

УДК 62-531.7

## ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕЕ РАСПИЛИВАНИЯ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. Г. КИСЕЛЕВ<sup>+</sup>, А. В. ДРОЗДОВ, Д. А. ЯМНАЯ

УО «Белорусский национальный технический университет», пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Беларусь.

*Представлены результаты экспериментальных исследований по распиливанию образцов из твердых и сверхтвердых материалов с использованием модернизированной секции. По результатам анализа полученных данных определены рациональные режимы циркуляционного распиливания, обеспечивающие повышенные, в сравнении с традиционной обработкой, интенсивность и качество распиливания образцов из твердых и сверхтвердых материалов.*

### 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 ее выполнения, минимально возможная для данной технологической схемы толщина распила, а также высокие геометрическая точность и качество распиленной поверхности штучной заготовки. Последних два требования 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, а также трудоемкости и сложности выполнения данной операции на первом месте стоит операция механического распиливания монокристаллов алмаза. В частности, это обеспечение минимальной толщины распила и высокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов [1].

По сравнению с лазерным разделением монокристаллов алмаза их механическое распиливание обеспечивает более высокий процент выхода годного, особенно при обработке крупных кристаллов. Вместе с тем, ему присущи недостатки, связанные с низкой производительностью процесса и

недостаточно высоким качеством поверхности площадок распиленных полуфабрикатов.

В работах [2–4] показано, что в значительной степени указанные недостатки можно устранить за счет сообщения заготовке в процессе обработки двухмерного периодического циркуляционного движения, совершаемого в плоскости распиливания. Так теоретически обосновано, что в этом случае взаимодействие заготовки с режущей поверхностью распиловочного диска протекает в условиях периодического ударно-фрикционного взаимодействия, в результате чего интенсифицируется процесс разрушения материала заготовки, при этом степень влияния двухмерного движения заготовки на процесс распиливания будет определяться параметрами ее эллиптического движения. Их изменение влечет за собой изменение условий ударно-фрикционного взаимодействия заготовки с торцевой (режущей) поверхностью распиловочного диска, в частности, значения нормальной составляющей силы удара при косом соударении, продолжительности их контактного взаимодействия, периода циркуляционного движения заготовки и их соотношения. Экспериментально подтверждению установленных закономерностей влияния указанных параметров на технологические показатели (производительность обработки, качество распиленной поверхности, ширина пропила) посвящены исследования, проводимые в рамках данной работы.

### Методы проведения исследования

Эксперименты по распиливанию образцов проводили с использованием модернизированной

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

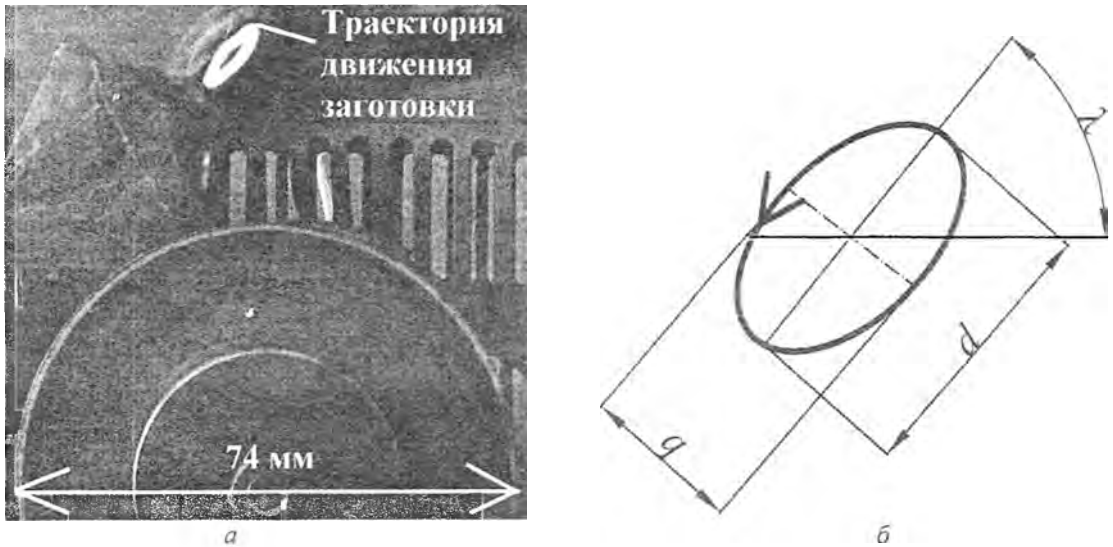


Рис. 1. Циркуляционная траектория движения заготовки: а – фотография траектории; б – схема, поясняющая параметры эллиптической траектории движения заготовки

распиловочной секции мод. ШП-2, подробное описание которой приведено в работе [4]. Она позволяет осуществлять распиливание как в обычных условиях, т.е. с гравитационной подачей заготовки, так и при сообщении ей двухмерного циркуляционного движения, совершаемого в плоскости распиливания, траектория которого имеет форму близкую к эллипсу (рис. 1). Авторами [4] установлено, что за счет изменения условий нагружения и возбуждения колебательной системы распиловочной секции можно целенаправленно влиять на параметры эллиптической траектории движения заготовки, в частности, на значение угла  $\lambda$  между горизонталью и большой осью эллипса  $d$ , а также на ее величину и величину его малой оси  $q$ .

