

УДК 62-531.7

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ КРИСТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ЕГО РАСПИЛИВАНИЯ НА УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

М. Г. КИСЕЛЕВ, А. В. ДРОЗДОВ, В. Л. ГАБЕЦ, Д. А. ЯМНАЯ

*Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», г. Минск*

### Введение

Рассматриваемые в данной работе вопросы относятся к операции механического распиливания монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий. Наряду с высокой производительностью, преобладающим требованием, предъявляемым к данной операции, является обеспечение минимальных потерь дорогостоящего сырья, т. е. обеспечение максимального выхода годного. Величина этих потерь определяется двумя основными факторами: шириной пропила, которая зависит от толщины распиловочного диска, и качеством поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, которое определяет величину припуска, удаляемого с поверхности алмаза на последующей операции ее шлифования. Если учесть, что толщина распиловочного диска, применяемого для распиливания монокристаллов алмаза конкретной весовой группы, является постоянной, то основной резерв минимизации безвозвратных потерь связан с обеспечением в процессе распиливания высокого качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. Поэтому дальнейшее совершенствование технологии механического распиливания монокристаллов алмаза, направленное на минимизацию потерь, представляет актуальную научно-техническую задачу для алмазообрабатывающего производства.

Как известно [1], качество поверхностей распиленных полуфабрикатов во многом определяется степенью проявления полирующего эффекта, возникающего при взаимодействии распиленных участков заготовки с боковыми сторонами распиловочного диска. Чем больше путь их относительного перемещения, тем сильнее происходит сглаживание микронеровностей, сформированных в процессе распиливания на участке взаимодействия торцевой поверхности диска и зоны пропила заготовки. Очевидно, что при постоянной частоте вращения распиловочного диска, которая составляет  $10000\text{--}12000\text{ мин}^{-1}$ , и неизменном направлении гравитационной подачи кристалла величина пути их относительного скольжения за время выполнения операции остается практически постоянной. В свою очередь это приводит к формированию на поверхности площадок распиленных полуфабрикатов однонаправленных следов обработки (рисок), имеющих, особенно в зоне окончания распиливания, значительную величину.

С целью создания более благоприятных условий для повышения качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов авторами [2] проведена модернизация промышленной распиловочной секции, в результате которой кристаллу в процессе обработки сообщается двухмерное периодическое циркуляционное движение, совершаемое им в плоскости распиливания. Наличие такого движения кристалла от-

носительно боковых поверхностей распиловочного диска позволяет, во-первых, увеличить путь их относительного скольжения за время выполнения операции, а во-вторых, обеспечить неповторяемость следов обработки на распиленной поверхности кристалла, что в совокупности должно способствовать интенсификации полирующего эффекта, а соответственно, повышению качества обработанных поверхностей.

Для оценки влияния параметров двумерного периодического циркуляционного движения кристалла на условия формирования микрорельефа обработанной поверхности важно оценить характер изменения скорости движения точки на поверхности распиливаемого кристалла, движущейся относительно вращающегося распиловочного диска по циркуляционной траектории. Теоретическому исследованию этих вопросов посвящена данная работа.

**Математическое описание закономерностей движения точки на поверхности кристалла относительно распиловочного диска**

Для этого обратимся к схеме распиливания, приведенной на рис. 1.

