

УДК 62-531.7

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. Л. Габец, Д. А. Ямная

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ
КОНТАКТИРОВАНИЯ РАСПИЛИВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ, СОВЕРШАЮЩЕЙ
ЦИРКУЛЯЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ
ОТРЕЗНОГО ДИСКА**

UDC62-531.7

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

**MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF INTERACTION
OF A CIRCULATING SAWED WORKPIECE WITH A LATERAL SURFACE
OF A CUTOFF DISK**

Аннотация

Статья посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию условий взаимодействия распиливаемой заготовки с боковой поверхностью отрезного диска. Предложена математическая модель для описания формы траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке на боковой поверхности распиловочного диска, в процессе циркуляционного распиливания. Приводится описание методики физического моделирования процесса взаимодействия распиливаемой заготовки, совершающей циркуляционное движение, с боковой поверхностью отрезного диска. Теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность управления условиями относительного скольжения заготовки и режущего инструмента за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции.

Ключевые слова:

распиловочный диск, математическое и физическое моделирование, циркуляционное движение.

Abstract

The purpose of the paper is the theoretical and experimental research of interaction of a cutoff disk lateral surface with a workpiece which is being sawed up. The mathematical model is offered which describes the trajectory form on the cutoff disk lateral surface made by a point of the workpiece, moving in circulating motion in an elliptic trajectory. The technique for physical modeling of the interaction of a moving sawed-up workpiece with a lateral surface of a cutoff disk is described. Thus, the opportunity to control the conditions of relative sliding of the workpiece and the cutting tool due to changing the excitation frequency of a vibrating system of the modernized sawing unit was theoretically established and experimentally confirmed.

Key words:

sawing disc, mathematical and physical modeling, circulating motion.

Введение

Операция механического распиливания исходного сырья из твердых и сверхтвердых неметаллических материалов на штучные заготовки широко используется в технологии оптического и электронного приборостроения, а также в ювелирном производстве. К операции

распиливания предъявляются следующие основные требования: высокая производительность выполнения, минимально возможная для данной технологической схемы толщина распила, а также высокие геометрическая точность и качество распиленной поверхности штучной заготовки. Последние два тре-

бования имеют принципиально важное значение при распиливании исходных заготовок из дорогостоящего сырья и продиктованы условием минимизации его безвозвратных потерь как на данной операции, так и на последующей операции шлифования полученных после распиливания поверхностей штучных заготовок.

С точки зрения уровня обеспечения этих требований, трудоемкости и сложности выполнения данной операции на первом месте стоит операция механического распиливания монокристаллов алмаза. Объясняется это его уникальной твердостью, высоким уровнем требований по минимизации безвозвратных потерь дорогостоящего сырья. В частности, это обеспечение минимальной толщины распила и высокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов [1].

По сравнению с лазерным разделением монокристаллов алмаза их ме-

ханическое распиливание обеспечивает более высокий процент выхода годного сырья, особенно при обработке крупных кристаллов. Вместе с тем, он имеет недостатки, связанные с низкой производительностью процесса и недостаточно высоким качеством поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, снижающим процент выхода годного сырья.

Одно из направлений повышения производительности и качества операции механического распиливания твердых и сверхтвердых материалов – это сообщение заготовке в процессе ее обработки двухмерного периодического циркуляционного движения [2–5]. Для осуществления такого способа распиливания авторами была произведена модернизация промышленной распиловочной секции станка модели ШП-2, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

