

УДК 62-531.7

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕЕ РАСПИЛИВАНИЯ

*д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ;  
канд. техн. наук, доц. А.В. ДРОЗДОВ; В.Л. ГАБЕЦ; Д.А. ЯМНАЯ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматривается проблема повышения интенсивности распиливания при сообщении эллиптического движения распиливаемой заготовке. В ходе проведения исследования получены зависимости величины импульса ударной силы, действующего в процессе ударно-фрикционного взаимодействия режущей кромки распиловочного диска с поверхностью заготовки, при различных параметрах эллиптической траектории ее движения. Показано, что сообщение заготовке в процессе ее распиливания управляемого эллиптического движения позволяет целенаправленно влиять на условия ее ударного взаимодействия с режущей кромкой диска.

Предметом исследования данной работы является процесс механического распиливания твердых и сверхтвердых материалов, в частности монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий [1]. Выполняется эта операция на специальной распиловочной секции с использованием гравитационной подачи заготовки (рис. 1).

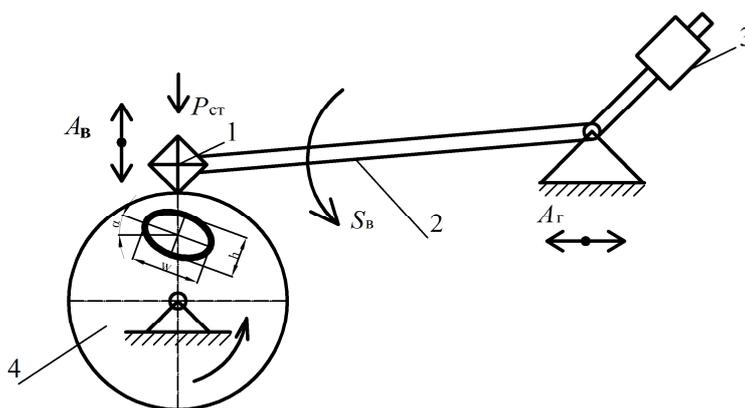


Рис. 1. Принципиальная схема распиливания монокристаллов алмаза с гравитационной подачей заготовки

Обрабатываемый кристалл 1 закрепляется на одном конце качающегося рычага (стрелы) 2 и путем придания последнему неуравновешенного состояния, что обеспечивается за счет изменения положения противовеса 3 на его противоположном конце, прижимается под действием статического усилия  $P_{ст}$  к режущей кромке тонкого вращающегося распиловочного диска 4. При постоянной частоте вращения последнего и его режущей способности интенсивность распиливания определяется значением статической нагрузки, с повышением которой она возрастает. Однако на практике максимальное значение  $P_{ст}$  ограничивается условием потери устойчивости распиловочного диска к деформации продольного изгиба, что приводит к отклонению плоскости распиливания кристалла от направления, заданного его разметкой. Именно это обстоятельство ограничивает значение интенсивности распиливания за счет повышения статического усилия прижатия кристалла к режущей кромке диска.

Согласно результатам исследований [2; 3], существенно повысить интенсивность распиливания можно за счет сообщения заготовке вынужденных колебаний  $A_в$  (см. рис. 1), направленных перпендикулярно режущей кромке диска. В этом случае условия их контактного взаимодействия характеризуются наличием периодических ударных импульсов, которые, в отличие от статического нагружения, интенсифицируют процесс хрупкого разрушения материала заготовки.

Дальнейшее совершенствование способа виброударного распиливания связано с использованием распиловочной секции, оснащенной оригинальной колебательной системой, обеспечивающей придание заготовке двумерного периодического циркуляционного движения, совершаемого в плоскости распиливания [4; 5]. Траектория этого движения имеет форму, близкую к эллипсу (см. рис. 1), и характеризуется

величиной  $h$  малой его оси и большой оси  $w$ , а также значением угла  $\alpha$  наклона последней к горизонтальной оси. При этом за счет изменения параметров и условий возбуждения колебательной системы можно управлять указанными параметрами эллиптической траектории движения заготовки. В свою очередь, это дает возможность в широком диапазоне изменять условия ударно-фрикционного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска, а соответственно, целенаправленно влиять на протекание процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала.

В этой связи цель данной работы заключалась в теоретической оценке влияния параметров циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания.

