

УДК 62-1/-9

DOI: 10.12737/article_59ae90c6572822.07490267

В.Г. Гусев, д.т.н.,

А.В. Морозов, к.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof_gusev@mail.ru

Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей

Рассмотрена новая область использования лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления для процессов высокочастотной дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов. Разработаны способы высокочастотной дискретизации высоко концентрированными потоками энергии и конструкции дискретных инструментов, позволяющие уменьшить уровень вибрации технологической системы и одновременно сохранить достоинства дискретного шлифования.

Ключевые слова: шлифование; высокочастотная дискретизация; режущая поверхность; лазерный луч; гидроабразивная струя высокого давления; уровень вибрации.

V.G. Gusev, D. Eng.,

A.V. Morozov, Can. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

Discretization technology of abrasive disc operating surfaces with laser and hydro-abrasive jet

The well-known discrete abrasive discs are characterized by a high vibration level of the technological system that causes the geometrical characteristics degradation of surfaces ground, life and technological equipment decrease and tool quick wear. New methods of the high-frequency discretization of a cutting surface with the use of a laser beam and a hydro-abrasive jet and also designs of grinding tools decreasing a vibration level of the technological system are developed.

The processes of the high-frequency discretization of grinding discs are improved experimentally: the path of a high-concentrated energy flow motion is substantiated, the modes of hole cutting out in abrasive of a tool and a field of the application of a laser beam and a high-pressure hydro-abrasive jet are defined.

Keywords: grinding; high-frequency discretization; cutting surface; laser beam; high-pressure hydro-abrasive jet; vibration level.

Известные дискретные шлифовальные круги, выполненные в виде корпуса и абразивных сегментов, расположенных по его периферии, а также цельные круги с периферийными выступами и впадинами [1] наряду с достоинствами (снижение температуры шлифуемой поверхности до 3-х раз, повышение качества поверхностного слоя, производительности до 2-х раз и др.) характеризуются высоким уровнем вибрации технологической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка». Этот существенный недостаток обусловлен ударными импульсами, наносимыми абразивными сегментами (выступами) по обрабатываемой поверхности заготовки, что вызывает ухудшение геометрических характеристик шлифованных поверхностей, снижение долговечности технологического оборудования и

быстрый износ шлифовального инструмента.

Снижения энергии ударных импульсов можно достичь путем уменьшения протяженностей воздушных промежутков между смежными сегментами, однако этот путь неизбежно приводит к повышению тепловой напряженности процесса шлифования, что нивелирует достоинства указанных выше дискретных инструментов. Размещение сегментов и абразивных выступов на малом расстоянии 5... 10 мм приводит к существенному уменьшению площадей, статических характеристик и моментов сопротивления несущих сечений режущих элементов и невозможности использования известных дискретных кругов по причине низкой механической прочности и разрушения их в процессе шлифования.

Создание высокопрочных дискретных

шлифовальных инструментов, обеспечивающих низкий уровень вибрации элементов технологической системы, является научной проблемой, разрешение которой позволит повысить геометрические показатели качества шлифованной поверхности, ресурс работы шлифовального инструмента и долговечность технологического оборудования.

Существующие способы дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов в принципе не могут достичь поставленной цели [2] по указанным выше причинам, поэтому были разработаны новые способы дискретизации [3, 4] и конструкции шлифовальных инструментов [5, 6] с малыми масштабами дискретизации. С этих позиций для реализации процессов высоко частотной дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов проанализирована возможность использования высоко концентрированного потока энергии.

Лазерный луч и гидроабразивная струя высокого давления при обработке абразивного материала находятся вне конкуренции по сравнению с обработкой резанием и традиционным прессованием и могут выполнить дискретизацию малого масштаба. При малой протяженности режущих и прерывающих процесс шлифования участков (5...10 мм) обработка дискретным инструментом характеризуется высокочастотными циклами «резание – отдых», которые принципиально изменяют динамику процесса шлифования и снижают уровень вибрации элементов технологической системы [7].

