

На правах рукописи



Швагирев Павел Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА  
И ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ТОРЦОВОГО  
ШЛИФОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ  
АБРАЗИВНЫМИ СЕГМЕНТАМИ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО

«Владимирский государственный университет

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Гусев Владимир Григорьевич

Официальные оппоненты: Заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Денисенко Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент  
Михрютин Вадим Владимирович

Ведущая организация: Филиал ФГУ ГКНПЦ  
им. М.В. Хруничева, г. Ковров

Защита состоится в 14<sup>00</sup> часов 21 декабря 2011 года, на заседании диссертационного совета Д 212.025.03 при Владимирском государственном университете по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Владимирского государственного университета.

Автореферат разослан

«14» ноября 2011 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Панфилов А. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Процессы шлифования непрерывно совершенствуются. Разработаны новые абразивные материалы, шлифовальные инструменты, составы и способы подачи смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону резания. Дальнейшее развитие получили дискретные абразивные круги, новые процессы шлифования сборными абразивными кругами, характеризующиеся контактным взаимодействием режущих элементов инструмента и обрабатываемой заготовки одновременно по нескольким площадкам (назовем такой процесс многоточечным шлифованием).

Многоточечное шлифование характеризуется значительно более высокой производительностью по сравнению с широко распространенным одноточечным шлифованием, при котором инструмент взаимодействует с заготовкой лишь по одной площадке. В процессе реализации многоточечного шлифования, вследствие контакта инструмента и заготовки одновременно по нескольким площадкам, возрастает количество источников тепла, что приводит к интенсивному тепловыделению и повышению температуры в зоне резания, вызывающей термические повреждения деталей.

Процесс плоского торцового шлифования известными кругами также является многоточечным, а сегменты инструмента прижаты силой резания к обрабатываемой поверхности, вследствие чего доставка СОЖ в места контакта режущих абразивных зерен и связки с металлом заготовки невозможна. В условиях, когда роль СОЖ практически нивелирована, обеспечение высокого качества поверхностного слоя возможно путем уменьшения режима резания, что неизбежно приводит к значительному снижению производительности процесса обработки.

Таким образом, разработка инструмента и процесса плоского торцового шлифования, обеспечивающего высокие скорости отвода тепла из зоны резания, повышение качества и производительности технологических операций, является актуальной научно-технической задачей.

Работа выполнена при поддержке проекта №11-08-97-542 Российского Фонда Фундаментальных исследований.

**Цель работы** – повышение качества деталей и производительности процесса плоского торцового шлифования путем дискретизации режущей поверхности абразивных сегментов и подвода смазочно-охлаждающей жидкости в плоскость резания.

**Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

- обосновать выбор схемы дискретизации режущей поверхности абразивных сегментов для практической реализации;
- разработать методику расчета дискретных абразивных сегментов, обеспечивающую их высокую механическую прочность;

–разработать процесс формирования дискретных абразивных сегментов и конструкцию торцового шлифовального инструмента;

–разработать методику реализации процесса дискретного плоского торцового шлифования с подводом СОЖ в плоскость резания.

**Методы исследований.** В работе использованы методы сопротивления материалов при расчете абразивных сегментов на механическую прочность. Научные положения теории шлифования материалов, тепловых процессов в технологических системах использованы при анализе степени снижения температуры заготовки путем дискретизации режущей поверхности абразивных сегментов и подачи СОЖ в плоскость резания. Научные положения теории планирования многофакторных экспериментов использованы при исследовании шероховатости поверхностей, шлифованных дискретным торцовым кругом, а математической статистики – в процессе обработки результатов многофакторного эксперимента.

Исследование температуры обрабатываемой поверхности заготовки при дискретном плоском торцовом шлифовании проведено с использованием метода конечно-элементного анализа, реализованного в современном САЕ-комплексе COSMOSWORKS.

Теоретические положения работы получили подтверждение результатами испытаний инструмента и процесса дискретного плоского торцового шлифования в условиях производства.

#### **Автор выносит на защиту:**

–анализ напряженного состояния дискретного абразивного сегмента с продольными каналами, обоснование инерционного способа подачи СОЖ в плоскость резания;

–процесс формирования дискретных абразивных сегментов с каналами;

–конструкцию, аэродинамику дискретного торцового шлифовального инструмента и технические решения по устранению засорения каналов сегментов отходами шлифования;

–аналитические и экспериментальные модели показателей качества и производительности процесса дискретного плоского торцового шлифования и методику его реализации.

#### **Научная новизна работы:**

–установлены закономерности влияния конструктивно-технологических факторов инструмента и процесса дискретного плоского торцового шлифования сегментами с каналами и подводом СОЖ в плоскость резания на показатели качества деталей, скорость съема металла, расход абразива и коэффициент шлифования;

–впервые вскрыт механизм засорения каналов абразивных сегментов отходами шлифования и предложены технические решения по его устранению, защищенные патентами РФ № 2385215, 24171494;

**Практическая значимость и реализация работы.** Предложено производство: конструкция абразивного сегмента с открытыми каналами и конструкция пресс-формы для его формования, процесс формования дискретных абразивных сегментов, конструкция инструмента для дискретного плоского торцового шлифования, обеспечивающая подвод СОЖ в плоскость резания.