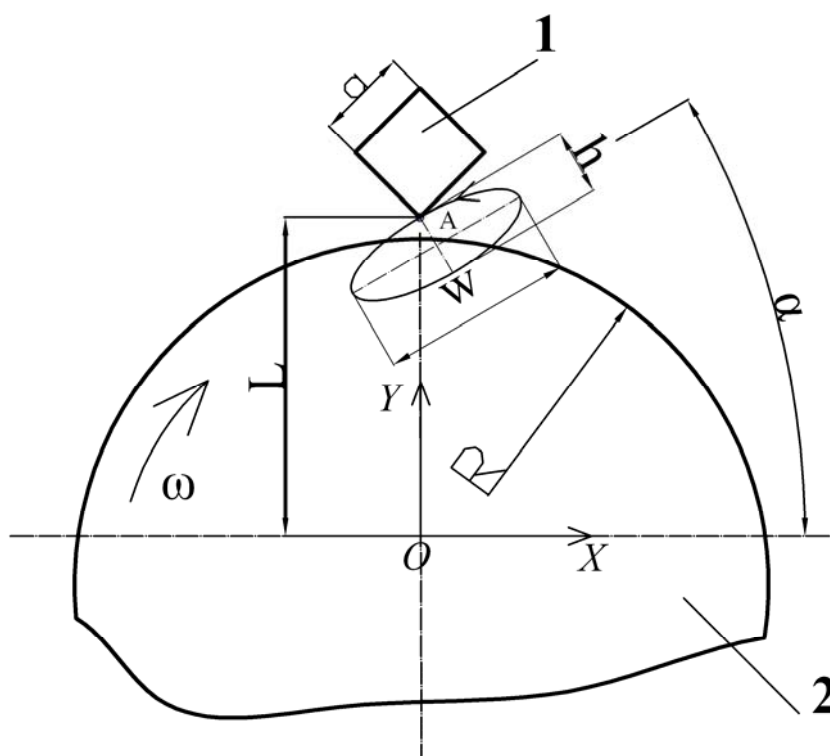


Рис. 1. Схема для математического моделирования процесса распиливания кристаллов сверхтвёрдых материалов: 1 – обрабатываемый кристалл; 2 – распиловочный диск

В данном случае распиловочный диск 2 представим в виде окружности с центром в точке  $O$  с координатами  $(0, 0)$  и радиусом  $R = 38$  мм, а обрабатываемый кристалл 1 представим в виде квадрата в сечении в плоскости распиливания со стороной  $a$  равной 5 мм и по аналогии в выполнении распиливания монокристаллов алмаза расположим его ориентированным на ребро относительно торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска. При этом ближайшая к режущему инструменту точка  $A$  заготовки диска находится на расстоянии  $L = 40$  мм от центра диска вдоль оси  $Y$ . В случае сообщения заготовке циркуляционного движения каждая ее точка, включая  $A$ , перемещается по эллиптической траектории с размерами ее большой и малой осей, соответственно,  $w$  и  $h$ .

Для упрощения задачи оценим путь скольжения не для всех точек заготовки, а только точки  $A$  (рис. 1) как первой начинающей взаимодействие с боковой поверхностью инструмента. При традиционном распиливании данная величина будет определяться из уравнения

$$L(t) = \omega t(R - S_{\text{рад}} t) = \omega R t - \frac{\sqrt{2a}}{t_{\text{рас}}} t^2,$$

где  $\omega$  – частота вращения диска,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S_{\text{рад}} = \frac{\sqrt{2a}}{t_{\text{рас}}}$  – радиальная подача заготовки на распиловочный диск,  $\text{мм/мин}$ ;  $t_{\text{рас}}$  – время распиливания заготовки, с.

В случае придания заготовке циркуляционного движения сообщим точке  $A$  движение по эллиптической траектории с параметрами  $w$  и  $h$ , наклоненной по углом  $\alpha$  к оси  $OX$  (рис. 1).

Для вычисления координат точки  $A$  при ее движении по эллиптической траектории применялась программная среда MathCAD. В ней сначала задавались координаты эллиптического движения согласно уравнениям:

$$\begin{cases} x_j = w \cos(j \frac{\pi}{180}) + x_0 \\ y_j = h \sin(j \frac{\pi}{180}) + y_0 \end{cases},$$

где  $x_0, y_0$  – координаты начального положения точки  $A$ , совпадающие с центром эллиптической траектории и определяемые как

$$x_0 = 0, \quad y_0 = R;$$

$j$  = от 0 до 360 – текущий угол наклона радиус-вектора в градусах.

Вычисленные по формулам координаты сохранялись в векторах  $X$  и  $Y$ .