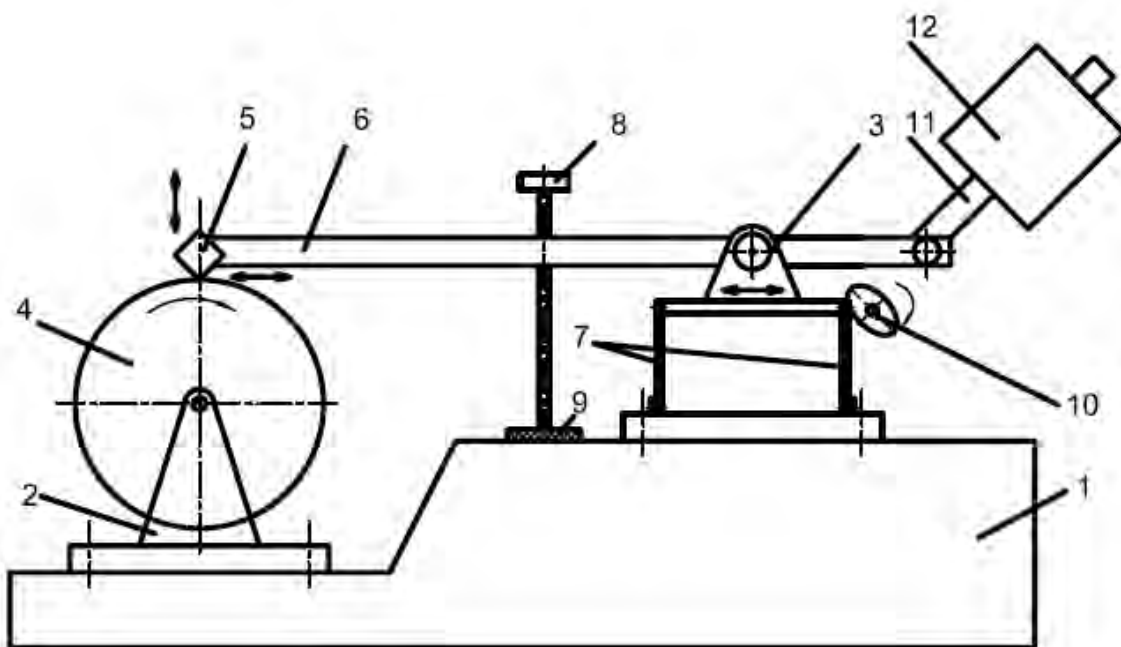


Рис. 1. Принципиальная схема распиловочной секции, обеспечивающей периодическое циркуляционное движение заготовки

На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 3 пары стоек. В передней

паре стоек 2 вращается распиловочный диск 4. Кристалл 5 закрепляется на

стреле 6, установленной в задней паре стоек 3, которые связаны со станиной с помощью пары плоских пружин 7, образующих параллелограмный подвес, допускающий перемещение стоек 3 вдоль горизонтали. Стрела поддерживается в рабочем положении регулировочным винтом 8, опирающимся на упругую прокладку 9. Перемещение стоек 3 обеспечивается кулачком 10, закрепленным на выходном валу привода (на чертеже не показан). Для создания рабочего давления на кристалл 5 на стреле 6 с помощью качающегося рычага 11 установлен регулируемый противовес 12.

При вращении кулачка 11 заготовка совершает колебательное движение в горизонтальном направлении. Одновременно в силу того, что центр тяжести противовеса 12 расположен выше оси качания стрелы 6, инерционные силы, действующие на него, создают переменный вращающий момент, вызывающий колебательные смещения заготовки по дуге окружности. В результате заготовка совершает двухмерное компланарное периодическое движение по замкнутой траектории [5], вид и параметры которой зависят от упругоинерционных характеристик колебательной системы и условий ее возбуждения. Однако для комплексного обоснования разработанного способа важно оценить влияние такого движения заготовки на качество распиливаемой поверхности, которое во многом определяется степенью проявления полирующего эффекта, возникающего при взаимодействии распиленных участков заготовки с боковыми сторонами распиловочного диска. С целью косвенной оценки степени проявления полирующего эффекта важно установить влияние параметров циркуляционного движения на форму траектории, описываемой участками перемещающейся по циркуляционной траектории заготовки на боковой поверхности распиловочного диска. В свою очередь, это позволит определить условия формирования микрорель-

ефа на распиленной поверхности.

Математическое моделирование траектории перемещения точки на боковой поверхности распиловочного диска

Для определения траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке (для упрощения расчетов разместим точку в центре заготовки), составим уравнение координат точек окружности, моделирующей торцевую поверхность распиловочного диска согласно уравнениям

$$\begin{aligned}x_i &= R \cos(\varphi_i) + X_0; \\y_i &= R \sin(\varphi_i) + Y_0,\end{aligned}$$

где x_i, y_i – координаты точки окружности; X_0, Y_0 – координаты центра окружности; R – радиус окружности, $R = 38$ мм; φ_i – угол между радиус-вектором, проведенным к точке с координатами x_i, y_i и положительным направлением оси OY . В расчетах количество i точек принималось равным 360. Траекторию перемещения заготовки по эллиптической траектории с размерами большой и малой полуосей, равными соответственно w и h , с центром в начале координат можно представить в виде точек, координаты которых выражаются как

$$\begin{cases}x'_j = w \cos \eta_j; \\y'_j = h \sin \eta_j,\end{cases}$$

где η_j – угол между радиус-вектором, проведенным к j -й точке на эллиптической траектории с координатами x'_j, y'_j , и положительным направлением оси OY ; в расчетах j находилось в пределах от 0 до 360.

В случае наклона эллиптической траектории движения абразивной частицы под углом μ к положительному направлению оси OX каждую точку с координатами x'_j, y'_j необходимо пере-

множить на матрицу направляющих косинусов, соответствующую повороту на угол μ :

$$\begin{pmatrix} \cos \mu & \sin \mu \\ -\sin \mu & \cos \mu \end{pmatrix}.$$

В результате система, согласно [6], преобразуется к виду

$$\begin{cases} x'_j = w \cos \eta_j \cos \mu - h \sin \eta_j \sin \mu; \\ y'_j = w \cos \eta_j \sin \mu + h \sin \eta_j \cos \mu. \end{cases}$$

