

2. Hill, A. E. High-power electric CO<sub>2</sub> lasers / A. E. Hill // Gas lasers. Ed. by M. Endo, R. F. Walter. CRC Press. – N.Y., 2007. – P. 287–340.

3. Гордиец, Б. Ф. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры / Б. Ф. Гордиец, А. И. Осипов, Л. А. Шелепин. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

4. Nath, A. K. Scaling of laser power with N<sub>2</sub> partial pressure in a convective-cooled CW CO<sub>2</sub> laser / A. K. Nath, M. Kumar // IEEE J. Quant. Electron. – 1993. – Vol. 29, № 4. – P. 1199–1204.

5. Golubev, V. S. Scaling laws for designing high-power CW CO<sub>2</sub> lasers / V. S. Golubev, A. K. Nath // Proc. SPIE. – 2000. – Vol. 4165. – P. 42–55.

6. High-power two-dimensional waveguide CO<sub>2</sub> laser arrays / K. M. Abramski [et al.] // IEEE J. Quantum Electron. – 1996. – Vol. 32, № 2. – P. 340–348.

7. Невдах, В. В. О влиянии температуры на создание инверсии в активных средах электроразрядных CO<sub>2</sub>-лазеров / В. В. Невдах // Квант. электрон. – 2001. – Т. 31, № 6. – С. 525–528.

8. Tsui, K. H. Influence of the unstable glow discharge plasma state on the CW CO<sub>2</sub> laser output / K. H. Tsui, R. A. D. Zanon, C. A. Massone // IEEE J. Quantum Electron. – 1993. – Vol. 29, № 7. – P. 2138–2140.

9. Невдах, В. В. Оптимизация соотношения CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He в активных средах непрерывных электроразрядных CO<sub>2</sub>-лазеров / В. В. Невдах, Г. Монире // Журн. прикл. спектр. – 2004. – Т. 71, № 4. – С. 490–496.

10. Hill, A. E. Practical implementation of a CO<sub>2</sub>-laser-coupled quantum heat engine / A. E. Hill, Y. V. Rostovtsev, M. O. Scully // Phys. Rev. A 72, 043802. – 2005.

11. Невдах, В. В. Влияние температуры активной среды на работу CO<sub>2</sub>-лазера с быстрой прокачкой / В. В. Невдах, К. И. Аршинов, О. Л. Гайко // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107, № 3. – С. 398–402.

12. Rigrod, W. W. Homogeneously broadened cw lasers with uniform distributed loss / W. W. Rigrod // IEEE J. Quant. Electron. – 1978. – Vol. 14, № 5. – P. 377–381.

Поступила 19.02.2013

УДК 621.937.1

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВУХМЕРНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ РАСПИЛОВОЧНОЙ СЕКЦИИ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук, доц. ДРОЗДОВ А. В., асп. ЯМНАЯ Д. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

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]. Учитывая высокую стоимость монокристаллов алмаза, первостепенным требованием при их обработке является обеспечение минимальной величины (процента) безвозвратных потерь исходного сырья. Из числа известных способов разделения монокристаллов алмаза (лазерный, электронно-лучевой и др.) в наибольшей степени это требование обеспечивается при их механическом распиливании, благодаря чему сегодня этот способ повсеместно используется на алмазообрабатывающих предприятиях.

Технологическая схема распиливания монокристаллов алмаза (рис. 1) проста и аналогична схеме распиливания заготовок алмазным отрезным кругом с его гравитационной подачей [2] с той только разницей, что движение подачи  $S_B$  сообщается не инструменту 1 (распиловочному диску), а обрабатываемой заготовке 2, закрепленной на конце качающегося рычага 3.