Одновременно в соответствии с формулой (1) вычислялся угол  $\beta_j$  наклона касательной к эллипсу в каждой точке с координатами  $x_j$  и  $y_j$  (1), который одновременно являлся углом наклона к оси  $OX$  скорости движения точки по данной траектории:

$$\beta_j = \begin{cases} \arctg\left(\frac{x_j h^2}{y_j w^2}\right), & \text{если } y_j \neq 0; \\ 90^\circ, & \text{если } y_j = 0 \text{ и } j = 0; \\ -90^\circ, & \text{если } y_j = 0 \text{ и } j \neq 0. \end{cases} \quad (1)$$

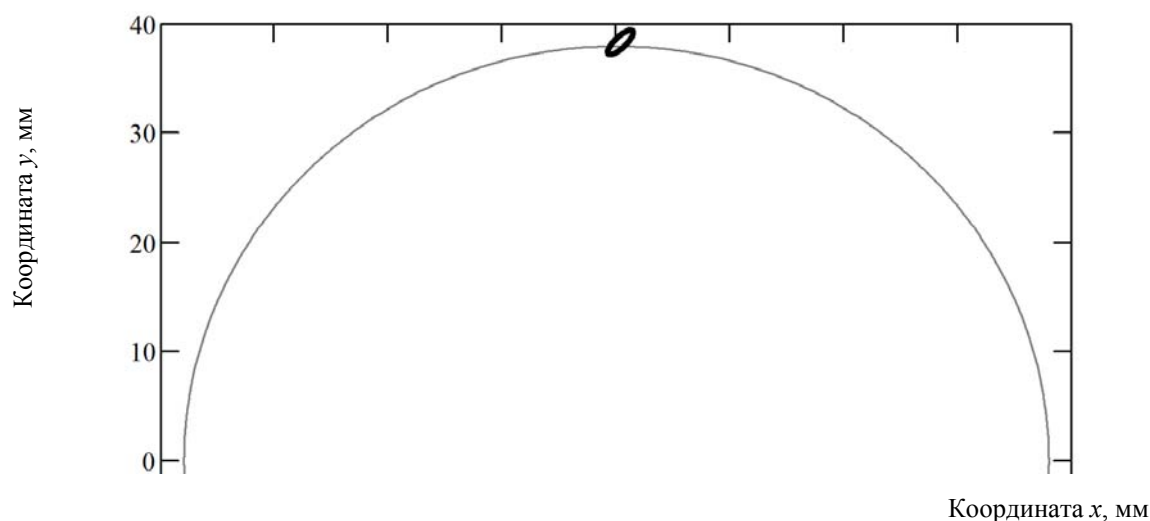
Для поворота траектории на угол  $\alpha$  полученные значения векторов  $X$  и  $Y$  перемножались на матрицу  $M_2$  направляющих косинусов, вычисляемую как

$$M_2 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

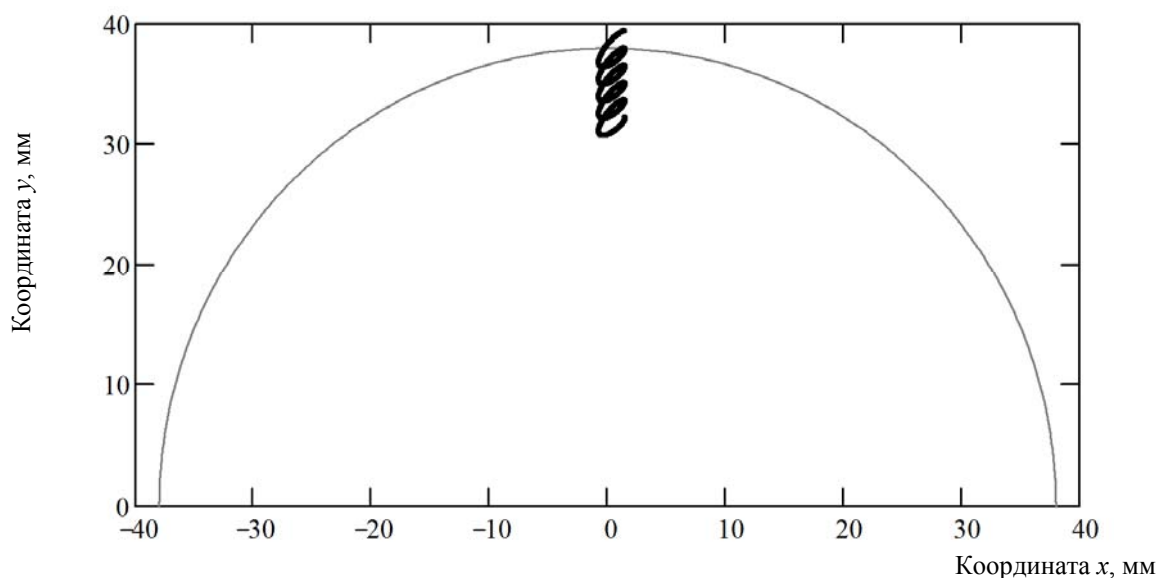
Полученные после перемножения значения векторов  $X$  и  $Y$  соединялись в среде MathCAD вместе в одну матрицу  $Resh$ . Координаты  $x'_j$  и  $y'_j$  полученных из координат  $x_j$  и  $y_j$  (1) после перемножения на матрицы  $M_1$  и  $M_2$  заносились, соответственно, в первый и второй столбец матрицы. В третий столбец матрицы  $Resh$  вносилось значение угла  $\beta'_j$  в градусах наклона касательной к повернутому эллипсу в соответствии с формулой