В процессе дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов использовали технологический волноводный CO₂-лазер ТЛ-1000 с диффузионным охлаждением рабочей смеси. Длина волны лазерного излучения – 10,6 мкм, номинальная мощность – 850 Вт, максимальная мощность – 1000 Вт, частота импульсов излучения – 100...500 Гц, длительность импульса излучения – 1,0...0,2 мкс. При выжигании отверстий измеряли температуру тепловизором модели Therma CAM S65.

Первые опыты по обработке высокочастотной дискретизации шлифовальных кругов путем выжигания лазерным лучом системы радиальных отверстий малого диаметра показали, что в абразивном материале появляются локальные вспучивания, цвета побегалости желто-оранжевой окраски, свидетельствующие о термическом повреждении исходной структуры инструмента.

В соответствии со стандартом, регламенти-

рующим безопасность выполнения шлифовальных операций, круги перед установкой на шпиндель шлифовального станка должны подвергаться испытанию на механическую прочность при 1,5-кратной перегрузке по рабочей частоте вращения. Шлифовальные круги с измененной структурой не выдерживали испытания на механическую прочность и разрывались после непродолжительного вращения (менее 1 мин), что потребовало экспериментальной отработки процесса выжигания отверстий.

Для устранения термического повреждения абразивного материала уменьшали плотность мощности лазерного излучения, отверстия выжигали при большом числе проходов и периодическом прерывании процесса выжигания, однако – все это приводило к снижению производительности процесса дискретизации и увеличению себестоимости шлифовального инструмента. В этой связи для снижения тепловой напряженности выжигание выполняли парами смежных строк с поочередным позиционированием лазерного луча с длинной на короткую строку и обратно, что обеспечило многократное кратковременное остывание абразивного материала. При таком способе выжигание одного отверстия на глубину 25 мм требовало 6 – 7 рабочих проходов лазерного луча и такое же число позиционирований к каждому отверстию.

Экспериментальную отработку процесса дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов проводили также на гидроабразивной установке ALBA 4-1313. Давление рабочей смеси в гидроабразивной установке составляло 5,33 МПа, давление воды в контуре высокого давления $P = 384...432$ МПа. Для вырезания отверстий использовали гранатовый абразив типа GMA Garnet Mesh 80 (размер частиц абразива – 0,178 мм). Расход гранатового абразива $Q_{абр} = 150$ г/мин. Диаметр выходного сопла $d_c = 0,25$ мм, диаметр фокусирующей трубки $d_{ф.т} = 0,76$ мм, длина трубки $L_{ф.т} = 75$ мм.

Отверстия в шлифовальном инструменте вырезали с использованием разработанного способа и спроектированной и изготовленной технологической оснастки (рис. 1) [3].

Оснастка включает плиту 1 и стойку 2, к которой прикреплены держатель 3 и фиксатор 4. В отверстие держателя 3 вставлен вал 5. По периферии делительного диска 6 просверлены радиальные отверстия, окружной шаг которых определяется шагом вырезаемых отверстий. В фиксатор 4 ввернут винт 7. На коническую

ступень вала 5 установлена планшайба 8. Делительный диск 6, планшайба 8 и шлифовальный круг 9 жестко соединены болтами. При повороте диска 6 на один окружной шаг шлифовальный круг 9 поворачивается на окружной шаг вырезаемых отверстий.

