

УДК 62-531.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМЕРНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕЕ РАСПИЛИВАНИЯ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

Белорусский национальный технический университет

E-mail: dav7@tut.by

Статья посвящена экспериментальной оценке влияния параметров двухмерного циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей. Получены экспериментальные данные, отражающие эффективность применения циркуляционного движения заготовки на повышение уровня выходных показателей процесса ее распиливания.

Разработана методика проведения сравнительных экспериментальных исследований по распиливанию образцов из стекла, нефрита и яшмы как в традиционных условиях выполнения операции, так и при сообщении узлу подвеса стрелы вынужденных колебаний, обеспечивающих циркуляционное движение образца, позволяющая количественно оценивать интенсивность его распиливания и качество обработанной на нем поверхности.

Показано, что положительное влияние циркуляционного движения образца на повышение качества его распиленной поверхности связано с особенностями кинематики относительного движения боковой поверхности диска с пропиленными участками поверхности образца. Интенсифицирующее воздействие циркуляционного движения образца на процесс распиливания в первую очередь связано с изменениями динамических условий его взаимодействия с режущей кромкой диска. В отличие от традиционного распиливания, когда процесс протекает в условиях статического прижатия контактирующих поверхностей, при сообщении образцу циркуляционного движения по эллиптической траектории имеет место их периодическое ударно-фрикционное взаимодействие. При этом степень положительного влияния циркуляционного движения образца на качество его распиленной поверхности возрастает с увеличением вертикальной составляющей скорости ее скольжения относительно боковой поверхности диска, что достигается путем повышения частоты колебаний, сообщаемых узлу подвеса стрелы. Причем степень положительного влияния циркуляционного движения образца на качество его распиленной поверхности возрастает с увеличением вертикальной составляющей скорости ее скольжения относительно поверхности диска.

Ключевые слова: двухмерное циркуляционное движение, заготовка, интенсивность распиливания, обработанная поверхность.

Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

EXPERIMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF PARAMETERS PERTAINING TO BLANK TWO-DIMENSIONAL CIRCULAR MOTION ON INTENSITY OF ITS CUTTING AND QUALITY OF MACHINED SURFACE

KISELEV M. G., DROZDOV A. V., MONICH S. G., YAMNAYA D. A.

Belarusian National Technical University

The purpose of the paper is to make an experimental impact assessment of parameters pertaining to blank two-dimensional circular blank motion on intensity of its cutting and quality of the machined surfaces. Experimental data have been obtained that reveal efficiency in application of blank circular motion and improvement of its output cutting indices.

A methodology has been developed for execution of comparative experimental investigations on cutting glass, nephrite and jasper specimens as under conventional conditions required for the operation so while transferring induced oscillations to boom suspension assembly that ensure specimen.

The proposed methodology makes it possible to assess quantitatively intensity of specimen cutting and quality of its machined surface. The paper has shown that a positive impact of the specimen circular motion on quality improvement of its cross-cut surface is related to peculiar kinematics features pertaining to relative motion of disc side surface with cross-cut portions of the specimen surface. It has been shown that the intensifying impact of the specimen circular motion on the cutting process is primarily related to the changes in dynamic conditions of its interaction with the cutting edge of the disc. In contrast to conventional cutting when the pro-

cess is going on under static pressure of contacting surfaces there is their periodical impact-frictional interaction due to transfer of circular motion to the specimen along elliptical trajectory. In this case the rate of the positive impact of the specimen circular motion on its cross-cut surface becomes higher while increasing vertical velocity component that concerns its sliding relative to disc side surface that is ensured by increasing oscillation frequency which is transferred to the boom suspension assembly. Moreover, the rate of positive impact of the specimen circulatory motion on the quality of its cross-cut surface becomes higher while increasing vertical velocity component of its sliding relative to disc surface.

Keywords: two-dimensional circular motion, blank, cutting intensity, machined surface.

