

На правах рукописи



Тюхта Антон Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА  
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ТЕХНИКИ ПОДАЧИ СОЖ

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» на кафедре «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент,  
Василенко Юрий Валерьевич

Официальные оппоненты:

Гусев Владимир Григорьевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный  
университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)  
профессор кафедры «Технология машиностроения»

Дьяконов Александр Анатольевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государствен-  
ный университет», (национальный исследова-  
тельский университет) («ЮУрГУ» (НИУ))  
доцент кафедры «Технология машиностроения»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный  
технический университет»

Защита состоится «15» марта 2013 г., в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.182.06 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.

Автореферат разослан «7» февраля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Василенко Юрий Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Машиностроение – это ядро всей экономики и главный плацдарм для инновационных преобразований, который в современных условиях приобретает особое системообразующее значение. Его приоритетное технологическое развитие становится решающим условием инновационного развития страны. Одной из главных задач, стоящих перед отечественным машиностроением, остается его технологическая модернизация.

В настоящий момент развитие плоского шлифования требует использования всех конструктивно-технологических резервов, в том числе тех, которые связаны с совершенствованием техники применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Как показывает практика, возможности СОЖ используются далеко не в полной мере, в некоторых случаях всего на 5-10%.

Экономические механизмы рыночных отношений требуют от промышленных предприятий постоянного поиска резервов снижения себестоимости производства, в частности, операций механической обработки. При шлифовании, одним из таких резервов является сокращение потерь СОЖ, основным источником которых являются безвозвратные потери (разбрызгивание) технологической жидкости из зоны резания, обусловленные кинематикой процесса обработки. В то же время, возрастающие требования экологической безопасности заставляют предприятия разрабатывать меры по снижению уровня вредных выбросов в окружающую среду, основными источниками которых при плоском шлифовании являются безвозвратные потери СОЖ и факел отходов, направлено движущийся из зоны резания. При этом из-за специфики процесса обработки, затруднено эффективное применение традиционных средств очистки, таких как уловители или отсосы, поэтому требуется использование специальных научно-обоснованных технических решений.

Несмотря на большое количество работ, где рассматриваются теоретические проблемы, связанные с применением СОЖ при плоском шлифовании, следует отметить, что полностью не решены и остаются актуальными вопросы, связанные с сокращением безвозвратных потерь СОЖ и нейтрализацией факела отходов обработки.

Представленные в данной работе результаты направлены на конструкторско-технологическую модификацию существующего парка плоскошлифовальных станков, обеспечивающую, при минимальных затратах на оборудование, снижение себестоимости, повышение производительности и улучшение экологичности процесса за счет совершенствования техники подачи СОЖ.

**Цель работы:** повышение производительности и экологичности процесса плоского шлифования периферией круга за счет применения нового (комбинаторного) способа подачи СОЖ.

Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи:**

- разработать новый способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга - комбинаторный, обеспечивающий повышение производительности процесса и полное улавливание шлама и сопутствующих отходов шлифования в рабочей зоне станка;
- выполнить теоретическое обоснование комбинаторного способа подачи СОЖ;
- провести экспериментальные исследования влияния технологических факторов реализации комбинаторного способа подачи СОЖ на производительность и экологичность процесса плоского шлифования периферией круга;
- разработать установку для промышленной реализации комбинаторного способа подачи СОЖ;
- разработать конструкторско-технологические рекомендации по применению комбинаторного способа подачи СОЖ.

**Объект исследования:** процесс плоского шлифования периферией круга.

**Предмет исследования:** производительность и экологичность процесса обработки.

**Методы исследования:** теоретические исследования базируются на теориях шлифования материалов, инженерии поверхности, аэрогидродинамики, гидравлики, планирования многофакторного эксперимента, математической статистики, дифференциального и интегрального исчисления.

**Научная новизна работы:**

Разработан новый способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга - комбинаторный, обеспечивающий полную изоляцию рабочей зоны станка шторами СОЖ и создание в зоне резания ванны из СОЖ, получены:

- математическая модель формирования штор и ванны из СОЖ в рабочей зоне станка, устанавливающая взаимосвязь между технологическими условиями подачи СОЖ и глубиной создаваемой ванны;

- математическая модель линейного взаимодействия частицы шлама со шторой из СОЖ, обеспечивающая прогнозирование эффективности улавливания шлама.

**Практическая значимость:**

- разработана, изготовлена и прошла промышленную апробацию установка, реализующая комбинаторный способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга, обеспечивающая повышение производительности обработки до 30% и ее экологичности в 4 раза;

- разработаны конструкторско-технологические рекомендации по применению комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга.

**Автор защищает:**

- новый способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга – комбинаторный;

- математическую модель формирования штор и ванны из СОЖ в рабочей зоне плоскошлифовального станка;

- математическую модель линейного взаимодействия частицы шлама со шторой из СОЖ при комбинаторном способе ее подачи;

- результаты экспериментальных исследований комбинаторного способа подачи СОЖ и его влияния на температурную напряженность в зоне резания, производительность и экологичность процесса обработки;

- конструкцию установки для реализации комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга;

- конструкторско-технологические рекомендации по применению комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга.

**Результаты работы внедрены** на ЗАО «Техоснастка» (г. Орел) и ООО «Центр Погрузчик - Сервис» (г. Орел).

**Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2008: Машиностроительные технологии», Москва, 2008 г.; всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы машиностроительных производств», Орел, 2011-2012 г.г.; региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России», Орел – Ливны, 2010 г.; международной научно-технической конференции (МНТК) «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», Орел, 2009-2012 г.г.; Всероссийском конкурсе научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2011», Москва 2011 г.; международной молодежной научной конференции «XXXVIII Гагаринские чтения», Москва, 2012 г.; МНТК «Высокие технологии в машиностроении», Курган, 2012 г.; МНТК «Наукоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении», Рыбинск, 2012 г., МНТК «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии», Липецк, 2012 г.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 3 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных исследований.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и 3 приложений. Работа изложена на 131 страницах, содержит 59 рисунков и 10 таблиц, список литературы из 77 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, цель, задачи, объект и предмет исследования, методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору актуального и активно развивающегося научного направления в технологии машиностроения, заключающегося в развитии и совершенствовании техники подачи СОЖ для обеспечения роста производительности и экологичности механической обработки. Значительный вклад в развитие этого направления технической науки внесли как отечественные ученые: Н.В. Азарова, М.М. Аршанский, Ю.П. Бараник, Е.Г. Бердичевский, В.Р. Берзин, Н.И. Богомолов, А.В. Болдырев, Э.М. Берлинер, Э.С. Бранкевич, Е.М. Булыжев, М.Б. Гордон, В.Ф. Гурьянин, В.Г. Гусев, А.М. Дальский, Д.Г. Евсеев, Ю.М. Ермаков, В.В. Ефимов, Ю.М. Зубарев, Е.С. Киселев, М.И. Клушин, С.Н. Корчак, Г.Ф. Кудасов, Б.С. Либерман, Г.Б. Лурье, Е.Н. Маслов, А.Н. Мельников, Л.Л. Мишнаевский, В.И. Островский, П.П. Переверзев, В.И. Пилинский, Ю.В. Полянсков, А.В. Приемышев, П.А. Ребиндер, А.Н. Резников, В.В. Рябов, Г. И. Саютин, В.Н. Серов, В.А. Сипайлов, В.К. Старков, Ю.С. Степанов, В.И. Туромша, В.С. Терган, Л.Н. Филимонов, Л.В. Худобин, Г.В. Чирков, В.Н. Шумилин, В.М. Шумячер, В.Д. Эльянов, С.Г. Энтелис, А.В. Якимов, П.И. Ящерицын так и зарубежные: Б. Бургуан, К. Гюринг, Е. Салье, Ж. Пекленик, С. С. Chang, G. Kluge, Koshima Kazuhiko, Lecher Gerhard, S. Manfred, T. Negamine, Płaska Stanislaw, J. Webster.