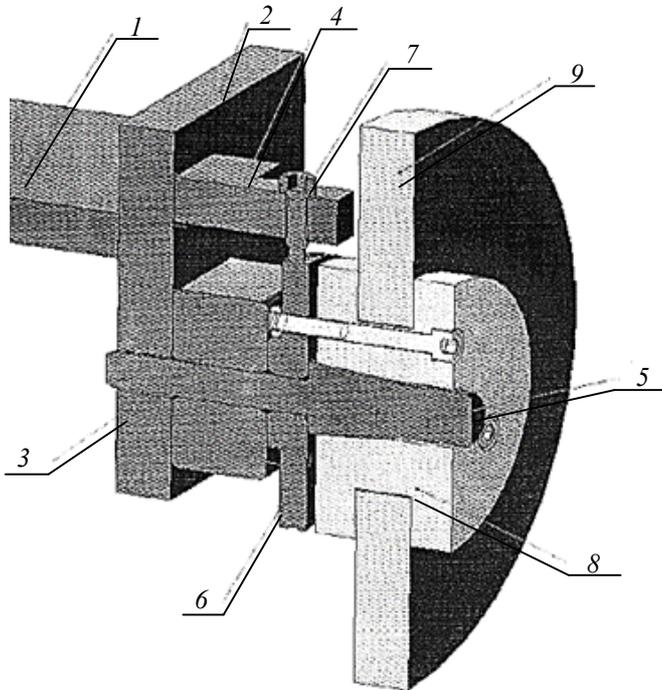


Рис. 1. Экспериментальная установка для высоко частотной дискретизации инструмента гидроабразивной струей высокого давления

Гидроабразивной головкой вырезали последовательно все отверстия одной строки, затем режущую головку перемещали в исходную позицию, а шлифовальный круг 9 поворачивали на центральный угол, соответствующий дуге окружности между соседними строками. Для поворота круга 9 на окружной шаг винт 7 выворачивали из фиксатора 4, освобождая тем самым диск 6. Поворачивали диск 6 вместе с кругом 9 на один окружной шаг, после чего вворачивали винт 7, фиксируя круг 9 в новой угловой позиции для вырезания отверстий по второй строке. Дискретизация инструмента заканчивается после вырезания всех отверстий в круге.

Отверстия, формируемые лазерным лучом в теле шлифовального круга, образуются в результате сублимации абразивных зерен и связки, приводящей к искажению цилиндрической формы отверстий. Погрешности диаметральных размеров и формы в продольном и поперечном сечениях отверстий приводят к неравномерному распределению масс дискретного шлифовального круга и возникнове-

нию главного вектора и главного момента дисбалансов, которые негативно сказываются на снижении геометрической точности шлифованных поверхностей и других важнейших показателях процесса шлифования. Было установлено, что погрешности выжженных отверстий в значительной степени определяются траекторией движения высоко концентрированного потока энергии.

Применение гидроабразивной струи высокого давления исключает термическое повреждение абразивного материала инструмента, так как в процессе дискретизации, кроме свободного абразива, используется вода под высоким давлением, что является эффективным охлаждающим средством зоны обработки. Этот факт позволяет сохранить исходную структуру абразивного материала, избежать появления в шлифовальном инструменте цветов побежалости и вырезать отверстия в направлении одной строки, что исключает многочисленные позиционирования гидроабразивной струи с одной строки отверстий на другую и уменьшает вспомогательное время на дискретизацию инструмента.

На установке гидроабразивной резки ALBA 4-1313 были вырезаны 245 радиальных отверстий диаметром 2,5 мм на режиме: давление воды в контуре высокого давления $P = 240$ МПа; размер частиц абразива – 178 мкм; расход абразива – 150 г/мин; диаметр сопла $d_c = 0,25$ мм; скорость перемещения режущей головки $v_s = 1,0$ м/мин. Время на вырезание 245 отверстий на глубину 25 мм составило 115 мин, а при прожигании тех же отверстий лазерным лучом – 480 мин. Столь большая разница в производительности объясняется необходимостью многократного кратковременного позиционирования лазерного луча во избежание термического повреждения абразивного материала.

При выжигании отверстий малого диаметра (до 1 мм) позиционирования лазерного луча с одной строки на другую не требуется, поскольку удаляется малый объем абразива и отсутствует термическое повреждение инструмента. В этих условиях время на дискретизацию шлифовальных кругов лазерным лучом меньше на 7...9 % по сравнению с вырезанием отверстий гидроабразивной струей высокого давления.

Для выбора траектории движения струи высоко концентрированного потока энергии, обеспечивающей минимальные геометрические погрешности отверстий, исследованы пять альтернативных траекторий струи. При

этом траектория не должна выходить за пределы вырезаемого отверстия.