Движение заготовки по эллиптической траектории можно заменить движением центра круга по этой же траектории, т. е. координаты точек фигуры получаемой при данной операции будут выражаться как

$$\begin{aligned} x_i &= R \cos(\varphi_i) + w \cos \eta_j \cos \mu - \\ &\quad - h \sin \eta_j \sin \mu; \\ y_i &= R \sin(\varphi_i) + w \cos \eta_j \sin \mu + \\ &\quad + h \sin \eta_j \cos \mu, \end{aligned} \quad (1)$$

В случае, если приравнять индексы $i = j$ (т. е. каждая точка эллиптической траектории центра диска соединяется с единственной точкой окружности, моделирующей торцевую поверхность режущего инструмента (рис. 2)), то можно сформировать траектории движения центра заготовки по боковой поверхности режущего инструмента в условиях равенства частот вращения диска и заготовки. Вид данной траектории показан на рис. 2 жирной линией.

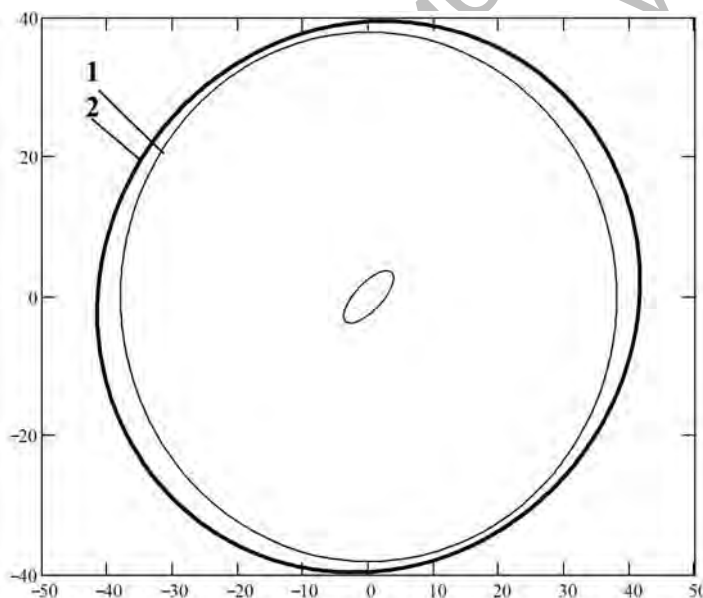


Рис. 2. Форма траектории перемещения точки, принадлежащей заготовке относительно боковых поверхностей распиловочного диска: 1 – окружность, моделирующая режущий инструмент, а также эллиптическая траектория ($\mu = 45$) перемещения его центра, соответствующая циркуляционному движению заготовки; 2 – результирующая траектория перемещения, описываемая уравнениями (1)

В случае выполнения равенства $j = 2i$ координаты каждой точки эллиптической траектории центра диска складываются с координатами двух точек окружности, моделирующей торцевую поверхность режущего инструмента. В данном случае можно определить траекторию движения центра заготовки по боковой поверхности режущего инструмента в условиях, когда последний вращается с частотой, в 2 раза превышающей частоту эллиптического перемещения заготовки (рис. 3, а). Чтобы определить форму траектории при других соот-

екторию движения центра заготовки по боковой поверхности режущего инструмента в условиях, когда последний вращается с частотой, в 2 раза превышающей частоту эллиптического перемещения заготовки (рис. 3, а). Чтобы определить форму траектории при других соот-

ношениях частот вращения режущего инструмента и перемещения заготовки по циркуляционной траектории свяжем индексы друг с другом путем ввода искусственного индекса q , принимающего целочисленные значения:

$$i = S1 \cdot q;$$

$$j = S2 \cdot q,$$

где отношение безразмерных коэффициентов $S1/S2 = n_d / n_z$ представляет собой отношение простых целых чисел, эквивалентное отношению частот вращения диска n_d и заготовки n_z . Так, формы траектории, формируемые при различных значениях $S1$ и $S2$, приведены на рис. 3.