Fig. 6. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Операция механического распиливания твердых и сверхтвердых материалов, включая кристаллы алмаза, выполняется для разделения исходного сырья на штучные заготовки (полуфабрикаты) с целью его рационального использования. Поэтому основные требования, предъявляемые к этой операции, связаны с обеспечением наибольшей производительности ее выполнения и высокого качества поверхности распиленных полуфабрикатов. При этом доминирующим, и в первую очередь при распиливании кристаллов алмаза, является последнее требование, с обеспечением которого напрямую связан уровень безвозвратных потерь исходного сырья. Он определяется величиной припуска, удаляемого с поверхности площадок распиленных полуфабрикатов при их последующей обработке шлифованием [1, 2].

Операция распиливания кристаллов алмаза выполняется на специальных распиловочных секциях, работающих по принципу гравитационной подачи заготовки. Последняя закрепляется на одном конце качающегося рычага (стрелы) и за счет придания ему неуравновешенного состояния прижимается к режущей кромке распиловочного диска. Однако такая технологическая схема обработки отличается низкой производительностью выполнения операции, а топография распиленной поверхности характеризуется наличием на ней однонаправленных рисок (следов обработки). Для их удаления применяется последующая операция шлифования поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, что приводит к возрастанию безвозвратных потерь алмазного сырья.

Согласно результатам ранее проведенных исследований [3–8], эффективным способом существенного повышения уровня технологических показателей данной операции является сообщение заготовке вынужденных колебаний, направленных перпендикулярно режущей кромке распиловочного диска. В исследованиях [9, 10] обоснована перспективность исполь-

зования для этого не одно-, а двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки, которое совершается в плоскости распиливания. Вместе с тем, сегодня отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие количественно оценить влияние параметров такого движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей. В этой связи целью настоящей работы явилось получение экспериментальных данных, отражающих эффективность применения циркуляционного движения заготовки на повышение уровня выходных показателей процесса ее распиливания.

Методика проведения экспериментальных исследований. Эксперименты по распиливанию образцов проводили на модернизированной промышленной распиловочной секции, общий вид которой приведен на рис. 1.

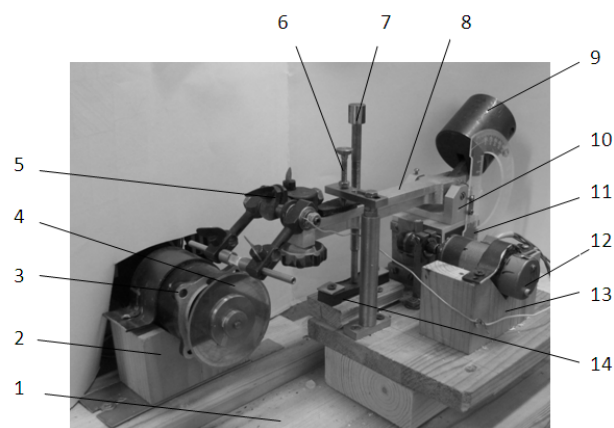


Рис. 1. Общий вид модернизированной промышленной распиловочной секции

Она состоит из основания 1, на котором в призме 2 закреплен электродвигатель 3, с установленным на его валу распиловочным диском 4. Стрела 8 с регулировочным винтом 7 установлена в кронштейне 10 на опорах верчения, обеспечивающих ее поворот относительно оси качания с минимальным трением. На одном конце стрелы смонтирован узел крепле-

ния кристалла (образца) 5, а на другом установлен узел противовеса 9. Кронштейн жестко связан с верхней (подвижной) частью плоскопараллелограммного подвеса 11, образованного двумя закаленными упругими стальными (У8А). В установочной призме 13, прикрепленной к основанию секции, с помощью хомута закреплен электродвигатель постоянного тока, на валу которого установлен узел привода вращения распиловочного диска, состоящего из электродвигателя постоянного тока 12, с закрепленным на его валу эксцентриком. Призма установлена таким образом, чтобы при вращении эксцентрика его рабочая часть постоянно контактировала с упором, жестко связанным с подвижной частью упругого подвеса узла качания стрелы, в результате чего последнему сообщаются колебательные смещения вдоль горизонтальной оси. Кроме того, в модернизированном варианте секции дополнительно к нижнему 14 применен верхний упругий ограничитель 6 вертикальных перемещений стрелы.

