

УДК 62-531.7

М.Г. КИСЕЛЕВ, д-р техн. наук; А.В. ДРОЗДОВ, канд. техн. наук;
В.Л. ГАБЕЦ, канд. техн. наук; Д.А. ЯМНАЯ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ РАСПИЛИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРОУДАРНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Разработана и исследована математическая модель распиловочной секции, оснащенной нижним и верхним упругими ограничителями перемещения стрелы с обрабатываемой заготовкой. Показано, что изменением положения верхнего упругого ограничителя относительно начального положения стрелы можно эффективно управлять параметрами возникающего эллиптического движения заготовки.

Ключевые слова: распиливание, сверхтвердые материалы, виброударное взаимодействие

Введение. Операция механического распиливания монокристаллов алмаза на части (полуфабрикаты) является важным этапом технологического процесса их переработки в бриллианты и другие изделия технического назначения (инструменты, подложки) [1]. При этом высокие твердость и стоимость обрабатываемого сырья обуславливают необходимость обеспечения минимального процента безвозвратных потерь алмазосодержащего сырья, что подтверждает приоритет механического способа разделения монокристаллов алмаза перед другими (лазерным и электроннолучевым разделением).

Выполняется эта операция на специальных распиловочных секциях, реализующих технологическую схему обработки с использованием гравитационной подачи заготовки. Последняя закрепляется на одном конце качающегося рычага (стрелы) и за счет придания ему неуравновешенного состояния прижимается к торцевой (режущей) поверхности вращающегося распиловочного диска. Однако использование такого оборудования отличается низкой производительностью выполнения операции, а топография распиленной поверхности характеризуется наличием на ней однонаправленных рисок (следов обработки), для удаления которых применяется последующая операция шлифования площадок распиленных полуфабрикатов, что приводит к возрастанию безвозвратных потерь алмаза [1].

Как показали результаты предшествующих исследований [2, 3], эффективным способом существенного повышения уровня технологических показателей данной операции является сообщение обрабатываемой заготовки вынужденных колебаний, направленных перпендикулярно торцевой поверхности распиловочного диска.

В ходе дальнейшего совершенствования такого способа распиливания за счет расширения управляющего влияния колебаний на условия протекания процесса авторами [4, 5] обоснована перспективность использования для этого не одномерного, а двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки, которое совершается ею в

плоскости распиливания. Для придания заготовке такого движения промышленная распиловочная секция дополнительно оснащается специальной колебательной системой, обеспечивающей виброударный режим взаимодействия стрелы с упругими ограничителями. При этом возможны два варианта практической реализации такого режима: в одном случае ударное взаимодействие стрелы происходит только с одним нижним ограничителем, а во-вторых, как с нижним, так и с дополнительно установленным верхним ограничителем. Очевидно, что траектория двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки, в частности, ее форма и геометрические параметры будут в значительной степени зависеть от варианта виброударного взаимодействия стрелы с ограничителями.

В этой связи, в первую очередь, необходимо определить предпочтительный с точки зрения надежного и эффективного управления двухмерным периодическим циркуляционным движением заготовки вариант виброударной колебательной системы, после чего применительно к нему провести математическое описание траектории движения заготовки и теоретически оценить влияние на ее параметры условий возбуждения колебательной системы.

Обоснование рационального варианта виброударной колебательной системы распиловочной секции. На рисунке 1 представлена принципиальная схема модернизированной распиловочной секции, которая обеспечивает виброударный режим взаимодействия стрелы только с одним нижним упругим ограничителем. 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 передается от вала асинхронного электродвигателя с помощью плоскоременной передачи. В паре стоек 3 смонтирован узел опоры рычага 5 (стрелы), обеспечивающий его качение относительно точки О с минимальным трением. На одном конце стрелы в специальном приспособлении закреплен обрабатываемый кристалл 6, а на другом —

