

На правах рукописи



КОЖУС ОЛЬГА ГЕННАДЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО
РЕЗАНИЯ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ
НА ПОВЕРХНОСТИ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

Научный
руководитель:

Барсуков Геннадий Валерьевич
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры машиностроения
ФГБОУ ВО «ОГУ им И. С. Тургенева»

Официальные
оппоненты:

Галиновский Андрей Леонидович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии ракетно-
космического машиностроения»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Яблуновский Ян Юрьевич
кандидат технических наук,
главный технолог
АО «Рыбинский завод приборостроения»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Брянский государственный
технический университет»

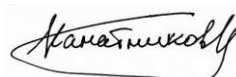
Защита состоится «___» _____ 2019 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 999.115.03 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» и на сайте <http://oreluniver.ru/diser>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, просим выслать по указанному адресу в диссертационный совет Д999.115.03
Телефон для справок +79155080508. Email: katunin57@gmail.com.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Канатников Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время производство и продажа оборудования для гидроабразивного резания самый быстрорастущий сегмент станкостроительной промышленности. Это обусловлено желанием предприятий пополнить свои производственные фонды многофункциональными, универсальными станками, позволяющими свести к минимуму количество операций, сократить время настройки на выпуск новой продукции.

Для получения режущей струи в сверхзвуковой поток жидкости вводят абразивные зерна размером от 100 до 400 мкм. В качестве абразива многие производители оборудования рекомендуют использовать гранат, так как он является твердым абразивом (более 7,5 по шкале МООСа) с округлыми гранями, что позволяет снизить износ фокусирующей трубки соплового узла установки. Гранат добывается только за границей (Австралия, ЮАР, США, Индия, Китай). Отечественным предприятиям приходится использовать его, несмотря на высокую цену, так как в России аналогичные материалы для этих целей не производят. Возникает проблема высокой цены резки, так как затраты на абразив для одной установки составляют до 60 % от себестоимости всей обработки. Отечественные абразивы, например, эльбор (кубический нитрид или его модификация), карбид бора, карбид кремния, электрокорунд (нормальный, белый, хромистый и титанистый), монокорунд применить для гидроабразивного резания оказалось невозможным из-за критического износа сопла (несколько минут), что в итоге приводит к выходу сопла из строя в процессе его эксплуатации.

Поэтому, актуальной и имеющей важное научное и практическое значение является работа, направленная на решение задачи получения отечественного абразива для гидроабразивного резания любых материалов, путем заключения абразивного зерна в полимерную оболочку, позволяющую сохранить фокусирующую трубку и значительно повысить режущие возможности гидроабразивной струи.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в рамках финансируемых научно-технических проектов в рамках грантов Фонда содействия инновациям:

- по программе «УМНИК» «Разработка технологии создания новых абразивных материалов из отвальных шлаков никелевого производства» (2016-2017 гг.);

- по программе «Старт» «Разработка технологии и производство абразива в полимерной оболочке» (2018-2019 гг.).

Цель работы: повышение производительности гидроабразивного резания и снижение износа фокусирующей трубки сопла путем создания полимерной оболочки на поверхности абразивного зерна.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ типов абразивных материалов для повышения производительности гидроабразивного резания и данных об износе фокусирующей трубки сопла, что позволит обосновать необходимость нанесения полимерной оболочки на абразивное зерно и определить требования к качеству ее формирования в зависимости от протекающих физико-химических процессов.

2. Получить теоретические зависимости для описания процессов, протекающих с абразивом в полимерной оболочке при взаимодействии со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала, что позволит выбирать тип абразива, полимера и толщину покрытия для обеспечения ее целостности в процессе эксплуатации.

3. Получить экспериментальные данные о прочности абразива в полимерной оболочке, об эффективности покрытия и технологических возможностях при гидроабразивном резании, что позволит оценить степень влияния полученной полимерной оболочки на поверхности абразива на производительность гидроабразивного резания и снижение износа фокусирующей трубки сопла.

4. Разработать технологические рекомендации нанесения полимерной оболочки на абразивное зерно в процессе микрокапсулирования, что позволит получить требуемую однородность и толщину покрытия, а так же обеспечить целостность полимерной оболочки в процессе эксплуатации.

