

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.9:621.31

КИРИЕНКО
Александр Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО
ИНСТРУМЕНТА С УПРАВЛЕНИЕМ ОРИЕНТАЦИЕЙ АБРАЗИВНЫХ
ЗЕРЕН В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научный
руководитель

ЗАВИСТОВСКИЙ Сергей Эдуардович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и методики преподавания учреждения образования «Полоцкий государственный университет»

Официальные
оппоненты:

БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Марат Артемович, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»;

ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики поверхностных явлений отдела инженерии поверхности ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Оппонирующая
организация

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Защита состоится 24 мая 2019 г. в 16⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, аудитория 202; тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета

Автореферат разослан 24 апреля 2019 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно

© Кириенко А.С., 2019
© Белорусский национальный
технический университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Импорт эластичных шлифовальных инструментов достаточно велик. Объем всего потенциального ЕU-рынка эластичных шлифовальных инструментов в среднем ежегодно составляет 112,5 млн долл. Объем целевого рынка эластичных шлифовальных инструментов в странах ТС составляет 48,5 млн долл. в год. Объем реально доступного сегмента эластичных шлифовальных инструментов в Республике Беларусь составляет 4,5 млн долл. в год. Объем реально доступной доли рынка эластичных шлифовальных инструментов в стране равен 1,7 млн долл. в год. В связи с отсутствием в Республике Беларусь соответствующих производственных мощностей проведение научных исследований в данной области относится к основным направлениям замещения импортного шлифовального инструмента в машиностроении, и создание аналогичного производства было бы весьма целесообразным и актуальным.

В большинстве случаев отделочной обработки традиционными инструментами на эластичной основе реализуется резание обрабатываемых материалов хаотично расположенными зернами абразива. С одной стороны, это хорошо т.к. выполняется среднестатистическая обработка определенным количеством зерен, участвующих в резании, но присутствуют и негативные моменты: вследствие того, что некоторые зерна вызывают трение по своим граням, появляются пригары на обработанной поверхности, понижается качество обрабатываемых поверхностей деталей машин. Для получения высоких показателей производительности отделочной обработки необходимо стабилизировать условия резания в контакте поверхности детали и зерна абразива. В настоящее время нет четких рекомендаций, каким образом это можно сделать при шлифовании ленточным инструментом. В связи с этим появилась необходимость в разработке, исследовании и технологическом обеспечении процесса ориентации зерен абразива в электростатическом поле при получении ленточного шлифовального инструмента, использование которого решало бы указанные проблемы. Рационально ориентированные зерна абразива обладают повышенной режущей способностью, поскольку резание материала происходит по изученным законам лезвийной обработки. Известна зависимость между определенным образом сориентированными структурами рабочих слоев шлифовальных инструментов, геометрия которых влияет на напряженно-деформированное состояние абразивных зерен при шлифовании и эксплуатационными характеристиками самого инструмента. Однако отсутствуют научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы технологического обеспечения получения ориентированных ленточных шлифовальных инструментов и значений углов ориентирования зерен в рабочих слоях инструментов, используемых для шлифования конкретных конструктивных материалов. В связи с чем, указанная проблема является актуальной для изучения с целью управления поведением зерен абразива при формировании рабочего слоя инструмента для регулирования его эксплуатационных характеристик за счет реализации электростатического нанесения рабочего слоя из абразивных материалов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации была включена в утвержденный план работы кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» учреждения образования «Полоцкий государственный университет» на период 2003–2008 гг. и соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190): п. 7. Системы и комплексы машин; п. 8. Многофункциональные материалы и технологии. Результаты исследования соответствуют направлению Государственной программы «Научеёмкие технологии и техника» на 2016–2020 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 21.04.2016 № 327). Диссертационное исследование выполнялось в рамках ГНТП «Новые материалы и технологии» (подпрограмма «Новые материалы и защита поверхностей», раздел 1 «Новые материалы»), задание 1.61 «Разработать метод регулирования ориентации зерен абразива в абразивных материалах с использованием электростатического поля и создать на его основе технологию и оборудование для изготовления ленточного шлифовального инструмента. Освоить его опытно-промышленное производство» (2003–2005 гг., № ГР 20032635). Результаты работы получили отражение в отчетах научно-исследовательской темы ГБ № 925 «Разработка и исследование технологий. Совершенствование методики технологического образования» № ГР 20068 от 16.11.06 г.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка технологии изготовления ленточного шлифовального инструмента с управляемым ориентированием абразивных зерен в электростатическом поле, что позволит повысить производительность отделочной обработки поверхностей деталей машин.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач:

– проанализировать и обобщить теоретические и практические достижения в области формирования структуры и свойств рабочих слоев гибкого шлифовального инструмента, классифицировать существующие способы управления поведением абразивных материалов при создании рабочих слоев инструмента, обосновать целесообразность применения ориентирования зерен абразива при получении эластичных шлифовальных инструментов;

– разработать математическую модель процесса управления поведением абразивных зерен при создании рабочих слоев эластичного шлифовального инструмента, представляющую собой систему взаимосвязанных уравнений электромеханических и динамических явлений, сопровождающих этот процесс и связанных общими граничными и начальными условиями. Рационально задать эти условия и решить задачи по повышению эксплуатационных свойств эластичных шлифовальных инструментов;

– разработать способ управления эксплуатационными свойствами эластичного шлифовального инструмента для повышения производительности шлифования деталей машин;