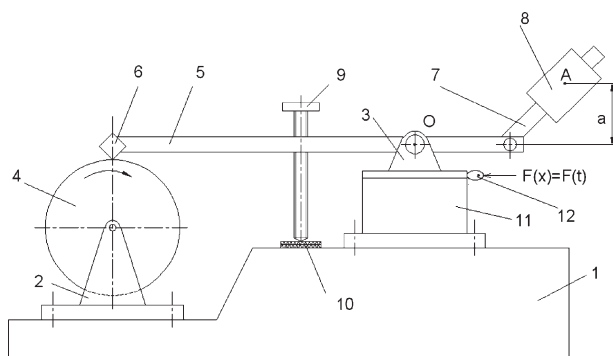


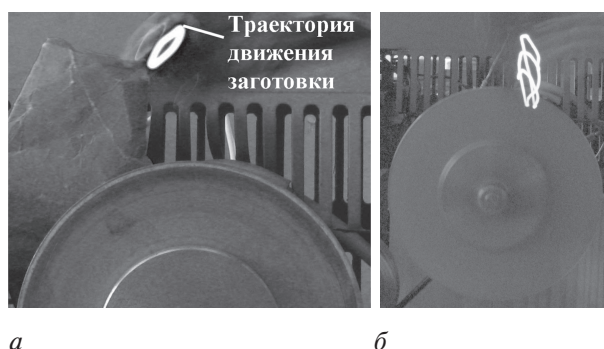
Рисунок 1 — Схема распиловочной секции, реализующей циркуляционное (периодическое) движение заготовки в процессе обработки

смонтирован узел противовеса, включающий поворотный рычаг 7, на котором установлен груз 8.

Статическое усилие прижатия заготовки к торцевой поверхности диска обеспечивается путем придания стреле неуравновешенного состояния за счет соответствующего изменения углового положения поворотного рычага с грузом, т. е. используется так называемая гравитационная подача. Важно подчеркнуть то обстоятельство, что в процессе распиливания центр тяжести узла противовеса (точка А) всегда расположен выше оси качания стрелы. Последняя в рабочем положении поддерживается с помощью регулировочного винта 9, который опирается на упругую прокладку 10, благодаря чему достигается плавное изменение усилия прижатия заготовки к режущей кромке распиловочного диска. По мере увеличения глубины пропила винт периодически выворачивается, чем обеспечивается врезная подача в процессе распиливания заготовки.

Принципиальное отличие модернизированного варианта распиловочной секции от промышленного состоит в том, что узел качания стрелы (пара стоек 3) жестко не связан со станиной секции, а установлен на двух плоских пружинах 11, образующих параллелограммный подвес, допускающий перемещение оси качания стрелы (точка О) вдоль оси ОХ. Для сообщения этому узлу вынужденных колебаний применен механический (эксцентриковый) вибратор 12 с приводом от электродвигателя постоянного тока (на рисунке 1 он не показан).

При вращении эксцентрика заготовка вместе со стрелой совершает колебательное движение вдоль оси ОХ. Одновременно, в силу того, что центр тяжести противовеса расположен выше оси качания стрелы, инерционные силы, действующие на него, создают переменный вращающий момент, вызывающий колебательное смещение заготовки по дуге окружности. Таким образом, заготовка совершает колебательное движение, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, в результате сложения которых она приобретает двухмерное периодическое циркуляционное движение по замкнутой траектории, как показано на рисунке 2 а.



а б

Рисунок 2 — Траектория движения точки, принадлежащей заготовке: а — траектория двухмерного циркуляционного движения; б — траектория движения с возрастающей амплитудой вертикальных колебаний

Вместе с тем, в работе [6] установлено, что с повышением интенсивности возбуждения такой колебательной системы, в частности, за счет увеличения частоты вынужденных колебаний в ней устанавливается режим работы, при котором происходит отрыв опорного винта от нижнего упругого ограничителя с возрастающей амплитудой вертикальных колебаний заготовки (см. рисунок 2 б). В конечном итоге это приводит к зависанию стрелы или даже к ее опрокидыванию. Наличие такого ограничения по уровню возбуждения данной колебательной системы существенно снижает ее возможности по эффективному управлению параметрами двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки в процессе ее распиливания, что является первостепенным условием повышения технологических показателей данной операции. Поэтому такую колебательную систему, обеспечивающую виброударный режим взаимодействия стрелы только с одним нижним ограничителем нельзя признать рациональной и имеющей перспективы практической реализации.

Для устранения указанного недостатка в работе [6] предложено изменить структуру колебательной системы распиловочной секции путем установки дополнительного узла верхнего упругого ограничителя (рисунок 3).