В ходе проведения экспериментов варьировались следующие параметры режима распиливания образцов: величина статического усилия  $P_{ст}$

прижатия образца к режущей кромке отрезного диска; частота  $f$  (период  $T_{ц}$ ) возбуждения колебательной системы;  $Z$  – величина зазора между стрелой с заготовкой и верхним ограничителем. Частота вращения отрезного диска, диаметром 74 мм, была постоянной и составляла  $7000 \text{ мин}^{-1}$ . На кромках его боковых поверхностей был гальванически закреплен алмазный порошок АСН 40/28. Распиливаемые образцы, изготовленные из различных материалов, имели в поперечном сечении форму квадрата со стороной  $S = 5 \text{ мм}$ . Интенсивность распиливания  $i$  определяли отношением площади распиленной поверхности образца ко времени выполнения операции.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 приведены данные, отражающие влияние частоты возбуждения колебательной сис-

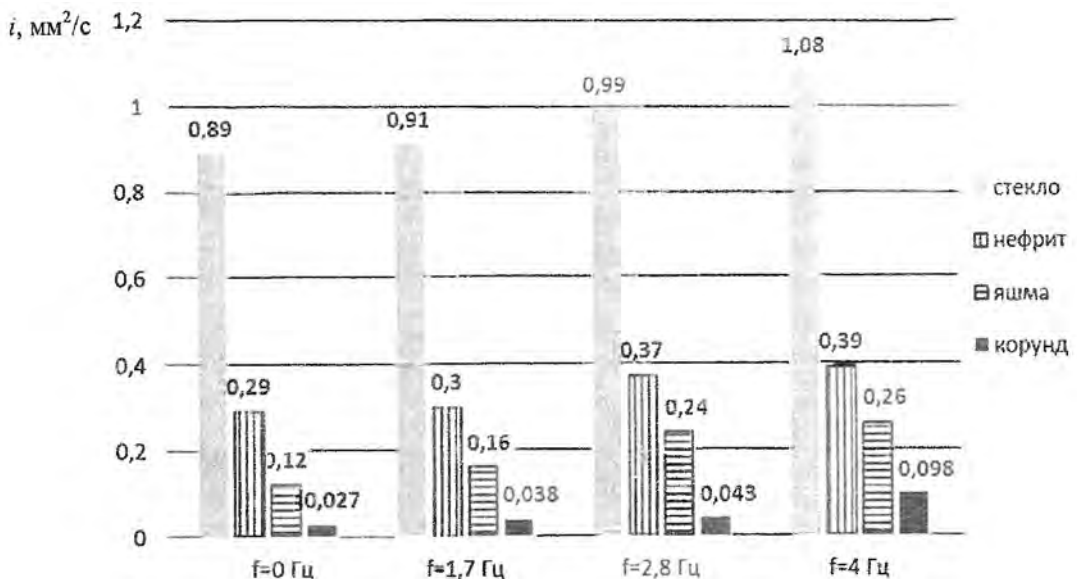


Рис. 2. Диаграмма интенсивности распиливания образцов из различных материалов при обработке в обычных условиях ( $f = 0 \text{ Гц}$ ) при различной частоте возбуждения колебательной системы

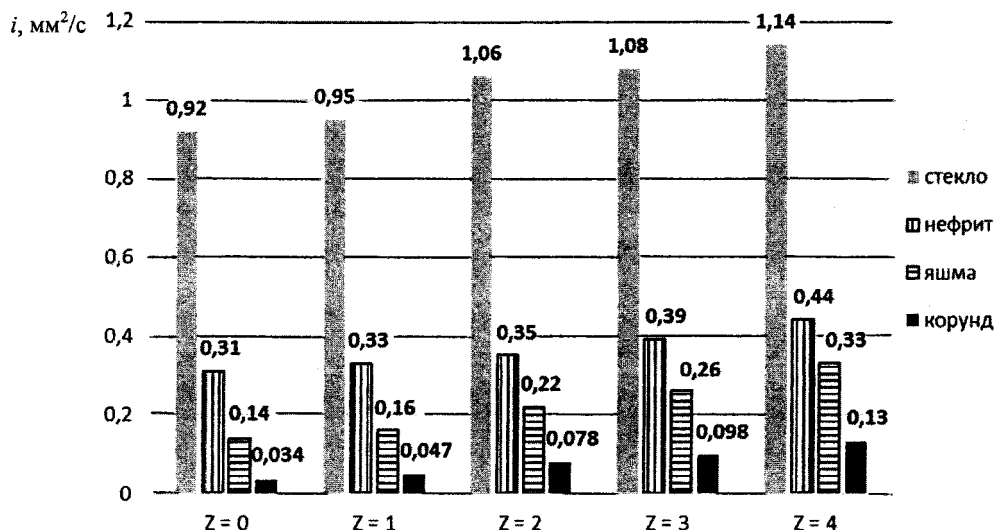


Рис. 3. Диаграмма зависимости интенсивности распиливания образцов из различных материалов от величины зазора между стрелой и верхним ограничителем

темы модернизированной распиловочной секции на значения интенсивности  $i$  распиливания образцов из различных материалов, полученные при  $P_{ст} = 6,5$  Н и  $Z = 3$  мм.

Видно, что во всех случаях увеличение частоты вынужденных колебаний с 0 до 4 Гц повышает интенсивность их распиливания. При этом степень этого повышения возрастает с увеличением твердости образцов. Так, для стекла (твердость 4 по шкале Мооса) отношение интенсивности распиливания с частотой 4 Гц к интенсивности распиливания в обычных условиях составило 1,21; для нефрита (твердость 6) – 1,34; для яшмы (твердость 7,5) – 2,16 и для корунда (твердость 9) – 3,6. Полученные данные позволяют спрогнозировать повышение интенсивности распиливания кристаллов алмаза, имеющих наивысшую твердость (твердость 10) в случае использования предложенной технологии.