– исследовать физико-механические, эксплуатационные свойства и восприимчивость абразивных дисперсных материалов к процессам управления их поведением при получении рабочих слоев эластичного шлифовального инструмента;

– на базе полученных результатов разработать научные основы технологического обеспечения получения рабочих слоев ленточного шлифовального инструмента с эффективным управлением эксплуатационными свойствами, конструирования и изготовления установки для получения рабочего слоя инструмента и экспериментального оборудования для комплексной оценки эксплуатационных характеристик инструмента;

– разработать и внедрить оборудование при проектировании новых технологических процессов и организации опытно-промышленного производства ленточных шлифовальных инструментов, обладающих повышенной износостойкостью и режущей способностью для шлифования ими поверхностей деталей машин, позволяющих повысить производительность шлифования в 1,3–1,5 раза.

Научная новизна

1. Научно обоснован управляемый процесс ориентированного перемещения абразивного зерна в электростатическом поле, с учетом начальных условий шлифования и для повышения производительности шлифовальных инструментов, позволяющий получать однослойный ленточный шлифовальный инструмент с необходимыми эксплуатационными свойствами.

2. Выявлена аналитическая зависимость между глубиной проникновения абразивного зерна в клеевую связку, характеристиками его свойств, углом ориентированности и напряженностью электростатического поля, дистанцией нанесения абразивных зерен, позволяющая рассчитать технологические параметры процесса формирования рабочего слоя из различных абразивных материалов с заданными свойствами;

3. Установлены значения ориентированности в электростатическом поле зерен абразива при формировании рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента, определяющие условия повышения износостойкости и режущей способности инструмента.

4. Экспериментально подтверждена зависимость эксплуатационных характеристик шлифовальных лент с ориентированными электростатическим полем абразивными зёрнами от геометрических, физико-механических характеристик используемого абразивного материала, напряженности электростатического поля, скорости и глубины проникания абразивных зерен в связку, дистанции нанесения и угла их ориентированности относительно основы ленты;

5. Обоснован выбор абразивного материала, клеевой связки, основы ленты, параметров процесса формирования рабочего слоя, управления эксплуатационными свойствами ленточного шлифовального инструмента с ориентацией в электростатическом поле наносимых абразивных зерен с учетом их режущей способности и электростатической восприимчивости, что позволило повысить производительность шлифования в 1,3–1,5 раза за счет рациональной макрогеометрии получаемого рабочего слоя.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Математические зависимости, устанавливающие связь между физико-механическими и геометрическими параметрами абразивных материалов, углами ориентирования зерен абразива, расстоянием перемещения зерен, напряженностью электростатического поля, скоростью перемещения абразива, позволяющие опре-

лить пределы значений технологических параметров образования рабочего слоя из ориентированных в электростатическом поле абразивных материалов, обеспечивающих начальные условия при разработке технологии и оборудования для получения ленточного шлифовального инструмента.

2. Результаты теоретического исследования влияния геометрических параметров абразивных зерен, определенным образом сориентированных в рабочем слое инструмента и взаимодействия материалов «абразив – металл» на режущую способность инструмента при шлифовании ориентированным абразивным зерном, позволяющие определить диапазон значений углов ориентированности абразивных зерен относительно основы, обеспечивающий увеличение режущей способности ленточного шлифовального инструмента.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров электростатического нанесения зерен абразива (марка, форма и зернистость абразива, дистанция нанесения абразива, выходное напряжение генератора электростатического поля, скорость протягивания тканевой основы) на параметры получаемого рабочего слоя (ориентированность зерен, концентрация абразива в рабочем слое, глубина проникновения абразива в связку), которые позволили выбрать марку, форму и размеры абразивного материала, определить технологические параметры его нанесения в электростатическом поле для формирования равномерной ориентированной макроструктуры рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния геометрических параметров ориентированных абразивных зерен рабочих слоев ленточных шлифовальных инструментов на их эксплуатационные характеристики (режущую способность, износостойкость, прочность закрепления абразива в связке), позволяющие определить оптимальные значения угла ориентированности зерен абразива относительно основы, обеспечивающие увеличение эксплуатационных характеристик в 1,3–1,5 раза в сравнении с традиционными инструментами.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния геометрических параметров ориентированных абразивных зерен однослойных ленточных шлифовальных инструментов на шероховатость обработанных поверхностей валов, позволяющие регламентировать оптимальные значения зернистости и углов ориентированности абразива относительно основы для обеспечения соответствующего качества обработанных поверхностей.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены как самим соискателем, так и при участии соавторов. Совместно с научным руководителем канд. техн. наук., доцентом, доцентом кафедры технологии и методики преподавания С.Э. Завистовским; канд. техн. наук., ведущим научным сотрудником ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» Ю.Н. Гафо; д-р. техн. наук., профессором кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» им. С.И. Губкина БНТУ К.Е. Белявиным, автор исследовал макроструктуры рабочих слоев инструмента с ориентированными зёрнами абразива, выполнив ряд совместных публикаций.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Представленные результаты работы доложены и обсуждены на: МНПС «Современные материалы и технологии в механообработке» (г. Таганрог, 2002, 2004 г.), МНТК «Механика машин. Теория и практика» (г. Минск, 2002 г.), МНТК «Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин» (г. Новополоцк, 2002–2007 гг.), 4-й РСНТК «Новые материалы и технологии их обработки» (г. Минск, 2003 г.), МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2003–2006 гг.), МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (г. Минск, 2003 г.), МНТК «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия» (г. Минск, 2004, 2007 г.), МС «О природе трения твердых тел» (г. Гомель 2004 г.), МНТК «Прогрессивные технологии обработки металлов давлением» (г. Минск 2004 г.), МНТК «Научные проблемы и перспективы развития ремонта, обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей» (г. Москва, 2004 г.), МНТК «Соединение и резка материалов, покрытий» (г. Минск, 2006 г.), МНТК «Инженерия поверхности». (г. Брест, 2007 г.), МНТК «Техника и технологии: инновации и качество» (г. Барановичи, 2007 г.), МНТК «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (г. Минск, 2008, 2018 г.), МНТК «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (г. Новополоцк, 2009 г.), МНТК «Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ»» (г. Новополоцк, 2011, 2015, 2018 г.). Результаты исследования использованы в производственных условиях ОАО «Полоцкий завод ПРОММАШРЕМОНТ» для изготовления и использования ленточно-го шлифовального инструмента.