Он включает в себя кронштейн 2, жестко закрепленный на станине 3, и регулировочный винт 1, который позволяет изменить величину зазора между ним и упругой прокладкой 4, приклеенной к верхней поверхности стрелы. Это позволило за счет обеспечения двустороннего виброударного взаимодействия стрелы с ограничителями исключить ее зависание, а также дало возможность управления параметрами двухмерного движения заготовки путем изменения зазора между регулировочным винтом и стрелой. Поэтому такой вариант виброударной колебательной системы оправдано рассматривать как наиболее рациональный, позволяющий гарантировано обеспечивать двухмерное циркуляционное движение заготовки.

При решении технологических задач, связанных с применением в процессе распиливания та-

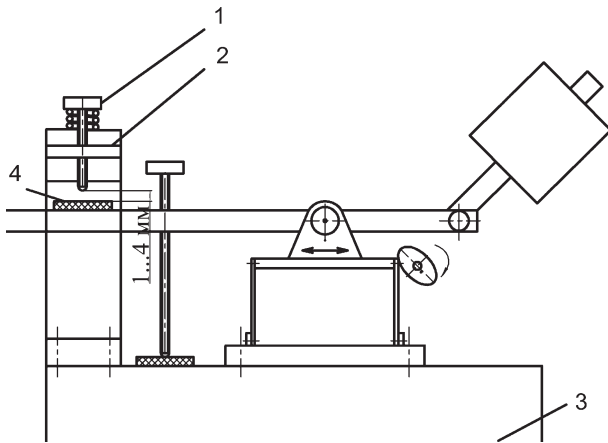


Рисунок 3 — Схема колебательной системы распиловочной секции с дополнительным установленным верхним ограничителем

кой колебательной системы, важно располагать данными, отражающими влияние зазора между верхним ограничителем и стрелой на характер двумерного периодического циркуляционного движения заготовки, и параметры двумерного периодического циркуляционного движения заготовки. Наличие таких данных позволит оценить возможности управления условиями виброударного распиливания заготовок за счет регулируемого указанного зазора в колебательной системе.

Для теоретического исследования характера возникающих при работе указанной секции перемещений обрабатываемой заготовки воспользуемся расчетной схемой, представленной на рисунке 4.

Она включает абсолютно жесткую невесомую стрелу, имеющую возможность поворота относительно оси ее качания, установленную на шариковых направляющих, связанных с основанием парой пружин, общей жесткостью c_1 и демпфером с коэффициентом пропорциональности D_1 , моделирующих плоскопараллелограммный подвес. Оси координат X и Y пересекаются на оси поворота стрелы и направлены, как показано на рисунке 4. Масса противовеса m_1 сосредоточена в точке с координатами x_1 и y_1 , а масса оставшейся части системы m_2 сосредоточена в точке с координатами x_2 и y_2 (см. рисунок 4). Изменение положения стрелы относительно горизонта определяется углом $\alpha(t)$

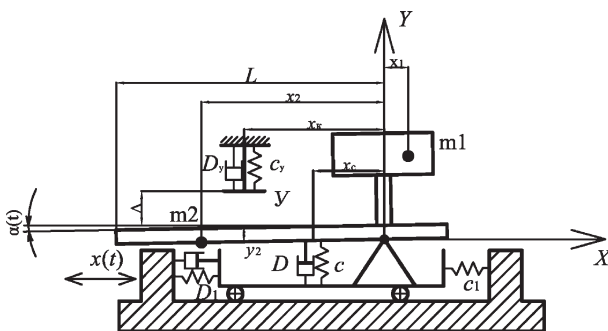


Рисунок 4 — Расчетная схема для математического описания движения заготовки при ее распиливании с возбуждением колебаний циркуляционного типа

между образующей стрелы и осью X . За положительное направление поворота стрелы принято ее движение против часовой стрелки. Повороту стрелы препятствует упругая пружина с коэффициентом пропорциональности c , а также демпфер колебаний с коэффициентом пропорциональности D , расположенные на расстоянии x_c от оси вращения стрелы. Кроме того, в системе предусмотрен верхний ограничитель Y , представляющий собой упругую пружину с коэффициентом пропорциональности c_y , а также демпфер колебаний с коэффициентом пропорциональности D_y , установленный на расстоянии x_k от оси вращения стрелы, а между его рабочей поверхностью и верхней плоскостью стрелы, в случае ее установки строго горизонтально предусмотрен зазор Δ , величина которого может регулироваться.