При первой траектории струя высоко концентрированного потока энергии (лазерного луча или гидроабразивной струи) начинает свое движение из центра формируемого радиального отверстия по спирали и выходит на максимальный радиус. Затем струя зигзагообразными движениями перемещается в диаметрально противоположную точку окружности и заканчивает обработку отверстия движением по окружности, окончательно формируя профиль отверстия. При второй траектории струя движется по концентрическим окружностям, обеспечивая получение требуемого размера отверстия. При третьей траектории струя перемещается по зигзагообразным отрезкам из периферийной точки будущего отверстия в диаметрально противоположную точку, а окончательно отверстие формируется движением струи по окружности.

При четвертой траектории струю выводят в точку 1 (рис. 2, а), (после чего перемещают в точку 2 по отрезкам параллельных прямых, например, *CB*, *AD* и др. Из конечной точки *B* предшествующего отрезка прямой линии (например, *CB*) струя перемещается в начальную точку *A* последующего отрезка *AD*. Из точки 2 высоко концентрированный поток энергии перемещается в точку 3, затем по окружности – на полный угол 360°, завершая формирование вырезаемого отверстия.

Отрезок *BA* наклонен к положительному направлению оси *X* под углом

$$\beta_i = 0,5\pi \pm \arctg\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y_i}\right), \quad (1)$$

где $\Delta X = \text{const}$ – шаг параллельных отрезков прямых линий (рабочих ходов струи), равный диаметру $2r_n$ пятна контакта струи с абразивным материалом; $\Delta Y_i = Y_{i+1} - Y_i$ – текущее приращение ординаты конечной точки отрезков параллельных прямых, приходящееся на шаг ΔX ; Y_{i+1} – значение текущей ординаты конечной точки параллельного отрезка, соответствующее аргументу $X_i = 2(i+1)r_n$; Y_i – текущее значение ординаты, которое определяется путем подстановки значения абсциссы $X_i = 2i \cdot r_n$ в уравнение окружности

$$X_i^2 + Y_i^2 = (r_0 - r_n)^2 \quad (2)$$

и решения уравнения (2) относительно Y_i .

Выполнив указанную процедуру, получим текущее значение ординаты

$$Y_i = \pm \sqrt{r_0^2 - (r_0 - 2r_n)^2 + (1 - 4i^2)r_n^2}, \quad (3)$$

где r_0 – радиус вырезаемого отверстия; r_n – радиус пятна контакта струи с шлифовальным кругом; i – текущий порядковый номер шага ΔX .