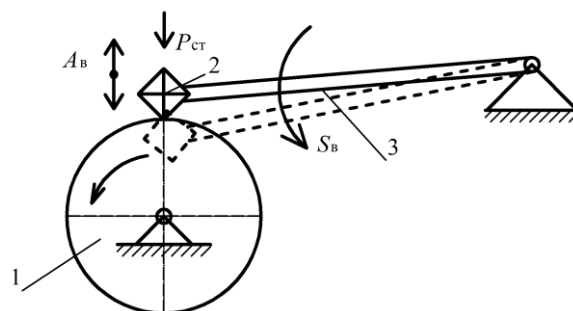


Рис. 1. Технологическая схема распиливания монокристаллов алмаза: 1 – распиловочный диск; 2 – монокристалл алмаза; 3 – качающийся рычаг

Однако традиционная технологическая схема отличается низкой производительностью выполнения операции, а шероховатость поверхности площадок распиленных полуфабрикатов характеризуется наличием на ней однонаправленных рисок (следов обработки). С целью их удаления применяется последующая операция шлифования поверхности площадок полученных полуфабрикатов, что приводит к дополнительному возрастанию безвозвратных потерь алмазного сырья.

Для устранения отмеченных недостатков авторами [3–5] предложено изменить традиционную технологическую схему распиливания за счет дополнительного сообщения заготовке вынужденных колебаний  $A_{\nu}$  как ультразвукового диапазона, так и низкочастотных, направленных перпендикулярно режущей кромке распиловочного диска. Однако, несмотря на доказанную в лабораторных условиях эффективность их применения с точки зрения интенсификации процесса распиливания образцов и повышения качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, использование для возбуждения таких колебаний ультразвуковых преобразователей и центробежного вибратора выявило ряд принципиальных недостатков. В частности, для обеспечения приемлемых для интенсификации процесса распиливания значений амплитуды колебательных смещений заготовки необходимо реализовать резонансный режим работы технологической системы и вибратора, что требует применения сложных систем управления. Кроме того, указанные вибраторы не позволяют изменять направление колебательных смещений заготовки относительно режущей кромки инструмента, что ограничивает возможности управляющего воздействия колебаний на протекание процесса распиливания монокристаллов алмаза.

В ходе проведения дальнейших исследований авторы [6, 7] предложили более перспективную технологическую схему распиливания монокристаллов алмаза, при которой заготовка получает двухмерное периодическое циркуляционное движение, совершаемое ею в плоскости распиливания. Оно является результатом

сложения двух одномерных синусоидальных компланарных колебаний с равными или находящимися в рациональном отношении частотами, возбуждение которых осуществляется от одного вибратора.

На рис. 2 представлена принципиальная схема модернизированной промышленной распиловочной секции станка ШП-2, обеспечивающей двухмерное периодическое циркуляционное движение заготовки.

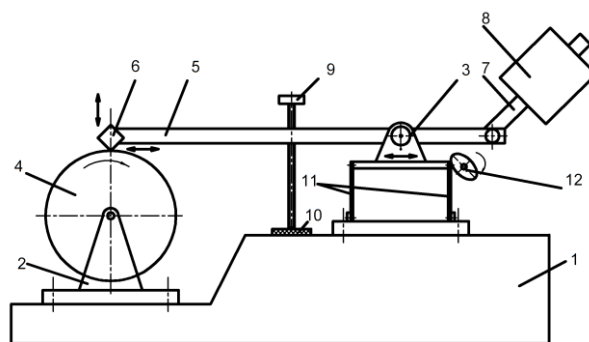


Рис. 2. Принципиальная схема распиловочной секции, обеспечивающей периодическое циркуляционное движение заготовки

Она состоит из массивного основания 1, на котором установлена передняя 2 и задняя 3 пары стоек. В передней стойке установлен вращающийся распиловочный диск 4, а в задней – узел качания стрелы 5. На одном ее конце закрепляется обрабатываемый кристалл 6, а на другом установлен поворотный рычаг 7 с противовесом 8. За счет изменения углового положения рычага обеспечивается необходимая величина статического усилия прижатия заготовки к поверхности диска. В процессе распиливания стрела в рабочем положении поддерживается с помощью регулировочного винта 9, который опирается на резиновую прокладку 10, чем обеспечивается плавное изменение гравитационной подачи. Принципиальное отличие модернизированного варианта распиловочной секции состоит в том, что узел качания стрелы (пара стоек 3) жестко не связан с ее основанием, как это сделано в конструкции промышленной секции, а установлен на двух плоских пружинах 11, образующих плоскопараллелограммный подвес, допускающий колебательные смещения узла качания стрелы вдоль горизонтальной оси. Эти движения он получает от

вращающегося эксцентрика 12, закрепленного на валу электродвигателя постоянного тока (на рис. 2 не показан).