Для упрощения расчетов в схеме действие кулачкового механизма на пружинный параллелограмм заменено перемещением стрелы в направлении оси X , выражаемой согласно [7] формулой (при условии, что отрыва кулачка от пружинного параллелограмма не происходит)

$$x(t) = \frac{\omega_0^2 A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \pi - \varphi)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4D_1^2 \omega^2}}, \quad (1)$$

где A_0 — амплитуда перемещения в горизонтальном направлении; ω — круговая частота вращения кулачкового механизма; ω_0 — собственная частота плоскопараллелограммного подвеса; D_1 — коэффициент демпфирования плоскопараллелограммного подвеса; φ — смещение фазы колебаний, зависящая от начального положения кулачка.

Если распиливание не осуществляется, дифференциальное уравнение движения стрелы в условии ее перемещения вдоль основания, с учетом контакта с ограничителем Y , будет выражаться как

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}(t) - \frac{KD}{J} \cdot [\cos(\alpha(t)) \cdot \dot{\alpha}(t)] \cdot x_c - \frac{Kc}{J} \cdot \sin(\alpha(t)) \cdot x_c + \\ + \frac{K_1 D_y}{J} \cdot \left[\cos\left(\left|\alpha(t)\right| - \left|\arctg\left(\frac{\Delta}{x_k}\right)\right|\right) \cdot \dot{\alpha}(t) \right] \cdot x_k + \\ + \frac{K_1 c_y}{J} \cdot \sin\left(\left|\alpha(t)\right| - \left|\arctg\left(\frac{\Delta}{x_k}\right)\right|\right) \cdot x_k - \\ - m_1 \cdot \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)} + m_2 \cdot \sqrt{(x_2^2 + y_2^2)} = M_{вп}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $J = m_2 \cdot (x_2^2 + y_2^2) + m_1 \cdot (x_1^2 + y_1^2)$ — момент инерции системы относительно оси качания; $M_{вп} = \ddot{x}(t) \cdot (m_1 \sin(\arctg(\frac{y_1}{x_1}) + \alpha_0 + \alpha(t)) \sqrt{x_1^2 + y_1^2} + m_2 \sin(\arctg(\frac{y_2}{x_2}) - \alpha_0 - \alpha(t)) \sqrt{x_2^2 + y_2^2})$ — возникающий со стороны противовеса при перемещении системы вдоль основания вращающий стрелу момент;

$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{m_2 \cdot g \cdot \sqrt{(x_2^2 + y_2^2)} - m_1 \cdot g \cdot \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)}}{c \cdot x_c^2}\right)$ — на-

чальный угол наклона стрелы, обусловленный действием статической нагрузки; K — поправочный коэффициент, учитывающий действие пружины и буфера только при их контакте со стрелой ($K = 1$ при $\alpha(t) \geq \alpha_0$ и $K = 0$ при $\alpha(t) < 0$); K_1 — поправочный коэффициент, учитывающий действие пружины и буфера только при их контакте стрелой с верхним ограничителем ($K_1 = 0$ при $\alpha(t) < -\arctg(\Delta / x_k)$ и $K = 0$ при $\alpha(t) \geq -\arctg(\Delta / x_k)$).

Тогда перемещение конца стрелы вместе с заготовкой вдоль оси Y будет выражаться формулой

$$y(t) = L \cdot \sin(\alpha(t) + \alpha_0), \quad (3)$$

где L — длина стрелы; α_0 — угол равновесного положения стрелы.