Влияние величины зазора между стрелой и верхним ограничителем на интенсивность распиливания образцов отражают данные, приведенные на рис. 3 ( $P_{ст} = 6,5$  Н и  $f = 4$  Гц).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что увеличение зазора от 0 до 4 мм приводит к повышению интенсивности распиливания. Так, в сравнении с традиционным распиливанием при  $Z = 4$  мм, интенсивность обработки стекла возросла в 1,28 раза, образца из нефрита – в 1,52 раза, образца из яшмы – в 2,75 раза и корунда – в 4,81 раза.

На рис. 4 представлены значения интенсивности распиливания стеклянных образцов для различной величины  $P_{ст}$  как в обычных условиях, так и при возбуждении колебательной системы при неизменной величине зазора  $Z = 3$  мм.

Видно, что с увеличением  $P_{ст}$  интенсивность распиливания стекла возрастает как по традиционной технологии, так и при циркуляционном движении. При этом с повышением ее частоты

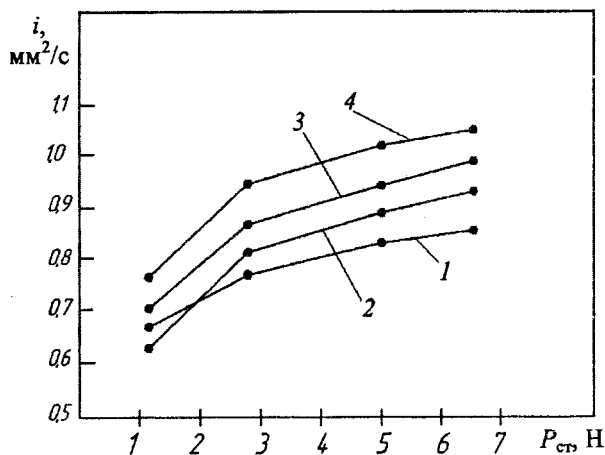


Рис. 4. Изменение интенсивности распиливания стеклянных образцов в зависимости от статической нагрузки: 1 – традиционное распиливание; 2 – распиливание с частотой  $f = 1,7$  Гц; 3 – распиливание с частотой  $f = 2,8$  Гц; 4 – распиливание с частотой  $f = 4$  Гц

возбуждения значение  $i$  увеличивается. Вместе с тем, при частоте возбуждения колебательной системы равной 1,7 Гц и величине  $P_{ст} < 1,5$  Н, значение  $i$  становится ниже чем при традиционной обработке. Аналогичный характер зависимости  $i$  от  $P_{ст}$  сохраняется при распиливании образцов из нефрита, яшмы и корунда.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что сообщение заготовке управляемого циркуляционного движения существенно повышает интенсивность ее распиливания. При этом, расширяются возможности эффективного управления интенсивностью распиливания. Так, кроме статической нагрузки на заготовку, которая является единственной возможностью управления интенсивностью традиционного распиливания, дополнительно можно использовать частоту вынужденных колебаний, а также величину зазора между стрелой и верхним ограничителем.

Для объяснения установленных зависимостей необходимо отметить, что доминирующее влияние на интенсивность хрупкого разрушения распиливаемого материала оказывает величина нормальной составляющей ударного импульса  $I^p$ , возникающего при ударно-фрикционном взаимодействии заготовки с торцевой (режущей) кромкой диска.

Значение  $I^p$  определяется параметрами эллиптической траектории движения заготовки (в частности, углом  $\lambda$  ее наклона к горизонтали). В свою очередь, параметры эллиптической траектории движения заготовки, зависят от режимов возбуждения колебательной системы, в частности, от частоты вынужденных колебаний, величины зазора между стрелой и верхним ограничителем, а также значения статической нагрузки на заготовку. Поэтому для объяснения механизма влияния перечисленных параметров режима обработки на интенсивность распиливания воспользуемся данными, отражающими их влияние на параметры эллиптической траектории движения заготовки из табл. 1.

Таблица 1. Параметры эллиптической траектории движения образца при различной частоте возбуждения колебательной системы ( $P_{ст} = 6,5$  Н и  $Z = 3$  мм)

Частота возбуждения колебательной системы, Гц	Параметры эллиптической траектории движения заготовки				
	$\lambda$ , град	$d$ , мм	$q$ , мм	$q/d$	$T_{ц}$ , с
1,7	5	8	2	0,25	0,58
2,8	17	9	3	0,33	0,36
4,0	42	11	5	0,45	0,25

Видно, что повышение частоты возбуждения колебательной системы сопровождается увеличением угла  $\lambda$  с  $5^\circ$  при  $f = 1,7$  Гц до  $42^\circ$  при  $f = 4$  Гц. Одновременно увеличиваются размеры осей эллиптической траектории, и при этом возрастает отношение  $q/d$  ее малой оси к большой. Так, при  $f = 1,7$  Гц это отношение равно 0,25, а при  $f = 4$  Гц оно возрастает до 0,45. Помимо этого, с повышением частоты возбуждения колебательной системы возрастает количество соударений заготовки и режущего инструмента в единицу времени, что повышает интенсивность распиливания.

Аналогичный характер имеет зависимость параметров эллиптической траектории движения от величины зазора  $Z$ , приведенная в табл. 2.