Объект исследования. Абразив в полимерной оболочке для гидроабразивного резания.

Предметом исследования. Прочность адгезии контакта абразив-полимер.

Методы исследования. В работе использовались теоретические положения адгезии полимеров к твердым поверхностям, методы расчета поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел, фундаментальные и прикладные положения механики сплошной среды (разделы: гидродинамика, теория напряженного и деформированного состояния). Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартного и специального оборудования. Обработка результатов экспериментов проводилась средствами вычислительной техники с использованием методов планирования эксперимента и регрессионного анализа.

Достоверность подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований, выполненных на аттестованном оборудовании, их высокой воспроизводимостью, соответствием теоретических и экспериментальных данных, ясностью физической трактовки.

Автор защищает:

1. Математическую модель прочности адгезии контакта абразив-полимер, учитывающую изменение свободной энергии адгезии полимера к поверхности абразива при возникающих деформациях.

2. Теоретические зависимости прочности адгезии контакта абразив-полимер с учетом взаимодействия со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала.

3. Расчеты прочности контакта абразив-полимер по критерию «энергия адгезии», с учетом взаимодействия со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала.

4. Регрессионную зависимость расчета сыпучести абразива в полимерной оболочке от режимов нанесения покрытия.

5. Технологические рекомендации нанесения полимерной оболочки на абразивное зерно в процессе микрокапсулирования.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке математической модели прочности адгезии контакта абразив-полимер, учитывающей изменение свободной энергии адгезии полимера к поверхности абразива при возникающих деформациях, что позволило выявить взаимосвязь прочности полимерного покрытия с его механическими свойствами (предел прочности, модуль Юнга) при известных геометрических характеристиках абразива;

- получении теоретических зависимостей прочности адгезии контакта абразив-полимер с учетом взаимодействия со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала, что позволило установить необходимые требования к механическим свойствам абразива и полимера для сохранения целостности покрытия в процессе эксплуатации.

Практическая значимость.

1. Разработаны технологические рекомендации нанесения полимерной оболочки на абразивное зерно в процессе микрокапсулирования, что позволяет получить требуемую однородность и толщину покрытия, а так же обеспечить целостность полимерной оболочки в процессе эксплуатации.

2. Разработана методика расчета прочности адгезии контакта абразив-полимер с учетом взаимодействия со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала, что позволило установить необходимые требования к механическим свойствам абразива и полимера для сохранения целостности покрытия в процессе эксплуатации.

3. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ №2018662137 «Расчет сушки кипящего слоя для сушки абразивных материалов в полимерной оболочке производительностью 0,7 кг/с», что позволяет рассчитывать температуру

сушки полимерного покрытия на поверхности абразива в кипящем (псевдооживленном) слое при инкапсулировании и исключать агломерацию частиц.

4. Получена регрессионная зависимость расчета сыпучести абразива в полимерной оболочке от режимов нанесения покрытия, что позволяет характеризовать шероховатость полимерной оболочки и делать оценку транспортируемости абразива по каналам гидроабразивной установки.

5. Разработаны методики оценки динамической прочности абразива в полимерной оболочке и оценки эффективности покрытия поверхности частицы полимером, что позволяет судить об адгезионных свойствах контакта абразив-полимер.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: 2-ой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орел, 2016 г.); всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Междисциплинарные исследования молодых ученых: education, science, R&D» (г. Орел, 2016 г.); III региональной научно-практической конференции им. А.Г. Шипунова «г. Ливны, 2016 г.»; XVI международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г. Орел, 2018 г.); IV международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве» (г. Чебоксары, 2018 г.); 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Курск, 2019 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 работах, в том числе 6 в изданиях, из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций, и 3, индексируемых в БД Scopus, а также 1 свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 90 источников и приложений. Содержит 169 страниц основного текста, 22 таблицы, 52 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической проблемы, сформулирована цель работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, научная значимость, практическая ценность и реализация работы, приведены данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ типов абразивных материалов для повышения производительности гидроабразивного резания и данных об износе фокусирующей трубки сопла, что позволило обосновать необходимость нанесения по-

лимерной оболочки на абразивное зерно и определить требования к качеству ее формирования в зависимости от протекающих физико-химических процессов.