Дискретный инструмент и процесс плоского торцового шлифования испытаны и рекомендованы к внедрению в условиях ОАО «Производственное объединение Муромский машиностроительный завод». В условиях Касимовского механического завода № 8 используются чертежи пресс-формы и режим обработки свободным абразивом рабочих поверхностей пуансонов и продольных стержней. Результаты работы используются в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены на Всероссийской научно-технической конференции (НТК) «Теплофизика технологических процессов» (г. Рыбинск: РГАТА, 2005), Всероссийской НТК «Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений» (г. Рыбинск: РГАТА, 2009), Международной НТК «Повышение качества и эффективности производства» (г. Курган: КГУ, 2006), Международной юбилейной НТК «Инструментальные системы машиностроительных производств» (г. Тула, ТулГУ, 2008), III-й Международной научно-практической конференции (г. Невинномысск: Невинномысский институт экономики, управления и права, 2009), Международной НТК «Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении» (г. Курган: КГУ, 2010), научно-техническом семинаре механико-технологического факультета и заседаниях кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 13 научных трудов, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, два патента РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 172 страницах основного текста, содержит 42 рисунка, 3 таблицы и библиографический список из 109 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность решаемой проблемы, поставлена цель исследований, сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения цели; научная новизна, практическая ценность; положения, вынесенные на защиту, апробация работы, основные результаты и выводы по работе.

**Первая глава** посвящена анализу процессов дискретного шлифования металлов и сплавов. Существенный вклад в развитие процессов абразивной обработки и инструмента внесли отечественные и зарубежные ученые: Евсеев Д. Г., Королев А. В., Маслов Е. Н., Резников А. Н., Силин С. С., Старков В. К., Степанов Ю. С., Худобин Л. В., Якимов А. В., Ящерицын П. И., Malkin S., Neugebauer R., Shaw M.C., Yo N.E. и другие.

Проанализированы процессы многоточечного шлифования дискретными кругами, отмечены их положительные стороны и нерешенные задачи. Обоснована актуальность темы работы.

**Во второй главе** обоснованы схема дискретизации режущей поверхности абразивных сегментов торцового шлифовального круга и инерционный способ подачи СОЖ в плоскость резания. Проанализированы три схемы дискретизации сегментов, характеризующиеся выполнением участков прерывания процесса резания в виде: закрытых каналов в сегменте (первая схема), одной открытой полости (вторая схема); открытых каналов, расположенных со стороны установочной плоскости сегментов (третья схема). Третья схема предложена автором.

Разработаны критерии оценки схем: высокая механическая прочность, технологичность сегмента, доставка СОЖ в плоскость резания, экономия абразива, уменьшение температуры заготовки, минимальные затраты на процесс дискретизации.

Первая схема дискретизации (рис. 1, а) обеспечивает высокую механическую прочность сегментов, гарантированную доставку СОЖ в плоскость резания, экономию абразивного материала и безопасную эксплуатацию инструмента. Однако, для нее характерен сложный процесс формования сегмента, большой объем ручных работ, низкая технологичность и высокие затраты на производство сегментов.

Вторая схема дискретизации (рис. 1, б) обеспечивает простоту формования сегмента, высокую технологичность его конструкции, экономию абразива и низкие затраты на производство сегментов. Но она характеризуется низкой механической прочностью сегмента и не обеспечивает гарантированной доставки СОЖ в плоскость резания.

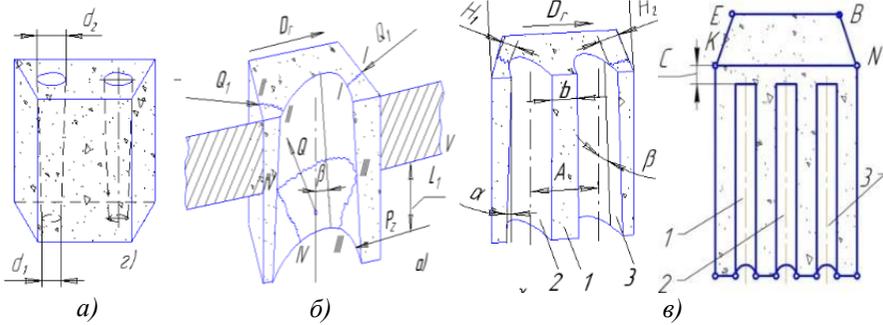


Рис. 1. Схемы дискретизации сегментов:  
а) – первая, б) – вторая, в) – третья.

Проанализируем третью схему дискретизации режущей поверхности абразивного сегмента (рис. 1, в). Наличие открытых каналов в сегменте приводит к смещению центра тяжести трапециевидального поперечного сечения из точки **С** в **С'** (рис. 2, а).

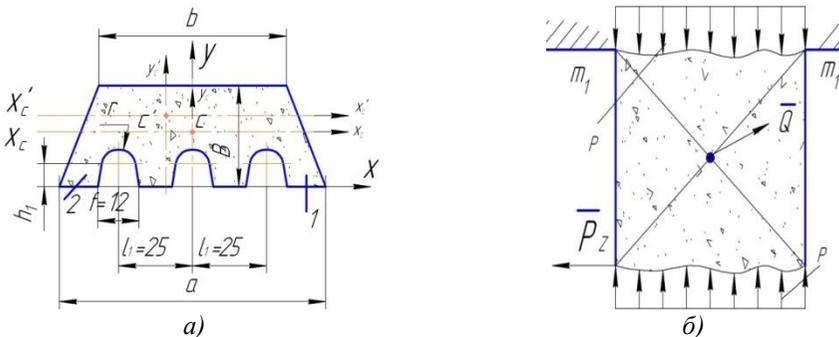


Рис. 2. Поперечное сечение сегмента (а) и его рабочая нагрузка (б).