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 39 научных трудов, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь общим объемом 4,5 авт. л., 27 статей в сборниках материалов международных научно-технических конференций. Получены 5 патентов Республики Беларусь.

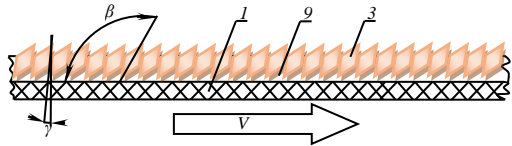
Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, общей характеристики работы, основной части, включающей пять глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа представлена на 227 страницах, содержит 59 иллюстраций, 28 таблиц, библиографический список из 177 наименований включая 39 публикаций автора, 51 страница приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первая глава диссертационной работы содержит анализ теоретических и практических знаний, закономерностей и факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ленточных шлифовальных инструментов, существующие способы управления поведением абразивных материалов при формировании рабочих слоев. Предлагается повысить производительность отделочной обработки ленточным инструментом путем образования наиболее рациональной ориентации зерен абразива в рабочем слое, схема которой показана на рисунке 1.

Анализ кинематики абразивного зерна при эластичном шлифовании позволил выявить зависимость глубины внедрения зерна, нагрузки на шлифующее зерно, температуры в зоне резания, режимов шлифования от длины кривой контакта, размеров и формы самого зерна, геометрии макроструктуры рабочего слоя инструмента. Оптимизация этих



1 – эластичная основа; 2 – клеевая связка; 3 – абразивный материал; γ – передний угол резания, град.;

β – угол ориентированности абразива относительно основы, град.

Рисунок 1. – Схема рациональной ориентации зерен абразива в рабочем слое относительно движения резания

параметров позволяет достигнуть требуемых характеристик производительности шлифовальной обработки. Для выявления этих способов изучено влияние параметров рабочего слоя абразивного инструмента на его эксплуатационные характеристики. Анализ числа абразивных зерен, действующих в пределах дуги контакта в зависимости от технологических условий обработки, позволяет сделать вывод о том, что число абразивных зерен, действующих в пределах дуги контакта, зависит, прежде всего, от зернистости инструмента, геометрии его поверхности, режимов обработки (V_s , V_w , S , t), следовательно, верно, что макроструктура рабочего слоя шлифовального инструмента влияет на его режущую способность и стойкость, а также на параметры шлифовальной обработки. На основании проведенного анализа напряженно-деформированного состояния и последующих перемещений абразивного зерна в связке, обусловленных воздействием нормальной и касательной нагрузок, выявлены особенности, которые необходимо учитывать при создании гибкого инструмента. Повышению долговечности инструмента будет способствовать применение эластичных связок, обладающих высокой адгезионной способностью к наполнителю, способных выдерживать без разрушения перемещение абразивного зерна до половины его размера. Расположение зерен абразива под углом β к эластичной основе требует применения связок, исключающих возможность образования пор при отверждении. Благодаря наличию растягивающих напряжений в прилегающих к режущей кромке областях и периодическому разрушению кромок при резании ориентированным абразивом обеспечивается его самозатачивание. Соответственно, значительное влияние на режущую способность и стойкость абразивного зерна оказывает его ориентированность относительно движения резания, и изменение угла ориентирования зерен абразива в рабочем слое на 120 – 140° относительно основы должно приводить к увеличению производительности

примерно в 1,5 раза, что является весьма ощутимым резервом использования абразивных материалов в шлифовании. Обработка ленточным шлифовальным инструментом с ориентированным положением зерен абразива позволит заменить твердые и дорогостоящие абразивные материалы на материалы средней твердости. Анализ известных способов воздействия на абразивные материалы для изменения их характеристик, процессов, приводящих к ориентированию абразивов, позволил предложить эффективный механизм управляемого формирования рабочих слоев из зерен абразива, ориентированных в электростатическом поле, учитывающий факторы, влияющие на процесс получения, на стойкость и режущую способность шлифовальных инструментов, вследствие чего, учитывается особенность шлифовальной обработки различных материалов и расширяются технологические возможности.