Таблица 2. Параметры эллиптической траектории движения образца при различной величине зазора между стрелой и верхним ограничителем ( $f = 4$  Гц и  $P_{ст} = 6,5$  Н)

Величина зазора $Z$ , мм	Параметры эллиптической траектории движения заготовки			
	$\lambda$ , град	$d$ , мм	$q$ , мм	$q/d$
0	12	8	2	0,25
1	20	9	3	0,33
2	34	10	4	0,4
3	42	11	5	0,45
4	51	12	6	0,5

Видно, что увеличение  $Z$  от нуля до 4 мм вызывает возрастание как угла  $\lambda$  с  $12^\circ$  до  $51^\circ$ , так и отношения  $q/d$  с 0,25 до 0,5 с одновременным увеличением размера осей эллипса.

Влияние статической нагрузки на образец параметры эллиптической траектории отражено в табл. 3.

Таблица 3. Параметры эллиптической траектории движения образца при различном значении статической нагрузки усилия его прижатия к торцевой поверхности диска ( $f = 4$  Гц и  $Z = 3$  мм)

Величина $P_{ст}$ , Н	Параметры эллиптической траектории движения заготовки			
	$\lambda$ , град	$d$ , мм	$q$ , мм	$q/d$
1,2	9	7	2	0,29
2,8	28	9	3	0,33
5	33	10	4	0,4
6,5	42	11	5	0,45

Видно, что с увеличением  $P_{ст}$  от 1,2 до 6,5 Н угол  $\lambda$  возрастает с  $9^\circ$  до  $42^\circ$ , а также увеличиваются размеры осей эллипса и отношение  $q/d$  с 0,25 до 0,45.

Анализ данных, приведенных в табл. 1–3, а также результатов экспериментов, представленных на рис. 1–3, позволяет сделать заключение о том, что основным фактором, повышающим интенсивность распиливания образцов является угол  $\lambda$  эллиптической траектории движения образца, с увеличением которого интенсифицируется процесс их хрупкого разрушения.

Для объяснения данного положения обратимся к схемам, представленным на рис. 5.

При традиционном распиливании (рис. 5, а) алмазное зерно, закрепленное на торцевой поверхности вращающегося со скоростью  $V_d$  диска, под действием статической нагрузки  $P_{ст}$  прижимается к поверхности пропила заготовки. В результате их силового взаимодействия на поверхности материала формируется предразрушенный слой толщиной  $h$ , зависящий от значения  $P_{ст}$ . Повторное воздействие алмазных зерен на этот слой вызывает скалывание частиц материала заготовки, количество и размер которых определяются характером и глубиной распространения микротрещин в материале. Тогда, за время, равное периоду движения заготовки  $T_{ц}$  при ее циркуляционном распиливании, с ее поверхности будет удален слой материала толщиной  $h$  и протяженностью  $T_{ц} \cdot V_d$ , выделенный черным цветом на рис. 5, а.

При циркуляционном движении заготовки (рис. 5, б) реализуется косое соударение алмазных зерен с поверхностью пропила и предразрушенный слой материала отличается по форме и размерам от слоя, сформированного при традиционном распиливании. Сила ударного взаимодействия заготовки и режущего инструмента существенно превышает значение  $P_{ст}$  и динамически изменяется за время их контакта.

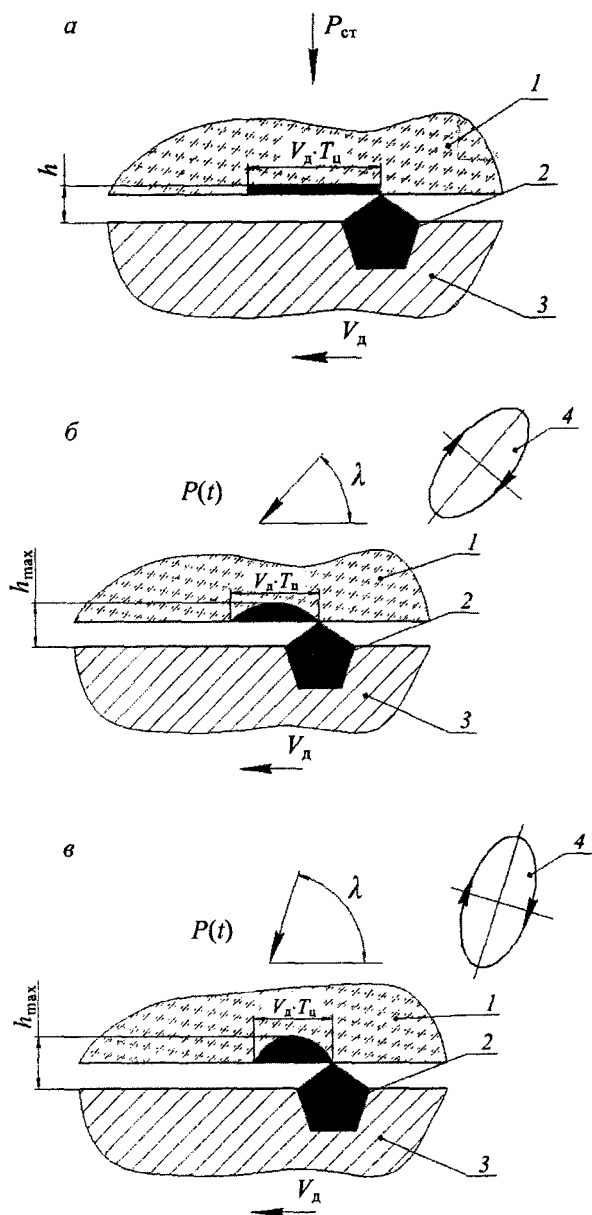


Рис. 5. Схемы, поясняющие влияние параметров циркуляционного движения заготовки на условия протекания процесса хрупкого разрушения ее материала в процессе распиливания

В результате толщина предразрушенного слоя оказывается переменной с максимальным значением  $h_{\max}$  и длиной равной произведению времени их контакта  $t_k$  на скорость их относительного перемещения  $V_d$ .