Для численного решения методом Рунге-Кутты уравнения (2) с начальными условиями, приведенными в формуле (4) был разработан программный код в среде MathCAD

$$\begin{cases} \alpha(0) = \alpha_0; \\ \alpha'(0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Число шагов, на которых находилось решение, принималось равным 1000, а конечный промежуток времени расчета составлял 1 с, что позволило исследовать движения стрелы с временной дискретизацией, составлявшей 0,001 с. Результатом численного решения уравнения (2) являлась матрица, отражающая изменение как значения, так и скорости изменения угла α в интервале времени от 0 до 1 с. Полученные данные в программном коде проверялись как на отрыв стрелы от пружины и демпфера (т. е. выполнение условия $\alpha(t) < 0$), так и на контакт с упором y (т. е. выполнение условия $\alpha(t) < -\arctg(\Delta/x_k)$), моменты наступления которых во времени сравнивались, и за действительный принимался случай, который наступает раньше. Если раньше наступал отрыв стрелы от пружины и демпфера, то выполнялась корректировка значения коэффициента K в формуле (2), при этом за начальные данные принимались значения угла α и его скорости, полученные из анализируемых данных в момент отрыва стрелы от пружины. Если раньше наступал контакт верхней плоскости стрелы с упором y , выполнялась корректировка значения коэффициента K_1 в формуле (2).

После определения начальных условий, цикл расчета движения повторялся, причем число таких циклов в программном коде составляло 40 000, что позволило провести исследование характера движения системы на временном интервале до 10 с.

При этом программным модулем предусматривался учет непрерывности изменения во времени координаты $x(t)$, за счет добавления к начальному и конечному отрезку времени нахождения численного решения системы (2), временного сдвига, обеспечивающего суммирование продолжительности всех вычисленных ранее циклов движения системы.

Рассмотрим характерные формы траекторий, возникающие при различных этапах работы системы (рисунок 5). Во всех представленных случаях форма результирующей кривой близка к эллиптической, хотя ее размеры отличаются в зависимости от условий взаимодействия стрелы с элементами колебательной системы. Так при движении стрелы без отрыва от нижнего основания форма двумерной траектории является строго эллиптической, с соотношением большой и малой полуосей порядка 3,9.

В случае отрыва от нижнего основания форма эллиптической траектории на ее правом участке искажается, на нем заметен участок незначительного отрыва стрелы от нижнего основания. Учитывая, что перемещение точки свободного конца стрелы выполняется по направлению часовой стрелки, можно заметить, что скорость ее подъема над основанием меньше скорости приближения к нему, что вызвано действием как силы тяжести, так и изменением направления действия вращающего момента, так как момент отрыва происходит в момент отклонения основания на максимальное расстояние вправо и начале его перемещения влево. Наступление изменения направления действия вращающего момента, обеспечивающего прижим стрелы к нижнему основанию раньше их контакта, и обеспечивают меньший период силового воздействия стрелы на нижнее основание, приводящее к постепенному выпрямлению последнего с каждым последующим циклом горизонтального движения основания. Это в свою очередь приводит к тому, что высота возникающих вертикальных перемещений стрелы становится достаточной для контакта с верхним упором, обеспечивающим существенное изменение характера формирующейся циркуляционной траектории. Учитывая выпрямле-

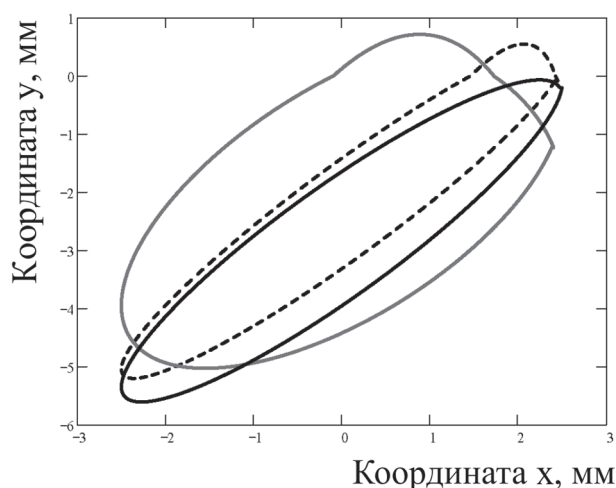


Рисунок 5 — Форма двумерной циркуляционной траектории стрелы, возникающая на различных этапах работы модели колебательной системы: $m_1 = 200$ гр; $x_1 = 50$ мм; $y_1 = 50$ мм; $m_2 = 100$ гр; $x_2 = -150$ мм; $y_2 = 0$ мм; $x_c = 100$ мм; $n = 180$ мин⁻¹; $c = 19\,600$ Н/м; $D = 10^4$ Па·с (черная сплошная линия — без отрыва от нижнего основания; черная пунктирная линия — с отрывом от нижнего основания; серая сплошная линия — с отрывом от нижнего основания и с контактом с верхним ограничителем)

