

УДК 62-531.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГОТОВКИ С РАСПИЛОВОЧНЫМ ДИСКОМ ПРИ СООБЩЕНИИ ЕЙ ДВУХМЕРНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, канд. техн. наук, доц. А.В. ДРОЗДОВ, Д.А. ЯМНАЯ
 (Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приводится описание методики и оборудования для исследования временных и частотных параметров взаимодействия распиливаемой заготовки в процессе ее двухмерного периодического циркуляционного движения относительно режущего инструмента. Получены экспериментальные зависимости влияния частоты вынуждающих колебаний на продолжительность и периодичность их ударно-фрикционного взаимодействия. На основе сопоставления полученных экспериментальных зависимостей с положениями теории виброударных систем показано, что при прочих равных условиях наличие и направление вращательного движения диска определяют условия и уровень демпфирования в колебательной системе, что в свою очередь оказывает влияние на режим ее работы, в частности на временные и частотные параметры ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском.

Введение. Операция механического распиливания твердых и сверхтвердых кристаллов широко применяется в производстве изделий электронного, оптического и оптико-электронного приборостроения, лазерной техники, в алмазообработке при изготовлении изделий как технического, так и ювелирного назначения. По уровню требований, предъявляемых к этой операции, а также трудоемкости и сложности ее выполнения на первом месте стоит операция механического распиливания монокристаллов алмаза, предназначенная для их разделения на части (полуфабрикаты). Она в значительной степени определяет выход годного алмазного сырья, т.е. массу будущего бриллианта, которая в свою очередь связана кубической зависимостью с его стоимостью.

Несмотря на разработку ряда новых методов разделения монокристаллов алмаза (лазерное, электроэрозионное, электроннолучевое), наибольшее применение благодаря обеспечению высокого процента выхода годного по-прежнему находит метод механического распиливания. Однако ему присущи недостатки, связанные с низкой производительностью процесса и недостаточно высоким качеством поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, снижающим процент выхода годного алмазного сырья.

Как показали результаты предшествующих исследований [1], в значительной степени указанные недостатки можно устранить путем сообщения заготовке в процессе распиливания двухмерного периодического циркуляционного движения. При этом рациональным является ее движение по замкнутой

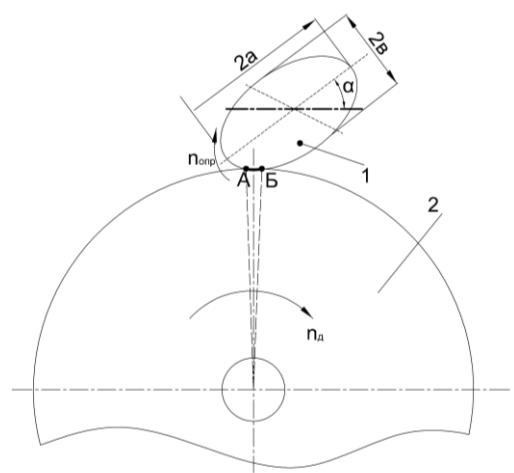


Рис. 1. Схема контактирования точки 1, принадлежащей заготовке, совершающей эллиптическое движение, с поверхностью распиловочного диска 2

траектории, имеющей форму, близкую к эллипсу [2]. В этом случае взаимодействие заготовки с торцевой (режущей) поверхностью распиловочного диска (рис. 1) протекает в условиях периодического ударно-фрикционного взаимодействия.

Как видно из представленной схемы, на участке траектории движения AB имеет место контактное взаимодействие поверхности заготовки с вращающимся распиловочным диском, а оставшуюся часть траектории она движется, не контактируя с его рабочей поверхностью. При этом если направление движения заготовки по эллиптической траектории (n_3) совпадает с направлением вращения распиловочного диска (n_d), имеет место встречное ударно-фрикционное взаимодействие, а если они имеют противоположное направление – попутное.