На сегмент действуют: главная составляющая силы резания  $P_z$ , инерционная центробежная сила  $Q$  и давление  $p$  со стороны заготовки (рис. 2, б). Суммарные напряжения изгиба  $\sigma_\Sigma, \sigma_\Sigma'$  в защемленном сечении  $m_1 - m_1$  соответственно для сплошного и дискретного абразивного сегментов определяются:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{(\sigma_n^{Pz})^2 + (\sigma_n^Q)^2} \mp p; \quad \sigma_\Sigma' = \sqrt{(\sigma_n^{Pz'})^2 + (\sigma_n^{Q'})^2} \mp p, \quad (1)$$

где  $\sigma_n^{Pz}, \sigma_n^Q, \sigma_n^{Pz'}, \sigma_n^{Q'}$  – напряжения изгиба, обусловленные действием главной составляющей  $P_z, P_z'$  силы резания и центробежной силы  $Q, Q'$ . Напряжения изгиба  $\sigma_\Sigma = 4,19$  МПа и  $\sigma_\Sigma' = 4,04$  МПа в сечении  $m_1 - m_1$  для сплошного и дискретного сегмента соответственно, рассчитанные по (1), свидетельствуют о высокой изгибной прочности сегмента с каналами.

Меньшие напряжения изгиба в сечении  $m_1 - m_1$  дискретного сегмента по сравнению с сегментом со сплошным поперечным сечением объясняются наличием ребер жесткости 1 между каналами 2, 3 (рис. 1, в), уменьшением массы сегмента, а, следовательно, и центробежной силы  $Q'$ .

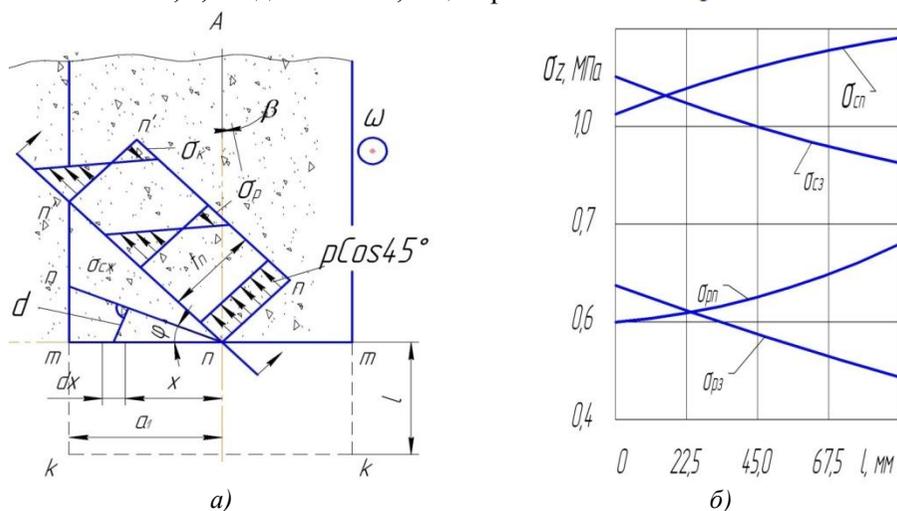


Рис. 3. Эпюра напряжений в правой стенке (а) и значения напряжений в опасных сечениях передней и задней стенки (б) сегмента.

Кроме сечения  $m_1 - m_1$ , опасными в дискретном сегменте являются сечение  $nnn'n'$  в передней стенке 1 (рис. 2, а и 3, а) и аналогичное сечение в задней стенке 2. В сечении  $nnn'n'$  максимальные напряжения изгиба,

$$\sigma_{\Sigma \max} = p \left[ \frac{3(h_0 - l\beta + r)\mu K}{2(t_{по} - l\alpha)} \pm \cos 45^\circ \right], \quad (2)$$

где  $h_0$  – глубина канала неизношенного сегмента, измеренная в плоскости режущего торца;  $l$  – длина износа сегмента;  $\beta$  – угол наклона канала в радиальной плоскости (рис.1, в);  $r$  – радиус окружности дна канала;  $\mu$  – коэффициент трения-резания;  $K$  – коэффициент динамичности;  $t_{по}$  – толщина передней стенки неизношенного сегмента;  $\alpha$  – угол наклона канала в плоскости, перпендикулярной радиусу инструмента.

Напряжения сжатия  $\sigma_{сж}$ , растяжения  $\sigma_{рп}$  в опасном сечении  $nnn'n'$  передней стенки и  $\sigma_{сз}$ ,  $\sigma_{рз}$  задней стенки меньше допускаемых напряжений в 6–8 раз (рис. 3, б), что свидетельствует о высокой механической прочности стенок 1 и 2.

На основании рассмотрения напряженного состояния сегмента с открытыми каналами разработана методика расчета, обеспечивающая его высокую

механическую прочность и площадь поперечного сечения каналов для транспортировки требуемого объема СОЖ в плоскость резания.