В основе механизма придания заготовке двухмерного циркуляционного движения лежит то обстоятельство, что в процессе распиливания центр тяжести противовеса расположен выше оси качания стрелы. Поэтому при вращении эксцентрика она совершает колебательные (вдоль горизонтальной оси) и одновременно вертикальные (по дуге окружности) смещения, обусловленные возникающим под действием виброускорений переменного относительно оси качания стрелы динамическим моментом. При определенной интенсивности возбуждения такой колебательной системы в ней устанавливается режим двустороннего виброударного взаимодействия стрелы с упругими ограничителями, в результате чего заготовка совершает в плоскости распиливания двухмерное циркуляционное движение, траектория которого (рис. 2а) имеет форму, близкую к эллипсу (рис. 2б). Причем параметрами траектории этого движения, включая размеры малой (рис. 2в) и большой (рис. 2а) осей эллипса, а также угол λ между большой осью и горизонталью, можно целенаправленно управлять как за счет изменения частоты вынужденных колебаний, сообщаемых узлу подвеса стрелы, так и путем изменения зазора между ней и верхним ограничителем. Так, увеличение этих параметров ре-

жима распиливания сопровождается возрастанием угла λ и повышением отношения между малой и большой осями эллипса, т. е. он как бы расширяется и одновременно поворачивается в сторону вертикальной оси [7].

В ходе проведения экспериментов использовали образцы из яшмы, нефрита и стекла, которые соответственно имели твердость по шкале Мооса 7,5; 6,0 и 4,0. Путем механической обработки из исходных заготовок изготавливали образцы в виде прямоугольного параллелепипеда сечением 6×6 и длиной 25–30 мм

С помощью фиксирующего цемента «Уницем» подлежащий распиливанию образец 4 (рис. 3) закрепляли в отверстии цилиндрической оправки 3, которую устанавливали в зажиме 2 поворотного кронштейна 1. С противоположного торца образец поджимали оправкой 8, закрепленной в зажиме 7. При этом образец ориентировали относительно режущей кромки распиловочного диска 5 таким образом, чтобы, по аналогии с обработкой кристалла алмаза, распиливание начиналось с ребра образца.

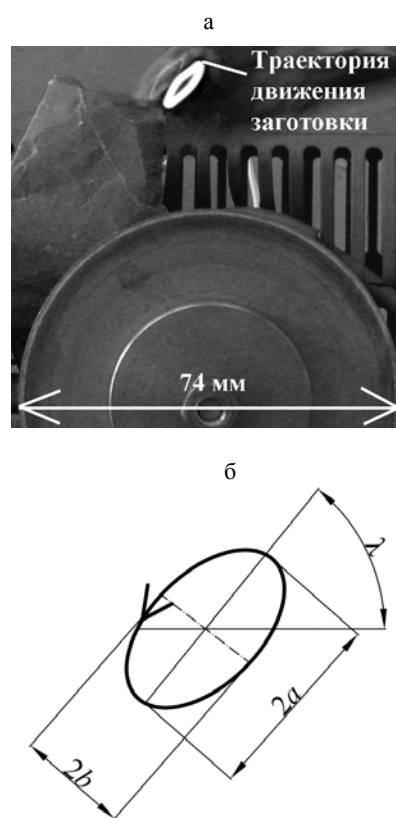


Рис. 2. Траектория циркуляционного движения заготовки (а) и оцениваемые параметры эллиптической траектории (б)

В качестве инструмента использовали стальной отрезной диск диаметром 76,00 мм и толщиной 0,15 мм, имеющий на периферийной части двустороннее в виде кольцевой дорожки алмазосодержащее покрытие из микропорошка 60/40, полученное методом гальваностегии. Толщина режущей кромки инструмента составляла 0,2 мм.