Во второй главе описываются исследования способа формирования рабочих слоев инструмента из абразивных зерен, ориентированных в электростатическом поле, прочности и производительности изготовленных образцов шлифовальных лент для чего разработана методика комплексного исследования механических и эксплуатационных характеристик, включающая: отбор абразивных материалов для получения шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя по размерам, форме и восприимчивости абразивов к воздействию электростатического поля; исследование технологических параметров электростатического нанесения рабочего слоя из электрокорунда; исследование характера расположения зерен абразива относительно поверхности тканевой основы и вектора направления движения резания; исследование эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зернами электрокорунда; статистическую обработку результатов исследований получения ленточного шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя из ориентированных зерен электрокорунда. Для исследования технологических параметров электростатического нанесения рабочего слоя инструмента

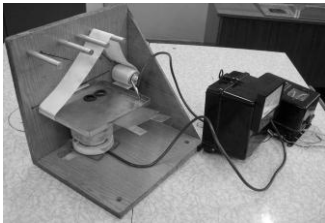


Рисунок 2. – Установка для исследования режимов электростатического нанесения покрытий из абразивных зерен

изготовлена экспериментальная установка, представленная на рисунке 2, в которой реализуется схема ориентации абразивного зерна в электростатическом поле симметричной системы электродов и в качестве генератора электростатического поля используется специально разработанное высоковольтное устройство, генерирующее электростатическое поле, напряженностью от 10 до 40 кВ. Методика исследования характера расположения зерен абразива при электростатическом нанесении рабочего слоя состояла из количественного стереологического анализа образцов инструмента с помощью программного комплекса обработки и анализа изображений «Autoscan», разработанного НИИ ПФП им.

А.Н. Севченко, г. Минск; исследования макроструктуры экспериментальных образцов на микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-21 производства ЛОМО (С.-ПЕТЕРБУРГ, РФ) и сканирующем электронном микроскопе СЭМ в ГНУ ИПМ. Для исследований износостойкости и режущей способности разработано специальное устройство, пока-

занное на рисунке 3. Упомянутые выше специальные экспериментальные методики защищены патентами на полезные модели.

Исследование шероховатости поверхностей образцов, шлифованных в процессе изучения эксплуатационных свойств ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зернами абразива, проводили в соответствии с методикой измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи профилографа Mitutoyo SJ-410 с графической регистрацией профиля. Достоверность результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждается их воспроизводимостью, а также использованием апробированных методик и средств измерений, прошедших метрологическую аттестацию.

В третьей главе решаются задачи теоретических исследований моделирования процесса формирования ориентированной в электростатическом поле макроструктуры рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента и влияния на его эксплуатационные характеристики.

Процесс нанесения рабочего слоя инструмента под действием электростатического поля, схематично представленный на рисунке 4, описывается тремя последовательно протекающими стадиями: заряджение частицы, образование заряженного

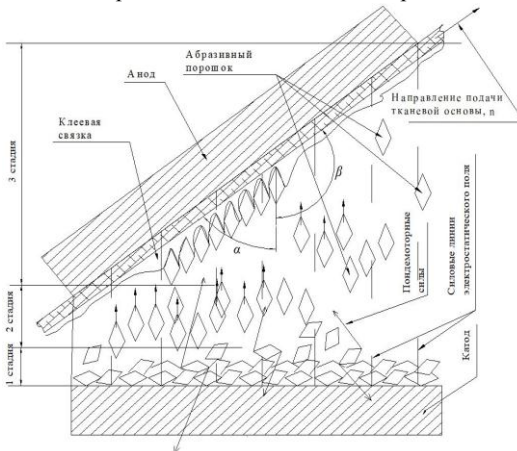
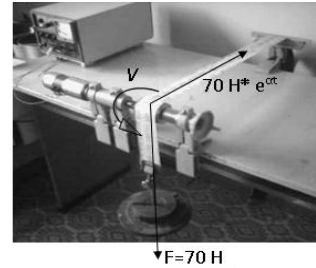


Рисунок 4. – Стадии процесса получения рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента в электростатическом поле

диполя с последующей его ориентацией в направлении действия электростатического поля; отрыв от поверхности электрода и полет заряженного диполя под действием электростатического поля; контакт и проникновение движущейся частицы в вязкую основу. В соответствии с требованиями неравноосности формы абразивных зерен принята физическая модель зерна абразива с соотношением сторон 4 к 1 в виде цилиндра с коническими концами и углом конусности 2γ (рисунок 5, а). На стадии моделирования процесса воздействия



V – скорость шлифования, м/с,
 F – усилие прижима, Н
Рисунок 3. – Установка для исследования механических свойств в ленточного абразивного инструмента

го способа эффективного формирования рабочего слоя инструмента из зерен, ориентированных в электростатическом поле разработана математическая модель, включающая:

– зависимость, определяющую размеры зерен абразива от условий электростатического поля:

$$a \leq \frac{27\varepsilon_0\varepsilon}{4g\rho(\varepsilon + 2\varepsilon_0)} E^2, \quad (1)$$

где a – размер абразивного материала, м; E – напряженность электростатического поля, кВ/м; ρ – плотность абразивного материала, кг/м³, ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы; ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м = $8,85 \cdot 10^{-12}$ м⁻³·кг⁻¹·с⁴·А²; g – ускорение свободного падения, м/с²;

– зависимость, определяющую оптимальную дистанцию перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от размеров зерна, скорости и условий электростатического поля:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho}{2} \frac{V^2}{9\varepsilon_0 E^2 - 4\rho a g}, \quad (2)$$

