

УДК 621.922.079

**М. Г. Киселев, д-р техн. наук, проф., А. В. Дроздов, канд. техн. наук, доц.,  
А. И. Ольгомец, Д. А. Ямная**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ РАСПИЛОВОЧНОГО ДИСКА ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ ШАРЖИРОВАНИИ ЕЕ БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Разработана математическая модель процесса вращения заготовки распиловочного диска при ее бесцентровом шаржировании. Рассчитан момент сил сопротивления, действующий на заготовку со стороны неподвижных опор, в зависимости от их расположения относительно вертикали. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено расположение опор, при котором возникает наибольший момент сопротивления на заготовку.

### **Введение**

Распиловочный диск – это инструмент, предназначенный для механического распиливания монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий [1]. Изготавливается он из оловянно-фосфористой бронзы марки БрОФ 6,5-0,15 диаметром 76 мм и толщиной от 0,05 до 0,09 мм. Вначале из прокатанной до требуемой толщины бронзовой ленты вырезают заготовки дисков. Затем на их боковых поверхностях путем шаржирования зерен алмазного микропорошка получают алмазосодержащее (режущее) покрытие. Завершает процесс изготовления операция термоправки, которая выполняется с целью придания распиловочному диску требуемой плоскостности.

Согласно результатам [2, 3] эффективным способом повышения качества и производительности шаржирования боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков является использование на этой операции ультразвуковых колебаний. По сравнению с традиционным шаржированием это позволяет за одну установку заготовки диска осуществлять двухстороннюю обработку ее боковых поверхностей и одновременно повысить значения эксплуатационных показателей получаемого на них алмазосодержащего покрытия.

На рис. 1 представлена технологическая схема шаржирования заготовок распиловочных дисков с ультразвуком. Обработанная заготовка 1 крепится между фланцами 2 на центральной оправке, которая устанавливается в обратных центрах. Деформирующие инструменты расположены соосно и навстречу друг другу с противоположных сторон заготовки диска. За счет статического усилия  $P_{ст}$  они прижимаются к обрабатываемой поверхности заготовки. В процессе шаржирования деформирующие инструменты совершают синхронное вращение с частотой  $n_n$  и им сообщаются ультразвуковые колебания (УЗК), направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности заготовки. Вращение заготовки с частотой  $n_z$  в процессе шаржирования может быть обеспечено двумя способами: путем использования отдельного привода [2] либо за счет передачи ей вращающего момента от синхронно вращающихся деформирующих инструментов, образующих с заготовкой торцевую фрикционную передачу [3]. В этом случае, по сравнению с первым, происходит самосинхронизация частоты вращения заготовки с частотой вращения деформирующих инструментов, благодаря чему повышается качество и стабильность протекания процесса шаржирования.

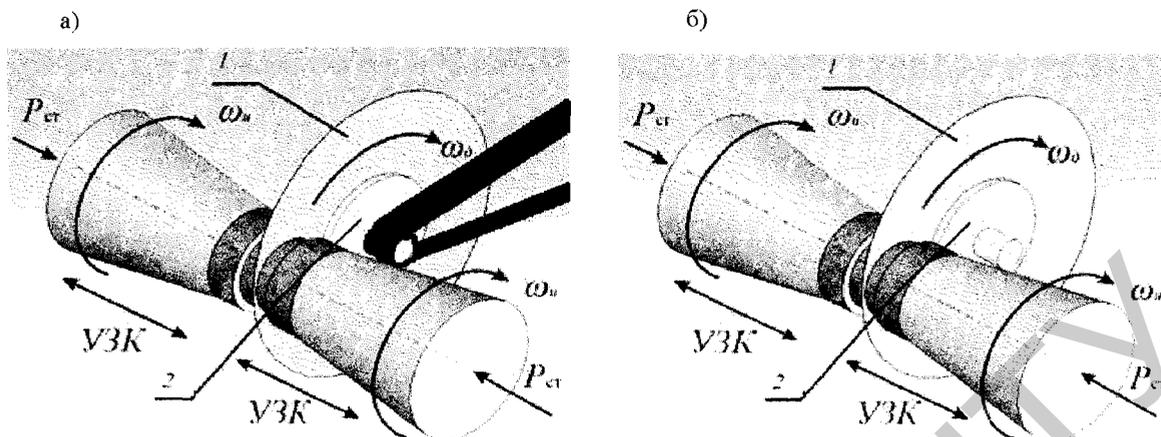


Рис. 1. Технологическая схема шаржирования распиловочных дисков с ультразвуком по двухсторонней схеме: а – с вращением заготовки диска от отдельного привода; б – с вращением заготовки диска за счет фрикционной торцевой передачи