В ходе проведения сравнительных испытаний фиксировали время распиливания образцов t с использованием в одной серии экспериментов традиционной технологии, а в другом – предложенной, т. е. при сообщении образцу двумерного циркуляционного движения. Зная площадь распиленной поверхности образца S , вычисляли значение интенсивности его распиливания $I = S/t$ (мм²/с), соответствующее данным условиям и режимам выполнения операции. Для сбора продуктов разрушения и их последующего анализа использовали липкую ленту, которую располагали вблизи зоны распиливания.

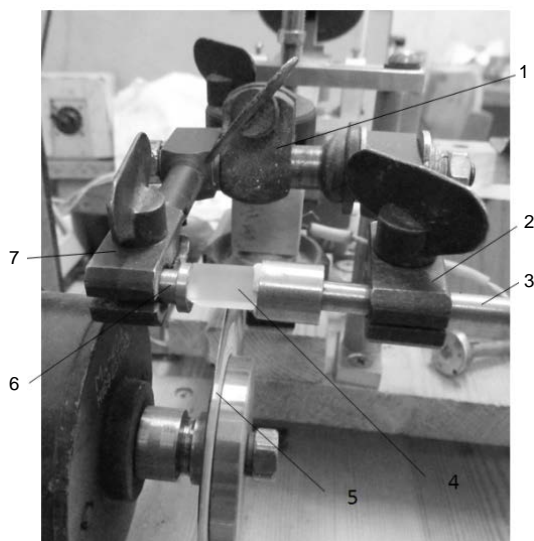


Рис. 3. Узел закрепления образца при его распиливании

Качество поверхности площадок распиленных образцов оценивали путем измерения с помощью профилографа-профилометра Taylor Hobson ее шероховатости в направлении действия гравитационной подачи. Кроме того, с использованием микроскопа МПСУ-1 визуально исследовали состояние распиленной поверхности образцов и фотографировали ее.

Эксперименты проводили при следующих режимах распиливания: частота вращения от-

резного диска была постоянной и составляла 7500 мин⁻¹, статическое усилие прижатия заготовки к его режущей кромке – 6,5 Н, частота вынужденных колебаний, сообщаемых упругому подвесу стрелы, варьировалась от 1,8 до 4,0 Гц при постоянном значении их амплитуды, равном 3,0 мм, величина зазора между стрелой и верхним ограничителем поддерживалась неизменной и составляла 2,0 мм.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Диаграмма, отражающая влияние частоты вынужденных колебаний f , сообщаемых узлу подвеса стрелы, на значение интенсивности распиливания образцов i , приведена на рис. 4.

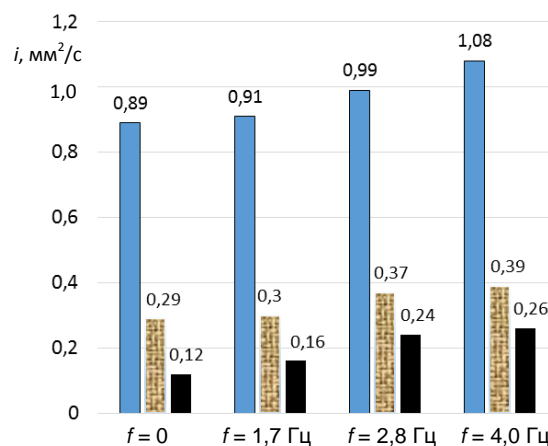


Рис. 4. Диаграмма зависимости интенсивности распиливания образцов при обработке в обычных условиях ($f = 0$) и при сообщении узлу подвеса стрелы вынужденных колебаний различной частоты: ■ – стекло; ■ – нефрит; ■ – яшма

Из анализа полученных данных видно, что во всех случаях с повышением частоты вынужденных колебаний интенсивность распиливания образцов возрастает. При этом чем ниже твердость материала образца, тем выше значение i как при его обработке в обычных условиях, так и при использовании колебаний. Важно отметить то обстоятельство, что степень влияния колебаний на повышение интенсивности распиливания образцов с увеличением их твердости возрастает. Так, для стеклянного образца отношение значений интенсивности его распиливания с применением колебаний частотой 4,00 Гц и в обычных условиях составило 1,21, для нефрита – 1,34, для яшмы – 2,16. Наличие такой зависимости дает основание полагать,

что предложенная технология также позволит существенно повысить интенсивность распиливания сверхтвердых материалов, включая кристаллы алмаза, т. е. материалов с твердостью по шкале Мооса 9–10 единиц.