Анализ теплообмена в зоне плоского торцового шлифования при подаче СОЖ поливом (первый вариант), применяемым в условиях производства, и по открытым каналам сегментов (второй вариант) позволил установить влияние отношения скоростей течения СОЖ ( $V_2/V_1$ ) при втором и первом варианте подачи на изменение температур  $\Delta t_1 / \Delta t_2$  заготовки:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{0,4}. \quad (3)$$

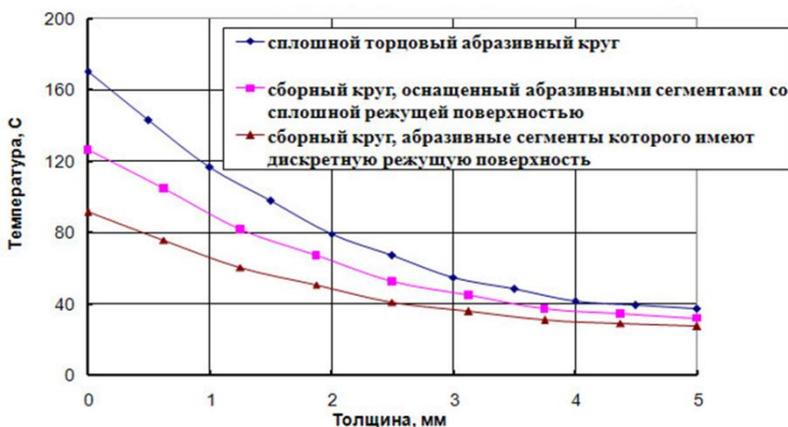


Рис. 4. Температура заготовки при шлифовании различными кругами.

По (3) рассчитано отношение температур  $\Delta t_1 / \Delta t_2$  и установлено, что при подаче СОЖ в плоскость резания температура обрабатываемой поверхности заготовки уменьшается в 2,5 по сравнению с подачей поливом.

Моделирование температуры заготовки в современном САЕ-комплексе COSMOSWORKS при шлифовании сплошным, сегментным и разработанным дискретным кругами (без СОЖ) свидетельствует о снижении температуры заготовки на 40% лишь за счет одной дискретизации абразивных сегментов (рис. 4).

Результаты анализа трех схем дискретизации режущей поверхности сегментов показали, что третья схема в наибольшей степени отвечает сформулированным выше критериям, вследствие чего она выбрана для практической реализации.

**В третьей главе** разработаны пресс-форма и процесс формования сегментов с открытыми каналами, выполненными в соответствии с третьей схемой дискретизации. Пресс-форма состоит из верхнего 1, нижнего 2 пуан-

сонов, двух боковых стенок 3, передней и задней стенок 4. Пуансон 1 имеет стержни 5, которые формируют в абразивной массе 6 открытые каналы.

Пробное формование сегментов показало, что ребра жесткости, а также передняя и задняя стенки отрывались от основной абразивной массы и застревали между стержнями пуансона. Исследования, проведенные с целью устранения причины отрывов, позволили сформулировать требования к оснастке, прессовому оборудованию и абразивной массе, соблюдение которых обеспечивает формование качественных абразивных сегментов.

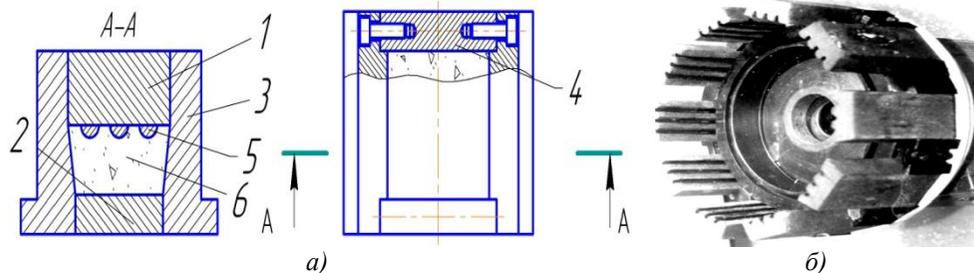


Рис. 4. Формование сегментов с каналами (а) и оснащенный ими круг (б).

Стержни для формования каналов должны быть изготовлены с пуансоном заодно целое, необходимо устранять относительные угловые деформации верхнего пуансона и остальной части пресс-формы, для чего максимальный зазор между направляющими втулками и скалками должен быть не более 50 мкм. Среднее арифметическое отклонение профиля рабочих поверхностей пресс-формы и стержней должно быть не более 0,32 мкм, а приготовленную абразивную массу следует расходовать в течение 6 ч.

Основные компоненты абразивной массы на один сегмент с каналами: шлифовальное зерно 95А (40-25) – 922 г., жидкий бакелит – 17,2 г., пульвербакелит – 52,2 г., криолит – 23,1 г., каучук – 10,2 г. Масса сегмента с каналами на 0,21 кг меньше массы стандартного сегмента, что позволяет экономить абразивный материал в процессе производства сегментов. Параметры процесса формования: скорость рабочего хода ползуна (пуансона) – 7 мм/с, скорость холостого хода ползуна вверх – 70 мм/с, вниз – 200 мм/с, время выдержки под давлением – 75 с, температура нагрева пресс-формы – 120 °С, усилие прессования – 900 кН.

Дискретный торцовый шлифовальный круг (рис. 4, б) оснастили сегментами с открытыми каналами. Пробное шлифование показало, что открытые каналы засоряются отходами шлифования, а СОЖ не поступает в плоскость резания. Была выдвинута гипотеза: причина засорения – аэродинамические потоки, генерируемые инструментом.