Для вычисления импульса ударной силы воспользуемся следующими допущениями. Так, всю массу системы  $m$  сосредоточим в одной точке, двигающейся по эллиптической траектории с длиной большой оси, равной  $w$ , и длиной малой оси, равной  $h$ . Согласно работе [6], торцевую поверхность режущего инструмента представим в виде плоского полотна. Центр координат расположим на вершине полотна, как показано на рисунке 1. Тогда изменения координат движения материальной точки по эллиптической траектории в течение времени  $t$  будет выражаться следующим образом:

$$\begin{cases} x' = w \cos t + x_0, \\ y' = h \sin t + y_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты центра эллиптической траектории.

В случае наклона эллиптической траектории движения точки под углом  $\alpha$  к поверхности режущего инструмента (см. рис. 1) система (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} x = w \cos t \cos \alpha - h \sin t \sin \alpha + x_0, \\ y = w \cos t \sin \alpha + h \sin t \cos \alpha + y_0. \end{cases} \quad (2)$$

Теперь, согласно [7], проекции на оси  $X$  и  $Y$  скорости точки при ее движении по эллиптической траектории будут равны

$$\begin{cases} V_x = \dot{x}(t) = -w \sin t \cos \alpha - h \cos t \sin \alpha, \\ V_y = \dot{y}(t) = -w \sin t \sin \alpha + h \cos t \cos \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Полная скорость  $V$  точки составит

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)}.$$

Угол наклона скорости  $V$  точки к оси  $X$  (угол падения материальной точки на торцевую поверхность режущего инструмента при их косом соударении) будет вычисляться, согласно [7], как

$$\alpha_X = \frac{V_x}{V} = \frac{-w \sin t \cos \alpha - h \cos t \sin \alpha}{\sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)}}. \quad (4)$$

Тогда, согласно [7], полный импульс ударной силы определим из выражения

$$\begin{aligned} S &= mV(1+K) \cos \alpha_x \sqrt{1+f_{mp}^2} = m \sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)} (1+K) \times \\ &\times \cos \left( \frac{-w \sin t \cos \alpha - h \cos t \sin \alpha}{\sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)}} \right) \sqrt{1+f_{mp}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент упругого восстановления при ударе;  $f_{mp}$  – коэффициент трения скольжения.

На рисунке 2 приведена зависимость полного импульса ударной силы для каждой точки эллиптической траектории при различных значениях угла  $\alpha$  ее наклона к торцевой поверхности режущего инструмента (к оси  $X$ ). Импульс ударной силы, как видно из рисунка 2, изменяется по закону косинуса, при этом увеличение угла наклона эллиптической траектории с  $0$  до  $60^\circ$  вызывает двукратное увеличение амплитуды этого изменения, а также сдвиг фазы такого движения. Однако чем выше угол наклона такой траектории, тем меньший ее участок контактирует с поверхностью режущего инструмента, что показано на рисунке 3. В этой связи важно оценить суммарный полный импульс ударной силы для каждой точки эллиптической траектории, в которой обрабатываемая заготовка находится в контакте с режущим инструментом, и сравнить полученное значение с импульсом, сообщаемым заготовке под действием только

гравитационной подачи, обусловленной действием силы тяжести при обычном резании за период эллиптического движения заготовки, и вычисляемым по формуле

$$S_{стам} = mgN, \tag{6}$$

где  $N = 3600$  – количество циклов итераций за период циркуляционного движения.

