264 с.
5. Марков А.И. Испытание внедрением и царапанием при ультразвуковых колебаниях индентора. В сб.: Склерометрия. - М.: Наука, 1968. - С. 183 - 192.
6. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с.
7. Киселев М.Г., Ибрагимов В.А. Математическое моделирование процесса контактного взаимодействия тел в условиях ультразвукового нагружения // Приборостроение. - 1989. - № 11. - С. 98 - 102.