При вращении эксцентрика заготовка вместе со стрелой совершает горизонтальное колебательное движение. Одновременно с этим, в силу того, что центр тяжести противовеса всегда расположен выше оси качания стрелы, на него действуют знакопеременные инерционные силы, создающие переменный вращающий момент, вызывающий поворот стрелы относительно оси ее качания. Благодаря этому, заготовка совершает колебательное движение по дуге окружности в вертикальном направлении. В результате его сложения с ее колебательным движением в горизонтальном направлении она получает двухмерное периодическое циркуляционное движение, совершаемое ею в плоскости распиливания. При этом траектория этого движения зависит от большого числа параметров как самой колебательной системы, так и условий ее возбуждения [8].

Поэтому для решения технологических задач, связанных с применением в процессе распиливания такой колебательной системы, в первую очередь необходимо располагать зависимостями, описывающими двухмерное периодическое циркуляционное движение заготовки. Наличие таких данных позволит определить те элементы колебательной системы и условия ее возбуждения, с помощью которых можно управлять как траекторией этого движения заготовки, так и ее параметрами.

**Математическое описание движения заготовки.** Для теоретического исследования характера возникающих при работе указанной секции перемещений обрабатываемой заготовки авторы использовали расчетную схему, представленную на рис. 3.

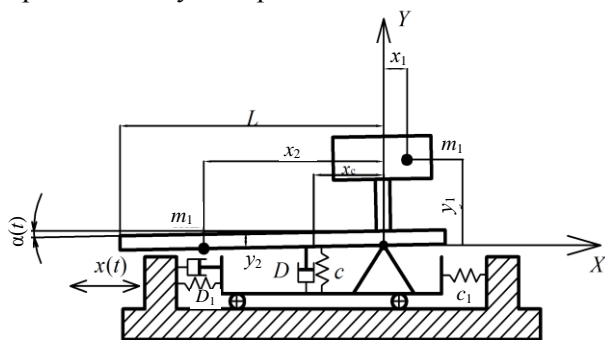


Рис. 3. Расчетная схема для математического описания движения точек свободного конца стрелы с возбуждением колебаний циркуляционного типа

Схема 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 рис. 3. Масса противовеса  $m_1$  сосредоточена в точке с координатами  $x_1$  и  $y_1$ , а масса оставшейся части системы  $m_2$  – в точке с координатами  $x_2$  и  $y_2$  (рис. 3). Изменение положения стрелы относительно горизонтали фиксируется углом  $\alpha(t)$  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.

Для упрощения расчетов в схеме действие кулачкового механизма на пружинный параллелограмм заменено перемещением стрелы в направлении оси  $X$ , выражаемым согласно [9] формулой (при условии, что отрыва кулачка от пружинного параллелограмма не происходит)

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

где  $A_0$  – амплитуда перемещения в горизонтальном направлении;  $\omega$  – круговая частота вращения кулачкового механизма;  $\omega_0$  – собственная частота плоскопараллелограммного подвеса со стрелой;  $D_1$  – коэффициент демпфирования плоскопараллелограммного подвеса;  $\varphi$  – смещение фазы колебаний, зависящее от начального положения кулачка.

Рассмотрим случай, когда процесс распиливания не осуществляется. Тогда дифференциальное уравнение движения стрелы в условиях ее перемещения вдоль основания будет выражаться как

$$\ddot{\alpha}(t) - \frac{KD}{J} \cos(\alpha(t)) \dot{\alpha}(t) x_c - \frac{Kc}{J} \sin(\alpha(t)) x_c -$$

$$-m_1\sqrt{x_1^2 + y_1^2} + m_2\sqrt{x_2^2 + y_2^2} = M_{\text{вр}}, \quad (2)$$

где  $J = m_2 x_2^2 + y_2^2 + m_1 x_1^2 + y_1^2$  – момент инерции системы относительно оси качания;  $M_{\text{вр}}$  – вращающий стрелу момент, возникающий со стороны противовеса при перемещении системы вдоль основания

$$M_{\text{вр}} = \ddot{x}(t)(m_1 \sin \left( \arctg \left( \frac{y_1}{x_1} \right) + \alpha_0 + \alpha(t) \right) + m_2 \sin \left( \arctg \left( \frac{y_2}{x_2} \right) + \alpha_0 + \alpha(t) \right));$$

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

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  $\alpha(t) < 0$ ).