$$\beta'_j = \beta_j + \alpha.$$

Полученная траектория движения точки  $A$  заготовки относительно неподвижного распиловочного диска представлена на рис. 2, *a*.



*a)*



*б)*

*Рис. 2.* Взаимное расположение циркуляционной траектории движения точки  $A$  заготовки: *a* – при неподвижном положении заготовки; *б* – в случае ее распиливания (для упрощения рисунка условно принято, что распиливание заготовки выполняется за время 5 ее циркуляционных движений, нижняя часть распиловочного диска не показана)

В случае распиливания заготовка опускается к центру распиловочного диска и одновременно при этом совершает циркуляционное движение. Результирующая траектория движения точки  $A$  заготовки относительно распиловочного диска приведена на рис. 2, б. Для учета такого движения к каждой координате  $Y$  (второй столбец матрицы  $Resh$ ) вычиталась поправка  $\Delta_j$ , вычисляемая по формуле

$$\Delta_j = R - \frac{\sqrt{2}aj}{360t_{\text{рас}}f},$$

где  $j = 0 \dots 360(t_{\text{рас}}f)$ ;  $f$  – частота движения точки по циркуляционной траектории (в расчетах принималась равной 5 Гц). Использование такой поправки позволяло учесть перемещение заготовки к центру режущего инструмента при условии, что полное распиливание осуществится за время  $t_{\text{рас}} = 300$  с.

В результате расчета получена матрица, содержащая координаты перемещения в пространстве точки  $A$  за время ее полного распиливания. При этом необходимо учесть, что часть времени заготовка не взаимодействует с режущим инструментом. Так, на рис. 2 это участки циркуляционной траектории, лежащие вне диска. При нахождении точки  $A$  на этих участках траектории полировальный эффект проявляться не будет, поэтому из полученной матрицы  $Resh$  удалялись все строки, на которых не выполнялось условие

$$x_j^2 + y_j^2 \leq R^2.$$

После такой обработки определялась величина скорости перемещения точки  $A$  по циркуляционной траектории на каждом ее участке в соответствии с формулой

$$V_j = \frac{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}}{\Delta t},$$

где  $\Delta t = \frac{1}{360f}$  – время прохождения точки в течение одной итерации.

Одновременно на каждом участке результирующего движения точки  $A$  определялась линейная скорость вращения  $V_{\text{кр}}$  распиловочного инструмента и угол  $\gamma$  ее наклона к оси  $OX$ . Для этого использовались следующие формулы:

$$\gamma_j = 90^\circ - \arctg\left(\frac{y'_j}{x'_j}\right);$$

$$V_{\text{кр}j} = \omega \sqrt{x_j'^2 + y_j'^2}.$$

Результирующая относительная скорость определялась как

$$\bar{V}_{\text{отн}} = \bar{V}_{\text{кр}} + \bar{V}$$

или в скалярной форме для каждого участка заготовки:

$$V_{\text{отн}j} = \sqrt{V_j^2 + V_{\text{кр}j}^2 + 2V_jV_{\text{кр}j} \cos(\beta_j + \gamma_j)}.$$

На рис. 3 представлено изменение относительной скорости за время обработки заготовки.