Согласно полученным в работе [3] экспериментальным данным, параметрами эллиптического движения заготовки (большой $2a$ и малой $2b$ осями эллипса, углом наклона большой оси α , периодом циркуляционного движения T) можно управлять за счет изменения условий и режимов возбуждения модернизированной распиловочной секции станка модели ШП-2. Очевидно, изменение

параметров эллиптического движения заготовки влечет за собой изменение условий ее ударно-фрикционного взаимодействия с распиловочным диском, в частности, продолжительности контактного

взаимодействия, периода циркуляционного движения заготовки и их соотношения. Поэтому для установления закономерностей процесса распиливания твердых и сверхтвердых кристаллов предложенным способом, а также их математического описания, необходимо располагать данными, отражающими взаимосвязь параметров эллиптического движения заготовки с временными и частотными характеристиками ее контактного взаимодействия с режущей поверхностью диска.

В этой связи целью данной работы явилось исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с диском при сообщении ей двухмерного периодического циркуляционного движения.

Методика проведения исследований. Эксперименты выполнялись с использованием модернизированной распиловочной секции станка модели ШП-2, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.

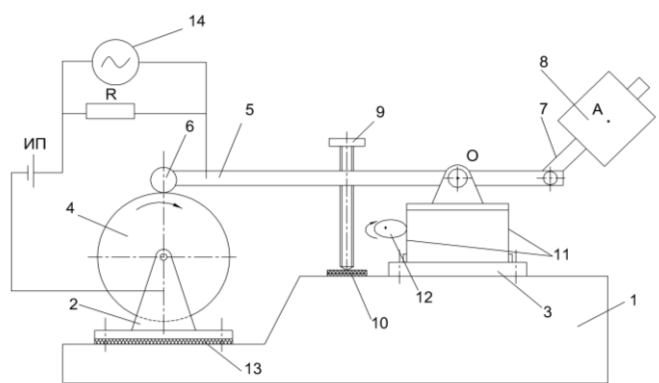


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированной распиловочной секции, примененной в исследованиях

Она состоит из массивной чугунной плиты 1, на которой закреплены две пары стоек 2 и 3. В паре стоек 2 устанавливается шпиндель с закреплённым на нём распиловочным диском 4. Вращение шпинделя передаётся от вала асинхронного электродвигателя посредством плоскоременной передачи (на рисунке не показана). В паре стоек 3 смонтирован узел опоры рычага 5 (стрелы), обеспечивающий его качание с минимальным трением. На одном конце стрелы в специальном приспособлении закрепляется обрабатываемая заготовка 6 (кристалл алмаза), а на другом – смонтирован узел противовеса, включающий поворотный рычаг 7, на котором установлен груз 8.

Статическое усилие прижатия обрабатываемой заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска обеспечивается путём придания стреле неуровновешенного состояния за счёт соответствующего изменения положения груза на поворотном рычаге. В рабочем положении стрела поддерживается с помощью регулировочного винта 9, который опирается на резиновую прокладку 10, благодаря чему достигается плавное изменение усилия прижатия заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска. По мере увеличения глубины пропила винт периодически выворачивается, чем обеспечивается врезная подача в процессе распиливания.

Принципиальное отличие данной конструкции распиловочной секции от традиционной состоит в том, что узел качания стрелы (пара стоек 3) установлен на плоских пружинах 11, образующих параллелограмный подвес, допускающий перемещение оси качания стрелы вдоль горизонтальной оси. Для сообщения этому узлу вынужденных колебаний применен механический (эксцентриковый) вибратор 12 с приводом от электродвигателя постоянного тока (на рисунке не показан).

В ходе выполнения экспериментов на месте обрабатываемой заготовки закреплялась стальная цилиндрическая оправка диаметром 6 мм, а вместо распиловочного диска (режущего инструмента) устанавливался обычный стальной диск диаметром 80 и толщиной 0,3 мм. Это позволило исключить процесс распиливания, т.е. резания, и тем самым реализовать условия их только ударно-фрикционного взаимодействия.