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

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

где  $L$  – длина стрелы;  $\alpha$  – угол равновесного положения стрелы.

Решение уравнения (2) потребовало разработки программного кода в среде MathCad численным методом Рунге – Кутты с начальными условиями, приведенными в формуле

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

Число шагов, на которых находилось решение, принимали равным 1000, а конечный промежуток времени расчета составлял 1 с. Выбор таких параметров позволил выполнить исследование характера 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  $\alpha$  в интервале времени от 0 до 1 с. Полученные данные в программном коде проверяли на вы-

полнение условия отрыва стрелы от пружины и демпфера (т. е. выполнение условия  $\alpha(t) < 0$ ), по результатам которого производили корректировку значения коэффициента  $K$  в формуле (2). В результате цикл расчета движения повторялся, при этом за начальные данные принимали значения угла  $\alpha$  и его скорости, полученные из анализируемых величин в момент отрыва стрелы от пружины. Число таких циклов в программном коде составляло 10000, 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 отрезкам времени нахождения численного решения системы (2), временного сдвига, обеспечивающего суммирование продолжительности всех вычисленных ранее циклов движения системы.

На рис. 4а приведено полученное в ходе реализации указанного программного кода изменение во времени координаты  $y$  положения точек свободного конца стрелы системы, а на рис. 4б – возникающая при работе системы траектория циркуляционного перемещения указанных точек. Как видно из приведенного графика, начальный этап движения стрелы характеризуется нестабильной амплитудой перемещения точки ее свободного конца, после чего в течение порядка 3 с наблюдается выход системы на устойчивый режим перемещения стрелы, характеризующийся стабилизацией колебаний точек свободного конца стрелы по амплитуде с незначительными (порядка 1 %) изменениями координат нижней и верхней точек циклов перемещения.

Очевидно, что исследовать характер циркуляционной траектории, возникающей при работе такой системы, следует именно после указанной стабилизации ее работы. Результирующая двухмерная траектория перемещения точки свободного конца системы представляет собой эллиптическую траекторию (рис. 4б). При этом, учитывая незначительное изменение координат точек нижнего и верхнего пределов перемещений траектории при стабилизации траектории перемещения (рис. 4а), удобнее оценивать характер возникающей траектории в пределах временного цикла, при котором про-

исходит единичное периодическое перемещение стрелы вверх-вниз.