Повышением эффективности гидроабразивного резания занимались такие ученые как Тихомиров Р.А., Барзов А.А., Барсуков Г. В., Галиновский, А.Л., Тищенко Л.А., Яблуновский Я.Ю., Momber A., Hashish M., Kovacevic R., Louis H., Geskin E., Mohan R., Zhang Y., Arola D., Ramulu M., Chao J. и других ученых. В своих исследованиях авторами определены оптимальные параметры струи, ее состав и характер воздействия на материал, сделан анализ схем разрушения материалов, определены условия износа фокусирующей трубки сопла.

Отмечается, что одним из направлений повышения производительности гидроабразивного резания является использование отечественных сверхтвердых абразивов, с твердостью более 8 по шкале МООСа. Однако их применение оказалось невозможным из-за критического износа сопла (несколько минут), что в итоге приводит к выходу сопла из строя в процессе его эксплуатации.

Для предотвращения отрицательного влияния контакта абразивных зерен с поверхностью фокусирующей трубки в работе предлагается покрыть их защитной полимерной оболочкой.

Для создания полимерной оболочки на поверхности абразивного зерна рекомендуется использовать метод микрокапсулирования – процесс заключения мелких частиц вещества в тонкую оболочку пленкообразующего материала.

В качестве материала для оболочки абразива рекомендуется применить водорастворимые полимеры, например, ПЭГ (полиэтиленгликоль), ПВС (поливиниловый спирт), полиоксиэтилен.

Проведенный анализ физико-химических закономерностей и особенностей нанесения полимера на поверхность абразивного зерна показал, что отсутствуют теоретические зависимости для определения прочности контакта абразив-полимер, с учетом протекающих процессов взаимодействия со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала. Расчеты по известным зависимостям не позволяют выбирать тип абразива, полимера и толщину покрытия для обеспечения ее целостности в процессе эксплуатации.

Во второй главе получены теоретические зависимости для определения прочности контакта абразив-полимер, с учетом протекающих процессов взаимодействия со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала, что позволило выбрать тип абразива, полимера и толщину покрытия, для обеспечения ее целостности в процессе эксплуатации.

Разработана математическая модель адгезионного взаимодействия абразивной частицы и ее полимерной оболочки. В основу модели положена теория сплошного деформируемого твердого тела, опирающаяся на парных взаимодействиях абразива и покрытия.

В математической модели потенциальная энергия взаимодействия абразива и полимера определялась по формуле:

$$d^2\varphi = \Phi(l) dV dV_1. \quad (1)$$

где dV и dV_1 взаимодействующие частицы абразива и полимера, l – расстояние между ними.

Для функции $\Phi(l)$ в диссертации использован потенциал Морзе:

$$\Phi(l) = \varphi_0(e^{-2\beta l} - 2e^{-\beta l}), \quad (2)$$

где φ_0 и β параметры потенциала, которые определяются через модули Юнга и коэффициенты Пуассона взаимодействующих материалов.

Предложена модель нелокального взаимодействия материалов абразивных частиц и полимера, которая служит основанием для ее использования при расчете энергии адгезии защитной оболочки абразивной частицы и ее сердцевины на основании информации об их механических свойствах.

Разработана математическая модель прочности адгезии контакта абразив-полимер, учитывающая изменение свободной энергии адгезии полимера к поверхности абразива, при возникающих деформациях, что позволило выявить взаимосвязь прочности полимерного покрытия с его механическими свойствами (предел прочности, модуль Юнга), при известных геометрических характеристиках абразива.

При исследовании сплошности контакта полимера с поверхностью абразивного зерна, проведен анализ адгезии в зависимости от характера образовавшихся дефектов несоответствия условий сопряжения полей перемещений и напряжений, которые развиваются в абразивном зерне и полимерной оболочке. В диссертационной работе приведены формулы, позволяющие рассчитать несплошность адгезионного контакта оболочки и абразивного зерна. Основной из них является:

$$\beta = \frac{\partial W_{(12)}}{\partial \beta} = \left[1 + \frac{2W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha\beta}}{2W_{\beta\beta} - W_{\alpha\beta}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $W_{\alpha\alpha}$, $W_{\alpha\beta}$, $W_{\beta\beta}$ - величины, характеризующие адгезию материалов частиц полимера ($W_{\alpha\alpha}$), полимера и абразива ($W_{\alpha\beta}$) и абразива ($W_{\beta\beta}$).