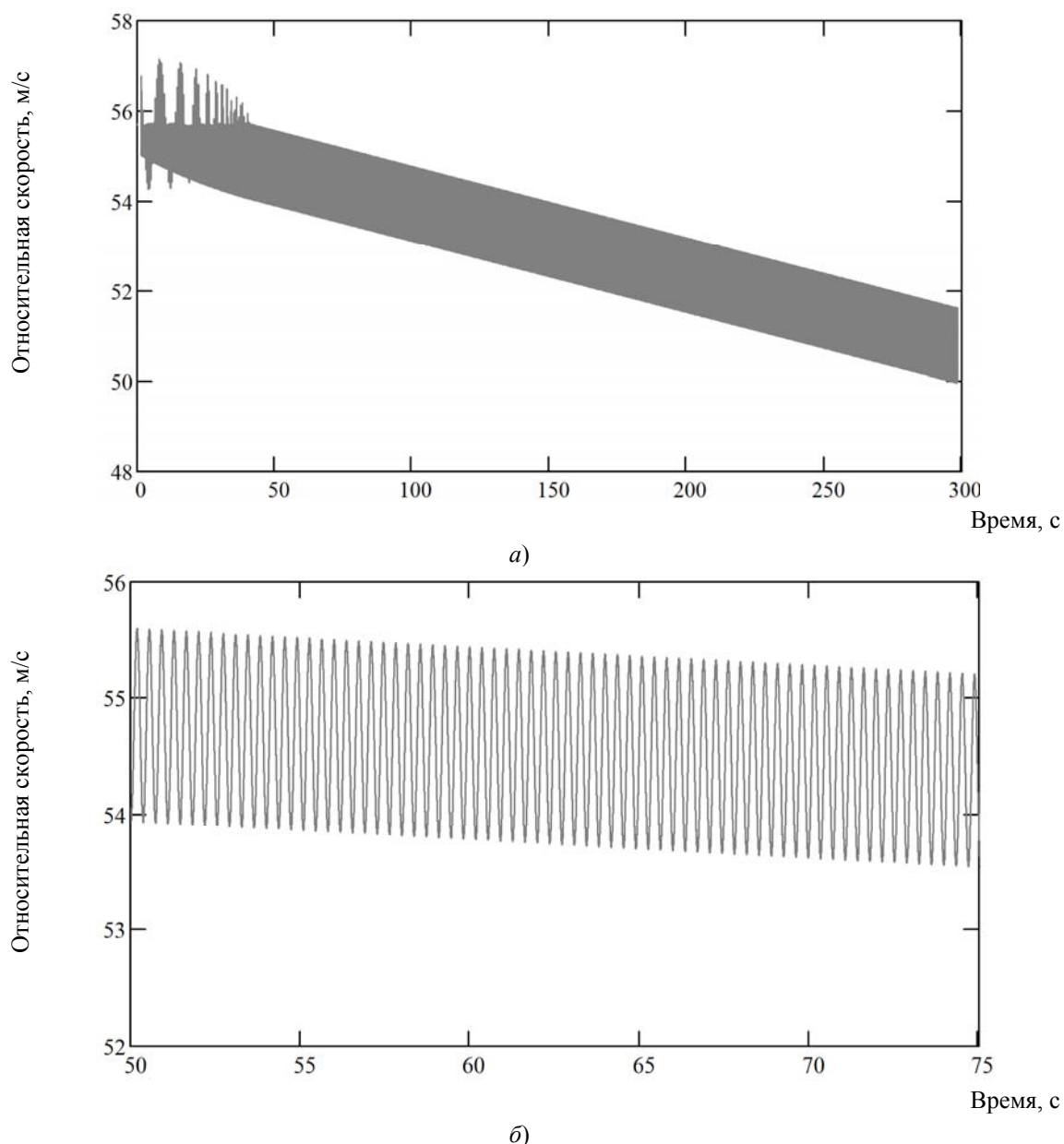


Рис. 3. Изменение скорости скольжения точки *A* заготовки относительно вращающегося распиловочного диска за время ее распиливания: *a* – за все время распиливания; *б* – на промежутке времени между 50 и 75 с обработки