Вместе с тем общим недостатком представленных способов шаржирования является необходимость установки заготовки диска на оправку, что приводит к значительным затратам времени и снижению производительности. Помимо этого, жесткое закрепление заготовки между фланцами не позволяет ее обрабатываемой части свободно устанавливаться относительно рабочих поверхностей деформирующих инструментов, что вызывает изгиб этой части заготовки, обуславливая тем самым неравномерность шаржирования ее поверхности по ширине обрабатываемой дорожки.

#### **Разработка способа бесцентрового шаржирования**

Для устранения указанных недостатков авторы предложили использовать бесцентровой способ шаржирования заготовок распиловочных дисков, при котором они обрабатываются в незакрепленном состоянии. Исходя из этого, цель данной работы заключалась в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности реализации бесцентрового способа шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков с ультразвуком.

На рис. 2 представлена предлагаемая схема бесцентрового шаржирования заготовок распиловочных дисков. Заготовка диска 1 устанавливается в одну из разъемных половинок кассеты 2 и опирается на три неподвижные цилиндрические опоры 3. Половинки соединяются, и кассета закрепляется на столе установки для двухстороннего шаржирования распиловочных дисков. В кассете выполнен паз, обеспечивающий доступ деформирующих инструментов 4 к обрабатываемой заготовке. Наличие зазора  $\Delta$  между стенками кассеты дает возможность заготовке диска самоустанавливаться относительно рабочих поверхностей деформирующих инструментов. За счет фрикционной передачи от синхронно вращающихся деформирующих инструментов заготовка получает равномерное вращение относительно своей оси.

#### **Математическая модель, используемая в исследованиях**

Для теоретического исследования закономерностей вращательного движения заготовки в процессе ее шаржирования воспользуемся расчетной схемой, представленной на рис. 3.