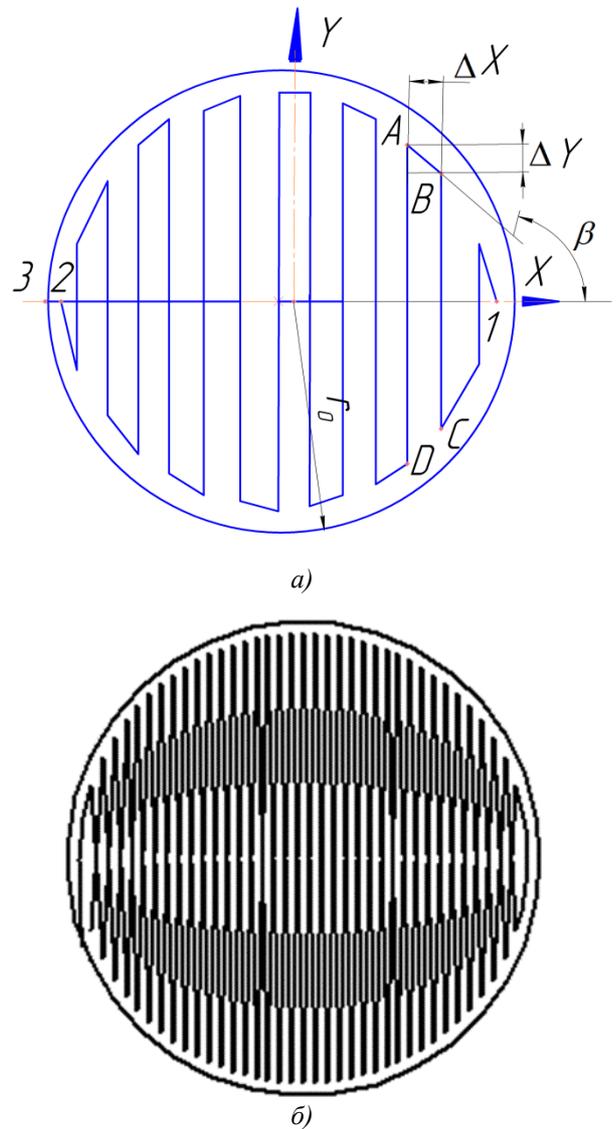


Рис. 2. Четвертая (а) и пятая (б) траектории движения струи высоко концентрированного потока энергии при вырезании отверстия

В интервале положительных значений абсциссы $(r_0 - r_n) \geq x \geq 0$ длина рабочих ходов струи (параллельных отрезков) увеличивается, а в интервале отрицательных значений $0 \geq x \geq -(r_0 - r_n)$ – уменьшается на величину

$$\Delta Y_i = 2 r_n / \text{tg}\beta_i, \quad (4)$$

где β_i – текущий угол наклона отрезка прямой линии, соединяющего конечную и начальную точки предыдущего и последующего параллельных рабочих ходов (параллельных отрезков) соответственно.

Ранее отмечалось, что шаг рабочих ходов струи назначают равным диаметру $2 r_n$ пятна контакта с шлифовальным кругом, при этом длина участка оси абсцисс, на котором размещаются эти шаги, равна $2(r_0 - r_n)$. При шаге рабочих ходов струи, равном $2 r_n$ общее число рабочих ходов, потребных для формирования радиального отверстия (в том числе и заключительного рабочего хода струи по окружности), определяется по формуле

$$n_x = \frac{2(r_0 - r_n)}{2r_n} + 1 = \frac{r_0}{r_n}. \quad (5)$$

Пятая траектория (рис. 2, б) содержит все движения струи четвертой траектории и отличается от последней тем, что после перемещения из точки 1 в точку 2 (рис. 2, а) струя движется по зеркально отраженной траектории параллельных отрезков прямых линий из точки 2 в точку 1.

Описанные траектории струи реализованы на лазерной и гидроабразивной установках. В процессе гидроабразивного вырезания отверстий температура в зоне резания повышалась на единицы градусов, в этой связи температуру контролировали лишь в процессе лазерного выжигания отверстий.

Для оценки каждой из траекторий выбраны критерии: термическое повреждение абразивного материала, точность отверстия и производительность процесса вырезания. Отверстия радиусом $r = 0,90; 1,60$ и $2,65$ мм выжигали лазером в стандартных шлифовальных кругах ПП 250×76×32 25AF46L26V2 ГОСТ P52381-2005, широко используемых при обработке металлов и сплавов. Первая и пятая траектории движения лазерного луча обеспечивают необходимую глубину отверстия и минимальные геометрические погрешности, однако в абразиве появлялись цвета побежалости и локальные вспучивания, что свидетельствовало об изменении исходной структуры под действием высокой температуры.

Выжигание отверстий по второй траектории при подаче лазерного луча $v_s = 500$ и 1000 мм/мин также сопровождалось появлением пятен серовато-коричневатого цвета, которые отчетливо видны у отверстий, приближенных к торцам инструмента. При подаче 1500 и 2000 мм/мин цвета побежалости исчезают, однако выжженное отверстие плохо геометрически сформировано: удален не весь объем абразива, отверстие имеет коническую форму.

Третья траектория выжигания радиальных отверстий не вызывает термического повреж-

дения абразивного материала, но при этом в отверстиях остаётся не полностью выжженный абразивный материал, вследствие чего его удаляли дополнительными проходами, что приводило к снижению производительности процесса дискретизации круга. По четвертой траектории были изготовлены шлифовальные круги на режимах: подача лазерного луча $v_s = 250$ мм/мин, мощность излучения $N = 1$ кВт. При этом установлено, что на точность формы отверстий и температуру в окрестности выжигаемого отверстия влияет не только режим резания, диаметр отверстия, но и число выполненных рабочих ходов.