В результате объем предразрушенного слоя на заготовке оказывается больше, чем при традиционном распиливании, а, соответственно, выше интенсивность ее распиливания.

На рис. 5, в показана форма поперечного сечения предразрушенного слоя материала при большем значении угла  $\lambda$  наклона эллиптической траектории движения образца к горизонтали. Как видно в этом случае уменьшение значения  $t_k$  компенсируется увеличением  $h_{\max}$  и объем предразрушенного слоя на заготовке оказывается больше.

Отмеченные положения подтверждаются ви-

зуальными наблюдениями интенсивного выброса из зоны обработки частиц материала при взаимодействии режущего инструмента с заготовкой при циркуляционном распиливании, чего визуально не наблюдается при традиционной обработке. При этом средний размер сколовшихся частиц оказывается меньше, чем при циркуляционном распиливании (табл. 4).

Таблица 4. Средний размер сколовшихся частиц при традиционном и циркуляционном распиливании ( $f = 4$  Гц,  $P_{ст} = 6,5$  Н и  $Z = 3$  мм)

Материал распиливаемого образца	Средний размер частиц разрушенного материала, мкм		
	При обработке в обычных условиях $\epsilon_0$	С использованием циркуляционного движения образца $\epsilon_{ц}$	Отношение $\epsilon_0/\epsilon_{ц}$
Стекло	72	43	1,67
Нефрит	56	31	1,81
Яшма	44	23	1,91
Корунд	33	15	2,2

Из табл. 4 видно, что обработка более твердого материала образца как в обычных условиях, так и при циркуляционном движении снижает средний размер сколовшихся частиц, а влияние ударно-фрикционного режима распиливания на снижение размера частиц возрастает. Так, отношение  $\epsilon_0/\epsilon_{ц}$  составило 1,67 для стекла, для нефрита – 1,81, для яшмы – 1,91, для корунда – 2,2. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что в результате ударно-фрикционного взаимодействия возрастает не только глубина предразрушенного слоя материала заготовки, но и степень его повреждения, что приводит к уменьшению размера отделившихся от него частиц.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований установлено, что придание заготовке управляемого циркуляционного движения при распиливании повышает в сравнении с традиционной обработкой интенсивность распиливания. При этом с повышением твердости обрабатываемого материала степень влияния такого способа распиливания заготовки на увеличение этого технологического показателя возрастает. Показано, что это вызвано увеличением как глубины предразрушенного слоя материала, так и степени его повреждения. Установлено, что основное влияние на интенсивность распиливания оказывает рост угла  $\lambda$  наклона большой оси эллиптической траектории к горизонтали, регулируемой за счет  $f$ ,  $Z$  и  $P_{ст}$ .

Для оценки влияния сообщаемого заготовке циркуляционного движения на ширину получаемого на ней распила, оказывающего непосредственное влияние на уровень безвозвратных потерь сырья при распиливании, была выполнена серия экспериментов, в которых алмазным отрезным диском с шириной режущей кромки 0,25 мм производилось распиливание стеклянных заготовок,

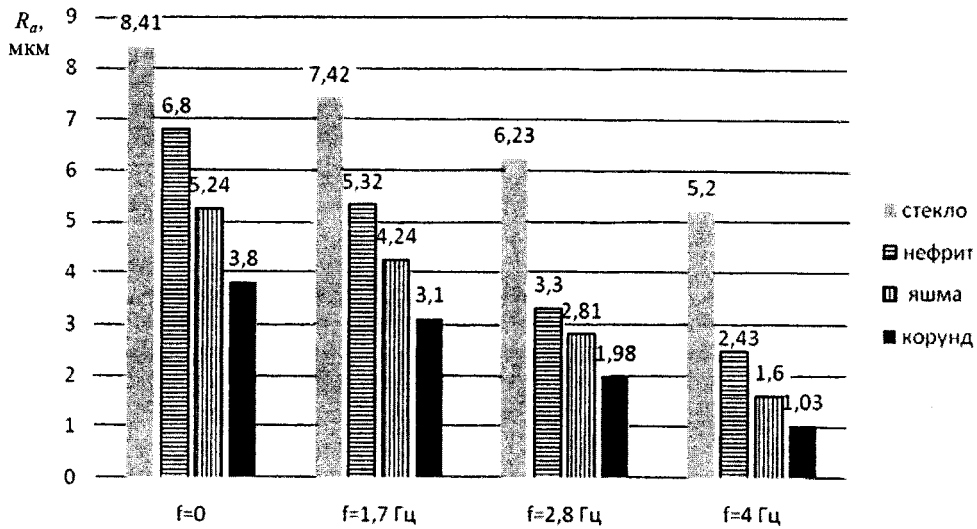


Рис. 6. Значения параметра  $R_a$  шероховатости распиленной поверхности образцов при их обработке в обычных условиях и при сообщении колебательной системе стрелы вынужденных колебаний различной частоты ( $P_{ст} = 6,5$  Н и  $Z = 3$  мм)

начиная с ребра до половины их толщины. В одном случае заготовка пропиливалась в обычных условиях ( $P_{ст} = 6,5$  Н), а в других – с возбуждением колебательной системы с частотой 2 и 4 Гц при  $P_{ст} = 6,5$  Н и  $Z = 3$  мм. Затем с помощью микроскопа МИМ-1 измерялась ширина  $B$  пропилов, полученных на боковой поверхности образца.