Для измерения временных и частотных параметров контактного взаимодействия оправки с диском, распиловочная секция оснащалась специальной электрической схемой. Она включала источник питания постоянного тока ИП, один полюс которого подключался к стреле 6, а второй к стойке 2, в которой установлен стальной диск. С помощью диэлектрической (текстолитовой) прокладки 13. Эта стойка электрически изолировалась от основания распиловочной секции, а соответственно, от стрелы с закрепленной на ней стальной оправкой. Благодаря этому электрическая цепь замыкается в момент наступления механического контакта оправки с диском, а в последующий момент его прекращения – она разрывается, что во времени фиксируется с помощью цифрового запоминающего осциллографа 11 модели С9-8, параллельно входу которого включено активное сопротивление R. При этом за счет соответствующей синхронизации

сигнала на экране осциллографа фиксировалось как минимум два соседних периода контактного взаимодействия оправки, совершающей эллиптическое движение, с поверхностью диска.

В качестве примера на рисунке 3 представлены осциллограммы, полученные при контактном взаимодействии оправки с поверхностью невращающегося диска (рис. 3, а) и при его вращении (рис. 3, б).

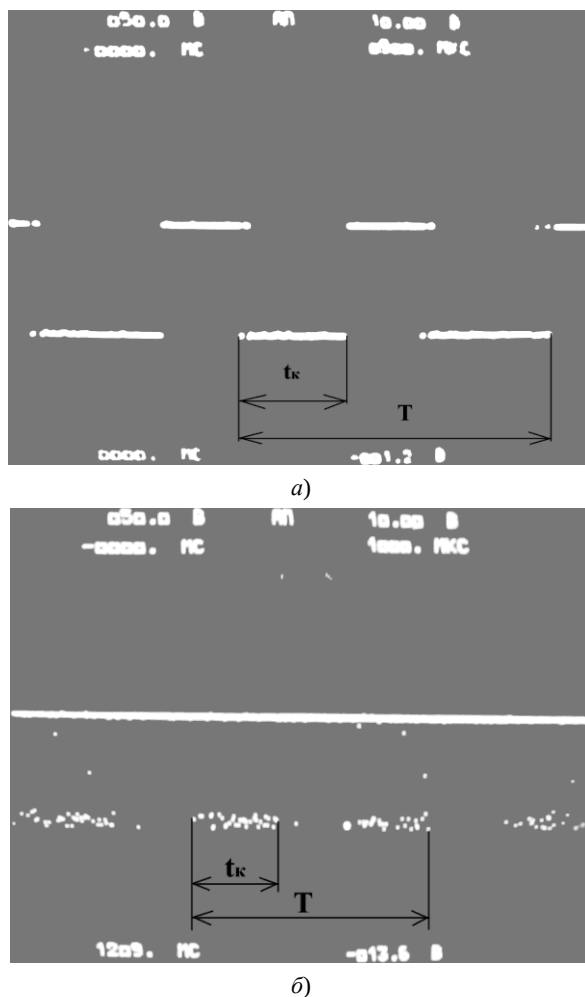


Рис. 3. Примеры осциллограмм, полученных при взаимодействии оправки с поверхностью неподвижного (а) и вращающегося диска (б)

В последнем случае на осциллограмме продолжительность контактного взаимодействия характеризуется наличием на этом участке высокочастотных колебаний, так называемого «дребезга», обусловленных относительным перемещением поверхностей, т.е. наличием скользящего электрического контакта. По результатам расшифровки полученных осциллограмм определялись продолжительность контактного взаимодействия поверхностей t_k и период эллиптического движения оправки T , а по полученным значениям этих параметров рассчитывалась частота периодического движения оправки $f_{оп} = \frac{1}{T}$ и отношение $\frac{T}{t_k} = q$, представляющее собой скважность периодического процесса ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском.

В ходе проведения исследований параллелограмному подвесу стрелы сообщались вынужденные периодические колебания с постоянной амплитудой, равной 3 мм, а их частота изменялась от 2 до 3,6 Гц. В одной серии экспериментов вращение диска отсутствовало, а во второй – ему сообщалось вращательное движение с постоянной частотой 1530 мин⁻¹ при изменении его направления, что позволило реализовать условия как встречного, так и попутного взаимодействия оправки с диском.