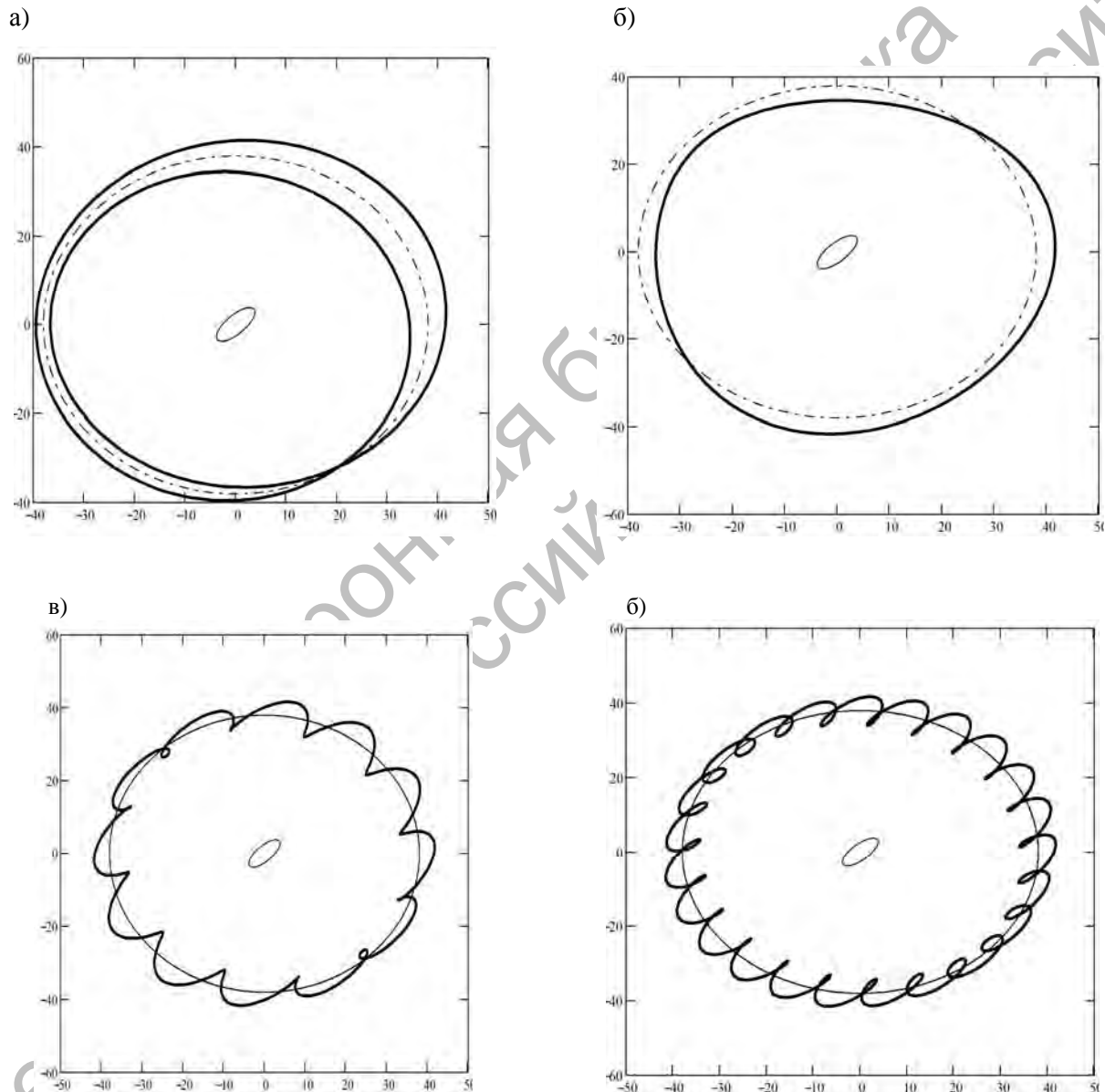


Рис. 3. Формы траектории точки, принадлежащей заготовке, оставляемой на боковой поверхности распиловочного диска, для различных соотношений частоты вращения режущего инструмента и частоты перемещения заготовки по эллиптической траектории: а – $n_d / n_z = 2$; б – $n_d / n_z = 0,5$; в – $n_d / n_z = 0,077$; г – $n_d / n_z = 0,042$

Как уже отмечалось, циркуляционное движение заготовки приводит к изменению кинематики относительного скольжения ее пропиленных участков с боковыми поверхностями диска. Наличие вертикальной составляющей этого движения обеспечивает реализацию условия неповторяемости следов обработки на распиленной поверхности заготовки, что способствует снижению по сравнению с обработкой в обычных условиях ее шероховатости. При этом предложенная математическая модель позволяет определить форму траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке на боковой поверхности распиловочного диска, при различных соотношениях частот вращения инструмента и перемещения заготовки по циркуляционной траектории, а также при различных ее геометрических параметрах (размере малой и большой полуосей, угле наклона последней к горизонтали). Последующий анализ формы данной кривой дает возможность прогнозировать

изменение кинематики относительного скольжения пропиленных участков заготовки и боковых поверхностей диска, что позволяет дать оценку качества распиленной поверхности для различных технологических условий обработки.

Физическое моделирование процесса формирования траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на боковой поверхности вращающегося диска

Для подтверждения результатов математического моделирования была проведена серия экспериментов, основанная на визуализации траектории движения точки, принадлежащей заготовке, относительно вращающегося диска.

Методика проведения этих экспериментов заключалась в следующем. На боковой поверхности отрезного диска 4 закреплялся бумажный диск 1 (рис. 4), выполняющий роль носителя информации.