В современном металлорежущем оборудовании наиболее распространено использование подачи СОЖ поливом или напорной струей, что обусловлено относительной простотой применения данных способов и позволяет СОЖ оптимально выполнять свои смазывающую, моющую и охлаждающую функции. Однако недостатком данных способов следует признать большие потери технологической жидкости при разбрызгивании и интенсивном образовании «тумана» из паров СОЖ, особенно при плоском шлифовании, что приводит также к ухудшению экологичности процесса обработки.

Механизм действия СОЖ при механической обработке достаточно хорошо изучен, разработана широкая гамма способов подачи СОЖ, насчитывающая 30 основных способов и значительное число их разновидностей и комбинаций, из них наиболее простой – подача СОЖ поливом, а наиболее значимый по эффективности реализации технологической жидкостью своих функций – обработка в среде СОЖ. Экспертным анализом основных способов подачи СОЖ, выполненным с применением метода анализа иерархий доказано, что в качестве наиболее эффективной техники подачи СОЖ, рекомендуется применение комбинированного способа: свободно падающей струей совместно со шлифованием в среде СОЖ.

Некоторые из существующих способов подачи СОЖ частично реализуют функцию улавливания отходов шлифования. Однако для них эта функция является второстепенной и эффективность ее реализации низка, наиболее эффективным является заградительный способ подачи СОЖ, однако данный способ малоэффективен в борьбе с отходами плоского шлифования в зоне обработки.

В последнее время проведено значительное количество достаточно успешных исследований, направленных на повышение экологичности различных видов механической

обработки, в том числе абразивной, за счет совершенствования техники подачи и последующего улавливания отходов шлифования и отработавшей СОЖ, однако для плоского шлифования периферией круга подобного эффективного решения не предложено, вследствие специфики кинематики процесса обработки.

**Вторая глава** посвящена разработке и теоретическому обоснованию комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга.

На качество поверхностного слоя обрабатываемой детали и ее структуру, а значит на физико-механические свойства готового изделия, на количество проходящей через зону резания СОЖ, износ и засаливание шлифовального круга, на температурный режим в зоне резания и другие технологические факторы, в значительной степени влияют аэрогидродинамические явления сопровождающие процесс шлифования.

Представлены результаты исследования по изучению аэродинамической обстановки в рабочей зоне плоскошлифовального станка. За рабочую зону в исследованиях принималось пространство, ограниченное в вертикальной плоскости сторонами защитного кожуха, а в горизонтальной плоскости - столом станка и краем кожуха.

Исследование проводилось на станке модели 3E711ВФ1 с кругом 250x40x76 4A40СМ19К,  $V_{KP} = 35$  м/с,  $V_{PP} = 5$  м/мин. Для измерения направления и скорости движения воздушных потоков применялись дифманометр МР 200 и трубка Пито.

Установлено, что при выходе воздушных потоков из-под кожуха образуется центр наддува. Сущность этого явления заключается в том, что направление движения воздушных потоков в плоскости стола (обрабатываемой заготовки) совпадает с направлением лучей, исходящих из центра наддува. Он находится на проекции торца круга, на расстоянии 10-15 мм от проекции периферийной поверхности круга (рисунок 1).

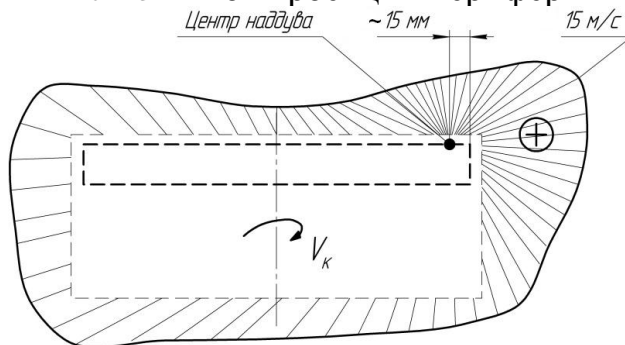


Рисунок 1 – Движение воздушных потоков в плоскости стола (обрабатываемой заготовки)

Образование центра наддува объясняется конструкцией защитного кожуха станка. Вдоль обрабатываемой поверхности заготовки воздушные потоки вне зоны резания движутся под углом 10-15° к кругу ламинарно со скоростью до 15 м/с, в зависимости от расстояния до абразивного круга.

Как правило, у плоскошлифовальных станков, и в частности 3E711ВФ1, шлифовальный круг располагается ассиметрично относительно кожуха, что обуславливает неравномерность в распределении скоростей периферийных воздушных потоков и образование

центра наддува, определяющего направление движения воздушных потоков у поверхности рабочего стола станка, что целесообразно учесть при проектировании средств улавливания и нейтрализации отходов шлифования, движущихся из-под кожуха станка.

Возможность оптимизации параметров улавливания факела отходов при шлифовании создает предпосылки к полному исключению выбросов аэрозоля СОЖ и абразивно-металлической пыли и снижению себестоимости обработки за счет экономии технологической жидкости и улучшения санитарно-гигиенических условий труда.

Целями создания нового способа подачи СОЖ являются:

- 1) реализация такого способа подачи СОЖ, при котором ее функциональные действия проявляются в полном объеме;
- 2) создание эффективной преграды для распространения аэрозоля СОЖ и отходов шлифования, как в виде факела, так и в виде отдельных частиц;
- 3) создание ванны из СОЖ в зоне резания, что исключает возможность сухого резания и позволяет повысить производительность обработки за счет ужесточения режимов резания.