На рисунке 4, а представлены экспериментально полученные зависимости периода циркуляционного движения оправки T от частоты вынужденных колебаний f_s , сообщаемых подвесу стрелы.

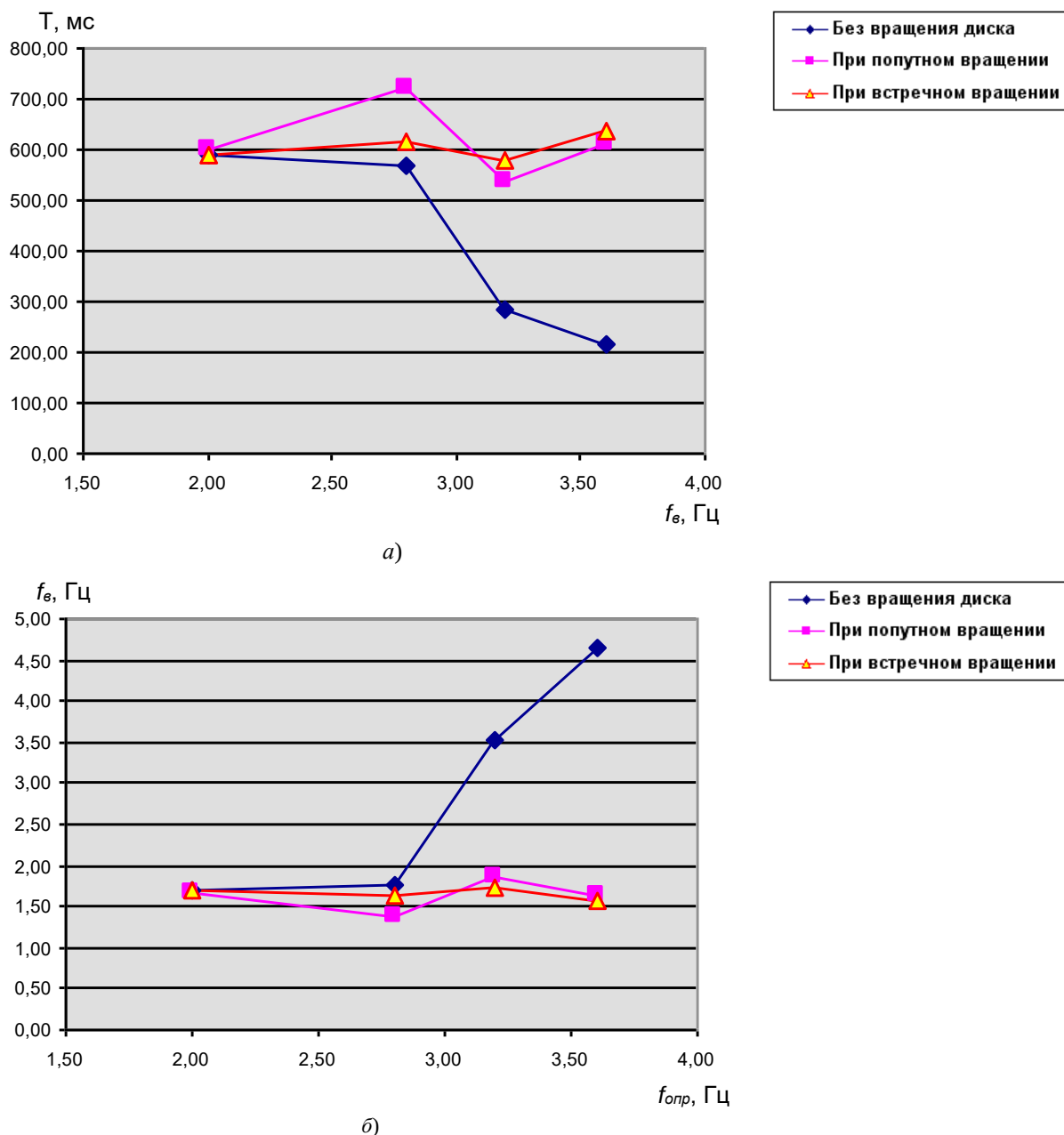


Рис. 4. Зависимость периода циркуляционного движения оправки (а) и частоты этого движения (б) от частоты вынужденных колебаний при различных условиях ее взаимодействия с диском