При выжигании отверстий радиусом $r_0 = 0,9$ мм поочередно в 1-й, 2-й и 3-й строках и увеличении числа рабочих ходов усредненная температура в зоне обработки возрастает. Для отверстий радиусом $r_0 = 0,9$ мм численные значения их окружного и осевого шагов на режущей поверхности круга составляют единицы миллиметров, поэтому к малой площади абразива подводится большая плотность мощности лазерного излучения, что приводит к нагреву абразивного материала до температуры $500...600$ °С. Скорость нарастания температуры по мере увеличения числа рабочих ходов лазерного луча постепенно уменьшается, однако стабилизации температуры не происходит, а в кругу наблюдаются цвета побежалости.

Выжигание отверстий радиусом $r_0 = 0,9$ мм парами смежных параллельных строк позволило сохранить исходную структуру абразива, однако потребовалось выполнять позиционирование лазерного луча между строками. При вырезании отверстий $r_0 = 1,6$ мм парами строк наблюдалось незначительное повышение температуры по сравнению с $r_0 = 0,9$ мм, что также позволило сохранить исходную структуру абразива.

Температура в зоне обработки при выжигании отверстий радиусом $r_0 = 2,65$ мм парами строк выше по сравнению с двумя предшествующими случаями, что обусловлено большим объемом выжигаемого абразива. Однако температура в зоне обработки также не вызывала термического повреждения абразивного материала. На основании многочисленных опытов выжигания отверстий лазерным лучом, измерения температуры и точности отверстий установлено, что наиболее полно ранее выбранным критериям отвечает 4-я траектория движения высоко концентрированного потока энергии. Температура в окрестности отверстия, формируемого гидроабразивной

струей, составляла 24 °С при исходной температуре круга 22,5 °С. Этот факт позволил исключить критерий «Термическое повреждение» при использовании гидроабразивной струи и учитывать лишь точность отверстия и производительность процесса дискретизации.

Вырезание отверстий на гидроабразивной установке в соответствии с первой и второй траекториями приводит к значительным геометрическим погрешностям формы продольного сечения. При давлении 384...432 МПа, диаметре сопла 0,25 мм, подаче гидроабразивной струи 120 мм/мин, расходе абразива 150 г/мин возникает значительное отклонение профиля продольного сечения отверстий. Форма вырезанного отверстия получается параболической, при этом в центре отверстия образуется опережающее углубление.

Последующее выполнение рабочих ходов гидроабразивной струи не приводило к исправлению геометрических погрешностей, образованных на первых проходах. В этой связи от первой и второй траектории струи следует отказаться. Неудовлетворительные результаты по точности отверстия получены также при использовании третьей траектории: в отверстиях остается не удаленный абразив.

Хорошие результаты по точности отверстий обеспечивают четвертая и пятая траектории. После вырезания отверстие имеет отклонение от круглости 0,07 мм для четвертой траектории и 0,05 мм – для пятой, а отклонение профиля продольного сечения – 0,12 мм. Диаметральная точность отверстия, вырезанного по пятой траектории, измеряется сотыми долями миллиметра, но производительность процесса дискретизации существенно ниже, по сравнению с четвертой траекторией.

Количество рабочих ходов при 5-й траектории значительно больше, чем при 4-й, вследствие чего время выполнения процесса дискретизации с использованием 5-й траектории примерно в 2 раза больше, чем при 4-й. По геометрической точности вырезанного отверстия 4-я траектория уступает 5-й, однако различие в точности отверстий для обоих вариантов незначительное и составляет сотые доли миллиметра. Поэтому при использовании лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления более предпочтительной является 4-я траектория.