Теоретико-экспериментальные исследования аэродинамической обстановки вокруг зоны резания шлифовальных станков послужили основой для создания нового способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга – комбинаторного (рисунок 2), сущность которого заключается в том, что зона обработки по периметру полностью окружается шторами из СОЖ, а за счет наклона этих штор в зоне резания создается ванна из технологической жидкости. Вследствие этого, весь шлам, вылетающий из зоны резания, полностью гарантированно улавливается защитными шторами из СОЖ, а в самой зоне резания создается ванна из технологической жидкости. Уловленные частицы шлама смываются в систему очистки СОЖ станка. Направленно движущиеся шторы СОЖ формируют в зоне обработки ванну из технологической жидкости, своим напором и углом атаки наполняя ее и удерживая от растекания, а также обеспечивая активную циркуляцию и проточность ванны.

Устройство, позволяющее реализовать комбинаторный способ подачи СОЖ, представлено на рисунке 3.

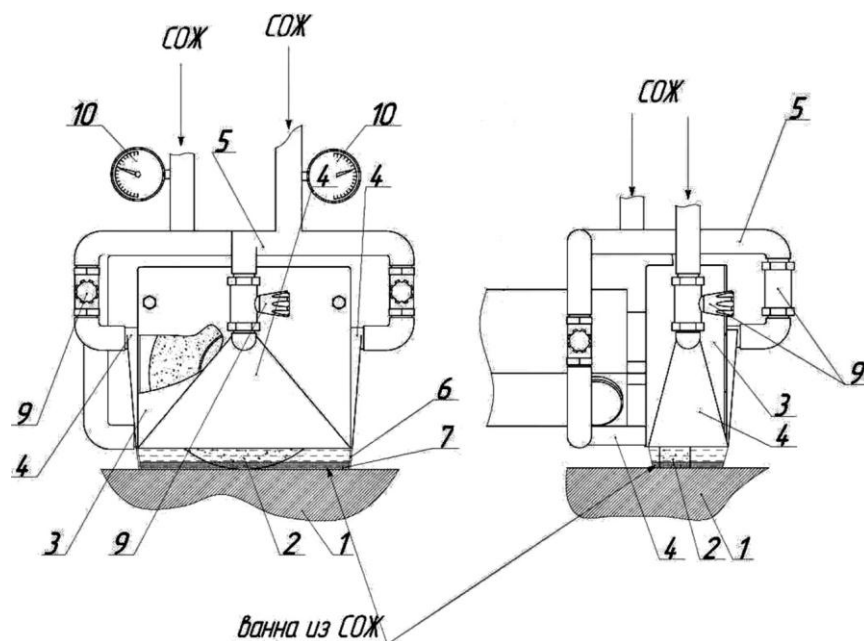
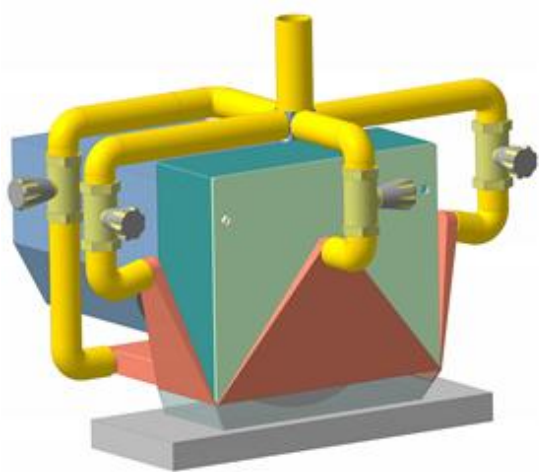


Рисунок 2 – 3-D модель комбинаторного способа подачи СОЖ

Рисунок 3 – Схема устройства для комбинаторного способа подачи СОЖ

Устройство работает следующим образом. От трубопровода 5 системы подачи СОЖ станка, через вентили 9 и соединительные трубы жидкость попадает в сопла 4, ограждающие зону резания по периметру и формирующие замкнутую штору из СОЖ, с целью улавливания потока шлама и отдельных его частиц при вылете из зоны резания. Отработавшая жидкость отводится на очистку посредством дренажной системы станка. Устройство позволяет изменять скорость истечения СОЖ из сопел 4 и давление жидкости в системе вентилем 9. Контроль давления осуществляется при помощи манометров 10. При установлении определенного давления в системе подачи СОЖ обеспечивается формирование в зоне обработки ванны из СОЖ 7.

Для теоретического обоснования и реализации комбинаторного способа были разработаны следующие математические модели:

1. Математическая модель определения параметров срезаемого слоя единичным зерном, которая позволяет рассчитать максимальные размеры стружки, за счет чего определить максимальную дисперсность твердых частиц, формирующих поток шлама, образующийся в зоне резания при плоском шлифовании.

В модели используются следующие допущения: 1) кинематические соотношения, касающиеся поперечного сечения стружки, рассматриваются в одной плоскости (торцовом сечении круга); 2) исходная поверхность детали гладкая – ее профиль представляет собой горизонтальную прямую линию (для плоского шлифования).

Общеизвестно, что траекторией движения зерна шлифовального круга является циклоида. Проанализирован след от двух соседних абразивных зерен находящихся на

одном радиусе и лежащих в одной радиальной плоскости (рисунок 4) и получена формула расчета площади среза:

$$S_{BDE} = \frac{v_{\text{ПР}}(2Rt - t^2)}{10v_K}, \quad (1)$$

Максимальный объем стружки, срезаемой единичным зерном равен:

$$V_c = S_{BDE} \cdot z, \quad (2)$$

Вследствие того, что процесс стружкообразования при шлифовании протекает под действием больших конечных пластических деформаций (локализуемых в узкой зоне пластического сдвига), в условиях высоких температур, больших скоростей деформирования и малой длительности во времени, состояние обрабатываемого металла приближается к идеально-пластическому. На основании этого факта принято, что вследствие такой деформации, срезаемая стружка приобретает шарообразную форму полуя внутри, так как в этом случае, при движении она будет обладать максимальной энергией и минимальным лобовым сопротивлением.

Получено уравнение для расчета диаметра стружки шарообразной формы  $d_{СТ}$ :

$$d_{СТ} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot v_{\text{ПР}} \cdot z (2Rt - t^2)}{10\pi v_K \cdot K_{\text{нол}}}} \quad (3)$$

В зависимостях (1) – (3) используются следующие обозначения:  $z$  – размер зерна шлифовального круга, м;  $K_{\text{нол}}$  – коэффициент полостности стружки, для стали 45 принимается  $K_{\text{нол}} = 1,1$ ;  $v_{\text{ПР}}$  – продольная подача шлифовального круга, м/с;  $v_K$  – скорость вращения шлифовального круга, м/с;  $R$  – радиус шлифовального круга, м;  $t$  – глубина шлифования, м.