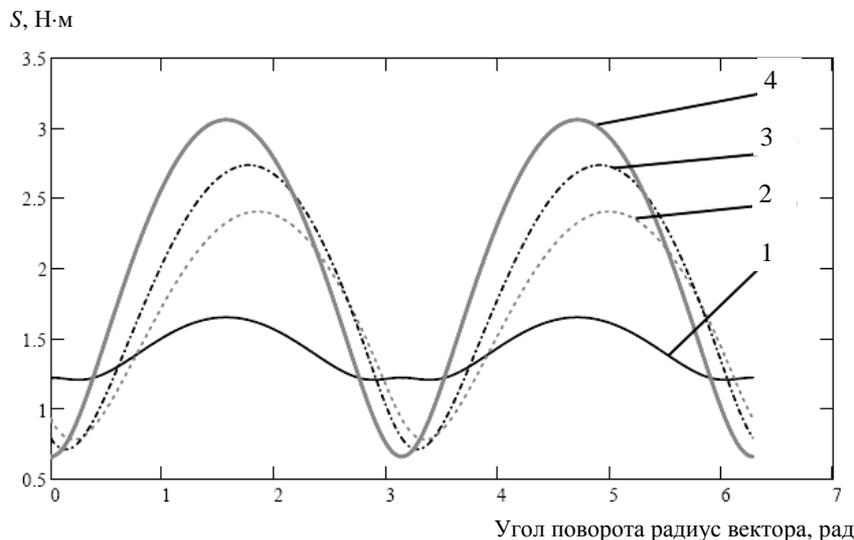


Рис. 2. Характер изменения полного импульса ударной силы от угла поворота радиус-вектора ( $w = 40$  мм,  $h = 16$  мм,  $m = 0,05$  кг) при различных углах наклона эллиптической траектории: 1 –  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 45^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 60^\circ$

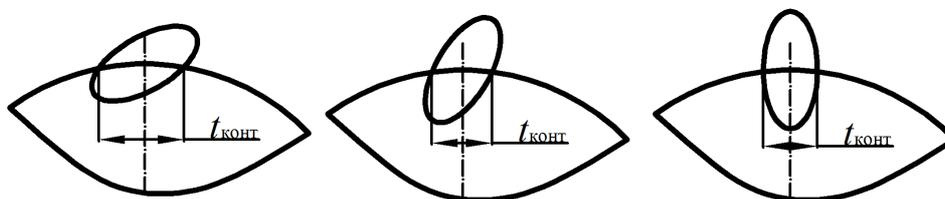


Рис. 3. Схема, отображающая изменение времени контакта  $t_{конт}$  заготовки и инструмента при различном наклоне эллиптической траектории перемещения заготовки к поверхности режущего инструмента

Для оценки интервала итераций, при которых происходит взаимодействие движущейся по эллиптической траектории заготовки с режущим инструментом производилась оценка вектора вертикальных координат  $y$  каждой точки эллиптической траектории и нахождение начала  $i_{нач}$  и конца  $i_{кон}$  интервала, определяемых с помощью следующих условий:

$$\begin{aligned} i_{нач} &= i \text{ если } y_i \leq 0 \text{ и } y_{i-1} > 0, \\ i_{кон} &= i \text{ если } y_{i-1} < 0 \text{ и } y_i \geq 0, \end{aligned} \tag{7}$$

где  $y_{i-1}, y_i$  – элементы вектора вертикальных координат  $y$  каждой точки эллиптической траектории.

Тогда суммарный полный импульс ударной силы для каждой точки эллиптической траектории, в которой обрабатываемая заготовка находится в контакте с режущим инструментом, будет вычисляться по формуле

$$S_{эл} = \sum_{i_{нач}}^{i_{кон}} S_i, \tag{8}$$

где  $S_i$  – полный импульс ударной силы в каждой точке эллиптической траектории при ее контакте с режущим инструментом, вычисляемый по формуле (5).

На рисунке 4 приведена зависимость отношения  $S_{эл} / S_{стам}$  для различных углов  $\alpha$  наклона эллиптической траектории.

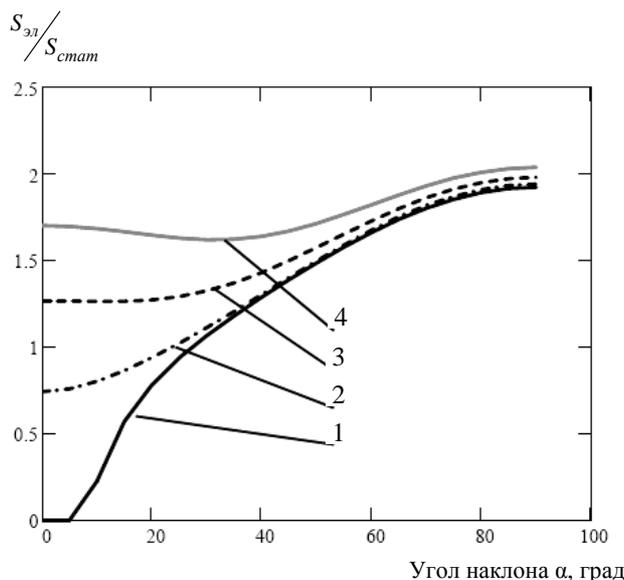


Рис. 4. Характер изменения отношения  $S_{эл}/S_{смам}$  от угла  $\alpha$  наклона эллиптической траектории при различных соотношениях малой и большой осей эллипса: 1 –  $h/w = 0,2$ ; 2 –  $h/w = 0,4$ ; 3 –  $h/w = 0,6$ ; 4 –  $h/w = 0,8$