На основе проведенного сравнения кинетической энергии абразива в оболочке со значениями энергии разрушения защитной оболочки зерна и с суммарной энергией адгезии оболочки и абразива установлено, что защитная оболочка при ударе зерна о стенку смесительной камеры не потеряет свою целостность, но из-за возникших в ней деформаций может отслоиться от абразивной середины, что не повлияет на ее эксплуатационные характеристики. При этом стенка смесительной камеры останется неповрежденной.

Приведен пример расчета жизненного цикла абразивной частицы в установ-

ке для гидроабразивного резания от момента попадания частицы в установку до момента ее удара об обрабатываемую поверхность.

В третьей главе получены экспериментальные данные о прочности абразива в полимерной оболочке, об эффективности покрытия и технологических возможностях при гидроабразивном резании, что позволило оценить степень влияния полученной полимерной оболочки на поверхности абразива на производительность гидроабразивного резания и снижение износа фокусирующей трубки сопла.

При исследовании динамической прочности установлено, что при угле падения абразивного зерна с полимерным покрытием равном 5° на плоскую преграду со скоростью 300 м/с, все частицы сохранили форму и результаты близки друг к другу (таблица 1).

Таблица 1 - Оценка динамической прочности абразива с полимерной оболочкой на разрушение при ударе о преграду

Абразивное зерно	Завод изготовитель	Материал полимерной оболочки	Коэффициент динамической прочности, K_d		
			Угол падения 5°	Угол падения 10°	Угол падения 20°
Черный карбид кремния	ОАО «Волжский абразивный завод»	ПЭГ 1500	0,99	0,97	0,94
		ПВС 16/1	1	0,99	0,93
		ПЭГ 400	0,99	0,97	0,93
Шлак медного производства	ООО «УралГрит» г. Екатеринбург	ПЭГ 1500	0,98	0,74	0,65
		ПВС 16/1	0,99	0,74	0,65
		ПЭГ 400	0,99	0,72	0,6
Гранатовый песок	ЮАР	ПЭГ 1500	0,99	0,95	0,85
		ПВС 16/1	1	0,95	0,85
		ПЭГ 400	0,99	0,92	0,9

Установлено, что при угле падения 20° тип покрытия можно не учитывать, так как разрушение зерна зависит от физико-механических свойств абразива, в частности, его твердости и микротвердости. Результаты разрушения расположились по мере снижения твердости частицы по шкале МООСа (карбид кремния – 9, гранатовый песок – 7,5, шлак – 6). Шлаки медного производства обладают меньшей динамической прочностью на 30-40 % по сравнению с гранатовым песком.

Проведенные испытания эффективности полимерной оболочки на абразивном зерне при истирании на установке для оценки абразивной способности «Ceramic Instruments s.r.l» (Италия) по ГОСТ 27180-2001, все типы абразивов, независимо от типа полимерного покрытия, показали значительное снижение следов царапин на контрольных образцах, практически до 100 %.

По полученным экспериментальным данным о сыпучести абразива в полимерной оболочке получена регрессионная зависимость от режимов нанесения покрытия, что позволяет характеризовать шероховатость полимерной оболочки и делать оценку транспортируемости абразива по каналам гидроабразивной установки.

Задача экспериментальных исследований сводилась к расчету величины отношения массы к затраченному времени и к площади отверстия (t , г/(с×мм²)). Получено уравнение регрессии в виде:

$$t = 1,15T_{\text{в вх}}^{-0,17} \rho^{-0,065}, \quad (4)$$

По результатам проведенных экспериментальных исследований построена графическая зависимость (рисунок 1).