Влияние частоты вынужденных колебаний на значение параметра Ra шероховатости распиленной поверхности образцов отражают данные, представленные на рис. 5.

Из них следует, что применение в процессе обработки вынужденных колебаний позволяет существенно повысить качество распиленной поверхности образцов. Так, в результате их действия значение шероховатости Ra распиленной поверхности образцов снизилось по сравнению с обработкой в обычных условиях для стекла в 1,61, для нефрита – в 3,7 и для яшмы – в 3,25 раза. Причем с увеличением твердости обрабатываемого материала степень влияния колебаний на повышение качества распиленной поверхности образцов возрастает. Это позволяет прогнозировать еще более высокую эффективность их влияния на повышение качества распиленных поверхностей при обработке сверхтвердых материалов.

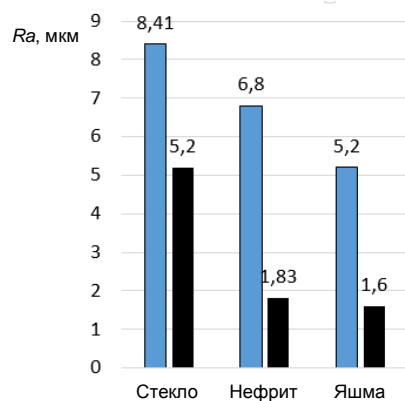


Рис. 5. Диаграмма зависимости значения шероховатости Ra распиленной поверхности образцов при их обработке в обычных условиях и при сообщении узлу подвеса стрелы вынужденных колебаний частотой 4 Гц:
 ■ – без вибраций; ■ – с применением колебаний частотой 4 Гц

Очевидно, что интенсифицирующее воздействие циркуляционного движения заготовки на процесс распиливания в первую очередь связано с изменениями динамических условий ее взаимодействия с режущей кромкой инструмента. В отличие от традиционного распи-

ливания, когда процесс протекает в условиях статического прижатия контактирующих поверхностей, при сообщении заготовке циркуляционного движения имеет место их периодическое ударно-фрикционное взаимодействие. Благодаря этому протекание процесса хрупкого разрушения материала образца характеризуется более разветвленной сетью микротрещин, формирующихся в поверхностном (предразрушенном) слое, а также его большей, в сравнении с обычным распиливанием, глубиной. Поэтому объем удаленного с поверхности образца материала за время периода его циркуляционного движения оказывается больше, чем за то же время при обработке в обычных условиях. Визуально это подтверждается наличием периодического интенсивного потока частиц разрушенного материала, выбрасываемых из зоны распиливания за время ударно-фрикционного взаимодействия образца с режущей кромкой диска. Повышение интенсивности распиливания с увеличением частоты колебаний, сообщаемых узлу подвеса стрелы, объясняется возрастанием нормальной составляющей силы соударения поверхности образца с режущей кромкой диска за время их контактирования, что обусловлено увеличением угла λ (рис. 2б) эллиптической траектории движения образца. Это сопровождается возрастанием степени разветвленности сети микротрещин в поверхностном слое материала образца и увеличением его глубины, что в совокупности приводит к повышению интенсивности распиливания. Отмеченное положение подтверждается результатами измерений средних размеров частиц разрушенного материала образца, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Средние размеры частиц разрушенного материала образцов при их распиливании в обычных условиях и при сообщении узлу подвеса стрелы колебаний частотой 4 Гц

Материал образца	Условие распиливания	Средний размер частиц разрушенного материала, мкм
Стекло	Без колебаний	72
	С применением колебаний	43
Нефрит	Без колебаний	56
	С применением колебаний	31
Яшма	Без колебаний	44
	С применением колебаний	23

Из представленных данных видно, что сообщение образцу циркуляционного движения приводит к значительному (от 1,7 до 1,8 раза) уменьшению по сравнению с распиливанием в обычных условиях среднего размера частиц разрушенного материала. Это подтверждает положение о формировании более разветвленной сети микротрещин в поверхностном слое образца в результате периодического ударно-фрикционного его взаимодействия с режущей кромкой диска. Из анализа приведенных данных также следует, что размер удаляемых частиц материала с увеличением его твердости уменьшается, причем эта зависимость сохраняется как при распиливании в обычных условиях, так и при сообщении образцу циркуляционного движения.