Из их анализа видно, что при $f_e = 2$ Гц период циркуляционного движения оправки остается практически одинаковым (порядка 600 мс) для всех исследуемых вариантов ее взаимодействия с диском. С увеличением частоты вынужденных колебаний значение T при взаимодействии оправки с неподвижным диском снижается и наиболее интенсивно при f_e , превышающей 2,8 Гц. При их попутном взаимодействии в диапазоне изменения f_e от 2 до 2,8 Гц период циркуляционного движения оправки возрастает, после чего снижается, достигая минимального значения при $f_e = 3,2$ Гц, а при дальнейшем повышении f_e до 3,6 Гц значение T несколько увеличивается. В случае встречного взаимодействия оправки с диском значение периода ее циркуляционного движения в исследованном диапазоне f_e практически не изменяется.

Влияние частоты сообщаемых параллелограммному подвесу вынужденных колебаний на частоту периодического циркуляционного движения оправки f_{opr} отражают зависимости, представленные на рисунке 4, б. Видно, что как при попутном, так и при встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском частота ее периодического циркуляционного движения существенно изменяется в исследованном диапазоне варьирования частоты вынужденных колебаний. Причем для указанных вариантов взаимодействия оправки с диском частота ее периодического циркуляционного движения остается ниже частоты f_e во всем диапазоне изменения последней. При взаимодействии оправки с поверхностью неподвижного

диска характер зависимости $f_{опр}(f_в)$ существенным образом изменяется. Так, с увеличением $f_в$ в диапазоне от 2 до 2,8 Гц значение $f_{опр}$ незначительно возрастает, оставаясь меньше частоты вынужденных колебаний. При дальнейшем увеличении $f_в$ имеет место интенсивное, практически линейное возрастание частоты периодического циркуляционного движения оправки, значение которой при $f_в = 3,6$ Гц составляет 4,64 Гц, т.е. превышает частоту вынужденных колебаний.

На рисунке 5, а представлены зависимости продолжительности контакта t_k оправки с диском за период ее циркуляционного движения от частоты вынужденных колебаний $f_в$ для различных вариантов взаимодействия.