Проверка гипотезы потребовала проведения исследования движения воздушных масс. При шлифовании инструмент 1 (рис. 5) увлекает воздушные массы во вращение, в результате чего формируются потоки I, II, которые,

проходя между заготовками 2 и рабочей поверхностью стола 3, направляются внутрь круга. Поток I, II проходят между сегментами и направляются в виде потока III к периферии, создавая разрежение во внутренней полости круга. При своем движении потоки I, II, III поднимают вверх отходы шлифования, которые оседают на сегментах, корпусе круга и плотно прижимаются к ним центробежной силой, постепенно перекрывая каналы и создавая дисбалансы круга. Максимальная окружная скорость воздушного потока IV на выходе из круга достигает 24 м/с.

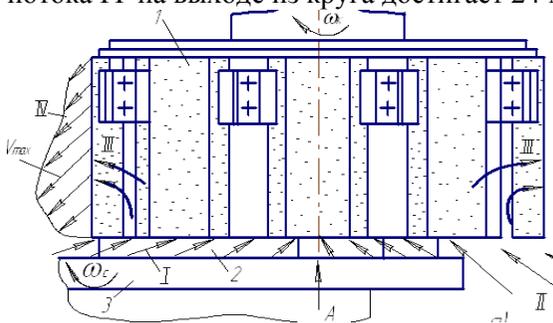


Рис. 5. Аэродинамические потоки, генерируемые кругом

На основании полученных данных разработаны решения, защищенные патентами РФ и позволяющие устранить засорение каналов. Суть решений заключается в создании преграды движущимся внутрь инструмента потокам в виде электромагнитного поля или направленных с большой кинетической энергией потоков жидкости.

**В четвертой главе** приведена методика экспериментальных исследований процесса дискретного плоского торцового шлифования разработанным инструментом, методика планируемых многофакторных экспериментов и результаты исследований показателей процесса обработки.

На плоскошлифовальном станке мод. 3Е756-Л1 шлифовали диски трения. Материал – легированная сталь 30ХГСА, твердость  $HRC_3$  32...36. В качестве инструмента использовали торцовый круг  $\varnothing 450$  мм с десятью абразивными сегментами трапецеидального поперечного сечения:

- сплошные сегменты 5С 100-40-150 мм 95А40Н(С1-С2)ЗБ;
- дискретные сегменты с каналами 5С3 100-40-150 мм 95А40НСТ13Б, 94А25НСТ23Б.

Исследовали минутный съем металла  $W_{\text{м}}$ , минутный расход абразива  $W_{\text{А}}$ , коэффициент шлифования  $K$ , прижоги, микротвердость, отклонения от плоскостности, шероховатость поверхности и производительность процесса при обработке разработанным дискретным кругом и кругом, применяемым в условиях производства. Минутный съем металла  $W_{\text{м}}$ , минутный расход абразива  $W_{\text{А}}$ , коэффициент шлифования  $K$  определяли на основании установленных в работе зависимостей, прижоги – методом травления. Микротвердость измеряли на приборе HVS-1000 (Тайвань), отклонения от плоскостности – лекальной линейкой и щупами различной толщины, шероховатость поверхности – на приборе SJ-201Р фирмы Mitutoyo (Япония).

На основании экспериментов рекомендованы следующие режимы шлифования и характеристика абразивного материала сегментов с каналами:

– частота вращения инструмента –  $980 \text{ мин}^{-1}$ , вертикальная подача инструмента  $S_B \leq 0,6 \text{ мм/мин.}$ , припуск на обработку каждой стороны диска  $Z = 0,3 \text{ мм}$ , характеристика абразивного материала – 94А25НСТ23Б, 94А40НСТ13Б.

Для инструмента, используемого в производстве:

– частота вращения круга –  $980 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_B \leq 0,3 \text{ мм/мин.}$ , припуск на обработку  $Z = 0,3 \text{ мм}$ , характеристика абразивного материала – 94А40Н(С2–СМ2)3Б.

Доминирующее влияние на минутный съем металла  $W_H$ , расход абразива и коэффициент шлифования оказывает вертикальная подача  $S_B$ , которая характеризует скорость врезания абразивных зерен в обрабатываемый металл. С увеличением  $S_B$  скорость съема металла  $W_H$  и расход абразива возрастают (рис. 6, а, б) при обработке известным и дискретным кругами.

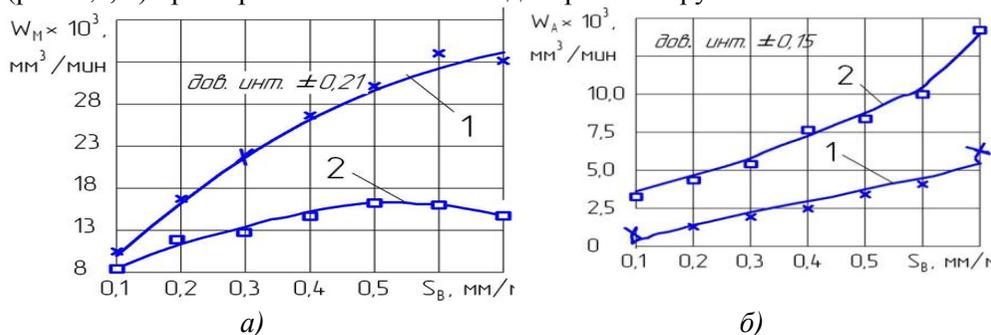


Рис. 6. Влияние вертикальной подачи на минутный съем металла (а) и на расход абразива (б): 1 – для дискретного торцового шлифовального инструмента, 2 – для инструмента, применяемого в производстве.