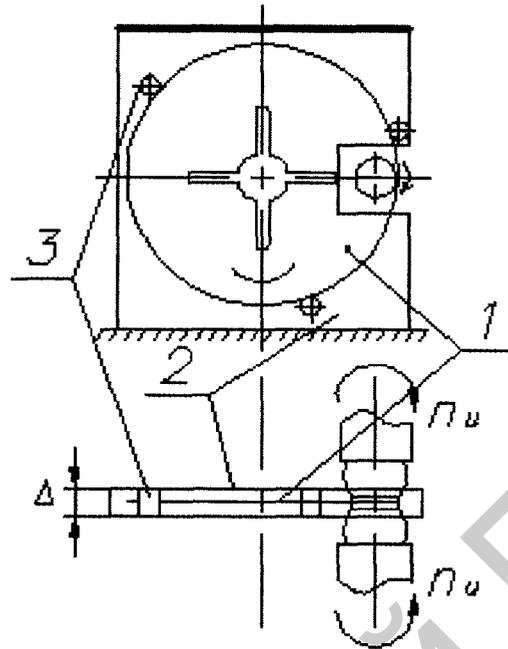


Рис. 2. Схема бесцентрового шаржирования заготовок распиловочных дисков

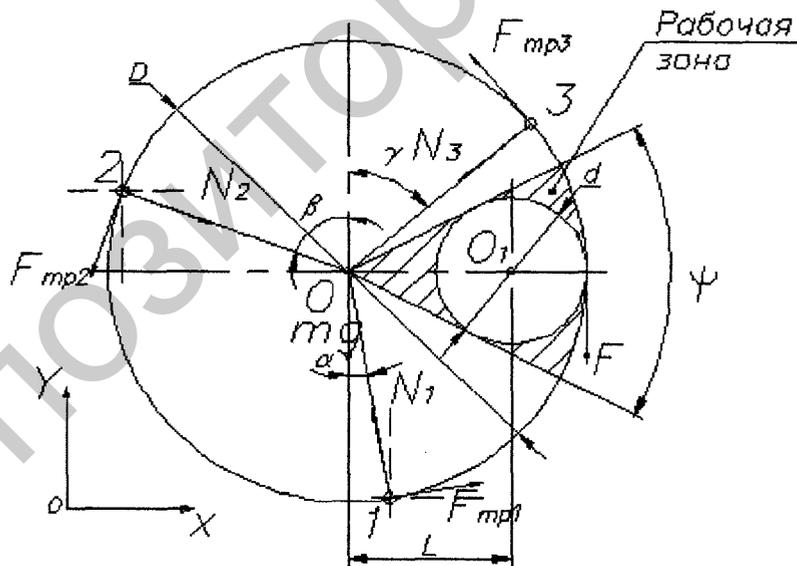


Рис. 3. Расчетная схема бесцентрового шаржирования заготовок распиловочных дисков

На ней заготовка диска диаметром  $D$  и массой  $m$  (центр масс совпадает с ее геометрическим центром в точке  $O$ ) опирается на три неподвижные опоры: 1, 2 и 3, которые расположены по ок-

ружности под углом  $120^\circ$ .

Деформирующие инструменты в виде плоской шайбы диаметром  $d$  установлены соосно в точке  $O_1$  с противоположных сторон заготовки диска и

синхронно вращаются с частотой  $n_1$ . Точка  $O_1$  расположена на горизонтальной оси на расстоянии  $L = (D - d) / 2$  от оси вращения заготовки. В результате на поверхности заготовки диска образуется рабочая зона, ограниченная центральным углом  $\psi$ , значение которого для  $D = 76$  мм и  $d = 20$  мм составляет  $60^\circ$ .

При силовом контактном взаимодействии вращающихся поверхностей деформирующих инструментов с боковыми поверхностями заготовки диска между ними возникают силы трения сцепления  $F_{сц}$  (аналог фрикционной торцевой передачи), вызывающие появление вращающего относительно оси заготовки момента, под действием которого она получает вращение вокруг точки  $O$  с частотой  $n_3$ .

Примем, что в процессе вращения заготовка диска контактирует только с опорами и не имеет контакта с боковыми стенками кассеты. В этом случае вращение заготовки возможно при условии, когда значение момента сил трения сцепления  $M_{сц}$  относительно точки  $O$  превышает величину суммарного момента сопротивления  $M_{тр}$  от сил трения, действующих в опорах, т. е. когда  $M_{сц} > M_{тр}$ .

Следовательно, при постоянном значении  $M_{сц}$  повысить частоту вращения заготовки можно за счет снижения  $M_{тр}$ . Обеспечивается это путем определения оптимального расположения трех опор в кассете, при котором момент трения, действующий в них, имеет наименьшее значение.

Для решения данной задачи вначале выделим так называемый угол опережения  $\alpha$  (см. рис. 3) – угол между вертикалью и отрезком, соединяющим центр диска (точка  $O$ ) и первую опору 1. Как видно, значение этого угла следует рассматривать в пределах от  $5^\circ$  до  $60^\circ$ , т. к. при угле  $\alpha$  меньшем  $5^\circ$  в рабочую зону попадает опора 3, а при  $\alpha$  больше  $60^\circ$  – опора 1. Учитывая, что опоры расположены под углом  $120^\circ$ , из рисунка

можно определить значение углов  $\beta$ ,  $\gamma$ :

$$\beta = 180^\circ - (120^\circ - \alpha) = 60^\circ + \alpha; \quad (1)$$

$$\gamma = 240^\circ - (180^\circ + \alpha) = 60^\circ - \alpha. \quad (2)$$

Спроецируем силы, действующие на диск, на ось  $OX$  и, учитывая, что  $F_{тр} = \mu N_i$ , где  $\mu = 0,14$  – коэффициент трения бронзы по стали, получим

$$\begin{aligned} \mu N_1 \cos \alpha - N_1 \sin \alpha - \mu N_2 \cos(60^\circ + \alpha) + \\ + N_2 \sin(60^\circ + \alpha) - \mu N_3 \cos(60^\circ - \alpha) - \\ - N_3 \sin(60^\circ - \alpha) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Проекция сил на ось  $OY$  выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} -F - mg + \mu N_1 \sin \alpha + N_1 \cos \alpha - \\ - \mu N_2 \sin(60^\circ + \alpha) - N_2 \cos(60^\circ + \alpha) + \\ + \mu N_3 \sin(60^\circ - \alpha) - N_3 \cos(60^\circ - \alpha) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Запишем сумму моментов сил относительно центра диска:

$$-F \frac{D}{2} + \mu N_1 \frac{D}{2} + \mu N_2 \frac{D}{2} = 0. \quad (5)$$

Путем преобразований системы уравнений (3)...(5) получена зависимость момента сил сопротивления  $M_{тр}$  от угла опережения  $\alpha$

$$\begin{aligned} M_{тр} = [Dmg[\mu b d - 2\mu^2 a b e_1 - \mu^2 b^2 e_1 + \\ + \mu^2 a c e + \mu a b c e + \mu a d - \mu^2 a^2 e_1 - \mu^2 a^2 e - \\ - \mu a b e]] / [2(ed - \mu b d + \mu^2 a b e_1 - \mu^2 b^2 e_1 - \\ - \mu^2 a c e + \mu c e^2 - \mu^2 b c e - \mu a d + \mu^2 a^2 e_1 - \\ - \mu a e e_1 + 2\mu^2 a b e + \mu^2 a^2 e - \mu a e^2)], \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$a = \sin \alpha - \mu \cos \alpha;$$

$$a_1 = \cos \alpha + \mu \sin \alpha;$$

$$b = \sin(60^\circ + \alpha) - \mu \cos(60^\circ + \alpha);$$

$$b_1 = \cos(60^\circ + \alpha) + \mu \sin(60^\circ + \alpha);$$

$$c = \sin(60 - \alpha) + \mu \cos(60 - \alpha);$$

$$d = \mu(be_1 - ac + ae_1 + ae).$$

$$c_1 = \cos(60 - \alpha) - \mu \sin(60 - \alpha);$$

$$e = a_1b - ab_1;$$

$$e_1 = a_1c + ac_1;$$

Из выражения (6) получена теоретическая зависимость момента сопротивления вращению заготовки от значения угла опережения  $\alpha$ , представленная на рис. 4.

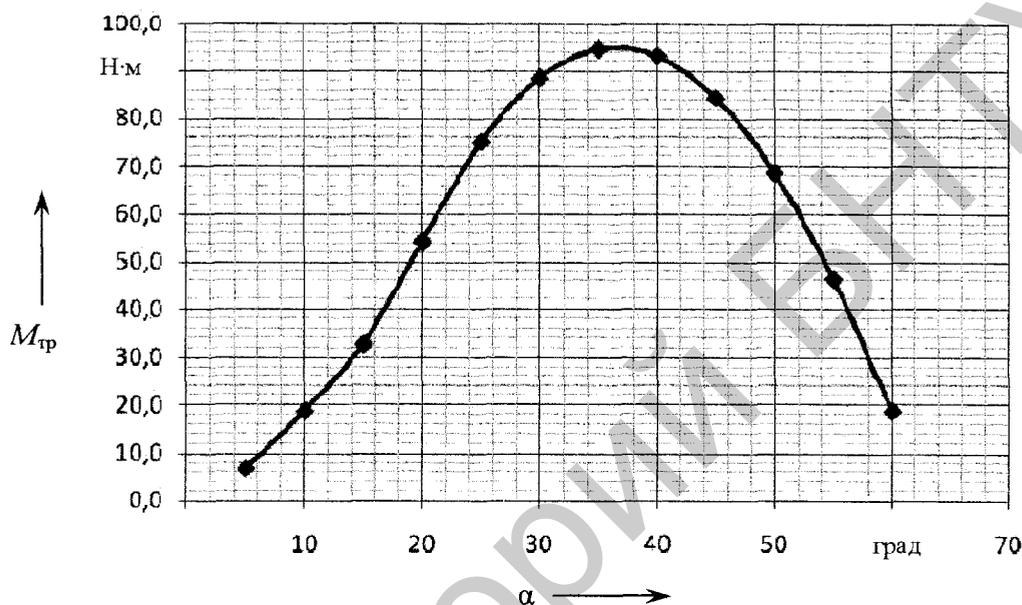


Рис. 4. График зависимости момента сил сопротивления в опорах от угла опережения

Из графика видно, что при значении угла  $41,5^\circ$  действующий в опорах момент сил сопротивления имеет наибольшее значение. С изменением угла  $\alpha$  от этого значения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения происходит снижение величины  $M_{тр}$ . Таким образом, на основании полученных результатов можно определить оптимальное значение угла опережения, при котором в процессе бесцентрового шаржирования заготовки диска действующий на нее со стороны опор момент сопротивления вращению имеет наименьшее значение. Так, с учетом указанного выше конструктивного ограничения значение угла опережения следует принимать равным  $60^\circ$ .

#### Экспериментальное исследование, проведенное в работе

С целью подтверждения результатов теоретических исследований были проведены эксперименты по бесцентровому шаржированию боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков с ультразвуком. Для этого использовалась установка для двухстороннего шаржирования с ультразвуком и фрикционной передачей вращающего момента обрабатываемой заготовке [2]. Заготовка перед обработкой устанавливалась в специальной кассете, фотография общего вида которой представлена на рис. 5.

Кассета изготавливалась из прозрачной пластмассы, что позволяло наблюдать за поведением заготовки диска

в процессе обработки и измерять частоту ее вращения. Конструкция кассеты обеспечивала возможность изменения положения опор, что позволяло исследовать влияние значения угла опережения на частоту вращения заготовки диска. Кроме того, изменялась величина

зазора между стенками кассеты, что дало возможность оценить влияние этого конструктивного параметра на условия вращательного движения заготовки диска. При этом толщина заготовки диска составляла 0,07 мм.

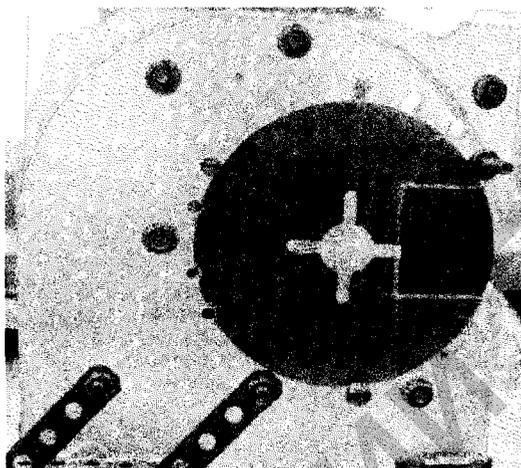


Рис. 5. Фотография общего вида кассеты для бесцентрового шаржирования диска

В ходе выполнения экспериментов определялась частота вращения заготовки  $n_3$  при различных углах опережения  $\alpha$ , составлявших 5, 20, 40 и 60°, что достигалось изменением положения опор в кассете. Для корректного сравнения в экспериментах оставались неизменными: частота вращения деформирующих инструментов, равная 72 мин<sup>-1</sup>, а также амплитуда и частота УЗК, составлявшие соответственно 6 мкм и 22 кГц. Исходя из полученных значений  $n_3$ , косвенно судили об изменении момента сил сопротивления в опорах, действующего на заготовку, в зависимости от угла  $\alpha$ . В одной серии экспериментов определялась частота вращения заготовок распиловочных дисков, на боковые поверхности которых наносилась абразивная суспензия, используемая при классическом шаржировании, состоящая из алмазного микропорошка АСН 20/14 и касторового масла. В другой – боковые поверхности заготовок распиловочных дисков

оставались в исходном состоянии, т. е. определялась частота вращения заготовки диска в условиях сухого трения по времени одного оборота диска и за счет наблюдения за предварительно нанесенной риской на его боковой поверхности.

На рис. 6 представлены экспериментальные данные, отражающие влияние угла опережения  $\alpha$  на частоту вращения заготовки  $n_3$ , как с абразивной суспензией, так и без нее.

Из анализа зависимостей следует, что при значениях угла  $\alpha$  частота вращения заготовки при обработке без использования алмазной суспензии оказывается выше, чем с ее применением. Объясняется это большим значением сил трения сцепления в торцевой фрикционной передаче, а собственно, и вращающего момента, действующего на заготовку при ее обработке без алмазной суспензии.

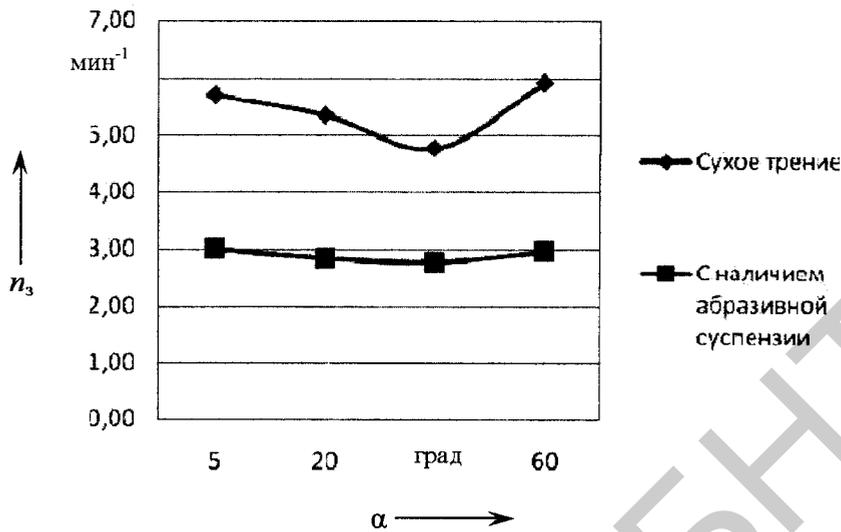


Рис. 6. График зависимости частоты вращения заготовки распиловочного диска от угла опережения

В этих условиях зависимость  $n_3(\alpha)$  имеет четко выраженное значение угла опережения (в области  $40^\circ$ ), при котором частота вращения заготовки принимает наименьшее значение. Изменение угла в сторону увеличения или уменьшения приводит к возрастанию  $n_3$ , что связано с уменьшением момента сил трения в опорах, действующих на заготовку.

Полученные экспериментальные данные полностью согласуются с результатами теоретических исследований (см. рис. 2), согласно которым при угле  $\alpha = 41,5^\circ$  на заготовку со стороны опор действует наибольший момент сопротивления, чему на зависимости  $n_3(\alpha)$  (см. рис. 4) соответствует наименьшее значение частоты вращения заготовки.

При обработке заготовки диска с использованием абразивной суспензии зависимость  $n_3(\alpha)$  имеет аналогичный характер, т. е. наименьшему значению частоты вращения заготовки соответствует величина угла опережения в области  $40^\circ$ . Однако степень его влияния на изменение частоты вращения заготовки проявляется в меньшей степени. Связано это с тем, что в таком случае помимо сил трения, действующих в опорах, на

величину момента сил сопротивления существенное влияние оказывает сила вязкостного трения, возникающая в зонах контакта поверхностей заготовки, покрытой слоем абразивной суспензии, со стенками кассеты, величина которых не зависит от расположения опор в кассете, но изменяется с изменением зазора  $\Delta$  между её стенками. Поэтому в этом случае суммарный момент сопротивления, препятствующий повороту заготовки, будет определяться, главным образом, действием сил вязкостного трения, обуславливая тем самым малую степень влияния изменения угла опережения на частоту вращения заготовки.