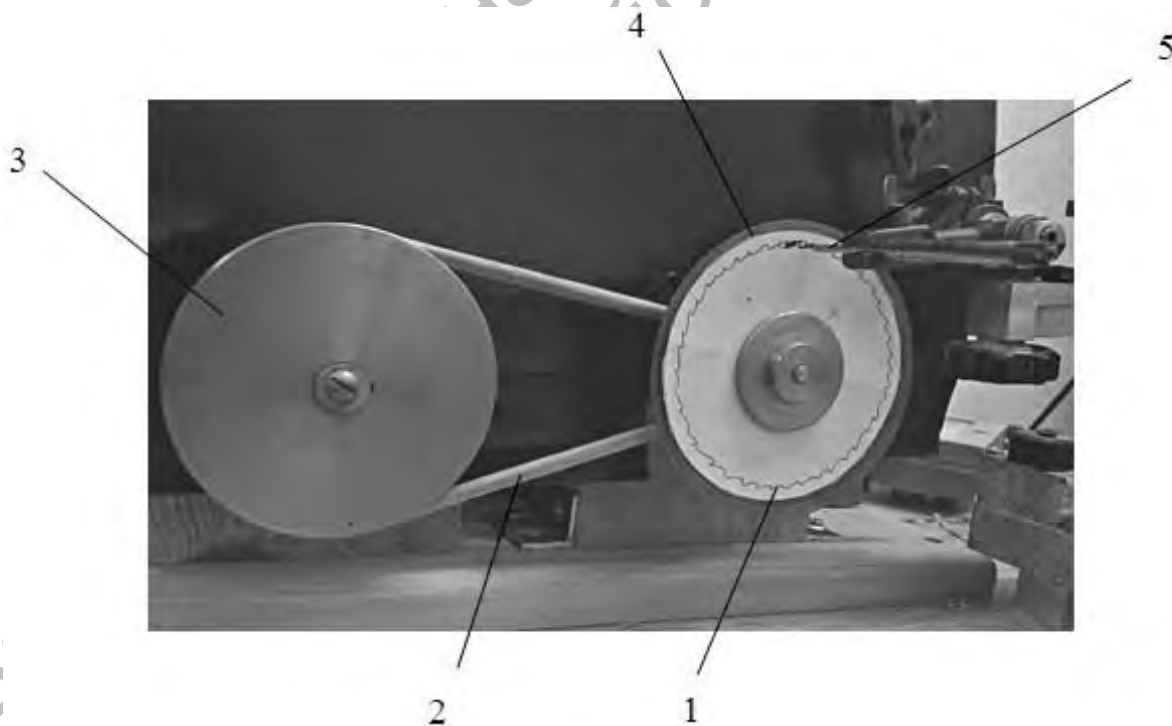


Рис. 4. Фотография узла регистрации траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска

На стреле в месте крепления оправки с образцом устанавливался стержень от гелиевой ручки 5, который с небольшим усилием прижимался к поверхности бумажного диска. Для обеспечения низкой частоты вращения последнего использовался отдельный шаговый электродвигатель (на рисунке он не виден), на валу которого закреплялся шкив 3. Вращение последнего передавалось на свободно вращающийся вал неработающего электродвигателя посредством ременной передачи 2. Частота вращения диска с бумажным носителем регулировалась за счет изменения частоты вращения вала шагового электродвигателя.

На рис. 5 представлены примеры записи траекторий движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска при различной ча-

стоте возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции. Траектории имеют схожую форму с траекториями, полученными по результатам математического моделирования (см. рис. 3), что подтверждает адекватность приведенной выше модели.

Анализ этих траекторий показывает, что с возбуждением колебательной системы траектория движения точки приобретает пилообразный вид с четко выраженным периодическим характером изменения ее параметров. В частности (рис. 6), к ним относятся величина размаха вертикальных (радиальных) смещений $2\Delta b$, значение шага между выступами S и угол наклона β линии, соединяющей вершины соседних впадин и выступов (точки A и B), и касательной к описанной окружности, проведенной в точке B .



Рис. 5. Траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска ($n = 10 \text{ мин}^{-1}$) при различной частоте f возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции за один оборот диска: а – $f = 4 \text{ Гц}$; б – $f = 2,8 \text{ Гц}$; в – $f = 2 \text{ Гц}$

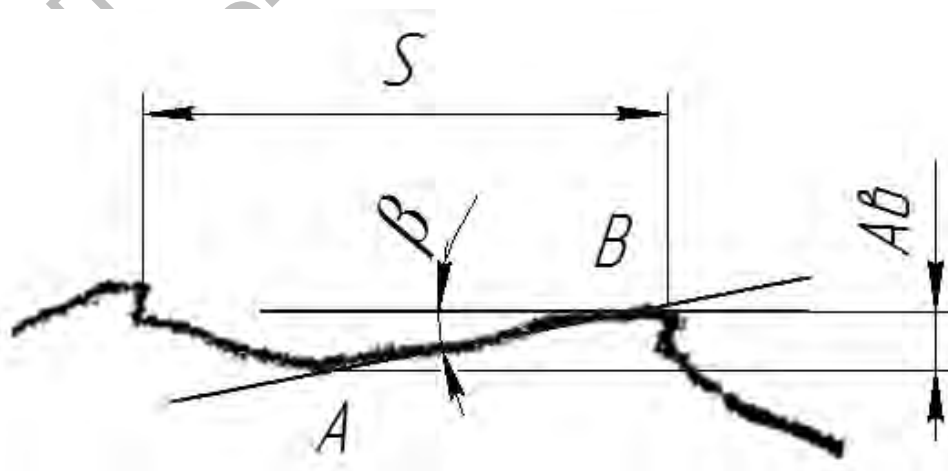


Рис. 6. Увеличенный фрагмент траектории движения точки, принадлежащей заготовке, с указанием характеризующих ее параметров