В результате установлено, что при частоте возбуждения колебательной системы, равной 2 Гц ширина пропила не отличается от ее значения, соответствующего обычным условиям обработки ( $B_1 = B_2 = 0,43$  мм), а при значении 4 Гц она увеличивается ( $B_3 = 0,45$  мм) на 5–6%. Очевидно, это вызвано высокой интенсивностью виброударного взаимодействия заготовки с режущей кромкой диска, что возбуждает изгибные колебания последнего, вызывающие «разбивание» зоны пропила.

Влияние частоты возбуждения колебательной системы на значение параметра  $R_a$  шероховатости распиленной поверхности образцов отражают данные, представленные на рис. 6.

Видно, что на всех исследованных режимах обработки повышение твердости обрабатываемого материала снижает значение параметра  $R_a$ . При этом сообщение заготовке циркуляционного движения позволяет существенно снизить шероховатость распиленной поверхности. Степень такого влияния возрастает с повышением частоты возбуждения колебательной системы. Так, при  $f = 4$  Гц значение  $R_a$  снизилось по сравнению с традиционной обработкой для стекла в 1,61; для нефрита – в 2,0; для яшмы – в 3,25 и для корунда – в 3,63 раза.

Также на изменение шероховатости распиленной поверхности образцов влияет величина зазора  $Z$  (рис. 7).

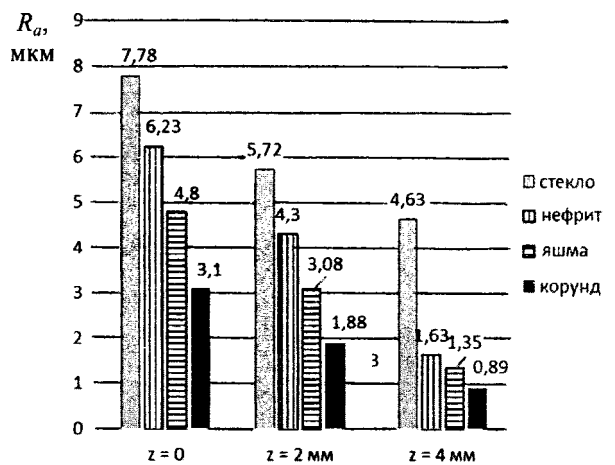


Рис. 7. Зависимость параметра  $R_a$  шероховатости распиленной поверхности образцов от величины зазора между стрелой и верхним ограничителем ( $P_{ст} = 6,5$  Н и  $f = 4$  Гц)

Вместе с тем, в ходе экспериментов при зазоре  $Z = 4$  мм наблюдались сколы на поверхности заготовок в зоне выхода режущего инструмента, что объясняется избыточной при окончании распиливания интенсивностью виброударного взаимодействия заготовки и инструмента. Кроме того, аналогичное явление наблюдалось с увеличением частоты возбуждения колебательной системы более 4 Гц. Поэтому, для предотвращения этого нежелательного явления, необходимо в ходе распиливания с изменением глубины пропила соответствующим образом управлять интенсивностью этого режима.

Влияние статической нагрузки на значение параметра  $R_a$  шероховатости распиленной поверхности приведено на рис. 8.

Как видно, при традиционном распиливании увеличение величины  $P_{ст}$  от 1,2 до 6,5 Н приводит к возрастанию параметра  $R_a$  с 7,22 до 8,41 мкм, а

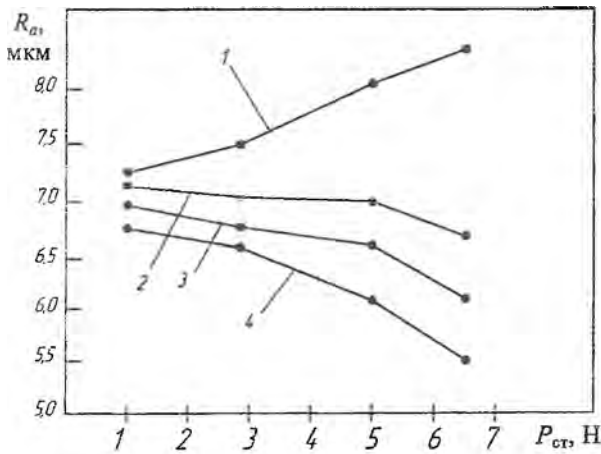


Рис. 8. Зависимость параметра  $R_a$  шероховатости распиленной поверхности стеклянного образца от статического усилия его прижатия к торцевой поверхности диска: 1 – при распиливании в обычных условиях; 2, 3 и 4 – с возбуждением колебательной системы, соответственно, на частоте 1,7, 2,5 и 4 Гц ( $Z = 3$  мм)

при сообщении заготовке циркуляционного движения  $R_a$  снижается с ростом  $P_{ст}$ , оставаясь во всем диапазоне изменения  $P_{ст}$  меньше, чем при распиливании в обычных условиях. При этом повышение частоты возбуждения колебательной

системы вызывает более интенсивное снижение шероховатости распиленной поверхности.

Полученные результаты можно объяснить следующими особенностями протекания процесса формирования на ней окончательного микрорельефа. Так снижение шероховатости распиленной поверхности заготовки при сообщении ей циркуляционного движения связано с наличием ее дополнительного скольжения относительно боковой поверхности диска в вертикальном направлении, т.е. перпендикулярно вектору скорости вращения диска. Это обеспечивает неповторяемость следов обработки на распиливаемой поверхности образца, в результате чего происходит сглаживание (затириание) на ней микронеровностей.

Помимо этого, на повышение качества распиленной поверхности влияет меньший размер скалываемых частиц, что обеспечивает меньшую начальную шероховатость, формируемую в зоне пропила заготовки, сглаживание которой обеспечивается взаимодействием пропиленных участков заготовки с боковыми сторонами режущего инструмента.

Влияние частоты возбуждения колебательной системы на шероховатость распиленной поверхности заготовки можно объяснить увеличением с

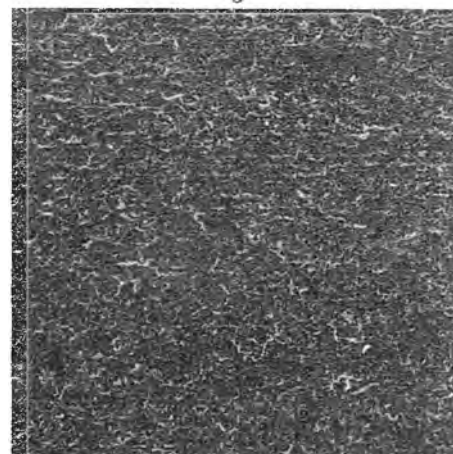
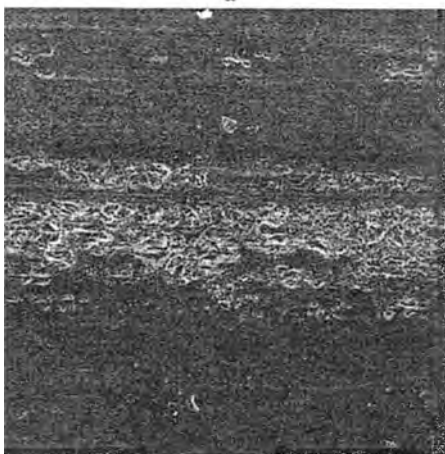
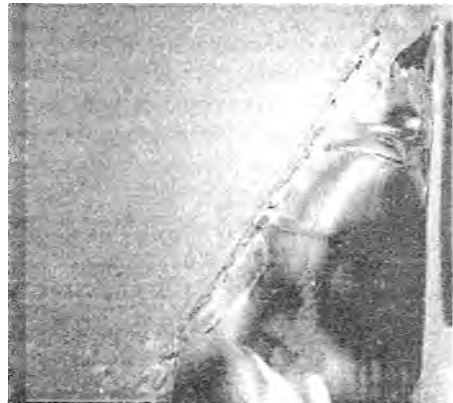
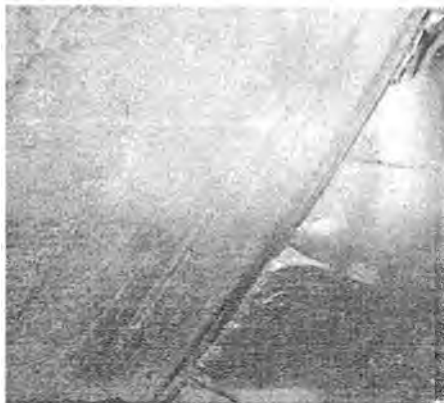


Рис. 9. Фотографии участков распиленной поверхности стеклянной заготовки: а, б – при обработке в обычных условиях; в, г – при возбуждении колебательной системы ( $f = 4$  Гц,  $Z = 3$  мм и  $P_{ст} = 6,5$  Н); а, в – при увеличении  $\times 16$ ; б, г – при увеличении  $\times 200$

ростом  $f$  угла  $\lambda$  и большой оси  $d$  эллипса (табл. 2). Это вызывает увеличение амплитуды колебательных смещений заготовки в вертикальном направлении, что интенсифицирует процесс затирания на ней образовавшихся боковыми сторонами режущего инструмента неровностей, способствуя снижению ее шероховатости.

При неизменном угле  $\lambda$  на шероховатость распиленной поверхности образца влияет отношение малой и большой осей эллиптической траектории движения заготовки, определяющее форму ее циркуляционного движения. С увеличением отношения  $q/d$  возрастает путь относительного скольжения в вертикальном направлении поверхностей заготовки и образца, а соответственно, работа сил трения, затрачиваемая на изнашивание (затирание) поверхности образца, обеспечивая снижение ее шероховатости. Этим объясняется влияние на качество распиленной поверхности образца величины зазора между стрелой и верхним ограничителем, а также значения статической нагрузки на заготовку. Данные особенности наглядно подтверждаются фотографиями поверхности стеклянной заготовки, распиленной в обычных условиях и с возбуждением колебательной системы (рис. 9).

Видно, что при традиционном распиливании на поверхности заготовки заметны однонаправленные следы обработки, а после циркуляционного распиливания (рис. 9, б) топография поверхности заготовки напоминает поверхность, формируемую при тонком шлифовании или притирке свободным абразивом.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что сообщение заготовке управляемого циркуляционного движения позволяет повысить, в сравнении с традиционным распиливанием, качество обработанной поверхности. Показано, что это обеспечивается изменением условий изнашивания распиливаемой поверхности образца с боковыми поверхностями распиловочного диска. Так действие вертикальных колебательных смещений заготовки относительно боковой поверхности диска при ее циркуляционном распиливании, способствует неповторяемости следов обработки и интенсифицирует затирание (сглаживание) неровностей на обрабатываемой поверхности заготовки, которое увеличивается с увеличением отношения  $q/d$ .