Из анализа влияния технологических факторов на размер стружки, срезаемой единичным зерном шлифовального круга (рисунок 5) следует, что доминирующее влияние на размеры стружки оказывает изменение глубины шлифования.

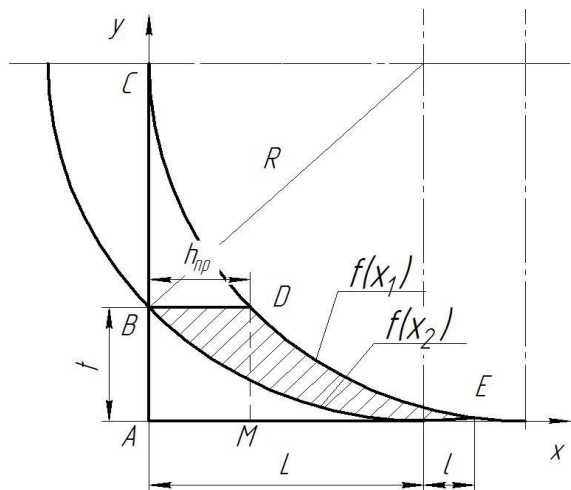


Рисунок 4 – Расчетная схема к определению максимального объема стружки, срезаемой единичным зерном

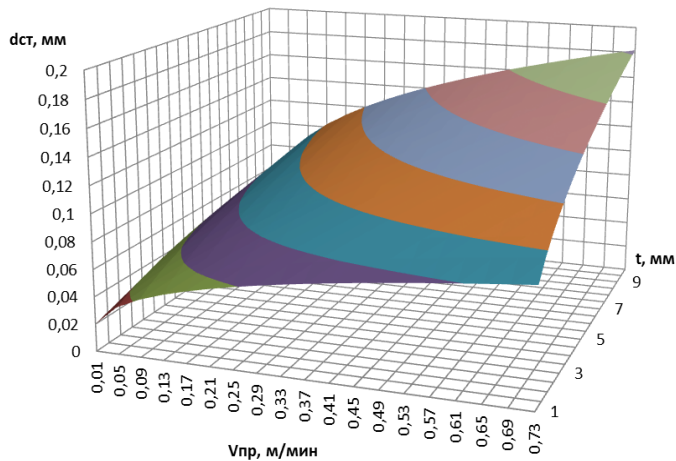


Рисунок 5 – Влияние продольной подачи и глубины шлифования на размер стружки, срезаемой единичным зерном шлифовального круга ПП 250×40×76 4A40СМ19К

2. Математическая модель формирования шторы из СОЖ, построенная на основных положениях гидродинамики, позволяющая рассчитать высоту создаваемой в рабочей зоне ванны из СОЖ в зависимости от расхода технологической жидкости и размеров этой зоны на станке.

При конструировании математической модели использованы следующие допущения: 1) на формирование шторы и ванны из СОЖ не влияет движение шлифовального круга и стола; 2) в модели не учитывается вязкость жидкости и коэффициент потерь, поэтому данная модель применима для создания ванны из СОЖ на водной основе; 3) штора



СОЖ, вытекающая из сопла, неразрывна по всей длине; 4) для образования ванны из СОЖ необходимо, чтобы давление в шторе из СОЖ  $P_{шт}$  было больше давления ванны из СОЖ  $P_в$ , с которым она воздействует на штормы, ограждающие зону резания:

$$P_{шт} \geq P_в \quad (4)$$

На рисунке 6 показана схема движения СОЖ, в результате которой в зоне резания образуется ванна из технологической жидкости (боковые сопла не показаны).

Максимальная скорость потока в шторе из СОЖ  $v_{max}$  будет на выходе из сопла, а минимальная  $v_{min}$  - при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью. Опуская промежуточные преобразования, давление штормы из СОЖ определится выражением:

$$P_{шт} = \frac{dF}{dS} = \frac{2v_{max}^2}{\cos^3 \varphi} \left[ \frac{(r_i/l)^4}{5 \cos^3 \varphi} + \frac{v_{min}}{v_{max}} \left( \frac{(r_i/l)^4}{3} - \frac{2(r_i/l)^4}{5 \cos^3 \varphi} \right) - \frac{v_{min}^2}{v_{max}^2} \left( \frac{(r_i/l)^4}{3} - \frac{2(r_i/l)^4}{5 \cos^3 \varphi} \right) \right] \quad (5)$$

Поскольку максимальное давление ванны из СОЖ на шторму возникает у плоскости обрабатываемой поверхности, то сила давления ванны на шторму определяется по формуле:

$$P_в = \frac{\rho Q v_{min}}{H \cdot S_{сеч}} \quad (6)$$

Так как при истечении из прямоугольного сопла шторма подвергается инверсии, ее площадь  $S_{сеч}$  в любом горизонтальном сечении определится по формуле:

$$S_{сеч} = a_i \cdot b_i = (2r + h \cdot k) \cdot (2l - 0.08h \cdot k) \quad (7)$$

Коэффициент инверсии струи  $k$  зависит от высоты струи и выбирается по известным справочным данным.

Исходя из вышесказанного, высота ванны из СОЖ равна:

$$H = \frac{\rho Q v_{min}}{\frac{2v_{max}^2}{\cos^3 \varphi} \left[ \frac{(r/l)^4}{5 \cos^3 \varphi} + \frac{v_{min}}{v_{max}} \left( \frac{(r/l)^4}{3} - \frac{2(r/l)^4}{5 \cos^3 \varphi} \right) - \frac{v_{min}^2}{v_{max}^2} \left( \frac{(r/l)^4}{3} - \frac{2(r/l)^4}{5 \cos^3 \varphi} \right) \right] \cdot (2r + h \cdot k)} \quad (8)$$

В зависимостях (5) – (8) используются следующие обозначения:  $l$  – ширина сопла, мм;  $r$  – длина сопла, мм;  $v_{max}$  – максимальная скорость жидкости, м/с;  $S_{сеч}$  – площадь сечения штормы, м<sup>2</sup>;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $h$  – высота штормы из СОЖ, мм;  $k$  – эмпирический коэффициент инверсии струи;  $H$  – высота ванны из СОЖ, м;  $\rho$  – плотность СОЖ, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{min}$  – минимальная скорость жидкости, м/с.

3. Математическая модель взаимодействия потока шлама со штормой из СОЖ, базирующаяся на основных положениях гидродинамики, которая обеспечивает прогнозирование результатов такого взаимодействия и расчет эффективной толщины штормы СОЖ.