Из полученных экспериментальных данных следует, что с увеличением частоты возбуждения колебательной системы величина $A\beta$ и значение угла β возрастают, а величина S снижается. Связано это с тем, что, как было установлено ранее, с повышением f изменяются параметры эллиптической траектории: увеличиваются размеры малой и большой осей эллипса, происходит поворот последней в сторону вертикальной оси. Одновременно происходит

уменьшение периода циркуляционного движения точки по эллиптической траектории, что сопровождается возрастанием средней за это время скорости ее перемещения по ней.

Влияние частоты вращения диска на траекторию движения точки, принадлежащей заготовке, при неизменной частоте возбуждения колебательной системы, равной 4 Гц, отражают данные, представленные на рис. 7.



Рис. 7. Траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности диска при различной частоте его вращения n и неизменной частоте возбуждения колебательной системы, равной 4 Гц: а – $n = 8 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 10 \text{ мин}^{-1}$; в – $n = 12 \text{ мин}^{-1}$

Согласно данным, с повышением n происходит увеличение параметра S траектории движения точки с одновременным уменьшением угла β при почти постоянной величине $2A\beta$. В результате в сторону уменьшения изменяется отношение пути, проходимого точкой в единицу времени на поверхности вращающегося диска в вертикальном (радиальном) направлении, к пути, проходимому в горизонтальном направлении, т. е. в направлении вектора окружной скорости вращения диска.

Таким образом, установлено, что за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы (а соответственно, и параметров эллиптической траектории движения заготовки) и частоты вращения отрезного диска можно управлять условиями их скольжения, в частности, значением размаха $2A\beta$ вертикальных смещений, шагом выступов S и величиной угла β . В свою очередь, это позволяет влиять на условия формирования микрорельефа на поверхности

пропиленных участков заготовки. Как уже отмечалось, наличие вертикально направленных относительных колебательных смещений заготовки и боковой поверхности диска обеспечивает условие неповторяемости следов обработки, что должно положительно сказываться на снижении шероховатости распиленной поверхности заготовки.

Физическое моделирование процесса истирания пропиленных участков заготовки с боковыми поверхностями диска

Для экспериментального подтверждения этого положения была проведена серия экспериментов по физическому моделированию процесса взаимодействия (истирания) пропиленных участков заготовки с боковой поверхностью отрезного диска. На рис. 8 приведена фотография зоны обработки, поясняющая условия проведения этих экспериментов. На боковой поверхности отрезного диска 1 закреплялся предваритель-

но вырезанный из шлифовальной шкурки диск 2, вращение которому сообщалось от электродвигателя 3. Стеклообразец 4 закреплялся в цилиндрической оправке 5, которая устанавливалась в зажимном устройстве 6 стрелы распиловочной секции. Торцевая поверхность образца, моделирующая его распиленную поверхность, с небольшим усилием прижималась к шлифовальной шкурке, которая моделировала боковую поверхность отрезного диска. Процесс истирания поверхности образца осуществлялся как в обычных условиях об-

работки, так и при сообщении ему циркуляционного движения. Частота вращения диска составляла 7500 мин^{-1} , продолжительность истирания – 10 с. После этого оправка с образцом и диск из шлифовальной шкурки снимались и с помощью микроскопа МИМ-1 исследовалось состояние их поверхностей.

На рис. 9 приведены фотографии поверхности стеклянного образца, полученные при ее истирании о поверхность шлифовальной шкурки в обычных условиях и при возбуждении колебательной системы с частотой 4 Гц.



Рис. 8. Фотография зоны обработки при проведении экспериментов по истиранию поверхности образца

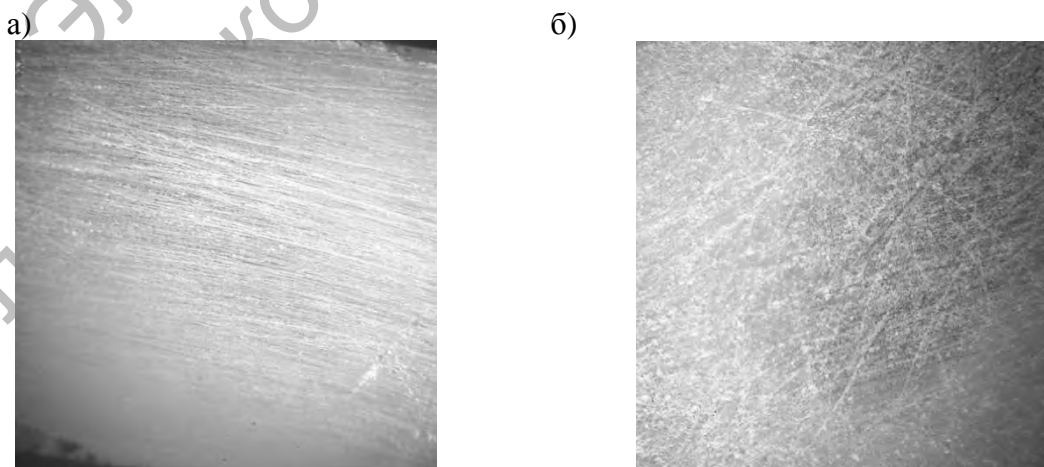


Рис. 9. Фотография поверхности стеклянного образца после ее истирания (увеличение 50^{\times}): а – в обычных условиях; б – при возбуждении колебательной системы с частотой 4 Гц

Как видно (рис. 9, а), на поверхности образца при ее истирании в обычных условиях присутствуют однонаправленные следы обработки (риски), имеющие значительные размеры. Во втором случае (рис. 9, б) на поверхности образца почти отсутствуют однонаправленные следы обработки, и поверхность характеризуется более равномерным микрорельефом с

меньшей, чем в первом случае, высотой неровностей.

На рис. 10 представлены фотографии поверхности диска из шлифовальной шкурки с дорожками износа, полученными при истирании образца в обычных условиях и при сообщении ему циркуляционного движения по эллиптической траектории.

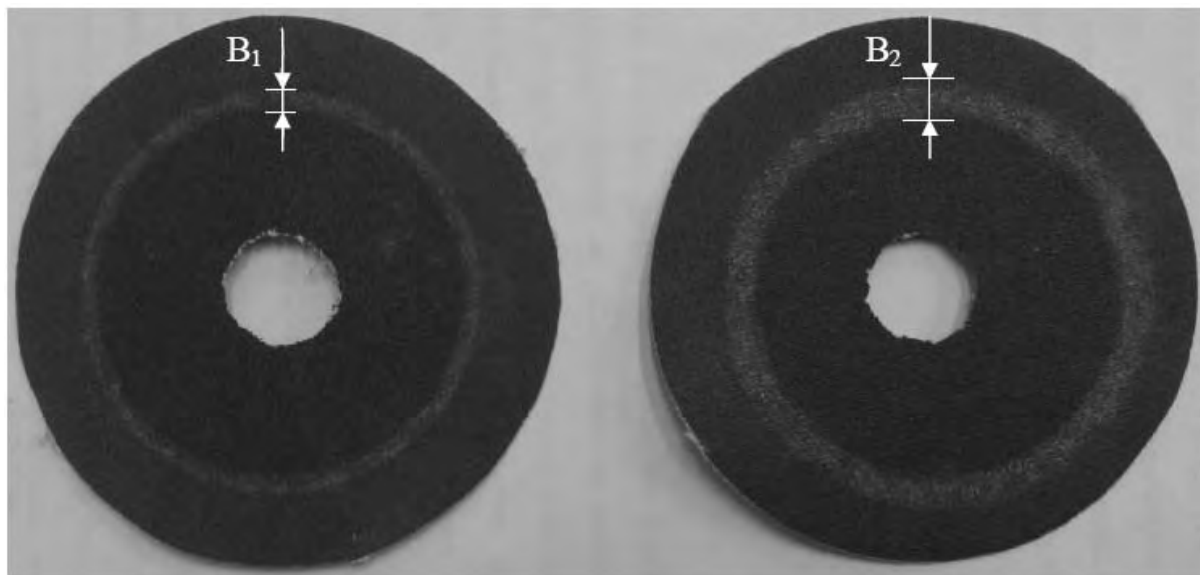


Рис. 10. Фотографии поверхности диска с дорожкой износа, полученной при истирании образца в обычных условиях (слева) и при сообщении ему циркуляционного движения по эллиптической траектории (справа)

Как видно (см. рис. 10), ширина дорожки износа B_2 при истирании образца с возбуждением колебательной системы превышает аналогичный параметр дорожки B_1 , полученной при истирании образца в обычных условиях. Это обусловлено наличием вертикально (радиально) направленных колебательных смещений заготовки относительно поверхности шлифовальной шкурки. При этом разность $B_2 - B_1$ соответствует величине $2Av$, которая зависит от значения большой оси W эллиптической траектории и угла ее наклона α к горизонтальной оси, т. е. $2Av = W \sin \alpha$ (при $\alpha = 0$). В случае, когда угол α равен нулю, величина $2Av$ будет соответствовать размеру малой оси h эллиптической траектории движения заготовки. Поэтому,

учитывая влияние режимов возбуждения колебательной системы на параметры эллиптической траектории движения заготовки, можно прогнозировать их влияние на шероховатость распиленной поверхности заготовки. В частности, с повышением частоты возбуждения колебательной системы обоснованно ожидать возрастания степени влияния этого движения на снижение шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов по сравнению с обработкой в обычных условиях.