При изменении подачи в пределах  $S_B = (0,1 - 0,7) \text{ мм/мин}$  скорость съема металла в 1,28 – 2,10 раза больше, минутный расход абразива в 1,8 – 2,6 раза меньше для дискретного круга по сравнению с кругом, используемым в производстве, что объясняется более высокой твердостью и стойкостью дискретных сегментов.

При увеличении вертикальной подачи дискретного круга в интервале (0,1-0,6) мм/мин коэффициент шлифования  $K$  уменьшается от 10,5 до 7,0 мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>. При обработке кругом, применяемым в производстве, в интервале подачи  $S_B = (0,1 - 0,4) \text{ мм/мин}$   $K$  уменьшается от 3,20 до 3,02 мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>, а при дальнейшем увеличении подачи  $S_B$  коэффициент шлифования снижается до 1,1 мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>. Полученные данные убедительно

доказывают преимущество разработанного инструмента и процесса плоско-го дискретного шлифования. Согласно плану  $N=2^3 = 8$  составлена матрица многофакторного эксперимента:

$$abc, bc, ac, c, ab, b, a, (-1), \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – верхний уровень первого, второго и третьего фактора соответственно;  $(-1)$  – строка матрицы, содержащая все три фактора на нижнем уровне. Реализация матрицы (4), статистическая обработка данных эксперимента, проверка адекватности с использованием критерия Фишера позволили получить уравнение регрессии:

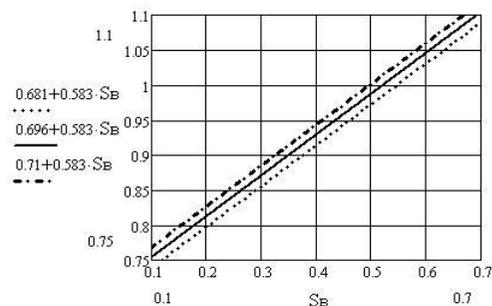
$$Y = 0,925 + 0,175x_1 + 0,075x_2 - 0,0625x_3, \quad (5)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – кодовое значение подачи  $S_B$ , частоты вращения  $n_{ст}$  стола с заготовками и минутного расхода  $Q$  смазочно-охлаждающей жидкости.

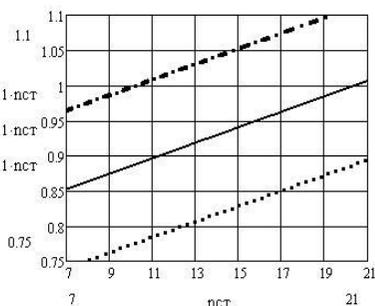
Уравнение регрессии в натуральном выражении факторов имеет вид:

$$R_a = 0,667 + 0,583S_B + 0,011n_{ст} - 0,00313Q. \quad (6)$$

Наибольшее влияние на среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  оказывает вертикальная подача  $S_B$  дискретного инструмента, с увеличением которой  $R_a$  увеличивается (рис. 7, а).



а)



б)

Рис. 7. Влияние подачи  $S_B$  инструмента (а) и частоты вращения стола  $n_{ст}$  (б) на среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , (доверительные интервалы  $\pm 0,054$ )

С увеличением частоты вращения  $n_{ст}$  стола с заготовками параметр  $R_a$  также увеличивается, однако, степень влияния  $n_{ст}$  меньше, чем  $S_B$  (рис. 7, б). Увеличение  $R_a$  при возрастании  $S_B$  и  $n_{ст}$  объясняется ростом силовой и тепловой нагрузки на каждое абразивное зерно, которое врезается на большую глубину, оставляя более глубокие риски на обработанной поверхности. При шлифовании дисков трения на режиме  $n = 980 \text{ мин}^{-1}$ ,  $n_{ст} = 21 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_B = 0,2 \text{ мм/мин}$ ,  $Q = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$  дискретными сегментами 95A40НСТ15Б и сплошными сегментами 95A40НС25Б значения

$R_a = (1,0-1,1)$  мкм получены при использовании дискретного круга, а большие значения  $R_a = (1,25-1,40)$  мкм – известного круга.

Технологическая, цикловая (шт/час) и техническая (шт/смену) производительности процесса дискретного шлифования с подачей СОЖ в плоскость резания выше по сравнению с известным процессом в 1,9; 1,7 и 1,6 раза соответственно (рис. 8). Числа, указанные на диаграмме, отражают количество обработанных дисков в единицу времени.

Глубина распространения прижогов в дисках, шлифованных известным кругом, составила (12-18) мкм в зависимости от режимов шлифования, в то время как при обработке дискретным кругом с подводом СОЖ в плоскость резания – (5-9) мкм. После шлифования дискретными сегментами (вертикальная подача  $S_B = 0,6$  мм/мин) и стандартными сегментами (вертикальная подача  $S_B = 0,3$  мм/мин) прижоги обнаружены не были. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что реализация процесса шлифования разработанным кругом обеспечивает бесприжоговый поверхностный слой при более высоких режимах резания.