ние нижнего основания, отрыв стрелы от него происходит раньше, а его увеличивающаяся высота вызывает увеличение продолжительности данного этапа. При этом контакт с верхним упором обеспечивает возврат стрелы к нижнему основанию, которое сменяется за тем действием вращающего момента, обеспечивающего дополнительный прижим стрелы к нему. В результате величина деформации нижнего основания возрастает, что приводит к округлению траектории двумерного периодического движения (так отношение большой и малой осей эллиптической траектории снижается с 3,9 до 1,9).

При этом уменьшение величины зазора в два раза изменяет форму формируемой циркуляционной траектории, приводя ее к виду, близкую к форме на второй стадии взаимодействия (рисунок 6). Как видно из рисунка, при изменении зазора между верхним ограничителем и плоскостью стрелы изменяется наклон большей оси эллиптической траектории движения точки свободного конца стрелы к горизонтальной оси. Так, при больших значениях зазора, наклон циркуляционной траектории увеличивается, что обеспечивает более вертикальное ее расположение по сравнению с траекториями, формируемыми с меньшими значениями зазора. Таким образом, за счет введения в технологическую систему дополнительного упругого ограничителя можно эффективно управлять характером взаимодействия распиливаемой заготовки с режущим инструментом, что обеспечивается изменением геометрических размеров и характера наклона сформированной циркуляционной траектории движения.

В практическом плане проведенные исследования позволяют подобрать конструктивные и технологические параметры колебательной системы распиловочной секции, обеспечивающие требуемые

параметры колебательного движения заготовки с учетом различных переходов при выполнении обработки, включая врезание, непосредственно распиливание и окончание операции. На основе данных, полученных в ходе проведения предварительных экспериментов, 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 единиц по шкале Мооса) ее значение увеличилось в 1,3 раза, для стекла (7,5 единиц твердости) — в 1,7 раза и для яшмы (7 единиц твердости) — в 1,5 раза.

Выводы

1. Предложены два варианта колебательной системы, обеспечивающие двухмерное периодическое циркуляционное движение заготовки в процессе ее распиливания, которые принципиально отличаются только реализацией условий контактного взаимодействия стрелы с упругими ограничителями: одно- и двухстороннее их взаимодействие.

2. По результатам сравнительных испытаний работы этих колебательных систем обоснован ее рациональный вариант, реализующий режим двухстороннего взаимодействия стрелы с верхним и нижним упругими ограничителями, который, в отличие от варианта с односторонним взаимодействием, гарантировано обеспечивает двухмерное периодическое циркуляционное движение заготовки во всем диапазоне изменения интенсивности возбуждения колебательной системы, а также устраняет нежелательное явление зависания стрелы, которое характерно для систем с односторонним ограничителем.

3. Разработана динамическая модель распиловочной секции, оснащенной рациональным вариантом колебательной системы, с помощью которой получено уравнение, описывающее траекторию движения точки, принадлежащей заготовке, и учитывающее влияние упруго-инерционных и диссипативных характеристик элементов колебательной системы, а также условий и режимов ее возбуждения.

4. С помощью программного обеспечения проведено численное исследование данного уравнения, в результате которого получены траектории движения точки, принадлежащей заготовке, позволяющие теоретически оценить влияние параметров колебательной системы распиловочной секции и режимов ее возбуждения на форму и размеры получаемой траектории, а также ее расположения относительно горизонтальной оси.