Дискретный шлифовальный круг с радиусом вырезанных отверстий $r_0 = 0,90$ мм (рис. 3, а) изготовлен с использованием лазерного луча, а с радиусом $r_0 = 1,60$ мм (рис. 3, б) – гидроабразивной струей. Изготовленные шлифо-

вальные круги не имеют термического повреждения, выдержали испытания на механическую прочность, характеризуются требуемой точностью вырезанных отверстий и могут использоваться для высоко производительного дискретного шлифования металлов и сплавов. Для отверстий диаметром более одного миллиметра рекомендуется использовать гидроабразивную струю высокого давления, а диаметром меньше 1 мм – лазерный луч.

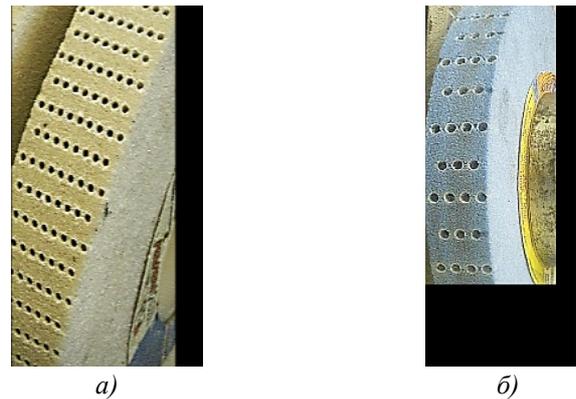


Рис. 3. Дискретная режущая поверхность шлифовального круга, выполненная лазерным лучом (а); гидроабразивной струей высокого давления (б)

Для сравнительной оценки степени снижения уровня вибрации в процессе шлифования заготовок (пластин из легированной стали) известными и разработанными высоко частотными дискретными кругами измеряли уровень вибрации передней опоры шпиндельного узла плоскошлифовального станка 3Г71 виброизмерительным прибором АГАТ. В процессе шлифования использовали дискретные круги ПП 250×76×32 25AF46L6V2A2 ГОСТ P52381-2005, ГОСТ P52587-2006, рабочая частота вращения кругов составляла $n = 2880$ мин⁻¹. Для круга с радиусом вырезанных отверстий $r = 1,6$ мм, число строк отверстий $n_{c1} = 62$; окружной шаг $T_0 = 12,66$ мм; осевой шаг $T_{oc} = 5,6$ мм; угловой шаг $\varphi = 5^{\circ}48'$. Число режущих выступов цельного дискретного шлифовального круга равно $n_{c2} = 8$, окружной шаг $T_0 = 98,1$ мм, отношение протяженности выступа и впадины 1:1.

В процессе шлифования разработанным дискретным инструментом частота внешнего динамического воздействия циклов «резание–отдых» $f_{c1} = nn_{c1}/60 = 2880 \cdot 62/60 = 2976$ Гц, а частота воздействия режущих выступов цельного круга $f_{c2} = nn_{c2}/60 = 384$ Гц. Время одного цикла «резание–отдых» для сравни-

ваемых процессов соответственно составляет: $\tau_{п1} = 3,4 \cdot 10^{-4}$ с (в т.ч. время прерывания процесса резания $\tau_{п1} = 8,6 \cdot 10^{-5}$ с); $\tau_{п2} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ с (время прерывания $\tau_{п2} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ с).

Доминирующую роль в снижении уровня вибрации технологической системы играет время прерывания процесса резания, которое в 15,1 раза меньше для разработанного высоко частотного дискретного шлифовального инструмента. За малое время прерывания процесса резания $\tau_{п1} = 8,6 \cdot 10^{-5}$ с инерционная технологическая система не успевает упруго восстановиться, вследствие чего очередной цикл резания происходит при незначительных энергиях удара инструмента о заготовку, что приводит к снижению динамической активности шпиндельного узла с установленным высоко частотным дискретным шлифовальным кругом.

Результаты измерения уровня вибрации шпиндельного узла показали, что при шлифовании высоко частотным дискретным инструментом уровень вибрации по сравнению с цельным дискретным кругом с выступами и впадинами меньше в 1,3 – 1,7 раза в зависимости от режима резания. Чем выше режим резания (больше глубина резания, продольная и поперечная подача заготовки), тем больше степень снижения уровня вибрации шпиндельного узла с установленным высоко частотным дискретным инструментом.