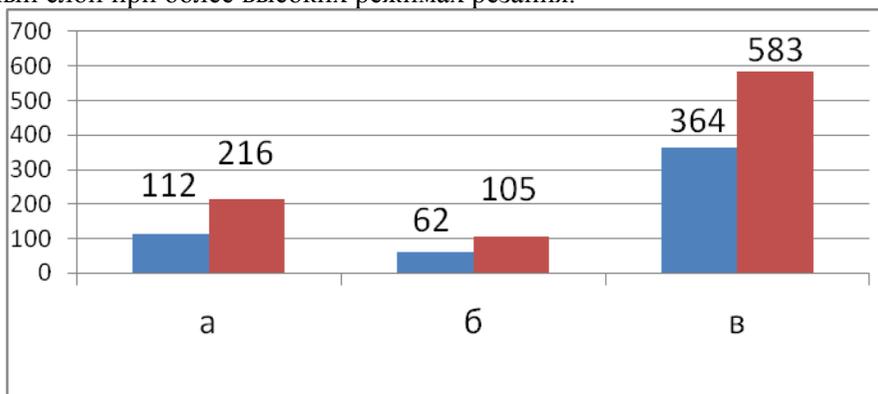


Рис. 8. Технологическая (а), цикловая (б) (шт/час) и техническая (шт/смену) (в) производительности процессов плоского торцевого шлифования: левый столбец – для известного круга, правый столбец – для дискретного круга.

Максимальное значение микротвердости  $H_{\mu} = 1,55$  ГПа характерно для дисков, шлифованных дискретными сегментами на чистовом режиме, а для дисков, шлифованных стандартными сегментами,  $H_{\mu} = 1,15$  ГПа. При шлифовании разработанным инструментом происходит упрочнение поверхностного слоя, о чем свидетельствует повышение микротвердости на 35% по сравнению с инструментом, применяемым в производстве.

Таким образом, дискретная режущая поверхность сегментов, мощные аэродинамические потоки, генерируемые инструментом, большие площади

обтекания заготовок жидкостью, подвергнутой естественной аэрации и движущейся со скоростью резания, – все это обеспечивает не только существенное повышение качества поверхностного слоя деталей, но и увеличение производительности процесса обработки.

**В пятой главе** приведена методика реализации процесса дискретного плоского торцового шлифования. Разработанные инструмент и процесс дискретного плоского торцового шлифования испытаны и рекомендованы к внедрению в условиях ОАО «ПО Муроммашзавод». Результаты работы используются в учебном процессе.

Ожидаемый годовой экономический эффект от повышения производительности процесса шлифования дискретным кругом и экономии абразивного материала составляет около 715 тыс. рублей.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. На основании проведенных комплексных исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения качества деталей и производительности процесса плоского торцового шлифования путем дискретизации режущей поверхности абразивных сегментов, конструкторско-технологического обеспечения процесса и инерционного подвода смазочно-охлаждающей жидкости в плоскость резания.

2. В результате анализа схем дискретизации выбрана схема, реализованная в виде открытых каналов со стороны установочной плоскости сегмента. На основании анализа напряженного состояния сегментов с открытыми каналами разработана методика инженерных расчетов, обеспечивающая высокую их механическую прочность, что позволяет применять дискретные сегменты в процессах интенсивного шлифования.

3. Исследования теплообмена в зоне резания при подаче СОЖ по открытым каналам сегментов в плоскость резания подтвердили возможность уменьшения температуры обрабатываемой поверхности заготовки в 2,5 раза по сравнению с подачей поливом, применяемой в условиях производства. Моделирование температуры с использованием современного САЕ-комплекса COSMOSWORKS показало, что лишь одна дискретизация режущей поверхности сегментов приводит к уменьшению температуры на 40%. Существенное снижение температуры в зоне шлифования позволяет повысить качественные показатели шлифованного поверхностного слоя деталей.

4. Разработаны средства реализации процесса формования сегментов с открытыми каналами и сформулированы требования к прессовому оборудованию и технологической оснастке, обеспечивающие высокую производительность формования и качество сегментов: стержни и пуансон должны изготавливаться заодно целое; максимальный зазор в сопряжении направляющих скалок-втулок – не более 50 мкм, шероховатость рабочих

поверхностей пуансонов и стержней  $R_a \leq 0,32$  мкм, а абразивная масса должна расходоваться в течение 6 часов с момента ее приготовления.

5. Установлено, что дискретный торцовый шлифовальный круг генерирует в процессе работы мощные аэродинамические потоки, которые, двигаясь внутрь инструмента, увлекают отходы шлифования, что приводит к засорению открытых каналов и ухудшению всех показателей процесса. Предложенные решения по устранению засорения каналов основаны на создании преграды аэродинамическим потокам в виде электромагнитного поля, а также скоростного напора СОЖ и защищены патентами Российской Федерации.

6. Установлено, что минутный съём металла при шлифовании дискретным кругом больше в 1,28-2,10 раза, коэффициент шлифования в 6-10 раз, а минутный расход абразива в 1,8-2,6 раза меньше, чем при обработке известным кругом, что свидетельствует о явных преимуществах разработанного процесса дискретного плоского торцового шлифования с подводом СОЖ в плоскость резания.

7. Доказана возможность применения более твердых дискретных абразивных сегментов (на две-три степени тверже сплошных сегментов) и увеличения бесприжоговой вертикальной подачи инструмента от 0,3 до 0,6 мм/мин, что в сочетании с высокой эффективностью действия СОЖ приводит к повышению качества деталей, увеличению технологической, цикловой и технической производительности соответственно в 1,9; 1,7 и 1,6 раза, а также к экономии абразивного материала. Микротвердость обработанного поверхностного слоя повышается на 35%, а шероховатость поверхности уменьшается с  $R_a = (1,25 - 1,40)$  мкм до  $R_a = (1,0 - 1,1)$  мкм.