При расчете использованы следующие допущения: 1) шторма СОЖ, вытекающая из сопла, неразрывна по всей длине, имеет одинаковую плотность и скорость потока; 2) факел шлама представляет поток частиц с одинаковой скоростью, но направленных под различными углами к горизонтальной плоскости; 3) движение частицы шлама в вертикальном потоке СОЖ равнозамедленное.

Рассмотрено движение частицы при попадании в движущийся поток СОЖ, толщина которого при уменьшении высоты  $h$  уменьшается (рисунок 7), наименьшее торможение испытает частица шлама с углом падения  $\alpha = \alpha_{min}$ , т.е.  $\alpha_{min} = 0^\circ$ .

Так как движение частицы шлама в вертикальном потоке СОЖ равнозамедленное, то горизонтальная проекция движения частицы:

$$S_{шк} = v_{СТ} \cdot t - \frac{at^2}{2} \quad (9)$$

Скорость частицы шлама рассчитывается по формуле:

$$v_{СТ} = v_{к} \left( 1 - \frac{3C_x \rho_в \cdot L}{\rho \cdot d_{СТ} \cdot K_{пол}} \right) \quad (10)$$

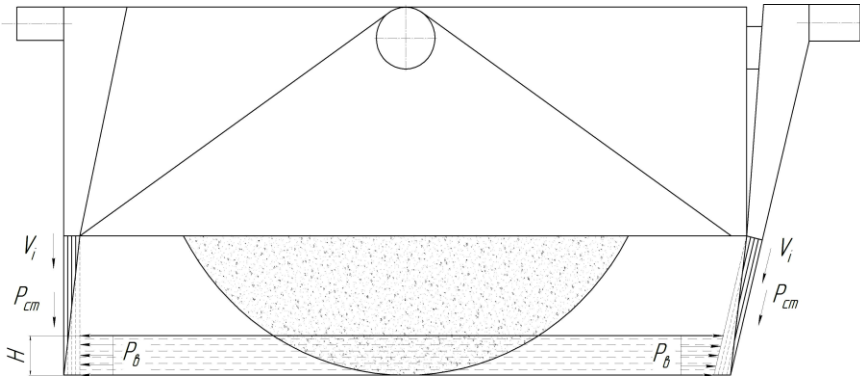


Рисунок 6 – Схема формирования ванны из СОЖ в рабочей зоне станка

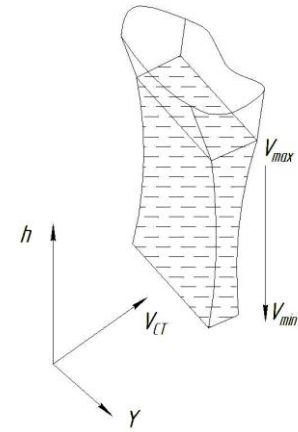


Рисунок 7 – Распределение скорости движения частицы шлама

Опуская промежуточные преобразования, горизонтальная проекция движения частицы равна:

$$S_{ШХ} = \frac{\rho \cdot d_{СТ}^2 \cdot K_{пол} \cdot \left[ v_{\min} + v_{\kappa} \left( \frac{3C_x \rho_6 \cdot L}{\rho \cdot d_{СТ} \cdot K_{пол}} - 1 \right) \right]}{18\mu \left( \frac{3v_{\kappa} \cdot d_{СТ} \left( \frac{3C_x \rho_6 \cdot L}{\rho \cdot d_{СТ} \cdot K_{пол}} - 1 \right)}{16\eta} \right)} \left( 1 - \frac{v_{\min} + v_{\kappa} \left( \frac{3C_x \rho_6 \cdot L}{\rho \cdot d_{СТ} \cdot K_{пол}} - 1 \right)}{2v_{\kappa} \left( \frac{3C_x \rho_6 \cdot L}{\rho \cdot d_{СТ} \cdot K_{пол}} - 1 \right)} \right) \quad (11)$$

Для эффективного улавливания факела отходов, толщина шторы из СОЖ  $B$  должна быть больше чем горизонтальная проекция  $S_{ШХ}$  расстояния, которое преодолет частица шлама при взаимодействии со шторой СОЖ, т.е:

$$B > S_{ШХ} \quad (12)$$

Уравнения (9) – (12) включают в себя следующие параметры:  $B$  – толщина шторы из СОЖ, м;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\eta$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – расстояние от зоны обработки до шторы из СОЖ, м;  $v_{СТ}$  – скорость частицы шлама, м/с;  $t$  – время, за которое скорость частицы  $v_{СТ}$  уменьшится до скорости струи  $v_{\min}$ , с;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $C_x$  – коэффициент сопротивления воздуха;  $\rho_6$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Анализ полученной математической модели показывает, что на требуемую толщину шторы из СОЖ доминирующее влияние оказывает глубина шлифования (рисунок 8).

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на эффективность комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга. Для подтверждения представленных теоретических положений была разработана и изготовлена экспериментальная установка, изображенная на рисунке 9, а – б, состоящая из защитного кожуха, с закрепленными на нем трубками и соплами для подачи СОЖ, давление в которых отслеживается при помощи манометров. В системе установлены краны для регулирования ширины шторы СОЖ и расхода жидкости. Шторы из жидкости купируют область обработки по периметру с целью улавливания потока шлама и отдельных его частиц при вылете их из зоны резания. Отработавшая жидкость отводится на очистку посредством дренажной системы. При установлении определенного давления в системе, наблюдается формирование ванны из СОЖ, что оказывает положительное влияние на процесс шлифования, интенсифицируя отвод тепла из зоны резания.

Первый эксперимент был направлен на определение влияния количества расходуемой жидкости на высоту ванны из СОЖ, образующейся в зоне резания.

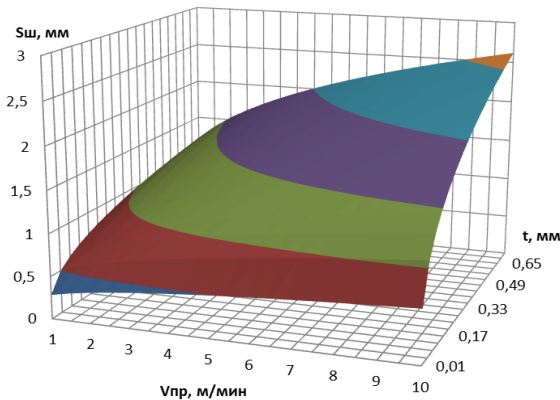


Рисунок 8 – Влияние продольной подачи и глубины шлифования на толщину шторы из СОЖ



а)

б)

Рисунок 9 – Общий вид установки для комбинаторного способа подачи СОЖ на плоскошлифовальном станке модели 3E711ВФ1