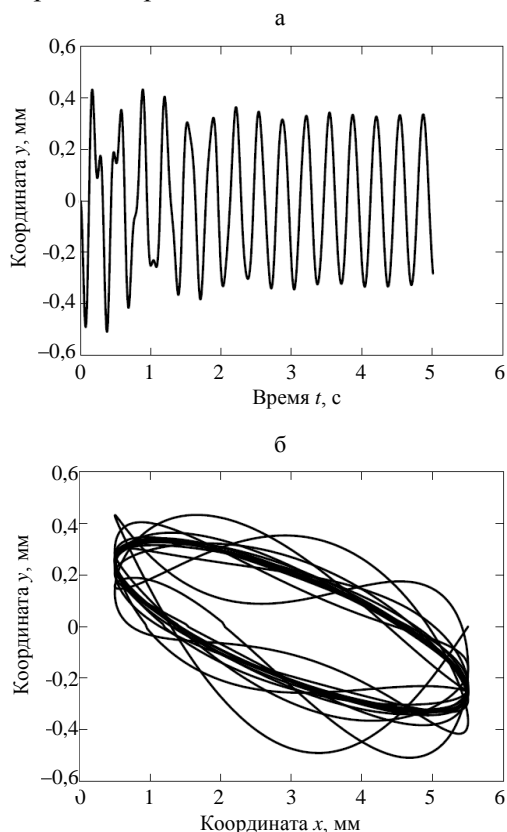


Рис. 4. Характер движения точек свободного конца стрелы с момента возбуждения системы ( $m_1 = 200$  г;  $x_1 = 50$  мм;  $y_1 = 50$  мм;  $m_2 = 200$  г;  $x_2 = -150$  мм;  $y_2 = 0$  мм;  $x_c = 100$  мм;  $n = 180$  мин<sup>-1</sup>;  $c = 1 \cdot 10^8$  Н/м;  $D = 10^5$  Па · с;  $A_0 = 3$  мм;  $c_1 = 3 \cdot 10^3$  Н/м;  $D_1 = 55$  Па · с;  $\omega = 18,85$  рад/с;  $\omega_0 = 50,25$  рад/с): а – изменение координаты  $y$  от времени; б – формируемое при работе системы циркуляционное перемещение точек

На основании качественного анализа полученной траектории установившегося двухмерного циркуляционного движения точки свободного конца стрелы можно сделать вывод о том, что форма траектории движения точки свободного конца стрелы является эллиптической. Тогда циркуляционное движение точки по такой траектории можно характеризовать величиной большой и малой полуосей эллипса, а также углом наклона первой из них к горизонтальной оси.

Обработка полученных результатов указанным образом представлена на рис. 5, где показаны единичные циклы циркуляционных траекторий установившегося движения точек свободного конца стрелы при различных значениях массы  $m_1$  противовеса.

Из приведенных на рис. 5 данных видно, что рост массы  $m_1$  системы приводит к увеличению угла наклона большей оси эллиптической траектории по отношению к горизонтали, а также к повышению отношения малой и большой полуосей эллипса, т. е. к постепенному приближению эллиптической формы траектории к круговой.

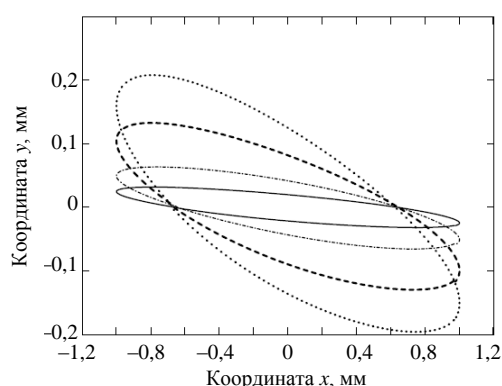


Рис. 5. Траектории единичных циклов циркуляционных перемещений точек свободного конца стрелы в установившемся режиме работы колебательной системы ( $x_1 = 50$  мм;  $y_1 = 50$  мм;  $m_2 = 200$  г;  $x_2 = -150$  мм;  $y_2 = 0$  мм;  $x_c = 100$  мм;  $n = 180$  мин<sup>-1</sup>;  $c = 1 \cdot 10^7$  Н/м;  $D = 10^5$  Па · с;  $A_0 = 3$  мм;  $c_1 = 3 \cdot 10^3$  Н/м;  $D_1 = 192,6$  Па · с;  $\omega = 18,85$  рад/с;  $\omega_0 = 50,25$  рад/с) при различных значениях массы  $m_1$  системы: сплошная линия –  $m_1 = 0,05$  кг; штрихпунктирная –  $0,1$  кг; штриховая –  $0,2$  кг; точечная –  $0,3$  кг

Влияние коэффициента демпфирования  $D_1$  на форму и размеры формируемой циркуляционной кривой показано на рис. 6.