8. Результаты проведенных теоретических, однофакторных и многофакторных экспериментальных исследований позволили создать научную и методическую базу для разработки перспективного шлифовального инструмента и процесса дискретного плоского торцового шлифования с инерционным подводом СОЖ в плоскость резания, значительно опережающих по своим функциональным возможностям существующие аналогичные процессы и шлифовальные инструменты.

Разработанный инструмент и процесс испытаны и рекомендованы к внедрению в производство ОАО «ПО Муроммашзавод». Результаты исследований используются в учебном процессе. Ожидаемый годовой экономический эффект, обусловленный повышением производительности процесса шлифования и экономией абразивного материала, составляет около 715 тыс. рублей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Гусев, В. Г. Аэродинамические потоки, генерируемые дискретным торцовым шлифовальным кругом / В. Г. Гусев, П. С. Швагирев, А. В. Морозов // Наука о резании материалов в современных условиях. (Серия. «Инструментальные и метрологические системы») // Известия Тул. гос. ун-та. Вып. 1. Ч. 2. 2004. – С. 74 – 79. – ISBN 5-7679-0585-1. (Соискатель – 45 %)
2. Гусев, В. Г. Выбор схемы дискретизации режущей поверхности шлифовального круга / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев // Станки и инструмент. – 2009. – № 6. – С. 15 – 19. (Соискатель – 35 %)
3. Гусев, В. Г. Критерии оценки дискретных кругов и их влияние на динамику процесса шлифования / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев // Станки и инструмент, 2009. – № 5. – с. 16 – 20. (Соискатель – 30 %)
4. Гусев, В. Г. Моделирование съема металла при плоском торцовом шлифовании в условиях изменяющейся жесткости шпиндельного узла / В. Г. Гусев, П. С. Швагирев, Р. В. Жигалов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии . – 2010. – № 4-2 (282). – С. 80 – 86. – ISSN 2073-7408. (Соискатель – 25 %)
5. Пат. № 2385215 Российская Федерация, МПК В24В, 55/02. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при плоском торцовом шлифовании / Гусев В. Г., Жигалов Р. В., Швагирев П. С.: заявл. 17. 07. 08; опубл. 27. 03. 10. Бюл. № 9. (Соискатель – 30 %)
6. Пат. № 2417149 Российская Федерация, МПК В24В, 55/00. Электромагнитное устройство для предотвращения эксплуатационных дисбалансов торцовых шлифовальных кругов / Жигалов Р. В., Гусев В. Г., Швагирев П. С.; заявл. 26. 08. 09 ; опубл. 27. 04. 11. Бюл. № 12. (Соискатель – 35 %)

### Публикации в других изданиях:

7. Гусев, В. Г. Выбор схемы сегментов, обеспечивающей повышение стойкости дискретного торцового шлифовального инструмента / В. Г. Гусев, П. С. Швагирев, А. В. Морозов // Повышение качества продукции и эффективности производства. (Серия. «Технические науки») : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Вестник Курганского ун-та, 2006. – Вып. 2. Ч. 1. – С. 145-146. – ISBN 85-86328-821-3.
8. Гусев, В. Г. Прессование сегментов с дискретной режущей поверхностью для плоского торцового шлифования / В. Г. Гусев, П. С. Швагирев, А. В. Морозов, // Повышение качества продукции и эффективности производства. (Серия. «Технические науки») : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Вестник курганского ун-та, 2006. – С. 34 – 36. – Вып. 2. Ч. 1. – С. 34 – 36. – ISBN 85-86328-821-3.

9. Гусев, В. Г. Температура поверхностей, шлифуемых дискретными и сплошными абразивными кругами / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев // Теплофизика технологических процессов : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Рыбинск : РГАТА, 2005. – С. 24 – 26. – ISBN 5-88435-180-1.

10. Гусев, В. Г. Устройство для подвода СОЖ в зону плоского дискретного торцового шлифования / Гусев В. Г., П. С. Швагирев, Р. В. Жигалов // Инструментальные системы машиностроительных производств. (Серия. «Инструментальные и метрологические системы») : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. / Вестник ТулГУ, 2008. – С. 11. – ISBN 978-5-7679-1044-8.

11. Швагирев, П. С. Дискретизация абразивных сегментов выполнением каналов на установочной базовой плоскости / П. С. Швагирев // Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Курган: изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – С.157 – 163. – ISBN 978-5-4217-0055-5.

12. Швагирев, П. С. Плоское торцовое шлифование кругами, оснащенными дискретными абразивными сегментами / П. С. Швагирев // Молодежь и наука : реальность и будущее : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Невинномысск: изд-во Невинномыс. ин-та экон., управления и права.

13. Швагирев, П. С. Направления совершенствования процесса плоского торцового шлифования / П. С. Швагирев, С. А. Назаренков // Актуальные проблемы машиностроения : материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Владимир. гос. ун-т ; под ред. В. Ф. Коростелева. – Владимир, ПУ «РОСТ» ВООО ВОИ, 2011.– С. 91 – 93. – ISBN 978-5-93907-061-4.

Подписано в печать 10.11.11.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.