По результатам проведенных экспериментальных исследований получено уравнение регрессии для определения зависимости высоты ванны из СОЖ от расхода жидкости в разных соплах:

$$h = 7,875 - 55,346 \cdot P_{\bar{o}} - 16,229 \cdot P_z + 91,518 \cdot P_{\bar{o}} \cdot P_z + 104,167 \cdot P_{\bar{o}}^2 + 67,217 \cdot P_{\bar{o}} \cdot P_n + 29,916 \cdot P_z \cdot P_n - 157,741 \cdot P_{\bar{o}} \cdot P_z \cdot P_n, \quad (13)$$

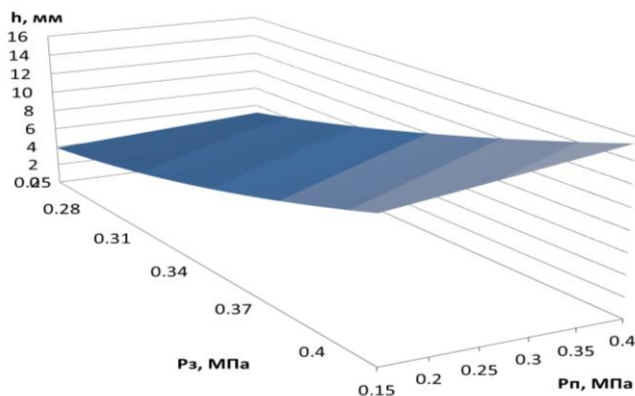


Рисунок 10 – Зависимость высоты ванны из СОЖ  $h$  от давления в переднем и заднем соплах

В работе выполнен анализ зависимости высоты ванны из СОЖ от давлений в соплах подачи, установлено, что на высоту ванны из СОЖ основное влияние оказывает повышение давления жидкости в переднем и заднем соплах (рисунок 10).

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных, полученных при помощи зависимости (8), показало расхождение не более 5%, что является приемлемым результатом.

Затем был проведен ряд экспериментальных исследований влияния технологических факторов на производительность процесса плоского шлифования с комбинаторным способом подачи СОЖ. Первый этап этих исследований был направлен на определение влияния технологических режимов обработки на среднюю температуру заготовки при шлифовании с комбинаторным способом подачи СОЖ.

Целью данного эксперимента являлась проверка адекватности известной теплофизической модели В.А. Сипайлова, применительно к разработанному комбинаторному способу подачи СОЖ.

$$T = \sum_{n=0}^k \frac{2qa}{\pi\lambda\vartheta} \int_{Z-nL-H}^{Z-nL+H} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) \left\{ 1 - \beta \exp[\beta X] \frac{\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{2\alpha a}{\lambda\vartheta} X\right) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) dX}{K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2})} \right\} d\xi + \sum_{n=0}^k \frac{2q_1 a}{\pi\lambda\vartheta} \int_{Z-(n+p)L-H}^{Z-(n+p)L+H} \exp(+\xi) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) \left\{ 1 - \beta \exp[\beta X] \frac{\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{2\alpha a}{\lambda\vartheta} X\right) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) dX}{K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2})} \right\} d\xi \quad (14)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\vartheta$  – продольная подача, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $\alpha$  – коэф-

коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $l$  - удвоенный ход стола, м,  $k$  - число ходов;  
 $\frac{\partial(z-z^{\wedge})}{2a} = \xi$ ,  $\frac{\partial z}{2a} = Z$ ,  $\frac{\partial x}{2a} = X$ ,  $\frac{\partial h}{2a} = H$ ,  $L = \frac{\partial l}{2a}$  - критерии Пекле;  $\beta = \frac{2\alpha a}{\lambda \theta}$  - безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность теплообмена.

По результатам расчета теоретической модели (14) были построены графики зависимости температуры в зоне обработки от параметров шлифования при подаче СОЖ комбинаторным способом для различных материалов (рисунок 11, а). По результатам проведенных экспериментальных исследований получено уравнение регрессии для определения влияния технологических факторов на среднюю температуру заготовки, в частности, для стали 45:

$$T = -969,76 + 421,92 \cdot V_{np} + 571,67 \cdot t + 2560 \cdot P_n + 63,61 \cdot V_{np} \cdot t - 948,33 \cdot V_{np} \cdot P_n - 1366,67 \cdot t \cdot P_n + 161,11 \cdot V_{np} \cdot t \cdot P_n; \quad (15)$$

Проведено исследование влияния режимов обработки на среднюю температуру обрабатываемой заготовки при различных способах подачи СОЖ, включая комбинаторный (рисунок 11, б).

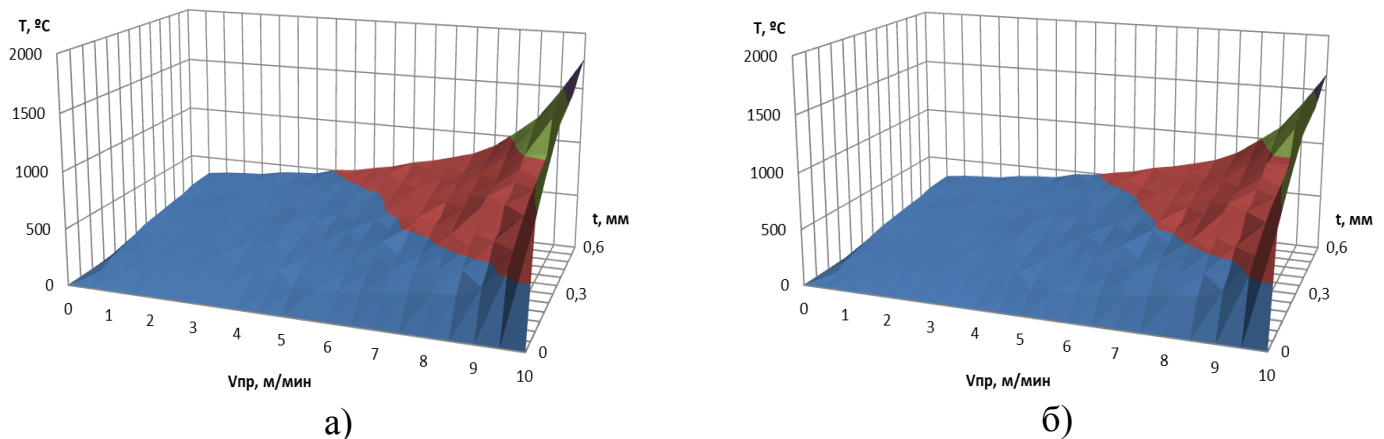


Рисунок 11 – Зависимость температуры в зоне обработки от параметров шлифования при подаче СОЖ комбинаторным способом для стали 45 (а – расчетная, б – экспериментальная).