Фотографии распиленной поверхности стеклянного образца при его обработке в обычных условиях и при сообщении узлу подвеса стрелы колебаний частотой 4 Гц приведены на рис. 6.

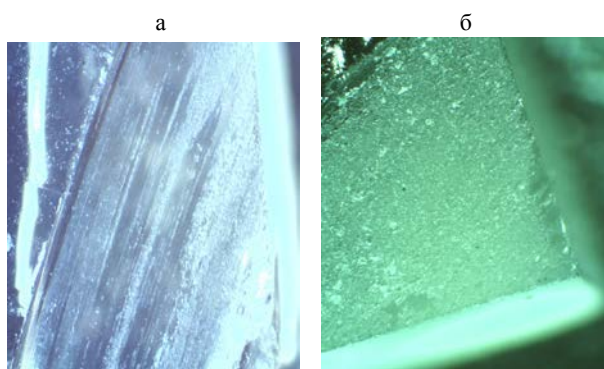


Рис. 6. Фотографии распиленной поверхности стеклянного образца ($\times 40$): а – при обработке в обычных условиях; б – при сообщении заготовке циркуляционного движения

При распиливании в обычных условиях (рис. 6а) на поверхности образца четко видны однонаправленные следы обработки, имеющие значительную глубину, в то время как на поверхности, полученной с применением циркуляционного движения образца (рис. 6б), они отсутствуют, а ее топография характеризуется значительно меньшей высотой микронеровностей. Положительное влияние циркуляционного движения образца на повышение качества его распиленной поверхности связано с осо-

бенностями кинематики относительного движения боковой поверхности диска с пропиленными участками поверхности образца. Так, при обработке в обычных условиях вектор скорости их относительного скольжения имеет постоянное направление и величину, в то время как за период циркуляционного движения образца он изменяется как по направлению, так и по величине. В результате силы трения, действующие в зоне скользящего контакта поверхностей, также периодически изменяют свое направление, что отражается на условиях изнашивания пропиленных участков поверхности образца. В частности, наличие вертикальной составляющей скорости относительного скольжения поверхностей и соответствующей ей силы трения обеспечивает условия неповторяемости следов обработки на пропиленной поверхности образца, а также способствует сглаживанию (затиранию) на ней микронеровностей. В совокупности отмеченные особенности контактного взаимодействия трущихся поверхностей обеспечивают более высокое, чем при обработке в обычных условиях, качество распиленной поверхности образца. Причем степень положительного влияния циркуляционного движения образца на качество его распиленной поверхности возрастает с увеличением вертикальной составляющей скорости ее скольжения относительно поверхности диска. На практике это достигается увеличением угла λ (рис. 2б), а соответственно отношения малой $2b$ и большой $2a$ осей эллипса за счет повышения частоты вынужденных колебаний, сообщаемых узлу подвеса стрелы.

ВЫВОДЫ

1. С использованием основных узлов промышленной распиловочной секции создана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять процесс распиливания как по традиционной технологии, так и при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения, совершаемого ею в плоскости распиливания по траектории, близкой к эллиптической.
2. Разработана методика проведения сравнительных экспериментальных исследований по распиливанию образцов из стекла, нефрита

и яшмы как в традиционных условиях выполнения операции, так и при сообщении узлу подвеса стрелы вынужденных колебаний, обеспечивающих циркуляционное движение образца, позволяющая количественно оценивать интенсивность его распиливания и качество обработанной на нем поверхности.

3. На основании обобщенного анализа полученных экспериментальных данных установлено следующее.