Таким образом, согласно результатам физического моделирования процесса истирания распиливаемой поверхности заготовки с боковой поверхностью шлифовальной шкурки (диска), сообщение ей циркуляционного движе-

ния по эллиптической траектории позволяет снизить в сравнении с истиранием в обычных условиях шероховатость поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. При этом степень указанного снижения возрастает с увеличением размера большой оси эллиптической траектории и угла ее наклона относительно горизонтали.

Выводы

1. Предложена математическая модель, позволяющая описать форму траектории на боковой поверхности распиловочного диска, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке, совершающей циркуляционное движение по эллиптической траектории. С ее помощью получены формы траекторий, соответствующие различным параметрам эллиптического движения этой точки при различной частоте вращения диска за время его одного оборота. На основании их анализа установлено, что доминирующее влияние на изменение траектории движения точки на поверхности диска оказывают размер большой оси W эллиптической траектории движения заготовки, угол ее наклона α к горизонтали и соотношение периода циркуляционного движения заготовки к частоте вращения диска.

2. С помощью оригинальной методики, основанной на визуализации процесса перемещения точки, принадлежащей заготовке, совершающей эллиптическое движение по поверхности бумажного диска, установленного на модернизированной распиловочной секции вместо распиловочного, экспериментально получены траектории указанного перемещения при различных параметрах циркуляционного движения заготовки и различной частоте вращения диска за время его одного оборота. На основании анализа полученных траекторий установлено, что они имеют пилообразный вид с четко выраженным периодическим характером изменения параметров, к которым относятся вели-

чина размаха вертикальных (радиальных) смещений $2Av$, величина шага между соседними выступами S и угол наклона линии β , соединяющей вершины соседних впадин и выступов, и касательной к окружности, описанной вокруг выступов полученной траектории. Установлено, что с повышением частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции величина $2Av$ и значение угла β увеличиваются, а значение S снижается. Увеличение частоты вращения диска сопровождается возрастанием параметра S траектории движения точки с одновременным уменьшением угла β при почти постоянной величине $2Av$.

3. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований, за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции (а соответственно, и параметров эллиптической траектории движения заготовки) и частоты вращения распиловочного диска можно управлять условиями их относительного скольжения, в частности, значением размаха $2Av$ вертикальных смещений, шагом выступов S и значением угла β . Доказано, что это, в свою очередь, позволяет активно влиять на условия формирования микрорельефа на пропиленных участках заготовки, обеспечивая за счет ее вертикально направленных колебательных смещений относительно боковых поверхностей диска условие неповторяемости на ней следов обработки, что должно положительно отразиться на снижении ее шероховатости в сравнении с распиливанием в обычных условиях.

4. Для подтверждения вышеизложенного с использованием модернизированной распиловочной секции была проведена серия экспериментов по физическому моделированию процесса взаимодействия (истирания) пропиленных участков заготовки с боковой поверхностью диска. В ходе выполнения экспериментов оценивалось состояние

торцевой поверхности стеклянного образца после ее истирания о поверхность диска из шлифовальной шкурки при их взаимодействии как в обычных условиях, так и при сообщении образцу циркуляционного движения по эллиптической траектории. Согласно результатам проведенных исследований, при истирании образца в обычных условиях на его поверхности присутствуют четко выраженные однонаправленные следы обработки, в то время как на поверхности, полученной при сообщении образцу циркуляционного движения, количество

таких следов существенно меньше или они вообще отсутствуют. При этом с увеличением размера большой оси W эллиптической траектории движения образца и угла ее наклона α к горизонтали, что достигается повышением частоты возбуждения колебательной системы, степень положительного влияния циркуляционного движения на повышение качества обработанной поверхности образца возрастает, что в полной мере согласуется с результатами теоретических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Епифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты : учебник для ПТУ / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – 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.
3. **Киселев, М. Г.** Исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с распиловочным диском при сообщении ей двухмерного периодического движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. ПГУ. – 2012. – № 3. – С. 102–108.
4. **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. – С. 78–85.
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. **Погорелов, А. В.** Аналитическая геометрия / А. В. Погорелов. – М., 1978. – 208 с.

Статья сдана в редакцию 26 января 2016 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

Алексей Владимирович Дроздов, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: dav7@tut.by

Вячеслав Леонидович Габец, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет.

Дарья Андреевна Ямная, мл. науч. сотрудник, Белорусский национальный технический университет.

Mikhail Grigoryevich Kiselev, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

Aleksey Vladimirovich Drozdov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: dav7@tut.by

Vyacheslav Leonidovich Gabets, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University.

Darya Andreyevna Yamnaya, research assistant, Belarusian National Technical University.