Из полученных данных видно, что при соотношении величин малой и большой полуосей эллипса, превышающем или равном 0,6, интенсивность суммарного импульса сил резания при взаимодействии между режущим инструментом и заготовкой, двигающейся по эллиптической траектории, при любом угле наклона последней будет больше, чем в случае их взаимодействия только под действием силы тяжести при гравитационной подаче. При этом с увеличением угла наклона эллиптической траектории данное соотношение возрастает. При меньших соотношениях полуосей эллиптической траектории присутствует диапазон значений угла наклона эллиптической траектории  $\alpha_{пред}$ , в которых распиливание с гравитационной подачей будет характеризоваться большей интенсивностью по сравнению со случаем движения заготовки по эллиптической траектории. Так, при соотношении  $h/w = 0,2$  угол  $\alpha_{пред} = 30^\circ$ , а при  $h/w = 0,2$  угол  $\alpha_{пред} = 25^\circ$ .

Таким образом, из представленных данных можно сделать вывод, что для получения высокой интенсивности распиливания необходимо сформировать эллиптическую траекторию движения заготовки с соотношением малой и большой полуосей не менее 0,6. Для экспериментального подтверждения полученных результатов проведена серия опытов с использованием модернизированной распиловочной секции, описание конструкции которой приведено в работе [8].

Для измерения нормальной составляющей силы соударения заготовки с диском за время их контактного взаимодействия использовалась следующая методика. На месте шпиндельного узла диска в специальном приспособлении 1 (рис. 5) закреплялась предварительно протарированная тензометрическая балка 2.



Рис. 5. Общий вид устройства для измерения нормальной составляющей силы соударения оправки (заготовки) с тензометрической балкой (диск)

На рабочем конце стрелы устанавливалась оправка 3, имеющая узкую выступающую часть 4, которой она при двухмерном колебательном движении периодически воздействовала на поверхность тензодатчиков, вызывая ее деформацию. Сигнал от тензодатчиков, пропорциональный изменению нормальной составляющей силы удара  $P_d$ , поступал на усилитель и далее подавался на цифровой запоминающий осциллограф SWINTEK GDS-71152A.

По полученным осциллограммам и с учетом тарировочных данных тензобалки определялись характер изменения и величина нормальной составляющей силы соударения заготовки с диском за время их однократного взаимодействия, а также ее максимальное значение  $P_{dmax}$ .

Осциллограмма изменения напряжения, создаваемого при взаимодействии оправки и тензобалки, полученная при одном из режимов работы модернизированной распиловочной секции, приведена на рисунке 6.

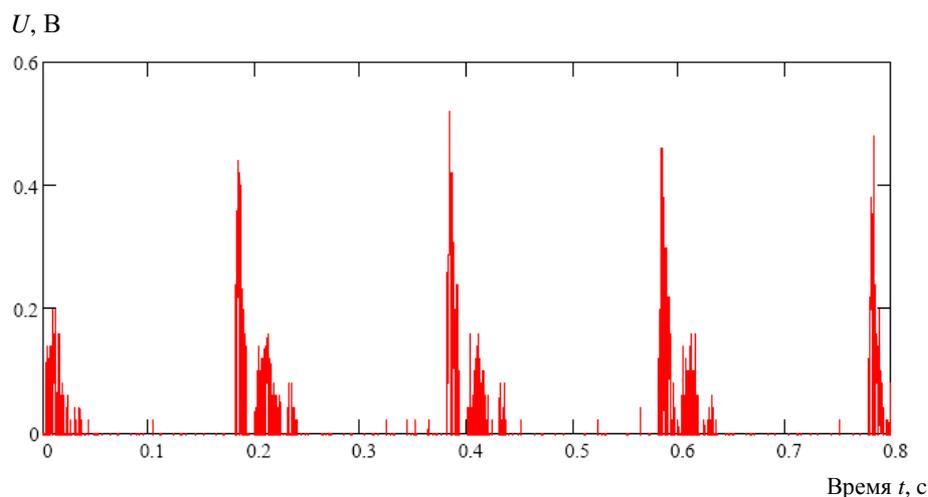


Рис. 6. Изменения напряжения на тензобалке

Для обработки полученной осциллограммы применялся программный продукт MathCAD, в котором выполнялось сглаживание полученного сигнала и его интерполяция кубическим сплайном.