Таким образом, экспериментальная обработка процессов высоко частотной дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов с использованием высоко концентрированных потоков энергии позволила изготовить инструменты и провести процессы шлифования, подтвердившие высокую эффективность разработанных способов [3, 4] и конструкций дискретных шлифовальных кругов [5, 6] в снижении уровня вибрации шпиндельного узла шлифовального оборудования при одновременном сохранении достоинств дискретного шлифования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, В.Г., Морозов, В. В. Технология плоского дискретного шлифования: учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Гусева. – Владимир: изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 344 с. – ISBN 978-5-89368-825-2.

2. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография [текст] / Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с. – ISBN 978-5-905371-38-7.

3. Пат. № 2520169 РФ, В24D 18/00, В24C 1/00. Способ дискретизации абразивного инструмента // В.Г. Гусев, А.В. Морозов, О.Ю. Метелкин; заявл. 02.11.2012; опубл. 20.04.2014. Бюл. 2010. № 9.

4. Пат. №2589993 РФ, В24D 18/00, В24C 1/00. Способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента // А.В. Морозов, В.Г. Гусев; заявл. 05.12.2014; опубл. 14.06.2016 Бюл. № 19.

5. Пат. № 2385216 РФ, В24D, 7/00. Дискретный шлифовальный инструмент / Гусев В. Г., Морозов А. В., Швагирев П. С.; заявл. 27.02.08; опубл. 2010. Бюл. № 9.

6. Пат. №2582841 Российская Федерация, В24D 18/00, В24C 1/00. Шлифовальный инструмент с дискретной режущей поверхностью // А.В. Морозов, В.Г. Гусев, П.С. Швагирев; заявл. 05.12.2014 Опубл.27.04.2016. Бюл. №12.

7. Морозов, А.В. Технологическая характеристика дискретных шлифовальных кругов и области их применения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». – Курск: ЮЗГУ, 2016. – ЗАО «Университетская книга». – С. 62–64. – ISBN 978-5-9906195-4-8.

REFERENCES

1. Gusev, V.G., Morozov, V.V. *Technology of Flat Discrete Grinding*: Textbook / under the editorship V.G. Gusev, D. Eng., Prof. – Vladimir: Publishing House of Vladimir State University, 2007. – pp. 344. – ISBN 978-5-89368-825-2.

2. Gusev, V.G., Morozov, A.V. *Flat Periphery Grinding with Discrete Discs*: Monograph [text] / Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222. – ISBN 978-5-905371-38-7.

3. Pat. № 2520169 the RF, B24D 18/00, B24C 1/00. *Method of Abrasive Discretization* // V.G. Gusev, A.V. Morozov, O.Yu. Metelkin; applied 02.11.2012; published. 20.04.2014. Bull. 2010. № 9.

4. Pat. №2589993 the RF, B24D 18/00, B24C 1/00. *Discretization Method of Abrasive Cutting Surface* // A.V. Morozov, V.G. Gusev; applied 05.12.2014; published 14.06.2016 Bull. № 19.

5. Pat. № 2385216 the RF, B24D, 7/00. *Discrete Grinding Tool* / Gusev V.G., Morozov A. V., Shvagirev P.S.; applied 27.02.08; published 2010. Bull. № 9.

6. Pat. №2582841 the Russian Federation, B24D 18/00, B24C 1/00. *Grinding Tool with Discrete Cutting Surface* // A.V. Morozov, V.G. Gusev, P.S. Shvagirev; applied 05.12.2014 Published 27.04.2016. Bull. №12.

7. Morozov, A.V. Technological characteristic of discrete grinding discs and fields of their application: *Proceedings of the Inter. Scientif.-Pract. Conf. "Outlooks in Development of Machining Techniques and Equipment in Mechanical Engineering"*. – Kursk: SWSU, 2016. – CC "University Book". – pp. 62–64. – ISBN 978-5-9906195-4-8.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко