

УДК 621.923.1
DOI: 10.12737/23482

А.В. Морозов, к.т.н.
(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87)
E-mail: ntk_2005@rambler.ru

Обоснование дискретизации шлифовальных кругов высококонцентрированными потоками энергии

Приведены результаты исследования уровня вибрации шпиндельного узла в процессе шлифования дискретными кругами, установлено, что для снижения размаха колебаний необходимо проводить дискретизацию режущей поверхности высоко концентрированными потоками энергии. Разработаны способы дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов лазерным излучением и гидроабразивной струей высокого давления, защищенные патентами РФ на изобретение.

Ключевые слова: шлифование; дискретная режущая поверхность; уровень вибрации; шпиндельный узел; сборный дискретный круг; круг с лазерной дискретизацией.

A.V. Morozov, Can. Eng.
(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str, Vladimir, Russia)

Substantiation of abrasive disc discretization with highly concentrated energy flows

The results of the investigation of a spindle assembly vibration level during abrasion with discrete discs are shown. It is established that for oscillations swing decrease it is necessary to carry out a discretization of a cutting face with highly concentrated energy flows. Methods for the discretization of a cutting face in abrasive discs with laser emission and a hydro-abrasive high-pressure jet covered by invention patents of the Russian Federation. It is defined that for the further improvement of discrete abrasion processes it is necessary to reduce the scales of cutting face discretization. And at the same time the role of highly concentrated energy flows from the positions providing small lengths of cutting areas and those interrupting a cutting process grow rapidly as the well-known methods of cut or abrasive segments compressing are unable to ensure sufficient mechanical strength of abrasive discs with small scales of cutting face discretization.

Keywords: abrasion; discrete cutting face; vibration level; spindle assembly; composite discrete disc; disc with laser discretization.

Для шлифования инструментальных сталей, высоко легированных закаленных до высокой твердости подшипниковых сталей, твердых сплавов и других труднообрабатываемых материалов используются цельные шлифовальные круги с чередующимися выступами и впадинами; сборные круги, состоящие из металлического корпуса, по периферии которого расположены абразивные сегменты, а также композиционные, импрегнированные и высокопористые круги [1 – 4]. В последнее время разработаны шлифовальные круги, дискретизация режущей поверхности которых выполнена высоко концентрированными по-

токамаи энергии (лазерным излучением, гидроабразивной струей высокого давления и плазмой).

Шлифование сборными, а также цельнопрессованными кругами с чередующимися выступами и впадинами сопровождается повышенным уровнем вибрации системы «станок–приспособление–инструмент–заготовка», что обусловлено ударными импульсами, наносимыми абразивными выступами на обрабатываемую поверхность заготовки.

Повышенный уровень вибрации сказывается на ухудшении геометрических показателей качества обработанной поверхности и снижении долговечности технологического шлифо-

вального оборудования. Сложилась противоречивая ситуация, когда, с одной стороны, в результате использования дискретных шлифовальных инструментов, обеспечивается существенное снижение температуры в зоне резания и, как следствие этого, повышение физико-механических показателей качества поверхностного слоя, а с другой стороны, снижается геометрическая точность шлифованных поверхностей.

Разрешение сложившейся проблемы снижения шероховатости, волнистости, погрешности формы продольного и поперечного сечений поверхностей, шлифованных дискретными кругами, необходимо проводить при соблюдении основного достоинства процессов дискретного шлифования – существенного снижения тепловой напряженности обрабатываемых заготовок.

Для снижения уровня вибрации технологической системы, как основной причины ухудшения геометрической точности шлифованных поверхностей, необходимо исследовать единичные циклы «резание – отдых» в процессе дискретного шлифования и определить факторы, оказывающие доминирующее влияние на уровень вибрации.

Исследование циклов «резание – отдых» в процессе плоского шлифования периферией круга позволило определить следующие независимые факторы, варьированием которых можно управлять уровнем вибрации шпиндельного узла с установленным дискретным шлифовальным кругом: частота вращения инструмента n , глубина резания t , скорость продольной $v_{спр}$ и поперечной $v_{сп}$ подачи стола с заготовкой, окружная протяженность впадины, а также число абразивных сегментов (выступов) в круге и дисбалансы инструмента.

С увеличением частоты вращения дискретного шлифовального круга амплитуда колебаний шпиндельного узла, вызванная прерывистостью резания, уменьшается, однако, для изменения частоты вращения на существующем шлифовальном оборудовании необходима замена электродвигателя привода главного движения, обеспечивающего большую частоту вращения.

Увеличение скорости резания (частоты вращения) приводит к росту инерционной нагрузки на дискретный шлифовальный инструмент, что вызывает необходимость проведения дополнительных исследований, связанных с обеспечением достаточной механической прочности режущих абразивных сегментов.

Несмотря на проводимую корректировку

масс дискретного шлифовального инструмента перед установкой на станок, в нем остаются дисбалансы в виде главного вектора и главного момента, значения которых определяются точно применяемых средств балансировки. Инерционная центробежная сила, обусловленная дисбалансами инструмента, связана с частотой вращения шлифовального круга, возведенной во вторую степень. В этой связи даже незначительная неуравновешенная масса генерирует большую по величине неуравновешенную центробежную силу, негативно влияющую на вибрационное состояние шпиндельного узла.

Поскольку при увеличении частоты вращения дискретного шлифовального инструмента инерционная нагрузка на него существенно возрастает, то решение проблемы уменьшения уровня вибрации путем управления частотой вращения инструмента целесообразно рассматривать в будущей перспективе, когда будут созданы новые высокопрочные абразивные материалы и шлифовальные круги.

Кроме этого, увеличение частоты вращения инструмента оказывает негативное влияние на качество шлифованной поверхности и долговечность используемого оборудования. Для устранения этого недостатка требуется более высокая точность корректировки масс инструмента, что сопровождается увеличением дополнительных затрат и повышением технологической себестоимости обработанных изделий.

В связи с отмеченным ранее управлять уровнем вибрации технологической системы варьированием частоты вращения шпиндельного узла пока преждевременно по причине значительных затрат на создание высокопрочного инструмента и проведение высокоточной корректировки его масс.

Глубина резания t при выполнении шлифовальных операций задается технологическим процессом, управлять уровнем вибрации технологической системы варьированием этого фактора нецелесообразно, поскольку изменение глубины резания непосредственно отражается на точности заданного размера.

Снизить уровень вибрации при дискретном шлифовании возможно уменьшением продольной $v_{спр}$ и поперечной подачи $v_{сп}$ заготовки, однако это ведет к потере производительности технологического оборудования, что крайне нежелательно.

Увеличение числа абразивных сегментов в дискретном инструменте сопровождается уменьшением их окружного шага, а, следовательно, времени резания и отдыха (прерыва-

ния резания) в единичном цикле. Число сегментов определяется механической прочностью абразивного материала и составляет от 3 до 24, соответственно, для дискретных кругов с диаметром режущей поверхности от 20 до 1200 мм. Вследствие сравнительно небольшого диапазона изменения числа сегментов в дискретном круге, управление вибрационным состоянием технологической системы путем изменения числа сегментов также нежелательно.

Окружная протяженность впадины (длины дуги окружности воздушного промежутка между сегментами) влияет на продолжительность прерывания процесса резания в пределах единичного цикла «резание – отдых», которая определяется по формуле

$$\tau_{np} = \frac{2a}{\omega D} = \frac{2(\pi D - n_1 b)}{\omega D n_1}, \quad (1)$$

где a – длина воздушного промежутка между соседними сегментами; ω – угловая скорость дискретного шлифовального круга; D – диаметр режущей поверхности круга; n_1 – число абразивных сегментов в круге; $b = \frac{\pi D}{n_1} - a$ – протяженность режущей поверхности абразивного сегмента.

Процесс дискретного шлифования сборным инструментом характеризуется поочередным высокочастотным нанесением ударных импульсов на заготовку, после которых следует переходный процесс, сопровождающийся свободными колебаниями элементов технологической системы.

После единичного реза каждым абразивным сегментом происходит упругое восстановление шпиндельного узла с инструментом, при этом, чем больше время отдыха (отсутствия резания), тем с большей кинетической энергией протекает встреча очередного абразивного сегмента с обрабатываемой поверхностью заготовки, т.е. тем более жесткий удар возникает при очередном контактном взаимодействии сегмента и заготовки. Чем больше энергия удара, тем выше уровень вибрации шпиндельного узла с дискретным инструментом.

Анализ цикла «резание – отдых», выполненный с позиций упомянутых факторов, позволяет сделать вывод о том, что уменьшать уровень вибрации шпиндельного узла в процессе дискретного шлифования наиболее целесообразно сокращением времени отдыха, а это возможно лишь при уменьшении масштаба дискретизации режущей поверхности инструмента.

Проанализируем различные дискретные

шлифовальные круги с позиции сформулированного вывода, т.е. с позиции возможности создания малых масштабов дискретизации режущей поверхности инструмента.

Цельные шлифовальные круги с выступами и впадинами, а также сборные дискретные круги характеризуются сравнительно большим масштабом дискретизации, при котором протяженности режущей поверхности абразивного сегмента (выступа) и воздушного промежутка (впадины) между сегментами измеряются десятками миллиметров. Эти дискретные инструменты не позволяют создавать достаточно прочную конструкцию при малых масштабах дискретизации, способную воспринимать внешнюю динамическую нагрузку, поскольку протяженность режущей поверхности сегмента, измеряемая единицами миллиметров, приводит к резкому уменьшению несущих площадей сегментов, а, следовательно, и их механической прочности.

Поскольку упомянутые инструменты не в состоянии обеспечить достаточной механической прочности инструмента при малых протяженностях выступов и впадин, то необходимо разрабатывать новые способы и конструкции дискретных шлифовальных кругов с малыми масштабами дискретизации. Дискретизацию режущей поверхности малых масштабов экономически нецелесообразно, а в некоторых случаях практически невозможно осуществить методами механической лезвийной обработки или формованием на прессовом оборудовании. В этой связи, значимость высоко концентрированных потоков энергии, например, лазерного излучения, гидроабразивной струи высокого давления или плазмы, резко возрастает.

Проведены исследования процессов дискретизации периферийной режущей поверхности шлифовальных кругов с использованием лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления, в результате которых разработаны способы, обеспечивающие изготовление инструментов, с минимально возможными окружными протяженностями режущего участка 3...5 мм, прерывающего участка 1...2 мм. Минимально возможная протяженность окружного шага, соответствующая циклу («резание – отдых»), составляет 4...7 мм. При скорости резания 50 м/с, применяемой в современных шлифовальных станках, минимальное возможное время цикла («резание – отдых») составляет $(0,8...1,4) \cdot 10^{-4}$ с, в т.ч. время резания – $(0,6...1,0) \cdot 10^{-4}$ с, время отдыха – $(0,2...1,0) \cdot 10^{-4}$ с.

Для дискретных шлифовальных кругов с выступами и впадинами, а также сборных кругов при равных габаритных размерах и скорости резания 50 м/с указанные промежутки времени составляют: цикл («резание – отдых») – $(0,8...1,4) \cdot 10^{-3}$ с, время резания – $(0,5...0,8) \cdot 10^{-3}$ с, время отдыха – $(0,3...0,6) \cdot 10^{-3}$ с.

Сокращение времени отдыха в 6 – 15 раз при использовании шлифовального инструмента, подвергнутого дискретизации режущей поверхности высоко концентрированными потоками энергии, позволяет ограничить размах колебаний шпиндельного узла и заготовки, что приведет к снижению общего уровня вибрации системы «станок–приспособление–инструмент–заготовка» со всеми позитивно вытекающими последствиями.

Для проверки выдвинутого научного положения проведены эксперименты, заключающиеся в исследовании уровня вибрации шпиндельного узла и микрогеометрии поверхностей, шлифованных сборными дискретными кругами и кругами с лазерной дискретизацией режущей поверхности диаметра 250 мм.

Плиту пресс-формы обрабатывали на плоскошлифовальном станке мод. 3Г71 с использованием смазочно-охлаждающей жидкости – пятипроцентного водного раствора полусинтетического эмульсола Аквол-11 при расходе 10 л/мин. Шероховатость шлифованной поверхности измеряли на профилометре мод. SJ-201P (Япония). Материал обрабатываемых заготовок – инструментальная легированная закаленная сталь 9ХС ГОСТ 5950–73, 54...59 HRC и инструментальная сталь Х12Ф1 ГОСТ 5950-73 61...63 HRC. В качестве шлифовальных инструментов использовали дискретные сборные круги и круги с лазерной дискретизацией режущей поверхности.

В металлическом корпусе 1 (рис. 1, а) равномерно расположены по окружности абразивные сегменты 2 в количестве 6 шт. Протяженность режущей поверхности сегментов 2 составляет 30 мм, а воздушного промежутка 3 между смежными сегментами – 23 мм, что обеспечивает прерывание процесса резания.

Фрагмент периферийной режущей поверхности шлифовального круга с лазерной дискретизацией представлен в виде длинных 1 и коротких 2 строк выжженных радиальных отверстий, между которыми располагаются сплошные абразивные участки 3 (рис. 1, б). Диаметр выжженных отверстий составляет 2 мм, а протяженность сплошного режущего участка – 7,3 мм, что соответственно в

11,5 раза меньше протяженности воздушного промежутка между абразивными сегментами и в 4,11 раза меньше протяженности режущей поверхности сегментов. Иными словами, сборный шлифовальный круг характеризуется сравнительно большими размерами режущих участков и участков, прерывающих процесс резания, т.е. большим масштабом дискретизации, а инструмент с радиальными отверстиями – малым масштабом.

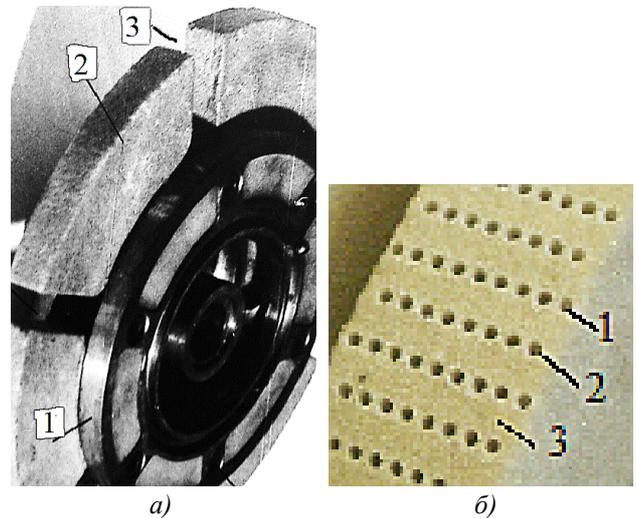


Рис. 1. Шлифовальные круги с различным масштабом дискретизации режущей поверхности: а – сборный круг; б – круг с лазерной дискретизацией

Исследование показало, что размах колебаний шпиндельного узла зависит от конструктивной схемы шлифовального инструмента (числа выжженных отверстий, абразивных сегментов, протяженности режущих и прерывающих процесс резания участков, а также дисбалансов инструмента). При шлифовании неуравновешенным кругом со сплошной режущей поверхностью вибрация шпиндельного узла протекает на сравнительно низкой частоте, определяемой по формуле

$$f_1 = \frac{n}{60}, \quad (2)$$

где n – частота вращения шлифовального круга, мин^{-1} .

Низкочастотная вибрация шпиндельного узла описывается гладкой синусоидой, амплитуда которой не зависит от способа дискретизации режущей поверхности инструмента и определяется значениями главного вектора и главного момента дисбалансов. Уменьшение уровня низкочастотной вибрации, обусловленной дисбалансами, достигается корректировкой масс шлифовального круга и повышением жесткости шпиндельного узла, на котором установлен круг.

Амплитуда низкочастотных колебаний

$A_1 = 8,35$ мкм не изменяется при постоянных значениях главного вектора и главного момента дисбалансов дискретных кругов, несмотря на различное число выжженных отверстий (рис. 2, а – з).

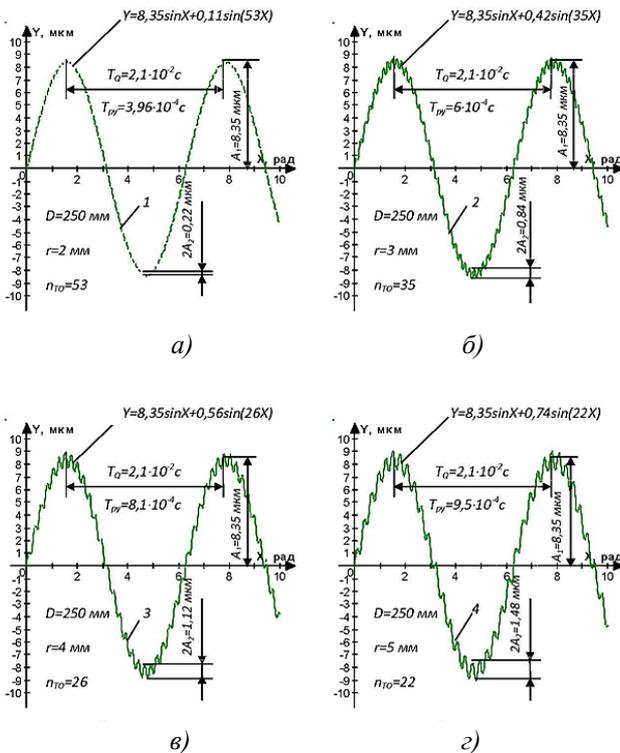


Рис. 2. Изменение уровня высокочастотной вибрации при шлифовании кругом при числе отверстий, выжженных лазерным лучом: а – 53; б – 35; в – 26; з – 22

Колебания шпиндельного узла в процессе шлифования неуравновешенными дискретными кругами описываются гладкой синусоидой, несущей на себе высоко частотную синусоиду, вызванную периодическим прерыванием процесса резания. Частота колебаний, обусловленных прерывистостью процесса резания, определяется по формуле

$$f_2 = \frac{nm_1}{60}, \quad (3)$$

где n_1 – число режущих выступов (сегментов) в дискретном шлифовальном круге.

Размах высокочастотных колебаний шпиндельного узла с установленным дискретным шлифовальным кругом возрастает по мере уменьшения числа отверстий, выжженных лазерным лучом на режущей поверхности. При числе радиальных отверстий $n_0 = 53$ синусоида 1 (см. рис. 2, а) отличается от гладкой синусоиды наличием высокочастотной вибрации с едва заметным размахом $2A_2$. При числе выжженных радиальных отверстий $n_1 = 35; 26; 22$ амплитуда высокочастотной вибрации увеличивается (рис. 2, б – з).

Самый большой размах высокочастотных колебаний $2A_2 = 1,48$ мкм характерен для числа отверстий $n_1 = 22$ а размах колебаний при $n_1 = 35$ и 26 располагается соответственно между значениями при $n_1 = 53$ и $n_1 = 22$.

Аналогичный характер колебаний шпиндельного узла характерен и для процессов шлифования дискретными кругами сборной конструкции. В результате исследования колебаний шпиндельного узла при шлифовании дискретными сборными кругами с числом сегментов (выступов) $n_1 = 8, 12$ и 16 установлено, что при уменьшении числа в инструменте, т.е. увеличении протяженностей режущих участков сегментов и воздушных промежутков уровень вибрации возрастает.

Максимальная амплитуда колебаний характерна для дискретного сборного круга с числом абразивных сегментов $n_1 = 6$. При этом сборный инструмент характеризуется наибольшим масштабом дискретизации режущей поверхности по сравнению со сборными кругами с числом сегментов $n_1 = 8; 12; 16$.

Шероховатость поверхностей (параметр Ra), подвергнутых шлифованию сплошным кругом, кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности и сборным дискретным кругом, зависит от конструктивного оформления инструмента, в частности, от масштабов дискретизации режущей поверхности. В начале шлифования шероховатость поверхности уменьшается для всех трех конструкций кругов, что объясняется их приработкой в процессе резания.

Время приработки сплошного круга составило 8 мин (рис. 3, кривая 1), после этого параметр Ra установился на отметке 0,20 мкм. После 20 мин работы круга на поверхности заготовки появились прижоги, а режущая поверхность шлифовального круга приобрела темные пятна.

После 32 мин работы инструмента площадь прижогов на поверхности заготовки увеличилась, а рабочая поверхность круга приобрела более темный цвет. После 44 мин работы круга на заготовке появились сплошные прижоги по всей поверхности, поэтому процесс шлифования был прекращен.

При шлифовании заготовки кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности время приработки составило 14 мин (рис. 3, кривая 2), после чего шероховатость поверхности установилась на отметке 0,23...0,24 мкм, что на 0,03...0,04 мкм больше по сравнению со сплошным шлифованием.

Время приработки сборного дискретного круга составило примерно 40 мин, а стабили-

зация параметра Ra наступило на уровне 0,45 мкм, что значительно превышает шероховатость поверхностей, шлифованных сплошным кругом и кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности. На поверхностях, шлифованных сборным дискретным кругом и кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности, прижоги отсутствовали в течение всего времени обработки.

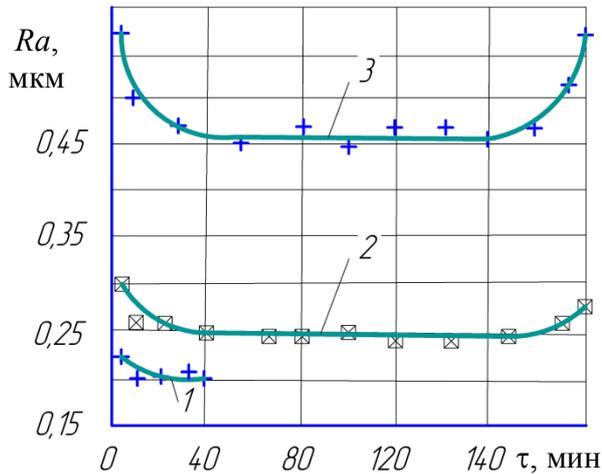


Рис. 3. Влияние времени шлифования на среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, обработанной:

1 – сплошным кругом; 2 – кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности; 3 – сборным кругом

Увеличение шероховатости поверхности, шлифованной сборным дискретным кругом, наступает после 150 мин работы, а круга с лазерной дискретизацией режущей поверхности – после 170 мин. Полученные данные свидетельствуют, во-первых, о значительно большем периоде стойкости дискретных шлифовальных кругов по сравнению со сплошным кругом. Во-вторых, среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, обработанной сплошным кругом, значительно меньше по сравнению со сборным кругом, но по сравнению с кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности эта разница незначительная.

Последнее обстоятельство подтверждает сделанный ранее вывод о возможности улучшения геометрических показателей качества поверхностей, шлифованных инструментом, характеризующимся малым масштабом дискретизации режущей поверхности.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что для дальнейшего совершенствования процессов дискретного шлифования необходимо уменьшать масштабы дискретизации режущей поверхности. При этом роль высококонцентрированных потоков энергии с позиций обеспечения малых протяженностей режущих и прерывающих процесс резания участков резко возрастает, поскольку известные способы вырезания или прессования абразивных сегментов не в состоянии обеспечить достаточную механическую прочность шлифовальных кругов

с малыми масштабами дискретизации режущей поверхности.

В результате практической реализации этого научного положения разработаны новые способы дискретизации режущей поверхности шлифовальных инструментов, защищенные патентами РФ на изобретения [5 – 8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, В.Г., Морозов, В.В. Технология плоского дискретного шлифования: учеб. пособ. / под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Г. Гусева. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 344 с.
2. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с.
3. Степанов, Ю.С., Гусев, В.Г., Афанасьев, Б.И. Дискретное внутреннее шлифование / под общ. ред. Ю.С. Степанова. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 190 с.
4. Прогрессивные инструменты и технологии шлифования: колл. монография / Д.В. Ардашев, Ю.В. Василенко, В.Г. Гусев и др. Разд. 2. Прогрессивные инструменты современного машиностроения / В.Г. Гусев, А.В. Морозов, П.С. Швагирев; под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 320 с.
5. Пат. РФ 2385216: МПК В24D, 7/00. Дискретный шлифовальный инструмент / В.Г. Гусев, А.В. Морозов, П.С. Швагирев; заявл. 27.02.08; опубл. 2010. Бюл. № 9.
6. Морозов, А.В., Алешин, М.П. Лазерное излучение – прогрессивный способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента: Сб. науч. ст. Международной молодежной научной конференции «40-е Гагаринские чтения». – М.: МАТИ, 2014.
7. Пат. РФ 2520169: МПК 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. №9.
8. Морозов, А.В., Алешин, М.П. Новое направление применения гидроабразивной струи жидкости высокого давления: Сб. науч. ст. Международной молодежной научной конференции «40-е Гагаринские чтения». – М.: МАТИ, 2014.

REFERENCES

1. Gusev, V.G., Morozov, V.V. *Technology of Flat Discrete Abrasion*: textbook / under the editorship of V.G. Gusev, D. Eng., Prof. – Vladimir: Publishing House of Vladimir State University, 2007. – pp. 344.
2. Gusev, V.G., Morozov, A.V. *Flat Peripheral Grinding with Discrete Discs*: monograph. – Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222.
3. Stepanov, Yu.S., Gusev, V.G., Afanasiev, B.I. *Discrete Inner Abrasion* / under the general editorship of Yu.S. Stepanov. – M.: Mechanical Engineering-1, 2004. – pp. 190.
4. Progressive tools and technologies in abrasion: cooperative monograph / D.V. Ardashev, Yu.V. Vasilenko, V.G. Gusev et al. Part 2. *Progressive Tools in Modern Mechanical Engineering* / V.G. Gusev, A.V. Morozov, P.S. Shvagirev; under the editorship of A.V. Kirichek. – M.: "Spectrum" Publishing House, 2013. – pp. 320.
5. Pat. RF 2385216: IPC B24D, 7/00. *Discrete Grinding Tool* / V.G. Gusev, A.V. Morozov, P.S. Shvagirev; applied 27.02.08; published. 2010. Bull. № 9.
6. Morozov, A.V., Alyoshin, M.P. Laser emission – progressive method in cutting face discretization of grinding tool: *Proceedings of the Inter. Youth Scientific Conf. "40-th Gagarin's Readings"*. – M.: MATI, 2014.
7. Pat. RF 2520169: IPC B24D 18/00, B24C 1/00. *Method for Grinding Tool Discretization* // G.G. Gusev, A.V. Morozov, O.Yu. Metelkin; applied 02.11.2012; published 20.04.2014. Bull. №9.
8. Morozov, A.V., Alyoshin, M.P. New direction in hydroabrasive high-pressure fluid jet application: *Proceedings of the Inter. Youth Scientific Conf. "40-th Gagarin's Readings"*. – M.: MATI, 2014.

Рецензент д.т.н. В.А. Кечин