Как показали эксперименты, существенное влияние на условия вращения заготовки в процессе ее бесцентрового шаржирования оказывает величина зазора  $\Delta$  между стенками кассеты. При большом её значении ( $\Delta = 3$  мм) происходит деформация заготовки, ее перекос в зазоре, и она не вращается. В том случае, когда зазор имеет весьма малую величину ( $\Delta = 0,5$  мм), вращение заготовки наблюдается, но с очень низкой скоростью, что объясняется увеличением момента сопротивления за счет увеличения сил вязкостного трения, дейст-

вующих в зазоре между близко расположенными поверхностями заготовки и стенками кассеты. По результатам экспериментов установлено оптимальное значение зазора, которое для дисков толщиной 0,07 мм находится в пределах 1...1,2 мм. В этом случае в процессе бесцентрового шаржирования заготовок распиловочных дисков не происходит их перекоса в кассете и одновременно обеспечивается вращение с наибольшей частотой.

### Заключение

На основании результатов выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность бесцентрового двухстороннего шаржирования боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков с ультразвуком, что позволяет повысить производительность выполнения операции.

2. Разработана и исследована математическая модель процесса вращения заготовки диска при ее бесцентровой обработке, позволившая рассчитать момент сил сопротивления, действующий на нее со стороны неподвижных опор, в зависимости от угла опережения  $\alpha$ , т. е. угла расположения первой по ходу вращения заготовки опоры относительно вертикальной оси. Установлено, что наибольший момент сопротивления действует на заготовку со стороны опор при  $\alpha = 41,5^\circ$ . Изменение угла опережения от этого значения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения приводит к снижению момента сопротивления.

3. Для проведения экспериментальных исследований по бесцентровой обработке распиловочных дисков разработана конструкция – специальная кассета – для установки их заготовок, позволяющая изменять угол опережения  $\alpha$  и величину зазора  $\Delta$  между ее стенками, а также измерять частоту

вращения заготовки.

4. С использованием установки для двухстороннего шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков с ультразвуком, оснащенной кассетой для их бесцентровой обработки, разработана методика проведения экспериментальных исследований, в основу которой положено измерение частоты вращения заготовки при различных значениях угла опережения  $\alpha$  и различной величине зазора  $\Delta$  между стенками кассеты, что позволило косвенно судить о величине момента сопротивления, действующего на заготовку.

5. На основании полученных результатов экспериментальных исследований влияния угла опережения на частоту вращения заготовки определили его значения ( $\alpha = 60^\circ$ ), при которых обеспечивается наибольшая частота вращения заготовки. Эти значения угла опережения  $\alpha$  практически совпадают с теоретически рассчитанными, при которых действующий на заготовку со стороны опор момент сопротивления имеет наименьшую величину, что подтверждает достоверность разработанной математической модели процесса вращения заготовки диска при ее бесцентровом шаржировании.

6. Экспериментально установлено, что в сравнении с обработкой без алмазной суспензии ее присутствие на боковых поверхностях заготовки диска снижает частоту вращения, что связано с возрастанием момента сопротивления за счет действия сил вязкостного трения, возникающих в зонах контакта поверхности заготовки со стенками кассеты.

7. Экспериментально установлена оптимальная величина зазора между стенками кассеты, равная 1,2 мм и обеспечивающая отсутствие перекоса заготовки в процессе обработки, а также наименьшее влияние на момент сопротивления сил вязкостного трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Елифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты / В. И. Елифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – М. : Высш. шк., 1982. – 335 с.

2. **Киселев, М. Г.** Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов. – Минск : Тесей, 2001. – 344 с.

3. Исследование механизма воздействия деформирующего элемента с распиловочным диском при двухстороннем ультразвуковом паржировании с фрикционной передачей момента / М. Г. Киселев [и др.] // Материалы докл. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Тонпик, 2004. – С. 264–266.

Белорусский национальный технический университет  
Материал поступил 07.05.2010

**M. G. Kiselev, A. V. Drozdov,  
A. I. Olgomets, D. A. Yamnaya**  
**The research of a sawing disk rotary  
movement laws at its lateral surfaces  
centerless charging**

The mathematical model of a sawing disk rotation process at its centerless charging has been developed. The resistance forces moment working on preparation from motionless bearings depending on their arrangement concerning a vertical has been designed. The bearings arrangement at which there is the greatest resistance moment on preparation has been theoretically established and experimentally confirmed.