где L – оптимальное расстояние нанесения абразива на проклеенную основу, м;

– зависимость, определяющую скорость проникновения абразива v_0 , м/с в клеевую среду основы от размеров абразивного материала, действующих сил сопротивления при величине угла проникновения – γ :

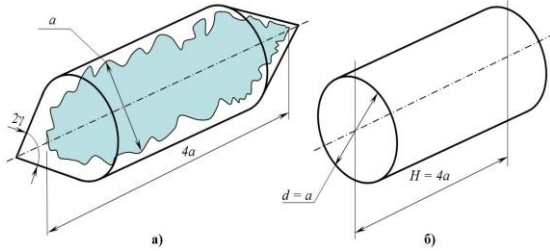
$$v_0 = \sqrt{-\frac{2}{5} b H_{\max}^{5/2} F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)}, \quad (3)$$

при угле атаки $\alpha = const$, $\lambda = const$, $\lambda \neq 0$, комплексном параметре $b = -2 \frac{\beta v_0^2}{m}$

гипергеометрической функции F и максимальной глубине проникновения абразива в клеевую среду H_{\max} , м;

– зависимость, определяющую оптимальное расстояние перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от технологических параметров напряженности электростатического поля, марки и размера абразива, глубины и углов проникновения абразива, учитывая, что $V = v_0$:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho b H_{\max}^2 F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)}{5(9\varepsilon_0 E^2 - 4\rho a g)}. \quad (4)$$



a – модель формы абразивного зерна;
 b – упрощенная модель абразивного зерна
 Рисунок 5. – Физическая модель абразивного зерна

Математическая модель является основой для определения технологических параметров формирования рабочего слоя нанесением абразива в электростатическом поле. Решив данную систему уравнений для абразивного материала электрокорунд 14А, ориентированного в электростатическом поле при максимальной глубине проникновения в клеевой слой $H_{max} = 2a$ получили расчетную зависимость технологических параметров нанесения рабочего слоя инструмента, показанную на рисунке 6. Исследования показали, что наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на процесс проникновения абразива в клеевой слой, являются их масса, размеры, форма, фактор скорости, угол атаки, толщина клеевого слоя и его вязкость. Увеличить глубину проникновения зерна можно за счет уменьшения вязкости клеевого слоя (например, выбором его состава или температуры нагрева).

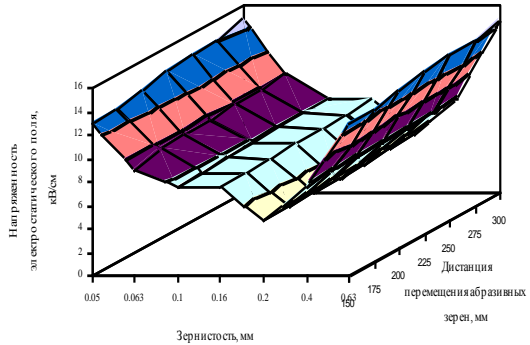
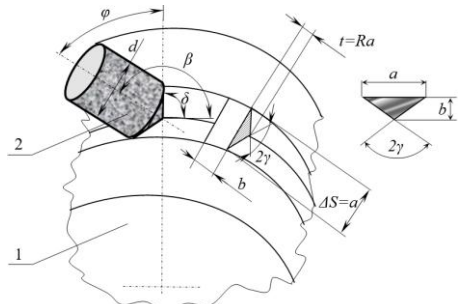


Рисунок 6. – Зависимость напряженности электростатического поля от зернистости электрокорунда 14А и дистанции перемещения абразивных зерен при электростатическом нанесении рабочих слоев

При моделировании эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента исследовано и выявлено влияние формы и целенаправленной ориентации абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. Для повышения удельной мощности взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемого металла при прочих равных условиях необходимо целенаправленно сортировать абразивные зерна в рабочем слое инструмента. В связи с этим геометрию резания ориентированным абразивным зерном представили в соответствии с рисунком 7.

Установив общий объем сошлифованного с цилиндрической заготовки материала на участке длиной l , равной ширине шлифовальной ленты, определили режущую способность ленточного шлифовального инструмента с целенаправленной ориентацией абразивных зерен в рабочем слое, как соотношение объема сошлифованного материала с заготовки $V_{общ}$ за единицу времени τ по формуле:



1 – обрабатываемая заготовка; **2** – абразивное зерно; t – глубина резания; b – ширина срезаемого слоя, d, a – размер абразивного материала; Ra – шероховатость ошлифованной поверхности
Рисунок 7. – Схема резания ориентированным абразивным зерном

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n a \cdot \sin \beta}{4\tau} \cdot n_i \cdot \pi D \cdot l \cdot n_{об}, \quad (5)$$

где n_i – количество абразивных зерен, участвующих в шлифовании; l – длина сошлифованного участка, равная ширине шлифовальной ленты, мм; D – диаметр шлифуемой заготовки, мм, $n_{об}$ – число оборотов цилиндрической заготовки. Для выявления зависимости между рациональными углами ориентирования зерен абразива и режущей способностью инструмента, обеспечивающих наиболее оптимальные параметры шлифования рассмотрели модель процесса взаимодействия материалов «абразив – металл». При рассмотрении процесса внедрения абразивного материала в шлифуемую поверхность металлической заготовки в расчетах износа абразива исходим из модели конуса трения «абразив – металл», при которой тангенс угла φ равен коэффициенту сопротивления резанию

