

¹Новиков Г.В., ²Новиков Ф.В.¹Научный центр “Эльбор”, г. Харьков, Украина²ХНЭУ им. Семена Кузнеца, г. Харьков, Украина

ПОВЫШЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ГРАНЕЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ХРУСТАЛЯ

Введение

Повышение качества изготовления изделий из хрусталя путем совершенствования технологии нарезания граней на их поверхностях является актуальной задачей, поскольку хрусталь относится к труднообрабатываемым материалам. В настоящее время нарезание граней на изделиях из хрусталя осуществляется алмазным кругом формы 14ЕЕ1 на металлической связке М2-01 с зернистостью алмазного порошка АС6 50...100 мкм. Основным недостатком процесса состоит в быстром износе острия алмазного круга и потере его режущей способности, геометрической формы и размеров (рис. 1). Это приводит к увеличению сил резания и соответственно физических нагрузок рабочего-резчика и его утомляемости, т.к. обработка изделий из хрусталя производится “вручную”. В конечном итоге это вызывает снижение производительности и качества нарезания граней на изделиях из хрусталя. Поэтому проблема обеспечения высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке в процессе нарезания граней на изделиях из хрусталя имеет большое практическое значение.

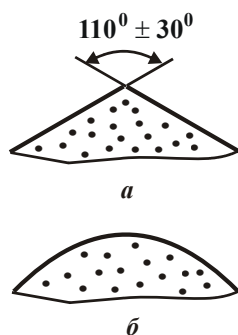


Рисунок 1 – Форма неизношенной (а) и изношенной (б) рабочей части круга

В процессе нарезания граней на изделиях из хрусталя для поддержания высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке и требуемой точности его формы производится периодическая правка круга механическим методом с использованием абразивного бруска [1]. Как показывает практика, такой метод не всегда обеспечивает высокую эффективность. Сложно восстановить требуемый угол при вершине круга, устранить радиальное биение круга непосредственно на рабочем станке, произвести качественное вскрытие алмазного слоя круга (обеспечить значительное выступание алмазных зерен из связки).

Известны подходы к профилированию и правке алмазного круга электроэрозионным методом, основанным на термическом разрушении металлической связки [1, 2]. Однако в стекольной обработке они не нашли широкого применения. Это связано с трудностями организации процесса правки круга непосредственно на рабочем месте, которые состоят в следующем:

1) используется большое количество абразивных брусков диаметром 100 мм и высотой 20 мм (примерно один брусок в смену на каждом рабочем месте);

2) в процессе правки происходит потеря геометрической формы круга, что ведет к снижению качества обработки хрусталя. Поэтому эти круги восстанавливают на специальном станке с использованием абразива (операция очень трудоемкая с большим расходом абразива);

3) алмазные круги зернистостью 125/100 обладают достаточно высокой режущей способностью после абразивной правки, однако это приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности, что требует ее длительного химического полирования и неэффективно. Применение абразивной правки алмазных кругов зернистостью 63/50 требовало большого расхода абразивных брусков и не обеспечивало достаточной режущей способности круга. Это снижало производительность обработки хрусталя, хотя шероховатость обработки хрусталя при этом уменьшалась. Данный вариант обработки также малоэффективен;

4) в результате низкой режущей способности круга на обрабатываемых поверхностях образовывались прижоги и трещины. При последующем химическом полировании стекла кислота проникала в трещины и разрушала материал на достаточно большую глубину. В итоге образовывалась так называемая “паутина” поверхности, для устранения которой требовалось значительное время. Необходимо отметить, что химическому полированию подвергались все изделия, т.к. нарезанные грани хрусталя всегда имеют матовую поверхность, а кислота снимает нарушенный поверхностный слой, обеспечивая прозрачность всей поверхности.

Цель работы – повышение производительности и качества резки хрусталя путем повышения режущей способности алмазных кругов на металлических связках за счет применения их электроэрозионной правки.

Основной материал

Для устранения указанных выше недостатков разработана эффективная технология электроэрозионной правки алмазного круга формы 14EE1 на металлической связке М2-01, используемого для нарезания граней на изделиях из хрусталя на станках САГ [3]. Электроэрозионная правка осуществляется периодически рабочим-резчиком хрусталя непосредственно на каждом рабочем месте без съема круга со станка. Время правки – 5...10 секунд, периодичность – 15...20 мин. Используется простое устройство (правлящий электрод), которое удерживается в руках рабочего [4]. Электрические разряды возбуждаются от специального малогабаритного электроимпульсного генератора, который одновременно может обслуживать 10 станков. В данном случае не требуется проводить сложную модернизацию станка САГ, не требуется высокой квалификации рабочего. Достаточно обеспечить токоподвод от генератора импульсного тока к станку. Результатом правки является качественное вскрытие алмазоносного слоя, что полностью восстанавливает режущую способность круга, обеспечивает требуемую точность формы его режущей части. Это позволяет производить качественное высокопроизводительное нарезание граней на изделиях из хрусталя. Применение электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке позволило полностью отказаться от правки абразивным брусом. Рабочий на станке может устранить биение круга и произвести его более качественную подзаправку. Прямая образующая на пластинах электрода в процессе правки обеспечивает устранение завалов на грани алмазного круга. В результате достигается требуемая геометрия алмазного круга.

Более качественное вскрытие зерен круга позволяет увеличить время между подзаправками до 2-3 раз, а это снижает расход алмазного круга. Повышение качества обработки хрусталя приводит к тому, что после химического полирования нарезанные грани имеют совершенно другой качественно новый вид, свидетельствующий об изготовлении высококачественной продукции. Применение электроэрозионной правки позволяет за счет повышения режущей способности алмазного круга на металлической связке существенно повысить производительность и качество нарезания граней на изделиях из хрусталя, снизить значительные физические нагрузки на рабочего, которые имеют место в процессе “ручного” нарезания граней на изделиях из хрусталя.

Для оценки возможностей технологии обработки хрусталя алмазными кругами после их электроэрозионной правки определены условия повышения производительности шлифования Q на основе аналитической зависимости, приведенной в работе [5]:

$$Q = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot HV}, \quad (1)$$

где P_y – сила прижима обрабатываемого изделия к алмазному кругу, Н; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; HV – твердость (по Виккерсу) обрабатываемого стекла, Н/мм²; η – безразмерный параметр, определяющий степень затупления алмазного круга, 0...1 ($\eta \rightarrow 0$ – для острого круга, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленного круга).

Как видно, повысить производительность обработки Q можно увеличением параметров $P_y, V_{кр}$ и уменьшением $\eta \rightarrow 0$. Возможности увеличения параметров P_y и $V_{кр}$ ограничены характеристиками станка и требованиями по качеству обработки. Безразмерный параметр η может изменяться в широких пределах: 0...1. Следовательно, наибольший эффект достигается от уменьшения безразмерного параметра η . С физической точки зрения η равен отношению величины линейного износа зерна x к максимальной толщине среза H , отсчитывая ее от вершины исходного неизношенного зерна (рис. 2). Тогда $\eta = x / H$, где [5]

$$H = \sqrt[3]{\frac{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}{m \cdot F \cdot HV}}, \quad (2)$$

\bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация зерен круга; F – площадь контакта круга с обрабатываемой деталью, м².

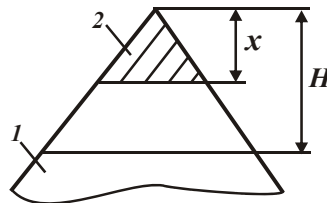


Рисунок 2 – Расчетная схема параметров шлифования: 1 – режущее зерно; 2 – изношенная часть зерна.

С учетом (2) параметр η выразится

$$\eta = x \cdot \sqrt[3]{\frac{m \cdot F \cdot HV}{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}}. \quad (3)$$

Уменьшить параметр η можно уменьшением величины линейного износа зерна x , концентрации круга m , твердости обрабатываемого материала HV и увеличением зернистости круга \bar{X} и давления P_y / F .

Наибольшее влияние на η оказывает величина x . Следовательно, необходимо в процессе шлифования поддерживать высокую остроту круга. С учетом (3) зависимость (1) примет вид:

$$Q = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{кр}}{\pi \cdot HV} \cdot \left(1 - x \cdot \sqrt[3]{\frac{m \cdot F \cdot HV}{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}} \right). \quad (4)$$

С увеличением силы P_y производительность обработки Q увеличивается более чем по линейному закону. Однако этому препятствует увеличение величины x , которое снижает Q . Увеличение величины x обусловлено увеличением силы P_{y1} , действующей на зерно круга [5]:

$$P_{y1} = 0,5 \cdot \pi^3 \sqrt[3]{HV \cdot \left(\frac{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}{m \cdot F} \right)^2}. \quad (5)$$

Следовательно, добиться пропорционального увеличения производительности обработки Q с ростом P_y можно уменьшением или стабилизацией во времени величины x . Для этого необходимо обеспечить периодическое выпадение из связки затупившихся зерен, т.е. режим равномерного во времени износа круга (режим самозатачивания).

Для того чтобы затупившееся зерно выпало из связки круга, необходимо приложить к нему силу P_{y1} , равную силе, удерживающей зерно в связке. В соответствии с зависимостью (5), сила P_{y1} тем больше, чем больше параметры HV , \bar{X} , P_y и меньше m , F . Для заданных значений m , \bar{X} , HV достичь предельное значение P_{y1} можно изменением P_y/F . Для относительно малопрочных связок значения P_{y1} и P_y/F - небольшие. Поэтому самозатачивание круга будет происходить при низкой силовой и тепловой напряженности процесса.

Увеличение твердости (прочности) связки увеличивает предельное значение P_{y1} . Величины силы P_y может быть недостаточно для достижения предельного значения P_{y1} . Тогда, исходя из зависимости (5), необходимо увеличить \bar{X} и уменьшить m . Эффект выше от увеличения зернистости \bar{X} , которая входит в (5) с максимальной степенью. Этим можно объяснить эффективность снижения зернистости в кругах на относительно "мягких" связках. Режим самозатачивания круга требует также выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки. Данное условие предполагает разделение силы P_y условно на две составляющие.

Первая составляющая должна затрачиваться на вдавливание зерен в обрабатываемый материал, вторая – на прижатие обрабатываемого материала и микростружек к связке круга и ее износ со скоростью износа зерен. Для "мягких" связок вторая составляющая силы P_y небольшая. Для твердых связок она существенно выше и не всегда может быть достигнута на практике. В результате круг будет работать в режиме затупления, т.к. скорость износа зерен будет больше скорости износа связки. Обеспечить режим самозатачивания круга можно уменьшением скорости износа зерен, применяя более прочные абразивные или алмазные зерна, увеличивая зернистость и концентрацию круга.

Таким образом показано, что с точки зрения выполнения условия равенства силы резания P_{y1} , действующей на зерно, и силы удержания зерна в связке, необходимо увеличить зернистость круга \bar{X} и уменьшить объемную концентрацию зерен круга m . С точки зрения выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки необходимо увеличивать и зернистость \bar{X} и объемную концентрацию зерен круга m . Учитывая то, что на практике при высокопроизводительной обработке зерна трудно выполнить второе условие, необходимо стремиться к увеличению \bar{X} и m , т.е. применять алмазные круги на прочной металлической связке типа М2-01 зернистостью 100/80 и более и концентрацией 100%. Именно этим обстоятельством можно объяснить то, что при огранке природных алмазов в бриллианты применяют алмазные круги на металлической связке с высокой концентрацией (200% и более), поскольку здесь практически отсутствует контакт обрабатываемого материала со связкой и ее износ, что не обеспечивает режим самозатачивания круга. Для снижения скорости износа зерен и выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки в этом случае в зону обработки часто вводят свободный абразив, что эквивалентно повышению концентрации зерен в круге до 400%. Естественно, изготовить алмазные круги с такой высокой концентрацией зерен методами порошковой металлургии невозможно.

Важнейшим условием выполнения равенства скоростей износа зерен и связки круга является правильный выбор типа связки. В настоящее время создано большое количество различных по составу связок, в том числе металлических, которые обеспечивают режим самозатачивания круга. Это достигается в основном за счет снижения твердости связки, что сопровождается снижением прочности удержания зерен и срока работы круга. Однако при этом увеличиваются режущая способность круга и производительность обработки Q вследствие уменьшения параметров \bar{X} и η – по зависимостям (1) и (4). Уменьшение зернистости круга \bar{X} ведет к снижению ресурса работы зерен в круге. Поэтому с точки зрения уменьшения себестоимости обработки существует оптимальное значение \bar{X} , которое должно обеспечиваться оптимальным сочетанием твердости связки, зерни-

стои и концентрации круга. Если два вышеуказанных условия самозатачивания круга не выполняются, то круг будет работать в режиме затупления и его необходимо периодически править. Для этого эффективно использовать метод электроэрозионной правки, основанный на термическом разрушении металлической связки от действия электрических разрядов. Температура нагрева поверхностных слоев связки в момент действия электрического импульса равна [6]:

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot A}{\rho \cdot c \cdot S \cdot l}, \quad (6)$$

где k – тепловой эквивалент работы; $A = I \cdot U \cdot \tau$ – работа электрического тока, Дж; I – сила тока, А; U – напряжение, В; τ – время действия электрического импульса, с; ρ, c – соответственно плотность и теплоемкость металлической связки; S – фактическая площадь контакта связки круга с правящим электродом, м²; l – толщина межэлектродного зазора, м.

Температура t° тем больше, чем больше A и меньше S и l . В начальный момент правки затупленного круга, когда величина l небольшая ($l \rightarrow 0$), температура t° принимает большие значения, достаточные для термического разрушения. По мере увеличения выступания зерен над связкой, величина l возрастает, а температура t° уменьшается, что при определенных условиях может привести к прекращению процесса электроэрозии. В этом случае необходимо увеличить работу электрического импульса A .

С увеличением прочности (твердости) связки температура t° и работа A увеличиваются. Правка крупнозернистых алмазных кругов в связи с увеличением l требует увеличения работы A .

Зависимость (6) преобразуем к виду

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot N}{\rho \cdot c \cdot Q_{np}}, \quad (7)$$

где $N = I \cdot U$ – мощность электрического тока, Вт; $Q_{np} = S \cdot l / \tau$ – производительность правки, м³/с.

При достижении предельного значения t° производительность правки Q_{np} зависит лишь от мощности электрического тока N . Чем больше N , тем больше Q_{np} . При этом напряжение U определяет толщину межэлектродного зазора l :

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot U^2 \cdot \tau}{\rho \cdot c \cdot \rho_{ом} \cdot l^2}, \quad (8)$$

где $\rho_{ом}$ – удельное сопротивление связки, Ом·мм/м².

Сила тока I определяет фактическую площадь контакта металлической связки с электродом $S_{нл}$:

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot I^2 \cdot \tau \cdot \rho_{ом}}{\rho \cdot c \cdot S_{нл}^2}. \quad (9)$$

В начальный момент правки, когда $l \approx 0$, напряжение небольшое (при достижении предельной температуры). С течением времени толщина зазора l увеличивается, что сопровождается увеличением напряжения U . Следовательно, для обеспечения большего зазора l необходимо использовать высокие значения напряжения U . Это относится к электроэрозионной правке крупнозернистых алмазных кругов, высокопроизводительному черновому шлифованию и т.д.

Сила тока I в начальный момент правки (в связи с небольшой площадью контакта связки с электродом) принимает большое значение (возможно короткое замыкание). По мере съема микронеровностей связки площадь $S_{нл}$ уменьшается, что ведет к снижению силы тока. Следовательно, при первоначальном вскрытии алмазного круга (при большой площади контакта связки с электродом) необходимо использовать источники тока, обеспечивающие высокие значения силы тока.

С увеличением τ , как следует из зависимостей (8) и (9), для достижения предельной температуры t° требуются меньшие значения U и I . Следовательно, недостаток мощности источника тока можно компенсировать увеличением длительности электрического импульса (при использовании электроимпульсных генераторов) или увеличением длины рабочей части электрода (с увеличением времени правки круга сила тока I_p и мощность тока P_p уменьшаются, а напряжение U_p увеличивается). Это связано с уменьшением площади контакта $S_{нл}$, производительности правки Q_{np} и увеличением l в соответствии с приведенными зависимостями.

С увеличением мощности тока P_p производительность правки увеличивается. Как видно, реализация качественной правки требует установления напряжения U до 30 В и более, силы тока I – более 40 А, мощности тока N – более 1 кВт.

Применим теоретические результаты для анализа процесса электроэрозионного шлифования, когда роль правящего электрода выполняет обрабатываемая деталь в процессе шлифования. Тогда зависимости (7), (8) и (9) принимают вид:

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot I \cdot U}{\rho_M \cdot c_M \cdot Q}; \quad (10)$$

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot U^2}{\rho_M \cdot c_M \cdot \rho_{OM} \cdot l \cdot V_{кр}}; \quad (11)$$

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot I^2 \cdot l \cdot \rho_{OM} \cdot V_{кр}}{\rho_M \cdot c_M \cdot Q}, \quad (12)$$

где ρ_M , c_M – соответственно плотность и удельная теплоемкость обрабатываемого материала; Q – производительность процесса шлифования.

При электроэрозионном шлифовании важно своевременно устранить с рабочей поверхности круга продукты обработки, не допуская засаливания круга. Это обеспечивается, прежде всего, термическим разрушением образующихся стружек при достижении предельной температуры t° .

Для увеличения Q мощность тока $N = I \cdot U$ и силу тока I необходимо увеличить ($t^{\circ} = const$). Для увеличения толщины межэлектродного зазора l напряжение U также необходимо увеличить.

При заданных значениях Q и l с увеличением $V_{кр}$ напряжение U увеличивается, сила тока I уменьшается, а мощность N остается постоянной.

Из приведенного анализа можно сделать выводы:

- уровень производительности обработки Q вполне однозначно определяется мощностью тока $N = I \cdot U$;
- для реализации высоких значений Q необходимо увеличить толщину межэлектродного зазора l путем повышения напряжения U ;
- чем больше l при заданном значении Q , тем меньше требуется сила тока I ;
- чем больше скорость круга $V_{кр}$ при заданных значениях l и Q , тем меньше требуется сила тока I и больше напряжение U .

Из приведенных зависимостей следует, что при высокопроизводительном электроэрозионном шлифовании основным электрическим параметром является напряжение U , которое необходимо увеличивать. Учитывая ограничения на величину напряжения U по технике безопасности труда, исходя из (11), необходимо уменьшать $V_{кр}$. Однако это ведет к снижению производительности обработки.

Для эффективной электроэрозионной правки алмазных кругов на прочных металлических связках типа М2-01 мощность тока необходимо существенно увеличивать. При ее ограничении – уменьшать скорость линейного износа зерен путем увеличения их прочности и износостойкости, а также путем увеличения площади рабочей поверхности круга (диаметра и высоты) и количества расположенных на ней зерен. Этим предопределяется эффективность применения крупногабаритных алмазных кругов на металлических связках.

Произведем расчет и анализ шероховатости поверхности при обработке хрусталя. Параметр шероховатости обработки R_{max} при шлифовании алмазным кругом с одинаковыми по размеру зёрнами определяется зависимостью [5]:

$$R_{max} = (1 - \eta) \cdot \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{900 \cdot P_y}{m \cdot HV}}. \quad (13)$$

Чем больше зернистость круга \bar{X} , сила P_y и меньше параметр η , твердость материала HV , концентрация круга m , тем больше R_{max} . Наибольшее влияние на R_{max} оказывают параметры \bar{X} и η , т.е. эффективно управлять шероховатостью обработки за счет изменения характеристик круга.

Алмазные круги изготавливаются с определенными диапазонами зернистости. Учесть разброс геометрических размеров зерен в расчетной зависимости для R_{max} можно путем уменьшения “условной” концентрации круга, умножив параметр m на два коэффициента $K_1 = \frac{R_{max}}{\Delta}$ и K_2 . Здесь Δ - диапазон разброса размера зерен. Первый коэффициент K_1 определяет то, что слой шероховатости обработанной поверхности формируется наиболее выступающими из связки зёрнами, вершины которых удалены от вершины максимально выступающего зерна на расстояние не более R_{max} . Вторым коэффициентом K_2 равен отношению количества зерен, имеющих наибольшие размеры, к количеству зерен, имеющих наименьшие размеры. Как показывает практика, крупных зерен всегда меньше, чем мелких. Поэтому коэффициент K_2 всегда меньше единицы и может быть равным 0,5; 0,3 и менее. С учетом принятых допущений, зависимость (13) преобразуется

$$R_{max} = \sqrt[4]{(1 - \eta)^3 \cdot \bar{X}^3 \cdot \frac{225 \cdot P_y \cdot \Delta}{m \cdot K_2}} \quad \text{или} \quad R_{max} = \sqrt[4]{R_{max}^3} \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta}{K_2}}, \quad (14)$$

где \bar{R}_{max} – параметр шероховатости, определяемый по зависимости (13).