Из приведенной зависимости видно, что по мере распиливания скорость скольжения снижается, что вызвано смещением обрабатываемой заготовки к центру диска. При этом на графике видно постоянное изменение величины этой скорости, обусловленное перемещением точки по циркуляционной траектории (рис. 3, б). Участки резкого изменения скорости на начальном этапе распиливания вызваны выходом траектории результирующего движения за пределы боковой поверхности распиловочного диска. Для определения длины пробега точки *A* заготовки по поверхности режущего инструмента использовалась формула

$$L(t) = \sum_{t=0}^{t=\Delta t \cdot j} V_{\text{отн } j} \cdot \Delta t.$$

На рис. 4 приведено изменение длины пути пробега точки  $A$  на заготовке по боковой поверхности распиловочного диска. Видно, что в случае сообщения заготовке циркуляционного движения (сплошная линия) длина пути на первых двух третях времени обработки меньше длины пути при традиционном распиливании, что вызвано отрывом заготовки от режущего инструмента в начале распиливания. Затем при окончании распиливания длина пути скольжения в случае циркуляционного движения заготовки будет несколько больше, чем при традиционном распиливании. Незначительное различие между данными показателями связано с тем, что частота циркуляционного движения значительно меньше частоты вращения диска.

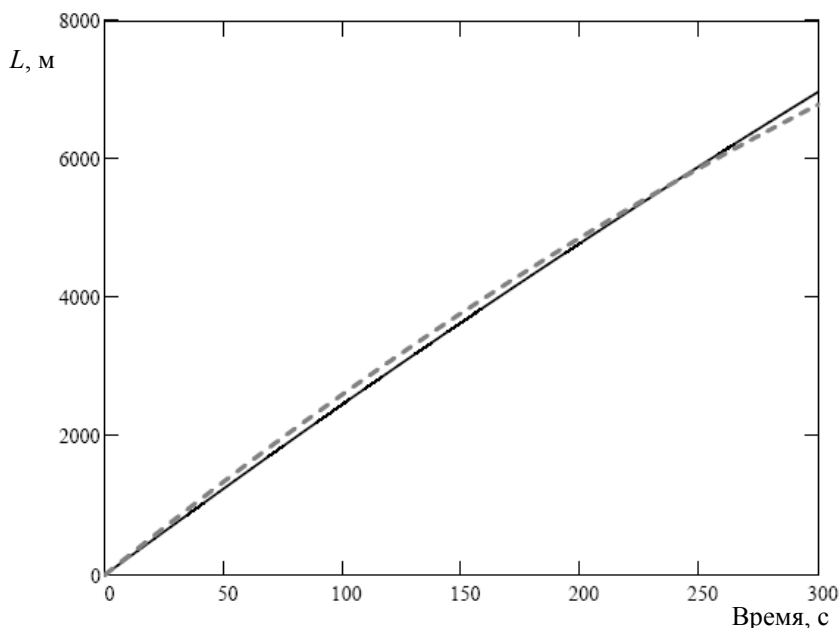


Рис. 4. Изменение пути резания в зависимости от времени обработки заготовки:  
штрихпунктирная линия – традиционное распиливание;  
сплошная линия – циркуляционное движение

Вместе с тем основное влияние на полирующий эффект оказывает вертикальная составляющая скорости скольжения. Это вызвано тем, что первоначальная шероховатость, сформированная при взаимодействии торцевой поверхности режущего инструмента и участком пропила заготовки, характеризуется наличием однонаправленных рисок, параллельных оси  $OX$ . Сглаживание таких микронеровностей как раз и осуществляется вертикальной составляющей скорости относительного скольжения, вычисляемой для каждого участка сформированной траектории движения по формуле

$$V_{\text{верт}j} = V_{\text{отн}j} \sin(\beta_j + \gamma_j).$$

На рис. 5 показано изменение данной составляющей в пределах одного цикла циркуляционного движения, а также ее разложение в спектр Фурье.