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F_{\max}}{N} = f, \quad (6)$$

где N – вектор нормальной реакции; F_{\max} – вектор силы сопротивления резанию. В связи с чем оптимальный угол ориентированности абразивных зерен относительно основы ленточного шлифовального инструмента равен

$$\beta = \delta + \varphi = 90^\circ + \varphi. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) позволяют определить коэффициенты сопротивления резанию f при шлифовании ленточным шлифовальным инструментом с ориентированными зернами абразива. Представив все иные факторы, влияющие на режущую способность ленточного шлифовального инструмента Q в виде коэффициента k в соответствии с (5) определили режущую способность по формуле

$$Q = k \cdot \sin \beta. \quad (8)$$

В соответствии с выражением (5) определены расчетные значения режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента при углах ориентированности β зерен абразива зернистостью a , равной 0,10, 0,16 и 0,20 мм (рисунок 8).

В соответствии с рисунком 8 для всех зернистостей максимальное значение режущей способности Q_{\max} достигается при угле ориентированности абразива относительно основы $\beta = 90^\circ$. Например, для абразивного зерна зернистостью $a = 0,10$ мм режущая способность $Q_{\max} = 255 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Оптимальные значения углов ориентированности β для исследуемых

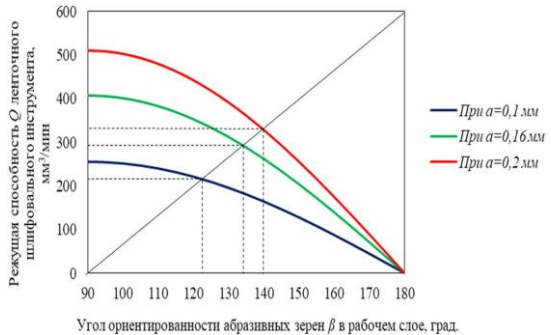
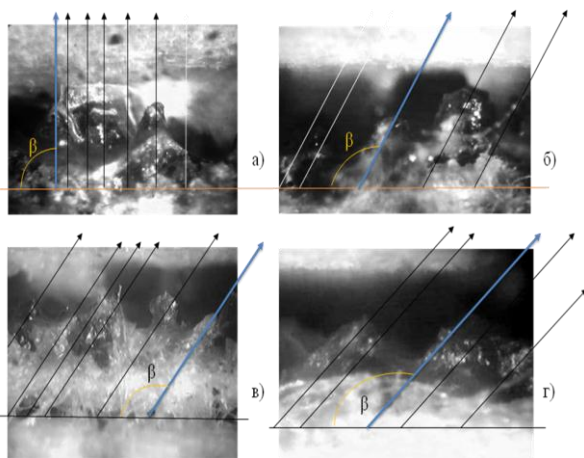


Рисунок 8. – Зависимость режущей способности Q ленточного шлиф овального инструмента от угла ориентированности абразивных зерен β

зернистостей абразива установили в соответствии со статистическим методом графического определения оптимальных границ, проведя биссектрису на рисунке 8. В результате для зерен зернистостью $a = 0,10$ мм оптимальное значение угла ориентированности $\beta = 123^\circ$ при котором режущая способность $Q = 214$ мм³/мин, что согласуется с алгебраическими расчетами. Для зерен зернистостью $a = 0,16$ мм $\beta = 135^\circ$, а $Q = 288,98$ мм³/мин. Для зерен зернистостью $a = 0,20$ мм $\beta = 140^\circ$, а $Q = 328,46$ мм³/мин. Подставив эти значения в выражение (8) определили значения коэффициента k для исследуемых зернистостей абразива. Так $k = 255$ для зерен зернистостью 0,10 мм, $k = 408,19$ для зерен зернистостью 0,16 мм и $k = 510,24$ для зерен зернистостью 0,20 мм, что доказывает верность соотношения $k = Q/\sin\beta = Q_{max}$ и правильность вышеописанных математических зависимостей. Данный математический аппарат использован при создании оборудования и технологического процесса, реализующих механизм управляемого получения рабочих слоев из зерен, ориентированных в электростатическом поле относительно тканевой основы и направления движения резания.

Четвертая глава содержит результаты исследований формирования рабочих слоев ленточных шлифовальных инструментов, содержащих ориентированные в электростатическом поле абразивные зерна, их эксплуатационных характеристик и показателей шероховатости поверхностей шлифуемых заготовок. Исходя из данных анализа и микроскопических исследований формы, структуры, физико-механических свойств, прочности, электростатической восприимчивости, плотности и эксплуатационных характеристик абразивных материалов обозначены следующие критерии выбора номенклатуры абразивов для исследований: максимальная величина фактора неравноности абразивного зерна; оптимальный размер зерна; минимальная стоимость. Соответственно особое внимание уделено осколочной и пластинчатой формам зерен. В результате исследований из многообразия абразивов выбран материал – электрокорунд 14А, соответствующий дисперсным материалам, восприимчивым к действию электростатических полей. Исследования технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с регулируемой в электростатическом поле ориентацией зерен абразива показали, что с каждым равным увеличением расстояния переноса, зернистости электрокорунда 14А и снижением выходного напряжения генератора электростатического поля значение изменения массы опытных образцов полочных инструментов уменьшается, что свидетельствует о снижении эффективности процесса формирования рабочих слоев инструмента в 1,5–2,5 раза. Поверхность экспериментальных образцов шлифовального инструмента становится неравномерной, что негативно сказывается на его рабочих характеристиках. Результаты микроскопических исследований свидетельствуют о регулируемом характере распределения и ориентированности зерен абразива в шлифовальной ленте. Количественная оценка распределения зерен абразива после соответствующей обработки позволила рекомендовать оптимальные режимы формирования рабочего слоя: расстояние перемещения зерен абразива – 50 мм; выходное напряжение генератора – 40 кВ; зернистость абразивного материала – 0,16–0,20 мм; скорость протягивания тканевой ленты – 0,5–1,0 м/мин. В результате исследований рабочих слоев ленточных шлифовальных инструментов с ориентированными зернами абразива получены фотографии продольного разреза изготовленных образцов шлифовальной ленты в различных технологических условиях (угол нанесения, зернистость) и традиционных, показанные на рисунке 9.