## Выводы

Получены экспериментальные зависимости, отражающие влияние параметров режима распиливания (частоты  $f$  возбуждения колебательной системы, величины зазора  $Z$  между стрелой и верхним ограничителем, статического усилия  $P_{ст}$  прижатия образца к диску) образцов из хрупких материалов при сообщении им управляемого циркуляционного движения на выходные показатели

операции, в частности, на интенсивность распиливания, ширину пропила и качество поверхности распиленных поверхностей образцов. На основании их анализа установлено следующее.

1. По сравнению с обработкой в обычных условиях, сообщение образцу циркуляционного движения обеспечивает повышение интенсивности распиливания, степень которого возрастает с увеличением частоты  $f$ , величины зазора  $Z$ , статического усилия  $P_{ст}$  и твердости материала заготовки. Так, для стеклянного образца (твердость 4 по шкале Мооса) отношение значений интенсивности распиливания с возбуждением колебательной системы ( $f = 4$  Гц,  $Z = 3$  мм,  $P_{ст} = 6,5$  Н) и в обычных условиях составило 1,21; для нефрита (6 единиц твердости) – 1,34; для яшмы (твердость 7,5) – 2,16 и для корунда (твердость 9) – 3,6.

2. Сообщение образцу управляемого циркуляционного движения обеспечивает, в сравнении с обработкой в обычных условиях, повышение качества его распиленной поверхности, степень которого возрастает с увеличением частоты  $f$ , величины зазора  $Z$ , статического усилия  $P_{ст}$  и твердости материала заготовок. Значение параметра  $R_a$  шероховатости распиленной поверхности стеклянной заготовки при распиливании с возбуждением колебательной системы ( $f = 4$  Гц,  $Z = 3$  мм,  $P_{ст} = 6,5$  Н) снизилось в 1,61 раза с 8,41 до 5,2 мкм; для образца из нефрита – в 2,09 раза с 6,8 до 2,43 мкм; для образца из яшмы – в 3,25 раза и для корундового образца – в 3,63 раза.

3. При частоте  $f$ , не превышающей 2 Гц, ширина распила на образце не отличается от ее значения, соответствующего обычным условиям обработки, а при больших значениях  $f$  (от 2 до 4 Гц) она увеличивается в пределах 5%.

4. На основании сопоставления полученных зависимостей с данными, отражающими влияние режимов обработки на параметры формируемой эллиптической траектории движения образца, установлено, что уровень выходных показателей операции распиливания зависит от значения угла  $\lambda$  наклона большой оси эллипса к горизонтали, размеров его осей и соотношения их размеров  $q/d$ , которые определяют условия протекания ударно-фрикционного взаимодействия образца с диском. Исходя из этого, проанализированы особенности хрупкого разрушения материала образца и условия формирования микрорельефа на его распиленной поверхности. Показано, что с увеличением угла  $\lambda$  и отношения  $q/d$ , что обеспечивается повышением частоты  $f$ , величины зазора  $Z$  и статической нагрузки  $P_{ст}$ , возрастает значение нормальной составляющей ударного импульса, а также величина размаха вертикальных смещений заготовки относительно боковых поверхностей диска. В результате увеличивается глубина предразрушенного слоя материала образца и степень его повреждения в нем, что в совокупности интенсифицирует процесс его хрупкого разрушения. Од-



новременно активизируется протекание процесса сглаживания (затираания) неровностей на распиленной поверхности образца, обуславливая снижение ее шероховатости.

#### Обозначения

$\lambda$  – угол наклона траектории двумерного циркуляционного движения заготовки к горизонтальной оси, град;  $d$  – величина большей оси двумерного циркуляционного движения заготовки, мм;  $q$  – величина меньшего размаха колебаний заготовки, мм;  $P_{ст}$  – статическое усилие прижатия образца к режущей кромке отрезного диска, Н;  $f$  – частота возбуждения колебательной системы распиловочной секции, Гц;  $T_{ц}$  – период возбуждения колебательной системы распиловочной секции, с;  $Z$  – величина зазора между стрелой с заготовкой и верхним ограничителем, мм;  $S$  – размер квадратного поперечного сечения образцов, мм;  $i$  – интенсивность распиливания образцов, мм<sup>2</sup>/с;  $B_1, B_2, B_3$  – ширины пропилов образцов при различных условиях обработки, мм;  $I^b$  – величина нормальной составляющей ударного импульса при ударно-фрикционном взаимодействии заготовки с торцевой (режущей) кромкой диска, Н·с;  $V_d$  – линейная скорость торцевой поверхности вращающегося распиловочного диска, м/с;  $h$  –

толщина предразрушенного слоя на заготовке, мм;  $h_{max}$  – максимальная толщина предразрушенного слоя на заготовке, мм;  $t_k$  – время контактного взаимодействия обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, с;  $\epsilon_0$  – средний размер частиц разрушенного материала при обработке в обычных условиях, мкм;  $\epsilon_{ц}$  – средний размер частиц разрушенного материала при обработке с использованием циркуляционного движения образца, мкм.

#### Литература

1. Епифанов, В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты: учеб. для сред. 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 двумерного циркуляционного движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестник БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.
3. Киселев, М.Г. Исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с распиловочным диском при сообщении ей двумерного периодического движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестник 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. – Т. 18, № 1. – С. 78–85.

Kiselev M. G., Drozdov A. V., and Yamnaya D. A.

**The effect of circulative motion of a blank on its saving intensity and quality of surface finish.**

Experimental researches of preparations from firm and superfirm materials sawing process with the using of the modernized equipment and an estimation of processed surfaces sawing intensity and qualities are carried out. By results of the received data analysis the rational sawing modes, providing increased sawing intensity and quality in comparison with traditional processing are determined.

*Поступила в редакцию 20.03.2015.*

© М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная, 2015.