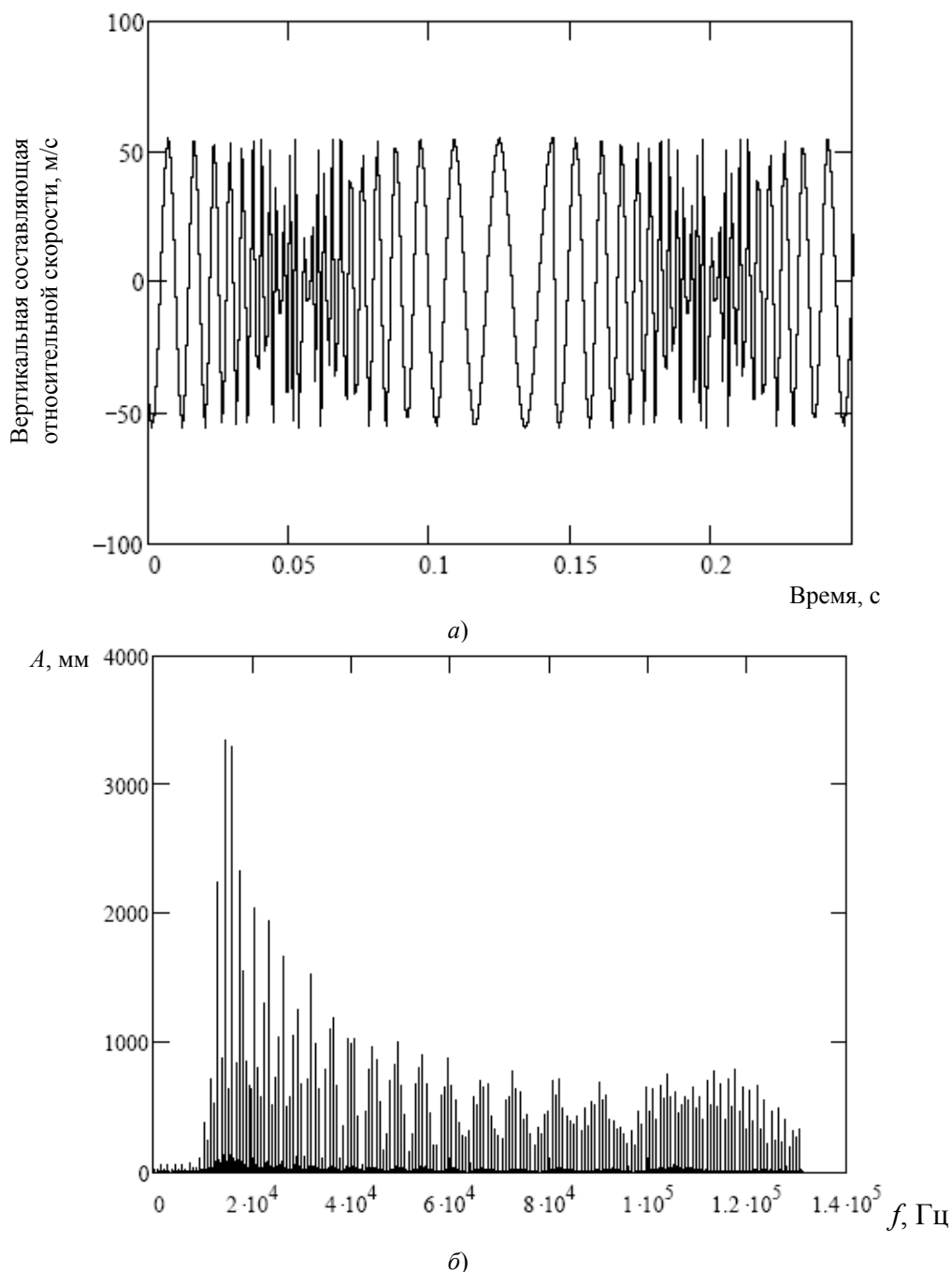


Рис. 5. Изменение вертикальной составляющей скорости скольжения точки  $A$  относительного боковой поверхности режущего инструмента:  $a$  – в пределах одного цикла циркуляционного движения заготовки;  $b$  – разложение в спектр Фурье

Как видно из рис. 5,  $b$ , в изменении вертикальной составляющей присутствует широкий спектр частот. Это позволяют судить об эффективном сглаживании микронеровностей в широком диапазоне частот вращения режущего инструмента.