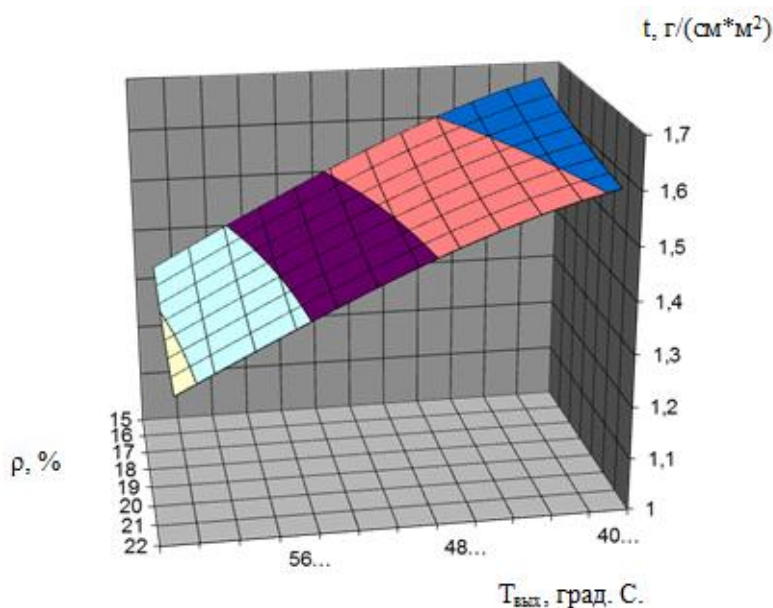


Рисунок 1 - Зависимость сыпучести абразива в полимерной оболочке от режимов нанесения покрытия

Исходя из полученных результатов, рекомендуется назначать температурный режим ближе к нижней границе диапазона для тех случаев, когда требуется высокая сыпучесть абразива по подводным каналам гидроабразивной установки.

Установлено, что шероховатость поверхности после резания гранатовым песком и абразивом в полимерной оболочке соответствует шероховатости $Rz = 1,8 - 3,2$.

При испытании опытного образца абразива в полимерной оболочке установлено, что наилучший результат по скорости гидроабразивной резки показал черный карбид кремния с полимерной оболочкой. Производительность увеличилась на 30 %.

Получен важный результат снижения износа при использовании черного карбида кремния, за счет применения абразива в полимерной оболочке (рисунок 2).

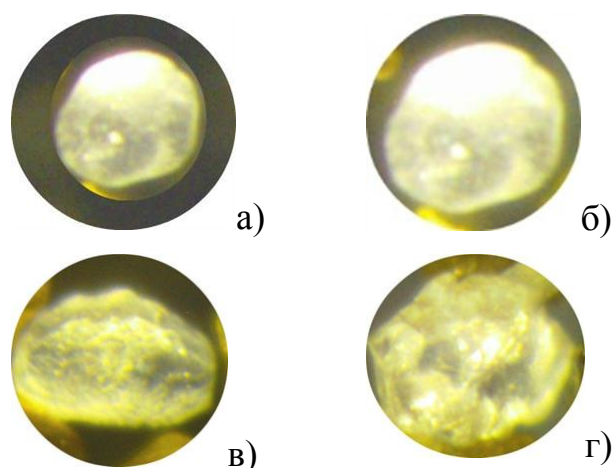


Рисунок 2 - Фотографии износа канала фокусирующей трубки

а) канал фокусирующей трубки при работе на исходном абразиве 5 мин – черный карбид кремния; б) канал фокусирующей трубки при работе на и абразиве с полимерным покрытием 1 час – черный карбид кремния ПВС 16/1

В четвертой главе разработаны технологические рекомендации нанесения полимерной оболочки на абразивное зерно в процессе микрокапсулирования, что позволило получить требуемую однородность и толщину покрытия, а так же обеспечить целостность полимерной оболочки в процессе эксплуатации.

Разработана технология изготовления абразива в полимерной оболочке. Определен вид оборудования и режимы нанесения полимерной пленки на поверхность абразива. Получены опытные образцы абразива в полимерной оболочке (рисунок 3).



а) ПЭГ 1500, б) ПЭГ 1500, в) ПЭГ 400, г) ПВС 16/1

Рисунок - 3 Фотографии опытных образцов абразива в полимерной оболочке

Разработаны рекомендации основных технических параметров абразива в полимерной оболочке, для достижения требуемого качества и производительности гидроабразивной резки (таблица 2).