Проведение такой обработки позволило вычислить среднее значение *нормальной* составляющей силы ее соударения.

Применительно к распиловочной секции, оснащенной колебательной системой, описание которой приведено в работе [8], важной характеристикой, влияющей на размеры и форму формируемой циркуляционной траектории, является величина зазора между плоскостью стрелы распиловочной секции и ее верхним упругим ограничителем. Исходя из указанного, важно оценить уровень динамического взаимодействия заготовки и режущего инструмента в зависимости от данного показателя.

На рисунке 7 приведено измеренное таким образом отношение среднего значения нормальной составляющей силы ее соударения к уровню статической нагрузки в зависимости от величины указанного зазора.

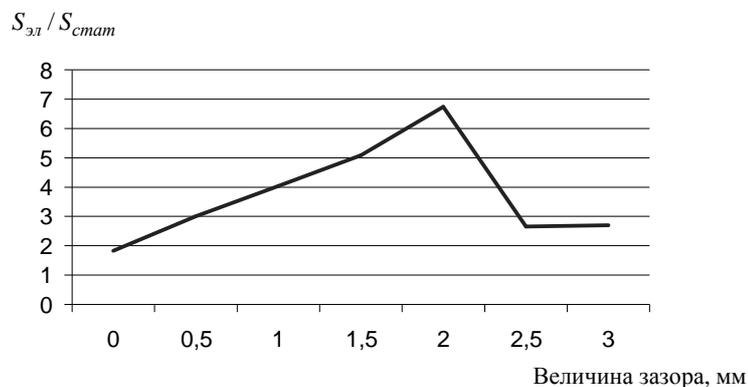


Рис. 7. Отношение средней динамической силы к ее статическому значению в зависимости от величины зазора

Как видно, использование верхнего ограничителя позволяет существенным образом изменять величину нормальной динамической силы, что, как указывалось выше, достигается изменением формы и размером формируемой траектории движения заготовки. Таким образом, учитывая изложенные в работе [1] особенности механизма разрушения материала, заключающиеся в прямой зависимости интенсивности выполнения распиливания от величины прижатия режущего инструмента к дну пропила заготовки, введение в конструкцию распиловочной секции ограничителя предоставляет возможность дополнительного управления процессом разрушения материала заготовки путем регулирования наклоном и размерами формируемой циркуляционной траектории. Это в свою очередь определяет величину суммарного импульса ударной силы при контакте заготовки с режущей кромкой диска, а соответственно, изменяет интенсивность протекания процесса распиливания.

**Заклучение.** На основании результатов предшествующих исследований доказано, что перспективным направлением повышения интенсивности распиливания твердых и сверхтвердых материалов является сообщение заготовке вынужденных колебаний, обеспечивающих виброударный режим ее взаимодействия с режущей кромкой диска. Такой режим обработки по сравнению с традиционными условиями распиливания, при которых прижатие заготовки к диску обеспечивается под действием статической (гравитационной) нагрузки, существенно интенсифицирует процесс хрупкого разрушения обрабатываемого материала.

Показано, что дальнейшее совершенствование способа виброударного распиливания связано с обеспечением двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки, совершаемого ею в плоскости распиливания по траектории, близкой к эллиптической. По сравнению с одномерным колебательным движением заготовки, направленным перпендикулярно режущей кромке диска, придание ей двухмерного циркуляционного движения по эллиптической траектории позволяет за счет изменения ее параметров, включая размеры малой и большой осей эллипса, а также угла наклона последней к горизонтальной оси, в широком диапазоне управлять условиями ударно-фрикционного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска, а соответственно и протеканием процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала.

В основу теоретической оценки степени влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность хрупкого разрушения ее материала положено вычисление величины импульса ударной силы, действующего в процессе ударно-фрикционного взаимодействия режущей кромки распиловочного диска с поверхностью заготовки, при различных параметрах эллиптической траектории ее движения.

Приняв ряд допущений (масса заготовки сосредоточена в одной точке, двигающейся по эллиптической траектории, а режущая кромка диска представлена в виде плоского полотна) и используя основные положения теории удара, получены теоретические зависимости, отражающие влияние параметров эллиптического движения заготовки на величину полного ударного импульса в процессе ее ударно-фрикционного взаимодействия с распиловочным диском.