Из анализа теоретических и экспериментальных результатов (рисунок 11) следует, что данная модель адекватна для плоского шлифования с комбинаторным способом подачи СОЖ, расхождение результатов не более 5%, средняя температура обрабатываемой заготовки при шлифовании с применением комбинаторного способа подачи СОЖ на 30 – 35% ниже, чем при шлифовании с подачей СОЖ поливом, что объясняется активным охлаждением заготовки за счет постоянного присутствия СОЖ в зоне резания. Снижение температуры обусловлено улучшением смазочной и охлаждающей функций СОЖ. Учитывая это, возможно интенсифицировать режимы обработки, в частности увеличить глубину резания до 40%, что обеспечит снижение числа проходов, необходимых для снятия требуемого припуска на 35% и, соответственно, увеличение производительности обработки до 20%.

На втором этапе был проведен ряд экспериментальных исследований влияния комбинаторного способа подачи СОЖ на шероховатость обработанной поверхности при выхаживании. Сущность данного исследования сводилась к определению шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от времени обработки (числа выхаживаний).

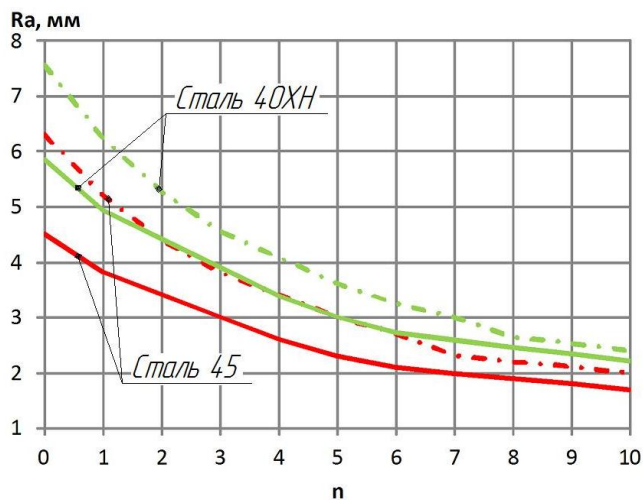
Из представленного на рисунке 12 графика видно, что, для достижения требуемой шероховатости при плоском шлифовании с комбинаторным способом подачи СОЖ, необходимое число выхаживаний на 40% меньше, чем при плоском шлифовании с подачей СОЖ поливом.

Снижение числа выхаживаний обусловлено улучшением диспергирующей функции СОЖ. Это объясняется снижением избыточной деформации стружки и повышением пластической деформации в зоне резания. Подобная зависимость характерна для всех режимов плоского шлифования периферией круга, а также для большинства марок сталей.

Экспериментальные исследования показали, что комбинаторный способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга целесообразно применять при следующих режимах: глубина шлифования  $t = 0,28 \dots 0,3$  мм, скорость перемещения стола  $V_{пр} = 6 \dots 8$  м/мин, давление в переднем сопле  $P_n = 0,35$  МПа, число выхаживаний  $n = 3$  (для стали 45) и глубина шлифования  $t = 0,14 \dots 0,17$  мм, скорость перемещения стола  $V_{пр} = 6 \dots 8$  м/мин, давление в переднем сопле  $P_n = 0,35$  МПа, число выхаживаний  $n = 5$  (для стали 40ХН).

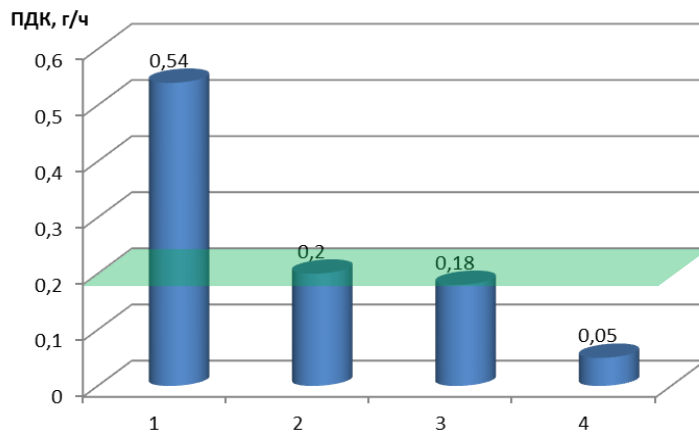
Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что подача СОЖ комбинаторным способом оказывает положительное влияние на производительность процесса плоского шлифования периферией круга за счет снижения числа проходов на 35% и числа выхаживаний на 40%. Это объясняется тем, что при использовании комбинаторного способа подачи СОЖ снижается температурная напряженность в зоне резания, улучшается действие всех технологических функций СОЖ, что делает возможным ужесточение режимов резания и получение требуемой шероховатости поверхности за более короткое время, чем при обработке с подачей СОЖ поливом. Все это приводит к увеличению производительности плоского шлифования периферией круга до 30%.

Для определения экологичности комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга, в части улавливания шлифовальной пыли, факела отходов, а также брызг и паров СОЖ, был проведен замер предельной допустимой концентрации вредных веществ в рабочей зоне оператора станка, при различных способах подачи СОЖ, при помощи универсального газоанализатора «ГАНК 4С», как видно из графика (рисунок 13) при комбинаторном способе подачи СОЖ, предельная концентрация вредных веществ (ПДК) в рабочей зоне оператора станка в 4 раза меньше регламентированной ПДК для плоского шлифования периферией круга с СОЖ.



- комбинаторный способ подачи СОЖ;  
 - - подача СОЖ поливом.

Рисунок 12 – Влияние числа выхаживаний на шероховатость обработанной поверхности, при различных способах подачи СОЖ



1 – шлифование без СОЖ;  
 2 – подача СОЖ поливом;  
 3 – заградительный способ подачи СОЖ;  
 4 – комбинаторный способ подачи СОЖ.

Рисунок 13 – Предельная допустимая концентрация вредных веществ в рабочей зоне оператора при различных способах подачи СОЖ

**В четвертой главе** представлено оборудование и конструктивно-технологические рекомендации по практическому применению комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга. В результате экспериментальных исследований была апробирована конструкция лабораторной установки для реализации комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга. На ее базе была разработана конструкция промышленной установки для реализации предложенного способа (рисунок 14).