Таблица 2 - Рекомендуемые технологические режимы нанесения полимерного покрытия на абразив в псевдооживленном слое

№ п/п	Технологический параметр	Значение
1	Q - расход воздуха, м ³ /час	1500 - 3000
2	T _{вых} - температура воздуха на выходе, град С	60
3	P _p - давление истечения раствора полимера, МПа	0,1
4	Q _p – расход жидкого раствора полимера, мл/мин	5 – 25
5	ρ - концентрация полимера, мл/мин	15 – 30 %
6	d – диаметр абразива, мкм	150 – 300

Сделаны рекомендации об условиях хранения и транспортировки абразива в полимерной оболочке.

Проведены испытания опытного образца абразива в полимерной оболочке и получены результаты, позволяющие говорить об эффективности его применения для гидроабразивной резки. Использование данного абразивного материала позволило повысить производительность гидроабразивной резки деталей из стального горячекатаного листа сталь 9ХС толщиной 50 мм на 30 % с сохранением требуемой точности (скорость резки увеличилась с 10 мм/мин до 13 мм/мин). Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы на предприятии ООО «Дорагромаш» составляет 740 тыс. рублей в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ направлений повышения эффективности гидроабразивного резания показал, что для повышения производительности необходимо использовать абразивы высокой и сверхвысокой твердости, но их применение оказалось невозможным из-за быстрого износа фокусирующей трубки, поэтому нанесение полимерной оболочки на поверхность абразивного зерна является перспективным ме-

тодом для решения этих проблем, однако, в настоящее время, отсутствуют какие-либо данные о возможности его реализации.

2. В результате исследования полной потенциальной энергии абразивной частицы с полимерным покрытием с учетом многочастичного взаимодействия как внутри абразива и покрытия, так и между ними, разработана математическая модель для оценки прочности адгезии контакта абразив-полимер, учитывающая изменение свободной энергии адгезии полимера к поверхности абразива, при возникающих деформациях, что позволило прогнозировать прочность полимерного покрытия с учетом геометрических характеристик абразива.

3. На основе изучения энергетических изменений при взаимодействии абразивного зерна в полимерной оболочке со стенками камеры смешивания сопла, канала фокусирующей трубки и поверхностью обрабатываемого материала получены теоретические зависимости и проведен расчет прочности адгезии контакта абразив-полимер, что позволило установить необходимые требования к механическим свойствам абразива и полимера для сохранения целостности покрытия в процессе эксплуатации.

4. Проведенные экспериментальные исследования эффективности полимерной оболочки на абразивном зерне при истирании все типы абразивов независимо от типа полимерного покрытия показали значительное снижение следов царапин на контрольных образцах, практически до 100 %, что позволяет говорить об эффективности покрытия.

5. При экспериментальных исследованиях опытного образца абразива в полимерной оболочке на станочном оборудовании установлено, что наилучший результат по скорости гидроабразивной резки показал черный карбид кремния с полимерной оболочкой. Производительность увеличилась на 30 %. Установлено, что шероховатость поверхности после резания абразивом в полимерной оболочке соответствует $Rz = 1,8 - 3,2$ мкм.

6. Впервые получен важный результат снижения износа сопла в несколько раз при использовании черного карбида кремния за счет применения абразива в полимерной оболочке.

7. По полученным экспериментальным данным о сыпучести абразива в полимерной оболочке получена регрессионная зависимость этого параметра от режимов нанесения покрытия, что позволило характеризовать шероховатость полимерной оболочки и сделать оценку транспортируемости абразива по каналам гидроабразивной установки.

8. Разработаны технологические рекомендации по нанесению полимерной оболочки на абразивное зерно, что позволяет получить требуемую однородность и толщину покрытия, а так же обеспечить целостность полимерной оболочки в процессе эксплуатации.

9. Использование абразива в полимерной оболочке позволило повысить производительность гидроабразивной резки деталей из стального горячекатаного листа сталь 9ХС толщиной 50 мм на 30 % с сохранением требуемой точности (скорость резки увеличилась с 10 мм/мин до 13 мм/мин). Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы на предприятии ООО «Дорагромаш» составляет 740 тыс. рублей в год.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

В изданиях, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук»

1. **Кожус, О.Г.** Исследование абразивной способности искусственных и природных абразивов, обеспечивающих производительность гидроабразивного резания [Текст] / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков, А.Ю. Винокуров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2018. – Т. 1. – №. 2. – С. 34-40.