5. На основании анализа результатов проведенных теоретических исследований установлено, что применение колебательной системы, обеспечивающей режим двухстороннего контактного взаимодействия стрелы с упругими ограничителями, дает возможность надежно и эффективно управлять

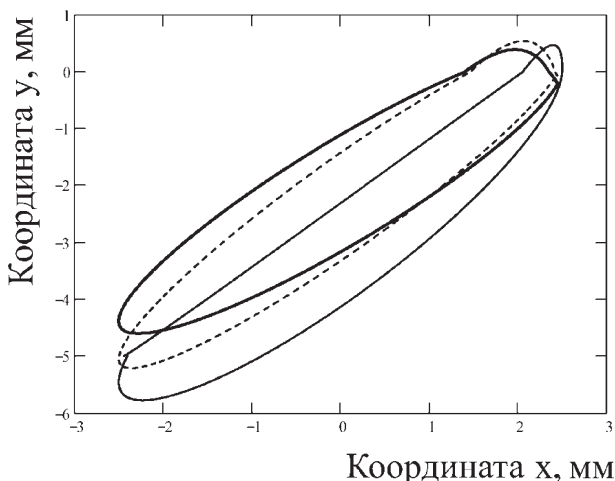


Рисунок 6 — Форма и наклон циркуляционной траектории движения точки свободного конца стрелы при различных величинах зазора между верхней плоскостью стрелы и верхним упором за один промежуток времени: $m_1 = 200$ гр; $x_1 = 50$ мм; $y_1 = 50$ мм; $m_2 = 100$ гр; $x_2 = -150$ мм; $y_2 = 0$ мм; $x_c = 100$ мм; $n = 180$ мин⁻¹; $c = 19\,600$ Н/м, $D = 10^4$ Па·с (черная сплошная линия — с зазором, равным 4 мм; черная пунктирная линия — с зазором, равным 2 мм; серая сплошная линия — с зазором, равным 1 мм)

параметрами циркуляционного (эллиптического) движения заготовки путем соответствующего регулирования зазора между стрелой и верхним ограничителем. Так, при прочих неизменных условиях, по мере его увеличения угол наклона большой оси эллиптической траектории движения заготовки к горизонтальной оси возрастает и одновременно изменяется отношение между малой и большой осями эллипса в сторону его увеличения, что существенно образом расширяет технологические возможности управления процессом распиливания твердых и сверхтвердых материалов.

Список обозначений

c_1 — жесткость горизонтальных пружин, Н/м;
 D_1 — коэффициент демпфирования горизонтальных пружин, Па·с;
 m_1 — масса противовеса, кг;
 x_1, y_1 — координаты центра тяжести противовеса, м;
 m_2 — масса остальной части системы, кг;
 x_2, y_2 — координаты центра тяжести остальной части системы, м;
 $\alpha(t)$ — текущий угол наклона стрелы, град;
 c — жесткость нижнего ограничителя, Н/м;
 D — коэффициент демпфирования нижнего ограничителя, Па·с;
 x_c — координата размещения нижнего ограничителя, м;
 c_y — жесткость верхнего ограничителя, Н/м;
 D_y — коэффициент демпфирования верхнего ограничителя, Па·с;
 x_k — координата размещения верхнего ограничителя, м;
 Δ — расстояние между верхним ограничителем и верхней плоскостью стрелы в ее начальном положении, м;
 A_0 — амплитуда перемещения в горизонтальном направлении, м;
 ω — круговая частота вращения кулачкового механизма, рад/с;

ω_0 — собственная радиальная частота плоскопараллелограммного подвеса, рад/с;
 φ — смещение фазы колебаний, град;
 J — момент инерции системы относительно оси качания, кг·м²;
 $M_{вр}$ — вращающий стрелу момент, Н·м;
 α_0 — начальный угол наклона стрелы, обусловленный действием статической нагрузки, град;
 K — поправочный коэффициент, учитывающий действие пружины и буфера только при их контакте со стрелой;
 K_1 — поправочный коэффициент, учитывающий действие пружины и буфера только при их контакте стрелой с верхним ограничителем;
 L — длина стрелы, м.

Список литературы

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 докл. 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. — 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. 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.
7. Быховский, И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. — М.: Машиностроение, 1969. — 363 с.

Kiselev M.G., Drozdov A.V., Gabets V.L., Yamnaya D.A.

The mathematical description of the preparation movement trajectory during it sawing with use of vibroimpact oscillatory system

The mathematical model of the sawing section equipped bottom and top elastic stops of boom with processable preparation moving is developed and investigated. It is shown, that change of position of the top elastic stop concerning initial boom's position can be operated effectively parameters of appearing elliptic preparation movement.

Keywords: sawing, superhard materials, vibroimpact interworking

Поступила в редакцию 01.04.2014.