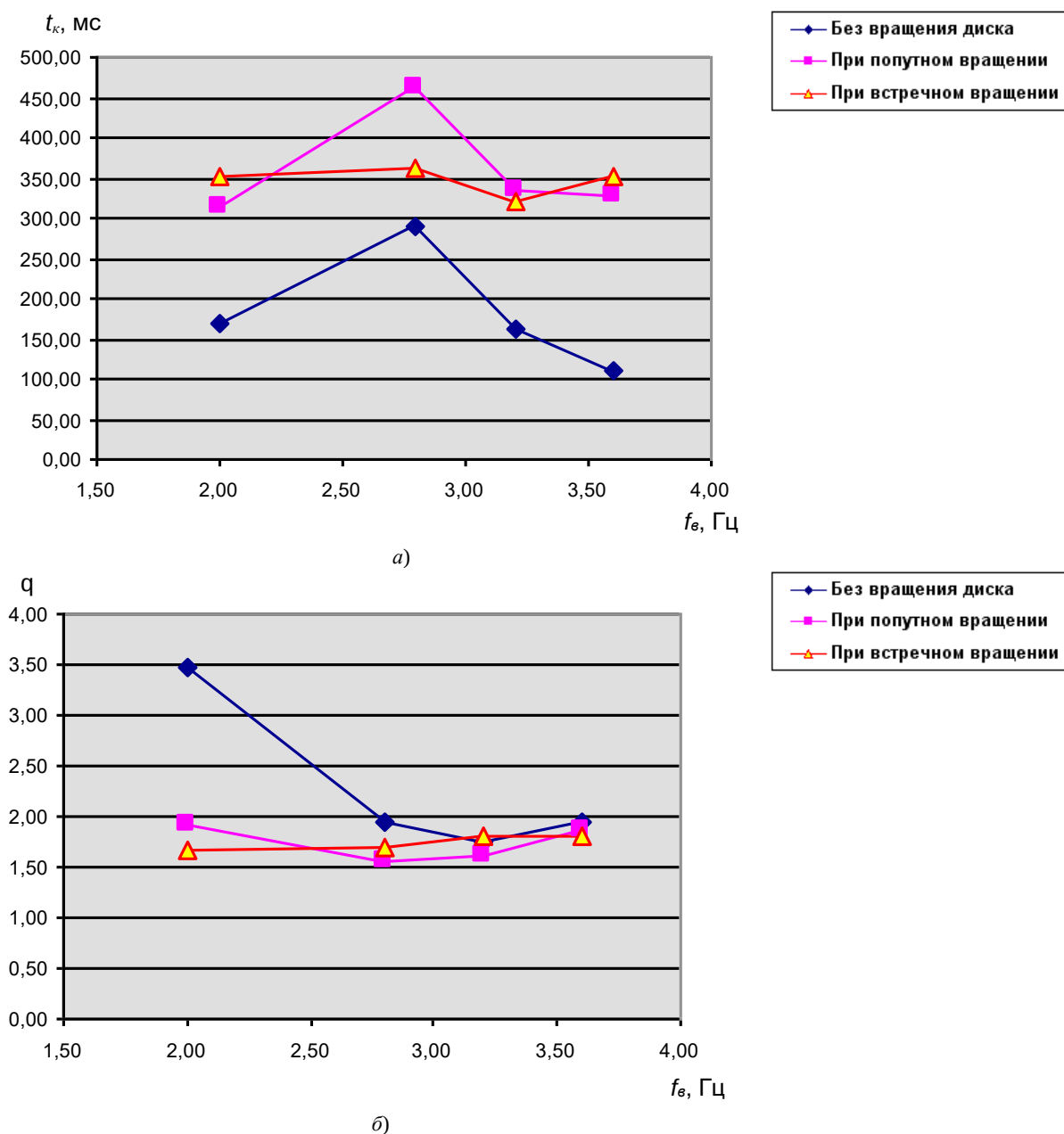


Рис. 5. Зависимость продолжительности контактного взаимодействия оправки с диском (а) и скважности ее периодического циркуляционного движения (б) от частоты вынужденных колебаний при различных условиях ее взаимодействия с диском

Как видно, зависимость $t_k(f_в)$ при взаимодействии оправки с неподвижным диском и при их попутном взаимодействии характеризуется наличием на них четко выраженных экстремумов, соответствующих $f_в = 2,8$ Гц, при котором продолжительность контактного взаимодействия оправки с диском имеют наибольшее значение. Изменение частоты вынужденных колебаний от этого значения в меньшую или большую сторону приводит к уменьшению параметра t_k , минимальная величина которого имеет место при

наибольшем значении $f_0 = 3,6$ Гц. При попутном взаимодействии оправки с диском продолжительность их контактного взаимодействия оказывается существенно больше, чем при ее взаимодействии с неподвижным диском. В случае их встречного взаимодействия величина t_k практически не зависит от частоты вынужденных колебаний, при этом она превышает продолжительность контакта оправки с неподвижным диском.

Влияние частоты сообщаемых параллелограммному подвесу вынужденных колебаний на скажность периодического ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском отражают зависимости, представленные на рисунке 5, б. Видно, что существенное влияние на значение скажности частота вынужденных колебаний оказывает при взаимодействии оправки с неподвижным диском. В этом случае наименьшей частоте вынужденных колебаний ($f_0 = 2$ Гц) соответствует наибольшее значение скажности ($q = 3,5$). С увеличением f_0 до 2,8 Гц значение скажности резко снижается ($q = 1,9$). Своего минимального значения ($q = 1,75$) она достигает при частоте вынужденных колебаний 3,2 Гц, а затем несколько возрастает ($q = 1,9$) при $f_0 = 3,6$ Гц.