3.1. С повышением частоты вынужденных колебаний (от 1,8 до 4,0 Гц), сообщаемых узлу подвеса стрелы, интенсивность распиливания образцов по сравнению с обработкой в обычных условиях возрастает. При этом степень влияния колебаний на повышение интенсивности распиливания образцов увеличивается с повышением их твердости. Так, для стеклянного образца (твердость по шкале Мооса 4) отношение интенсивности его распиливания с применением колебаний частотой 4 Гц и в обычных условия обработки составило 1,21, для нефрита (твердость 6) – 1,34 и для яшмы (твердость 7,5) – 2,16.

3.2. Применение в процессе обработки вынужденных колебаний позволяет существенно повысить качество распиленной поверхности образцов. Так, в результате их действия значение шероховатости Ra распиленной поверхности образцов снизилось по сравнению с обработкой в обычных условиях для стекла в 1,61, для нефрита – в 3,7 и для яшмы – 3,25 раза. Отсюда следует, что с увеличением твердости обрабатываемого материала степень влияния колебаний на повышение качества распиленной поверхности образцов возрастает.

4. Интенсифицирующее воздействие циркуляционного движения образца на процесс распиливания в первую очередь связано с изменениями динамических условий его взаимодействия с режущей кромкой диска. В отличие от традиционного распиливания, когда процесс протекает в условиях статического прижатия контактирующих поверхностей, при сообщении образцу циркуляционного движения по эллиптической траектории имеет место их периодическое ударно-фрикционное взаимодействие. Поэтому протекание процесса хрупкого разрушения материала образца характеризуется наличием более разветвленной сети микротре-

щин, образующихся в поверхностном (предразрушенном) слое материала образца, а также его большей, в сравнении с традиционным распиливанием, глубиной. В результате объем удаленного с поверхности образца материала за время периода его циркуляционного движения оказывается больше, чем за то же время при обработке в обычных условиях. При этом средний размер удаляемых частиц материала оказывается в 1,7–1,8 раза меньше, чем при обработке в обычных условиях, что служит косвенным подтверждением сделанных выше положений, касающихся формирования структуры поверхностного слоя в условиях его ударно-фрикционного взаимодействия с режущей кромкой диска.

5. Положительное влияние циркуляционного движения образца на повышение качества его распиленной поверхности связано с особенностями кинематики относительного движения боковой поверхности диска с пропиленными участками поверхности образца. Так, если при обработке в обычных условиях вектор скорости их относительного скольжения имеет постоянные направление и величину, то за период циркуляционного движения образца он изменяется как по направлению, так и по величине. Поэтому силы трения, действующие в зоне скользящего контакта поверхностей, также периодически изменяют свое направление, что отражается на условиях изнашивания пропиленных участков поверхности образца. В частности, наличие вертикальной составляющей скорости относительного скольжения поверхностей и соответствующей ей силы трения обеспечивают условия неповторяемости следов обработки на пропиленной поверхности образца, а также способствуют сглаживанию (затиранию) на ней микронеровностей, что в совокупности обеспечивает более высокое, чем при обработке в обычных условиях, качество распиленной поверхности образца. При этом степень положительного влияния циркуляционного движения образца на качество его распиленной поверхности возрастает с увеличением вертикальной составляющей скорости ее скольжения относительно боковой поверхности диска, что достигается путем повышения частоты колебаний, сообщаемых узлу подвеса стрелы.

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. **Быховский, Н. Н.** Основы теории вибрационной техники / Н. Н. Быховский. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
3. **Дроздов, А. В.** Повышение производительности и качества распиливания сверхтвердых кристаллов путем сообщения заготовке вынужденных колебаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Дроздов. – Минск, 2005. – 21 с.
4. **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 // Вестник БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.
5. **Киселев, М. Г.** Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 3–9.
6. **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. – Т. 18, № 1. – С. 78–85.
7. **Киселев, М. Г.** Влияние сообщаемого заготовке двухмерного колебательного движения на силовые и временные параметры ее контактного взаимодействия с распиловочным диском / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 19–25.
8. **Киселев, М. Г.** Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на повышение производительности процесса механического распиливания монокристаллов сверхтвердых материалов / М. Г. Киселев, Г. А. Галенюк, А. В. Дроздов // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2004. – № 2. – С. 55–59.
9. **Киселев, М. Г.** Обоснование возможности обеспечения циркуляционного колебания заготовки в процессе ее механического распиливания / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Междунар. симпозиум «Перспективные материалы и технологии: сб. статей, 24–26 мая 2011 г., Витебск, Беларусь / УО «ВГТУ». – Витебск, 2011. – С. 41–43.
10. **Киселев, М. Г.** Методики определения пространственно-временных параметров контактного взаимодействия колеблющейся заготовки с распиловочным диском / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 26–29.