На основании обобщенного анализа полученных теоретических зависимостей установлено:

- при постоянном отношении малой и большой осей эллипса по мере увеличения угла  $\lambda$  между последней и горизонтальной осью от 0 до  $60^\circ$  происходит возрастание импульса ударной силы и одновременно уменьшается продолжительность контактного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска;

- в случае неизменного значения угла  $\alpha$ , отличного от нуля, по мере увеличения отношения  $h/w$  величина импульса ударной силы возрастает, а при  $h/w > 0,6$  она при всех значениях угла  $\alpha$  оказывается больше, чем в случае взаимодействия заготовки с распиловочным диском в обычных условиях обработки.

С помощью методики, основанной на использовании тензометрической балки и цифрового запоминающего осциллографа, экспериментально определены значения нормальной составляющей силы соударения заготовки с режущей кромкой диска и продолжительность их контактного взаимодействия за период циркуляционного движения заготовки. Показано, что применение колебательной системы, обеспечивающей двухсторонний виброударный режим взаимодействия стрелы с верхним и нижним упругими ограничителями, позволяет за счет регулирования зазора  $Z$  между стрелой и верхним ограничителем целенаправленно управлять параметрами эллиптического циркуляционного движения заготовки, а следовательно и условиями ее ударно-фрикционного взаимодействия с режущей кромкой распиловочного диска. Установлено, что для условий проводимых экспериментов с увеличением указанного зазора отношение величины импульса нормальной составляющей силы удара заготовки с режущей кромкой диска за период циркуляционного движения  $J_1$  к значению за это же время статического импульса  $J_{ст}$  практически линейно возрастает, достигая своего максимального значения  $J_1/J_{ст} = 6,8$  при  $Z = 2$  мм, а при дальнейшем увеличении зазора это отношение резко уменьшается.

Таким образом в результате проведенных исследований теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что сообщение заготовке в процессе ее распиливания управляемого эллиптического циркуляционного движения позволяет целенаправленно влиять на условия ее ударно-фрикционного

взаимодействия с режущей кромкой диска, а соответственно и на интенсивность процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала. Показано, что путем изменения параметров циркуляционного эллиптического движения заготовки можно соответствующим образом управлять величиной суммарного импульса ударной силы при ее контактном взаимодействии с режущей кромкой диска, которая напрямую определяет интенсивность протекания процесса разрушения обрабатываемого материала. Принимая во внимание, что величина этого импульса может значительно превышать значение импульса, соответствующего условиям традиционной обработки, оправданно прогнозировать существенное повышение интенсивности распиливания заготовок из хрупких материалов при сообщении им циркуляционного движения, обеспечивающего их ударно-фрикционное взаимодействие с режущей кромкой диска.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов, В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Лесина, Л.В. Зыков; под ред. В.И. Епифанова. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. 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.
3. Дроздов, А.В. Повышение производительности и качества распиливания сверхтвердых кристаллов путем сообщения заготовке вынужденных колебаний: автореф. дис. канд. техн. наук / А.В. Дроздов. – Минск, 2005. – 21 с.
4. Киселев, М.Г. Повышение интенсивности и качества распиливания твердых сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двухмерного циркуляционного движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.
5. Киселев, М.Г. Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 3–9.
6. Киселев, М.Г. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на повышение производительности процесса механического распиливания монокристаллов сверхтвердых материалов / М.Г. Киселев, Г.А. Галенюк, А.В. Дроздов // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 2. – С. 55–59.
7. Курс теоретической механики: учебник для вузов / В.И. Дронг [и др.]; под общ. ред. К.С. Колесникова. – 3-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.
8. Киселев, М.Г. Влияние условий возбуждения стрелы распиловочной секции на параметры колебательного движения заготовки / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – № 1, Т. 18. – С. 78–85.

Поступила 28.04.2014

#### THEORETICAL ESTIMATE OF THE EFFECT OF THE PARAMETERS OF THE CIRCULATING MOVEMENT OF THE WORKPIECE ON THE INTENSITY OF ITS CUTTING

*M. KISELEV, A. DROZDOV, V. GABETS, D. YAMNAYA*

*In the article the substantiation of sawing intensity increase at the message of elliptic moving to sawing preparation is carried out. In result dependences of shock force pulse size of the active during percussion-frictional interaction of the sawing disk cutting edge with a surface of preparation at various parameters of an elliptic trajectory of its movement are received. It is shown, that the message to preparation during it sawing controlled elliptic movement allows to purposefully influence on conditions of its percussion interaction with a disk cutting edge.*