увеличение $\times 200$

β – угол ориентированности абразива по отношению к поверхности основы;

a – образец № 105 при $\beta = 90^\circ$; *б* – образец № 190 при $\beta = 110^\circ$;

в – образец № 280 при $\beta = 120^\circ$; *г* – образец № 460 при $\beta = 140^\circ$

Рисунок 9. – Ориентированность зерен электрокорунда 14А в рабочих слоях экспериментальных образцов инструмента

Анализ полученных снимков позволил сделать следующие выводы:

1) Электростатическое поле оказывает влияние на ориентированность зерен абразива в шлифовальной ленте, при этом, их концентрация и ориентированность зависит от направления вектора напряженности поля.

2) Наибольшие глубина и концентрация зерен абразива достигается при направлении вектора напряженности электростатического поля под углом 90° к поверхности тканевой основы.

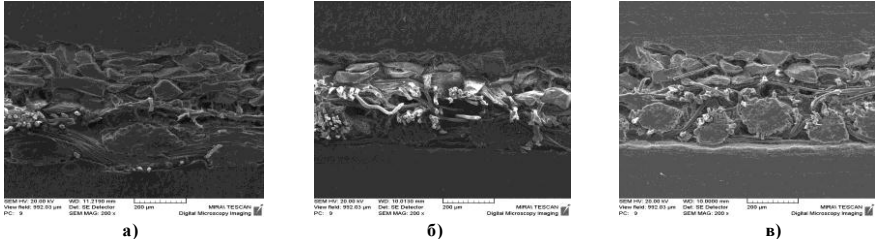
3) Уменьшение угла между вектором напряженности электростатического поля и поверхностью ленты приводит к уменьшению угла между большей осью зерна абразива и поверхностью ленты, а также к снижению концентрации зерен в рабочем слое и глубины их проникновения в клеевой слой. При этом отмечается увеличение разности между этими углами на $2-4^\circ$.

4) Зерна меньшего размера при одних и тех же параметрах электростатического поля в среднем проникают на меньшую глубину, и их концентрация меньше, чем у более крупных.

Макроскопические исследования изготовленных образцов, вырезанных из ленты в направлении, поперечном ее перемещению в процессе шлифования, показало, что видимой анизотропии расположения зерен абразива не наблюдается. Проведены сравнительные исследования изготовленных образцов ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зернами абразива с образцами традиционных эластичных шлифовальных инструментов (рисунок 10, 11). В ходе детального исследования шлифов и обработки полученных результатов приходим к выводу, что зерна абразива, закрепленные в клеевой основе, ориентируются при их перемещении в электростатическом поле к основе, повернутой на определенный угол, в отличие от их хаотического расположения в традиционных шлифовальных инструментах.

При увеличении расстояния перемещения абразивов в электростатическом поле с 50 до 200 мм, увеличении напряжения генератора электростатического поля с 10 до 40 кВ и скорости протягивания тканевой основы с 0,5 до 1 м/мин для абразива зернистостью от 0,20 до 0,63 мм, количество зерен на единицу площади в полученном слое

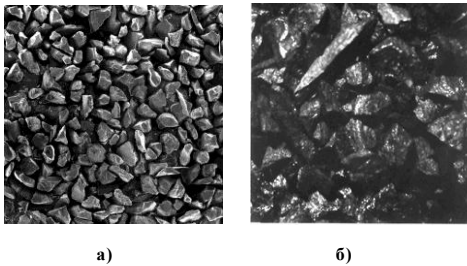
пропорционально уменьшается с 89% от общей площади образца до 5,1%, а при перемещении абразива размером от 0,16 до 0,20 мм количество зерен на единицу площади практически неизменно и составляет 86–89 % от общей площади поверхности полученных образцов.



увеличение $\times 100$

а – с хаотичным расположением зерен многослойной рабочей поверхности, полученной механической насышкой абразива; *б* – с хаотичным расположением зерен однослойной рабочей поверхности, полученной неуправляемым электростатическим нанесением; *в* – с ориентированными зернами однослойной рабочей поверхности, полученной электростатическим нанесением абразива с углом ориентированности $\beta = 140^\circ$

Рисунок 10. – Образцы эластичного шлифа овального инструмента



а – образец №55 с направлением зерен под углом 90° к основе при увеличении $\times 100$;

б – образец №595 с направлением зерен под углом 160° к основе при увеличении $\times 200$

Рисунок 11. – Экспериментальные образцы рабочих слоев инструмента из электрокорунда 14А размером зерен 0,16–0,20 мм

При этом направление вектора напряженности электростатического поля под углами к основе в диапазоне $120\text{--}140^\circ$ приводит к ориентированности 85–90 % абразивных зерен в слое, однако дальнейшее увеличение значений углов приводит к снижению концентрации абразива в рабочем слое и глубины их проникновения в слой.