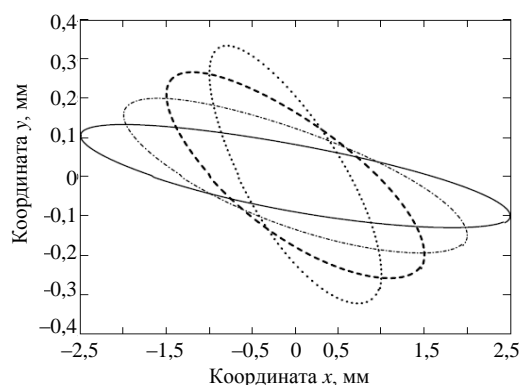


Рис. 6. Траектории единичных циклов циркуляционных перемещений точек свободного конца стрелы в установившемся режиме колебаний системы ( $m_1 = 0,2$  кг;  $x_1 = 50$  мм;  $y_1 = 50$  мм;  $m_2 = 0,1$  кг;  $x_2 = -150$  мм;  $y_2 = 0$  мм;  $x_c = 100$  мм;  $n = 180$  мин<sup>-1</sup>;  $c = 10^7$  Н/м;  $D = 1 \cdot 10^5$  Па · с;  $A_0 = 3$  мм;  $c_1 = 3 \cdot 10^3$  Н/м;  $\omega = 18,85$  рад/с;  $\omega_0 = 50,25$  рад/с) при различных значениях массы коэффициента демпфирования системы: сплошная линия –  $D_1 = 56$  Па · с;

штрихпунктирная – 82,5 Па · с;  
штриховая – 121,0 Па · с; точечная – 192,6 Па · с

Как видно из рас. 6, увеличение коэффициента  $D_1$  горизонтального демпфирования системы приводит к снижению размера смещения точки горизонтальной оси, а также к увеличению размаха вертикальных перемещений. При этом изменение отношения малой и большей сторон эллипса для различных значений коэффициента демпфирования остается практически постоянным и колеблется в пределах 0,52–0,57 (для различных величин  $D_1$ ). А это означает, что угол  $\lambda$  наклона эллиптической траектории пропорционально возрастает.

Изменение частоты вынужденных колебаний (рис. 7) приводит к изменению формы циркуляционной траектории, так как с ее повышением увеличивается отношение большой оси эллипса к малой, а также возрастает угол наклона большей оси эллипса к горизонтали.

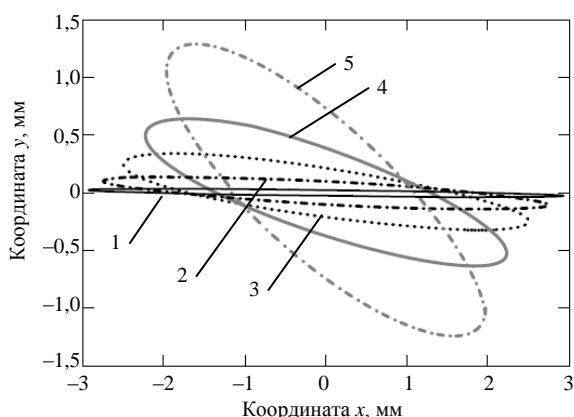


Рис. 7. Траектории единичных циклов циркуляционных перемещений точек свободного конца стрелы системы ( $m_1 = 0,2$  кг;  $x_1 = 50$  мм;  $y_1 = 50$  мм;  $m_2 = 0,1$  кг;  $x_2 = -150$  мм;  $y_2 = 0$  мм;  $x_c = 100$  мм;  $c = 1 \cdot 10^7$  Н/м;  $D = 1 \cdot 10^5$  Па · с;  $D_1 = 56$  Па · с;  $A_0 = 3$  мм;  $c_1 = 3 \cdot 10^3$  Н/м;  $\omega_0 = 50,25$  рад/с) при различных значениях частоты вынуждающей силы:  
1 –  $n = 60$  мин<sup>-1</sup>; 2 – 120 мин<sup>-1</sup>; 3 – 180 мин<sup>-1</sup>;  
4 – 240 мин<sup>-1</sup>; 5 – 300 мин<sup>-1</sup>

Из сопоставления полученных данных, отражающих влияние упруго-инерционных и диссипативных характеристик звеньев колебательной системы, а также условий ее возбуждения на форму и параметры траектории движения заготовки, можно сделать следующий важный с практической точки зрения вывод. Наиболее простым в реализации и эффективным способом управления характером двухмерного периодического циркуляционного дви-

жения заготовки в процессе ее распиливания является частота вынужденных колебаний, сообщаемых подвесу стрелы. Изменение ее значения позволяет с учетом конкретного перехода выполнения операции распиливания (врезание, распиливание, окончание операции) обеспечивать рациональные для его эффективного протекания параметры двухмерного циркуляционного движения обрабатываемой заготовки.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена расчетная схема колебательной системы для математического описания двухмерного циркуляционного движения точки свободного (рабочего) конца стрелы модернизированной распиловочной секции, ось качания которой установлена на упругом плоскопараллелограммном подвесе, совершающем вынужденные гармонические колебания вдоль горизонтальной оси.