### Заключение

1. Показано, что качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов определяется степенью проявления полирующего эффекта, зависящего от условий взаимодействия пропиленных участков кристалла (заготовки) с боковыми сторонами вращающегося распиловочного диска и, в частности, от пути их относительного



скольжения за время выполнения операции. В условиях традиционного распиливания это взаимодействие протекает при большой частоте и постоянной по направлению гравитационной подаче кристалла, что приводит к формированию на его обработанных поверхностях однонаправленных следов обработки (глубоких рисок), снижающих их качество.

2. Обосновано, что с целью создания более благоприятных условий для повышения качества поверхности распиленных полуфабрикатов целесообразно сообщать обрабатываемому кристаллу двухмерное периодическое циркуляционное движение, совершаемое им в плоскости распиливания. Наличие такого движения кристалла относительно боковых поверхностей распиловочного диска позволит, во-первых, увеличить путь их относительного скольжения за время выполнения операции, а во-вторых, обеспечить неповторяемость следов на распиленной поверхности кристалла, что в совокупности должно способствовать повышению качества обработанных поверхностей за счет интенсификации полирующего эффекта.

3. Разработаны математические модели, описывающие закономерности движения точки на поверхности кристалла относительно распиловочного диска при выполнении операции как в обычных условиях, так и при сообщении заготовке циркуляционного движения по эллиптической траектории, позволяющие теоретически оценить степень влияния параметров этого движения на условия формирования микрорельефа обработанных поверхностей.

4. По результатам численного исследования разработанных математических моделей получены данные, отражающие влияние параметров циркуляционного движения кристалла на изменение, в сравнении с традиционным распиливанием, скорости и пути скольжения точки, принадлежащей заготовке, относительно вращающегося распиловочного диска за время ее распиливания, а также изменение за это время вертикальной составляющей этой скорости.

5. На основании обобщенного анализа данных, полученных с учетом реальных условий и режимов распиливания кристалла (диаметр распиловочного диска 76 мм, частота его вращения  $10000 \text{ мин}^{-1}$ , размеры сечения кристалла в плоскости распиливания  $5 \times 5 \text{ мм}$ , частота циркуляционного движения по эллиптической траектории 5 Гц, при размере малой и большой осей эллипса, соответственно, 1 и 3 мм и угле наклона последней к горизонтальной оси  $45^\circ$ , продолжительность распиливания кристалла 300 с), установлено следующее: наличие циркуляционного движения кристалла с указанными его параметрами практически не вызывает, по сравнению с традиционным распиливанием, увеличения пути скольжения точки заготовки относительно вращающегося распиловочного диска за время ее распиливания. Поэтому этот фактор при принятых режимах распиливания, когда частота вращения диска значительно превышает частоту циркуляционного движения заготовки, практически не влияет на изменение в положительную сторону условий формирования микрорельефа обработанной поверхности кристалла. Вместе с тем за счет придания кристаллу циркуляционного движения возникает вертикальная составляющая скорости скольжения заготовки относительно боковой поверхности инструмента, которая в процессе распиливания изменяется в широком частотном диапазоне. Наличие такого дополнительного движения, которое отсутствует при традиционной обработке, обеспечивает, во-первых, реализацию условия неповторяемости следов обработки на распиливаемой поверхности заготовки, а во-вторых, способствует сглаживанию (затиранию) на ней микронеровностей, что в совокупности создает благоприятные условия для повышения качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов.

**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 интенсивности и качества распиливания твердых и сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двухмерного циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.

*Получено 08.04.2014 г.*