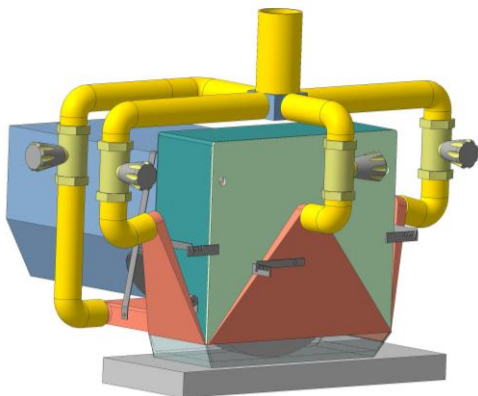


Рисунок 14 – Общий вид промышленной установки для комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, представленных в предыдущих главах, были разработаны конструкторско-технологические рекомендации по применению комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга со скоростями резания до 35 м/с (таблица 1) и 75 м/с.

Проведено опытное внедрение комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга в условиях ЗАО «Техоснастка» (г. Орел) и ООО «Центр Погрузчик – Сервис» (г. Орел). Расчет годового экономического эффекта показал, что срок окупаемости проекта составляет около 1 месяца, а суммарный годовой экономический эффект составит более 370 тыс. рублей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В представленной научно – квалификационной работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение производительности и экологичности плоского шлифования периферией круга за счет совершенствования техники подачи СОЖ, имеющие существенное значение для развития технологии абразивной обработки и машиностроения в целом.

2. Разработан комбинаторный способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга, обеспечивающий повышение производительности обработки в 1,3 раза, и ее экологичность до 4 раз.

3. Разработана математическая модель интегрального определения максимальных размеров срезаемой стружки при плоском шлифовании периферией круга единичным абразивным зерном, с учетом ее деформации.

4. Разработана модель формирования штор и ванны из СОЖ в рабочей зоне плоскошлифовального станка при комбинаторном способе подачи СОЖ, устанавливающая взаимосвязь между технологическими условиями подачи СОЖ и глубиной создаваемой ванны из технологической жидкости.

5. Разработана линейная математическая модель взаимодействия частицы шлама со шторой из СОЖ, обеспечивающая прогнозирование эффективности улавливания шлама при комбинаторном способе подачи СОЖ.

6. Проведено теоретико-экспериментальное исследование и получена регрессионная зависимость влияния технологических режимов обработки на среднюю температуру заготовки при плоском шлифовании с комбинаторным способом подачи СОЖ, обеспечивающим снижение температурной напряженности до 35% за счет интенсификации смазочной и охлаждающей функций СОЖ.

7. Экспериментально установлено, что применение комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга обеспечивает повышение производительности обработки до 30% за счет снижения числа проходов на 35% и числа выхаживаний на 40%.

8. Разработаны конструктивно-технологические рекомендации по практическому применению комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга на различном технологическом оборудовании со скоростями резания до 35 м/с и до 75 м/с.

9. Разработана конструкция установки для промышленной реализации комбинаторного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга. Проведена промышленная апробация комбинаторного способа подачи СОЖ на ЗАО «Техоснастка» (г. Орел) и ООО «Центр Погрузчик - Сервис» (г. Орел), ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составил более 370 тыс. рублей.

Таблица 1 – Конструкторско-технологические рекомендации по применению комбинаторного способа подачи СОЖ ( $V_K \leq 35$  м/с,  $V_{ПР} \leq 10$  м/мин, СОЖ – 5%-ный раствор эмульсола НГЛ-205)

Глубина входного сечения сопла $\varnothing$ , мм	Глубина шлифования $t$ , мкм																	Давление в системе подачи СОЖ $P$ , МПа									
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500						
1	0,1	0,1	0,1																								
	0,1	0,1	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22							
	0,1	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3				
	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	
2	0,15	0,15	0,15																								
	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19																		
	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35				
	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35						
3	0,2	0,2	0,2																								
	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24																		
	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4					
	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	
4	0,25	0,25	0,25																								
	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29																		
	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45				
	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45						
	60																										
																							160				
																							250				
																						400					
																						Зернистость круга $Z$ , мкм					

## Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

### *Список публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Тюхта, А.В. Комбинаторный способ подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга / Ю.В. Василенко, К.С. Тюхта, А.В. Тюхта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 13. – 2011. – №4(4). – С. 942-945.
2. Тюхта, А.В. Математическая модель взаимодействия частицы шлама со шторой из СОЖ при плоском шлифовании периферией круга / А.В. Тюхта. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3-2 (293). – С. 60-67.
3. Тюхта, А.В. Технологическое обоснование и оценка эффективности комбинаторного способа подачи СОТС / А.В. Тюхта, К.В. Подмастерьев, Ю.В. Василенко // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 5. С. 15-22.

### *Список публикаций в других изданиях:*

4. Тюхта, А.В. Разработка заградительного способа подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при плоском шлифовании / А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко, К.С. Корепанова. // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, посвященная 140-летию высшего технологического образования МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Студенческая научная весна 2008: Машиностроительные технологии». – 2008. – С. 33-35.
5. Тюхта, А.В. Практическое применение комбинаторного способа подачи СОЖ / А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко, К.С. Корепанова. // Сборник трудов Региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, Орел-Ливны, 26 февраля 2010. – 2010. – С. 19-23.
6. Тюхта, А.В. К вопросу о практическом применении комбинаторного способа подачи СОЖ / А.В. Тюхта. // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Научные труды в 8 томах. – 2012. – Т.1. – 250 с. – С. 101-103.
7. Тюхта, А.В. Практическое применение комбинаторного способа подачи смазочно-охлаждающей жидкости / А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко. // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012 г. – 2012. – Ч.2. – 334 с. – С. 24-29.
8. Tyuhta, A.V. Combinatorial method for cooling Lubricating fluid supply at flat grinding with disk periphery / A.V. Tyuhta // 13th Joint China-Russia symposium on advanced materials and processing technology - collection of articles of the international scientific-technical conference. – 2012. – 68 p. – P. 63.
9. Тюхта, А.В. Технологическое обоснование и оценка эффективности комбинаторного способа подачи СОЖ / А.В. Тюхта, К.В. Подмастерьев, Ю.В. Василенко // Фундаментальные проблемы техники и технологии - Технология-2012: Сборник тезисов и аннотаций научных докладов XV международной научно-технической конференции. – 2012. – С.76.
10. Тюхта, А.В. Математическая модель формирования штор и ванны из СОЖ при плоском шлифовании периферией круга с подачей СОЖ комбинаторным способом / А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко, О.А. Василенко. // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Материалы IV международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Безязычного Вячеслава Феокистовича. – 2012. – С. 277-282.
11. Тюхта, А.В. Исследование влияния технологических факторов на производительность и экологичность процесса плоского шлифования с комбинаторным способом подачи СОЖ / А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко. // Высокие технологии в машиностроении: Материалы Международной научно-технической конференции. – 2012. – С. 66-70.

Подписано в печать «26» января 2013 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 06ОП/13

Отпечатано с готового оригинал – макета на полиграфической базе

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК». Россия, 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65.