Из зависимости следует, что $R_{max} > \bar{R}_{max}$, т.к. $K_1 < 1$. Например, для зернистости 100/80 параметр $\Delta = 20$ мкм. С учетом $K_2 = 0,3$ множитель $\sqrt[4]{\frac{\Delta}{K_2}} = \sqrt[4]{\frac{20}{0,3}} \approx 3$.

Таким образом показано, что наличие диапазона разброса зернистости Δ ведет к увеличению R_{max} приблизительно в 3 раза. С уменьшением коэффициента K_2 ниже 0,3 (что вполне возможно) параметр шероховатость обработки R_{max} увеличится в большее число раз. Следовательно, алмазные круги необходимо изготавливать с минимально возможным диапазоном разброса зернистостей Δ , уменьшая его до нуля.

Необходимо отметить, что при некачественном просеивании алмазных зерен коэффициент K_2 может быть значительно уменьшен. Достаточно в массу зерен попасть несколькими крупными зернами, чтобы уменьшить коэффициент K_2 до значений 0,1 или 0,01. Параметр шероховатости R_{max} при этом увеличится в 10 и более раз. Улучшить шероховатость обработки в этом случае при шлифовании не удастся. Необходимо вводить новые технологические операции, например, при обработке изделий из хрусталя – операцию химического полирования и производить значительный съем материала для устранения шероховатого слоя.

Существенными факторами, влияющими на параметр шероховатости поверхности R_{max} , являются также наличие неровностей (выступающих участков) на круге и биение круга. Наличие неровностей приводит к значительному выступанию отдельных зерен по отношению к основной массе зерен, что эквивалентно рассмотренному выше случаю, связанному с существованием диапазона зернистости Δ . В результате на обработанной поверхности образуются глубокие отдельные риски-царапины, которые существенно ухудшают шероховатость обработки и не устраняются шлифованием, а устраняются, например, в процессе электрохимического полирования изделий из хрусталя с высокой трудоемкостью.

Как показывает практика, наличие неровностей на круге характерно для прочных металлических связок. Чем прочнее связка, тем труднее добиться однородности поверхности круга.

Применение методов механической правки не позволяет устранить неравномерность поверхности алмазного круга на металлической связке М2-01 в связи с копированием поверхности. Поэтому эффективно применять бесконтактную электроэрозионную правку, устраняющую как неровности связки, так и биение круга, вызывающего волнистость на обработанной поверхности.

Выводы

Разработана технология нарезания граней на изделиях из хрусталя с использованием электроэрозионной правки алмазных кругов формы 14ЕЕ1 на металлической связке М2-01. Электроэрозионная правка круга производится непосредственно на каждом рабочем месте без съема круга со станка. Время правки – 5...10 секунд, периодичность – 15...20 мин. Правка выполняется с помощью специального электрода, который удерживает в руках рабочий. Электрические разряды возбуждаются от малогабаритного электроимпульсного генератора, который одновременно может обслуживать 10 станков. В результате применения электроэрозионной правки обеспечивается качественная подготовка круга к работе: устраняются неровности связки и биение круга, исправляется погрешность геометрической формы круга и повышается его режущая способность. В сочетании с применением алмазных кругов с оптимальными характеристиками, обоснованными выше, это позволяет существенно повысить производительность и качество нарезания граней на изделиях из хрусталя, снизить значительные физические нагрузки на рабочего, которые имеют место в процессе “ручного” нарезания граней на изделиях из хрусталя.

Перечень источников литературы: 1. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Н.К. Беззубенко. – Харьков, 1995. – 56 с. **2.** Чачин В.И. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В.И. Чачин, В.Д. Дорофеев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с. **3.** Новиков Г.В. Обработка алмазными кругами на металлических связках неметаллических материалов / Г.В. Новиков // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: труды 5-й Международной научно-технической конференции, 28-29 мая 2002 г. – Харьков: ХПКП “ФЭД”, 2002. – С. 8-11. **4.** Новиков Г.В. Опыт эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке при обработке натуральных алмазов / Г.В. Новиков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 105-111. **5.** Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. **6.** Новиков Г.В. Обоснование и выбор оптимального электрического режима электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках / Г.В. Новиков // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2005. – Вип. 33. – С. 180-185.