2. С использованием предложенной расчетной схемы получена система двух зависимых уравнений, описывающих колебательное движение точки свободного конца стрелы, совершаемое ею одновременно в горизонтальном и вертикальном направлениях, учитывающие как упруго-инерционные и диссипативные параметры колебательной системы, так и условия ее возбуждения.

3. Путем численного решения этих уравнений методом Рунге – Кутты с использованием разработанного программного кода в среде MathCad получены графические изображения траектории движения точки свободного конца стрелы при различных параметрах колебательной системы и условиях ее возбуждения.

4. На основании обобщенного анализа полученных траекторий показано, что с достаточной для инженерных расчетов точностью их форму оправдано аппроксимировать эллиптической. Установлено, что за счет изменения характеристик колебательной системы (жесткость упругого подвеса, величина и положение инерционной массы относительно оси качания стрелы, коэффициент демпфирования), а также условий возбуждения системы (амплитуда и частота вынужденных колебаний) можно целенаправленно влиять как на положение эллипти-

ческой траектории относительно горизонтальной оси, так и на величину главных полуосей эллипса, т. е. на геометрические параметры эллиптической траектории.

5. Показано, что при прочих равных условиях наиболее простым в осуществлении и эффективным в применении способом управления параметрами циркуляционного движения точки свободного конца стрелы является регулирование частоты вынужденных колебаний, сообщаемых оси ее качания. Установлено, что ее повышение приводит к увеличению угла наклона большой оси эллиптической траектории по отношению к горизонтали с одновременным увеличением размаха вертикальных перемещений стрелы, т. е. постепенному приближению формы траектории от эллиптической к круговой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов, В. И. Технология обработки алмазов в бриллианты: учеб. / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Заков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. Пичугин, И. Г. Технология полупроводниковых приборов / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М.: Высш. шк., 1984. – 288 с.
3. Киселев, М. Г. Влияние ультразвука на производительность механической обработки монокристаллов сверхтвердых материалов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов,

Г. А. Галенюк // Вестник Полоцкого государственного университета. – 4-е изд.: Фундаментальные науки. – Новополоцк, 2005. – С. 128–132.

4. Патент. Установка для обработки кристаллов алмаза: пат. 1 С1 ВУ, МПК В28D 5/00 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. С. Старовойтов, В. А. Зайцев. – № 8393; Опубл. 2006.08.30 // Афіцыйны бюл. – № 4 (51).

5. Киселев, М. Г. Влияние виброударного режима взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемой заготовки на условия формирования ее шероховатости при механическом распиливании хрупких и твердых материалов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов // Инженерно-технический журнал. – 2005. – № 2. – С. 171–176.

6. Киселев, М. Г. Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2-е изд. – Гомель, 2011. – С. 4–9.

7. Киселев, М. Г. Установка для исследования процесса распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке вынужденных колебаний / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение 2010». – Минск, 2010. – С. 230–231.

8. Быховский, И. И. Основы вибрационной техники / И. И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.

9. Бабицкий, В. И. Теория виброударных систем / В. И. Бабицкий. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

Поступила 17.05.2013

УДК 621.3

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ, ОСНОВАННАЯ НА ОПЕРАТИВНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Асп. РУСЕЦКИЙ В. А.

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО»

Современный процесс производства интегральных микросхем в целом и процесс производства оригиналов топологии на фотошаблонах в частности характеризуются неуклонным ростом сложности формируемых топологических структур, обусловленным как уменьшением проектных норм, используемых при созда-

нии полупроводниковых приборов, так и все более интенсивным применением техники RET (Resolution Enhancement Technique – техника повышения разрешения) [1]. Соответственно повышаются сложность технологии изготовления и стоимость фотошаблонов, которая для проектных норм субстананометрового диапазо-