При попутном и встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском частота вынужденных колебаний не оказывает столь существенного влияния на скажность, как в предыдущем варианте. Так, при попутном взаимодействии зависимость $q(f_0)$ имеет аналогичный, как при взаимодействии оправки с неподвижным диском характер, но при значительно меньшем диапазоне изменения значения скажности. В случае их встречного взаимодействия частота вынужденных колебаний практически не влияет на значение скажности ($q \approx 1,75$), т.е. продолжительность контакта оправки с поверхностью диска по отношению к периоду ее циркуляционного движения остается величиной постоянной.

Из обобщенного анализа полученных экспериментальных зависимостей следует вывод о том, что при прочих равных условиях существенное влияние на временные и частотные параметры контактного взаимодействия оправки с диском оказывает как наличие его вращательного движения, так и направление последнего, т.е. встречное или попутное. Отметим, что взаимодействие оправки с диском, совершающей эллиптическое циркуляционное движение, при котором большая ось эллипса расположена под углом к горизонтальной оси (см. рис. 1) имеет место их периодическое косое ударно-фрикционное взаимодействие, а поэтому данную систему можно отнести к виброударным [2].

Режим работы таких систем, и в частности продолжительность цикла между соударениями, зависит от потерь энергии при ударе. Применительно к нашему случаю эти потери обусловлены фрикционным взаимодействием поверхностей за время их контактирования, а тогда диссипативное сопротивление (демпфирование в системе) оправданно принять пропорциональным скорости их относительного перемещения. Исходя из этого можно объяснить влияние скорости вращения диска и его направления на временные и частотные параметры контактного взаимодействия с ним оправки. Так, при неподвижном диске скорость их относительного перемещения определяется скоростью эллиптического движения оправки на участке ее контактирования с диском. Поэтому демпфирование в виброударной системе оказывается незначительным, в результате чего временные и частотные параметры взаимодействия оправки с диском существенным образом зависят от частоты вынужденных колебаний, что характерно для систем с малым демпфированием. Для условий попутного взаимодействия оправки с вращающимся диском скорость относительного перемещения за время их контакта будет определяться разностью средней скорости эллиптического движения оправки и окружной скоростью диска. В результате возрастания в сравнении с предыдущим случаем скорости относительного движения взаимодействующих поверхностей за время их контакта увеличивается демпфирование в виброударной системе, обуславливая тем самым меньшую степень влияния частоты вынужденных колебаний на временные и частотные параметры процесса.

При встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском скорость их относительного перемещения на участке контактирования имеет наибольшее значение, так как определяется суммой скорости эллиптического движения оправки и окружной скорости диска, а соответственно, имеет место наибольшее демпфирование в виброударной системе, благодаря чему частота вынужденных колебаний практически не влияет на временные и частотные параметры взаимодействия оправки (заготовки) с диском (инструментом).

Таким образом, полученные экспериментальные данные и установленные закономерности влияния скорости и направления вращения диска на временные и частотные параметры взаимодействия с ним оправки, совершающей двухмерное (эллиптическое) циркуляционное движение, дают возможность учесть их при математическом моделировании изучаемого процесса, а также целенаправленно использовать для управления процессом распиливания заготовок из твердых и сверхтвердых кристаллов по предложенной технологической схеме.