2. **Кожус, О.Г.** Исследование механизма смешивания компонентов абразивной смеси для гидроабразивного резания [Текст] / Г.В. Барсуков, О.Г. Кожус, С.А. Шманев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2019. – №. 3. – С. 61-68.

3. **Кожус, О. Г.** Применение наномодифицированного абразива для гидроабразивного резания элементов кузова автомобилей из стеклопластика [Текст] / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // *Мир транспорта и технологических машин.* – 2016. – №. 2. – С. 45-52.

4. **Кожус, О. Г.** Исследование режущей способности наномодифицированного абразива из отходов цветного производства для гидроабразивного резания материалов [Текст] / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2016. – Т. 1. – №. 2. – С. 48-54.

5. Инновационные технологии резания сверхзвуковой струей жидкости: экономика, рынок, состояние и перспективы развития [Текст] / Е.Ю. Степанова, О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков // *Вестник Брянского государственного технического университета.* – 2017. – №. 1. – С. 243-253.

6. **Кожус, О.Г.** Разработка технологических приемов раскрытия деталей из стекло-текстолита гидроабразивной струей [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, О.Г. Кожус, Т.А. Журавлева // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. ПА Соловьева.* – 2017. – №. 2. – С. 267-274.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

7. Barsukov, G. Increasing of efficiency of environmentally friendly technology of AWJ of a glass fiber plastic / G. Barsukov, T. Zhuravleva, **O. Kozhus** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 012001.

8. Barsukov, G. Quality of Hydroabrasive Waterjet Cutting Machinability / G. Barsukov, T. Zhuravleva, **O. Kozhus** // Procedia Engineering. – 2017. – Т. 206. – С. 1034-1038.

9. **Kozhus, O.** Methodics of Quality of Hydroabrasive Waterjet Cutting Machinability Assessment / O. Kozhus, G. Barsukov, T. Zhuravleva // International Conference on Industrial Engineering. – Springer, Cham, 2018. – С. 1677-1685.

Другие публикации

10. Повышение энергоэффективности гидроабразивного резания за счет управления свойствами абразивного материала / Ю. С. Степанов, Г.В. Барсуков, **О.Г. Кожус** и др. // XVI международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век»: матер. конф. – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2018. – 175 с.

11. Резервы повышения экономической эффективности резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей / Е.Ю. Степанова, **О.Г. Кожус**, Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов // IV международная научно-практическая конференция. под редакцией И.Е. Илларионова. «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве»: матер. конф. - Чебоксары: 2018. - С. 290-295.

12. **Кожус, О.Г.** Оценка режущих возможностей модифицированных, искусственных и природных абразивов для гидроабразивного резания/ О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков С.А. Шманев. // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 31-36.

13. **Кожус, О.Г.** Исследование влияния свойств абразива с наномодифицированной поверхностью на качество раскрытия гидроабразивной струей кузовных элементов из стеклопластика автомобильного транспорта [Текст] / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // Информационные технологии и инновации на транспорте. – 2016. – С. 156-163.

14. **Кожус, О.Г.** Наномодификация поверхности абразива из вторичных техногенных отходов для повышения качества гидроабразивной резки [Текст] / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков // Междисциплинарные исследования молодых ученых: education, science, R&D: материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Орел: Изд-во Картуш, 2016. – 300 с.

15. **Кожус, О.Г.** Разработка технологии наномодификации поверхности зерна никелевого шлака для гидроабразивной резки [Текст] / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков // Региональная научно-практическая конференция им. А.Г. Шипунова: мате-

риалы III региональной научно-практической конференции.- Орел: Изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, 2016. - 219 с.).

Объекты интеллектуальной собственности

16. Сертификат о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018662137. Расчет сушилки кипящего слоя для сушки абразивных материалов в полимерной оболочке производительностью 0,7 кг/с / Барсуков Г.В., **Кожус О.Г.**, Кожус С.В., Пикалов Д.Н.; заявитель и патентообладатель: ООО «АбразивДжет».- №2018619592; дата поступл. 10.09.2018; зарегистр. В Реестре прогр. Для ЭВМ 27.09.2018.