REFERENCES

1. **Epifanov, V. I., Lesina, A. Ya., & Zykov, L. V.** (1987) *Technology of Rough Diamond Processing in Polished Diamonds*. Moscow, Higher School (in Russian).
2. **Bykhovsky, N. N.** (1968) *Theoretical Principles of Vibration Engineering*. Moscow, Mechanical Engineering (in Russian).
3. **Drozdov, A. V.** *Povyshenie Proizvoditel'nosti i Kachestva Raspilivaniia Sverkhkhtverdykh Kristallov Putem Soobshcheniia Zagotovke Vynuzhdennykh Kolebaniia. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Increase in Productivity and Quality of Superhard Crystal Sawing by Transmitting Induced Oscillations to a Blank. Author's Abstract for a Science Degree of Candidate of Engineering Sciences]. Minsk, 2005 (in Russian).
4. **Kiselev, M. G., Drozdov, A. V., & Yamnaya, D. A.** (2011) Increase in Intensity and Quality of Hard and Super-Hard Materials by Transmitting a Two-Dimensional Circulatory Motion to a Blank. *Vestnik BNTU [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, 5, 36–40 (in Russian).
5. **Kiselev, M. G., Drozdov, A. V., & Yamnaya, D. A.** (2011) Unit for Diamond Mono-Crystal Sawing by Transmitting a Periodical Circulatory Motion to a Blank. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P. O. Sukhogo* [Bulletin of P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel], 2, 3–9 (in Russian).
6. **Kiselev, M. G., Drozdov, A. V., & Yamnaya, D. A.** (2013) Influence of Excitation Conditions of Sawing Section Boom on Parameters of Blank Oscillatory Motion. *Materialy, Tekhnologii, Instrument* [Materials, Technologies, Tools], 18 (1), 78–85 (in Russian).
7. **Kiselev, M. G., Drozdov, A. V., & Yamnaya, D. A.** (2014) Influence of Two-Dimensional Oscillatory Motion Transmitted to a Blank on Power and Time Parameters of its Contact Interaction with a Sawing Disk. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 1, 19–25 (in Russian).
8. **Kiselev, M. G., Galeniouk, G. A., & Drozdov, A. V.** (2004) Theoretical Evaluation of Ultrasound Influence on Increase in Productivity of Mechanical Process for Sawing Mono-Crystals of Super-Hard Materials. *Vesty Akademii Nauk Belarusi. Seriia Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Bulletin of Academy of Sciences of Belarus. Series: Physical and Engineering Sciences], 2, 55–59 (in Russian).
9. **Kiselev, M. G., Drozdov, A. V., & Yamnaya, D. A.** (2011) Substantiation of Possible Blank Circulatory Oscillation in the Process of its Mechanical. *Mezhdunarodnyi Simpozium "Perspektivnye Materialy i Tekhnologii"*, 24–26 maia 2011 g. *Sbornik Statei* [International Symposium "Prospective Materials and Technologies" May, 24–26 2011. Collected Works. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 41–43 (in Russian).
10. **Kiselev, M. G., Drozdov, A. V., & Yamnaya, D. A.** (2012) Methodology for Determination of Spatial and time Parameters of Contact Interaction of Oscillating Blank with Sawing Disk. *Metrologia i Priborostroyenie* [Metrology and Instrumentation], 2, 26–29 (in Russian).

Поступила 14.05.2014