Заключение. Разработана методика проведения экспериментальных исследований на модернизированной распиловочной секции станка модели ШП-2, оснащенной специальной электрической схемой, позволяющая определить временные и частотные параметры контактного взаимодействия металлической оправки (аналог заготовки) со стальным диском (аналог инструмента) при сообщении ей двухмерного (эллиптического) циркуляционного движения. С использованием данной методики получены экспериментальные данные, отражающие влияние частоты сообщаемых подвесу стрелы распиловочной секции вынужденных колебаний на продолжительность контактного взаимодействия оправки, совершающей эллиптическое циркуляционное движение, с диском и период (частоту) этого движения, а также его скажность при различных условиях их взаимодействия (при неподвижном диске, при вращающемся диске в условиях встречного и попутного их взаимодействия). На основании анализа этих данных установлено,

что как при попутном, так и при встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском частота ее периодического циркуляционного движения $f_{опр}$, а соответственно и его период T существенно не изменяются в исследованном диапазоне варьирования (от 2 до 3,6 Гц) частоты вынужденных колебаний $f_в$. При взаимодействии с неподвижным диском с увеличением $f_в$ от 2 до 2,8 Гц значение $f_{опр}$ незначительно возрастает, оставаясь меньше частоты вынужденных колебаний, а при дальнейшем повышении $f_в$ имеет место интенсивное, практически линейное возрастание частоты периодического циркуляционного движения оправки, значение которой при $f_в = 3,6$ Гц составляет 4,6 Гц, т.е. превышает частоту вынужденных колебаний.

Установлено, что продолжительность контакта t_k оправки с диском за период ее циркуляционного движения, а также его скажность $q = \frac{T}{t_k}$ практически не зависят от частоты вынужденных колебаний в

условиях их встречного взаимодействия. При взаимодействии с неподвижным диском, а также при попутном взаимодействии зависимости $t_k(f_в)$ имеют при $f_в = 2,8$ Гц экстремумы, соответствующие наибольшей продолжительности контактного взаимодействия оправки с диском. Изменение от этого значения частоты вынужденных колебаний в меньшую или большую сторону приводит к уменьшению параметра t_k , который имеет минимальную величину при наибольшем значении $f_в = 3,6$ Гц. В условиях попутного взаимодействия продолжительность контакта с диском при всех значениях $f_в$ оказывается существенно выше, чем при ее взаимодействии с неподвижным диском, а скажность, соответственно, ниже и при меньшем диапазоне ее изменения в пределах варьирования частоты вынужденных колебаний.

На основании качественного анализа условий контактного взаимодействия оправки с диском, совершающей эллиптическое циркуляционное движение, при котором большая ось эллипса направлена под углом к горизонтальной оси, установлено, что в этом случае имеет место их периодическое косое ударно-фрикционное взаимодействие. На основе сопоставления полученных экспериментальных зависимостей с положениями теории виброударных систем, показано, что при прочих равных условиях, наличие и направление вращательного движения диска, в принципе, определяет условия и уровень демпфирования в колебательной системе за счет фрикционного взаимодействия оправки с диском за время их контакта, что в свою очередь влияет на режим ее работы и, в частности, на временные и частотные параметры ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском. Так, при малом демпфировании, что имеет место при неподвижном диске, эти параметры существенным образом и не линейно зависят от частоты вынужденных колебаний. С повышением демпфирования за счет придания диску вращательного движения, обеспечивающего условия его попутного взаимодействия с оправкой, зависимость этих параметров от частоты вынужденных колебаний значительно ослабевает. При встречном взаимодействии вращающегося диска с оправкой, когда демпфирование в системе возрастает еще больше, продолжительность их контактного взаимодействия, частота периодического циркуляционного движения оправки и его скажность практически не зависят от частоты вынужденных колебаний в исследованном диапазоне ее варьирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Быховский, И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
3. 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.

Поступила 16.01.2012

RESEARCH OF TIME AND FREQUENCY PARAMETERS OF THE CONTACT INTERACTION OF A BLANK PART WITH THE SAWING DISK IN THE TIME OF IMPOSITION OF TWO-DIMENSIONAL PERIODIC CIRCULATING MOTION

M. KISELEV, A. DROZDOV, D. YAMNAJA

The article present a technique and the equipment description for time and frequency interaction parameters research of sawing preparations during its two-dimensional periodic circulating movement concerning the cutting tool. Experimental dependences of compelling fluctuations frequency influence on duration and periodicity of their shock-frictional interaction are received.