В результате сравнения экспериментальных значений износостойкости (рисунок 12) ленточных шлифовальных инструментов, с нормативными установлено, что стойкость образцов с ориентированными под углом 90° зернами абразива входит в предел нормативных значений равных $14\text{--}70 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$, однако они ниже в 1,2 раза его верхнего предела, а образцов инструмента с ориентированными под углами 120° , 140° и 160° зернами абразива выше максимального нормативного показателя в 1,3–1,5 раза.

В результате сравнения данных исследований режущей способности (рисунок 13) экспериментальных образцов инструмента с различными углами ориентированности зерен абразива с расчетными (см. рисунок 8) и нормативными показателями по ГОСТ 5009–82 установлено, что нанесение абразива под углами к тканевой основе в диапазоне $120\text{--}140^\circ$ в электростатическом поле позволяет повысить режущую способность в 1,3–1,5 раза, что подтверждает теоретические расчеты.

Установлено, что прочность закрепления абразивного зерна в связке образцов инструмента с ориентированностью зерен абразива под углами 90° и 110° ниже в 1,3 раза, а образцов инструмента с ориентированностью зерен абразива под углами 120° , 140° и 160° выше в 1,3–1,5 раза. В связи с чем, для используемых размеров зерен с учетом допустимого отклонения $\pm 4^\circ$ приняты следующие рациональные углы ориентированности: при $a = 0,10$ мм угол $\beta = 120^\circ \pm 4^\circ$; при $a = 0,16$ мм угол $\beta = 130^\circ \pm 4^\circ$; при $a = 0,20$ мм угол $\beta = 140^\circ \pm 4^\circ$.

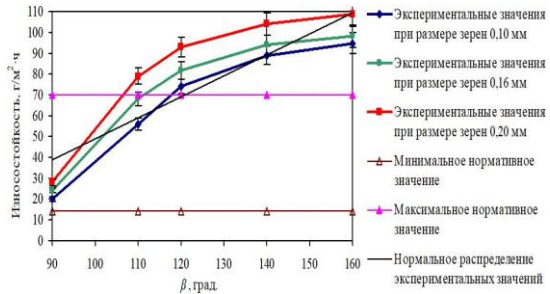


Рисунок 12. – Зависимость износостойкости образцов абразивосодержащих покрытий от угла ориентированности β зерен абразива

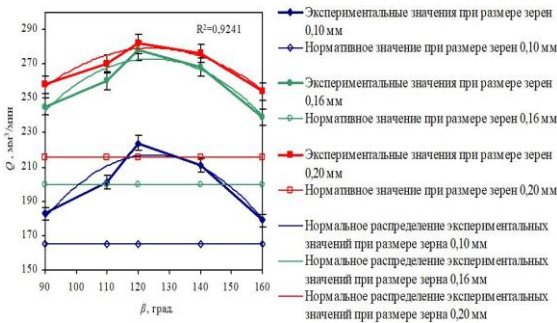


Рисунок 13. – Зависимость режущей способности Q образцов абразивосодержащих покрытий от угла ориентированности β зерен абразива

Исследования шероховатости поверхностей 15 валов диаметром 50 мм из стали 45 шлифованных абразивами ленточного шлифовального инструмента, полученного при ориентировании зерен электрокорунда 14А зернистостью 0,10, 0,16, 0,20 мм относительно тканевой основы под углами 90° , 110° , 120° , 140° и 160° на профилографе Mitutoyo SJ-410 установили, что достигнутые показатели шероховатости $Ra=0,14–0,54$ мкм соответствуют ГОСТ 2789–73. Также установлено, что шероховатость поверхности исследуемых образцов в большей степени зависит от размера зерна абразива инструмента, нежели от угла ориентирования абразивных зерен в инструменте. На основе результатов исследований разработан технологический процесс получения ленточного шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя из ориентированных зерен электрокорунда, включающий: аппретирование тканевой основы, нанесение клеевого слоя, электростатическое нанесение абразивного материала, сушку, нанесение закрепляющего слоя клея, термообработку, маркировку, контроль и упаковку.

Пятая глава посвящена практической реализации и перспективам использования результатов исследования. Разработанная технология и опытно-промышленная установка УЛШ-60 для изготовления ленточного шлифовального инструмента, показанная на рисунке 14 использованы в производственных условиях ОАО «Полоцкий завод

«ПРОММАШРЕМОНТ» на организованном опытном участке при изготовлении для собственного потребления партии ленточного шлифовального инструмента.



Рисунок 14. – Опытно-промышленная установка УЛШ-60 для производства ленточного шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочих слоев из ориентированных зерен электрокорунда

Приемочные испытания установки УЛШ-60 подтвердили, что оборудование обеспечивает технические характеристики: диапазон изменения угла ориентации зерен абразива от 90° до 140° ; ширина исходной текстильной ленты 60 мм; емкость приемного барабана до 500 м; диапазон изменения скорости протягивания ленты 0,23–1,0 м/мин; максимальный электростатический потенциал генератора 40 кВ; диапазон изменения расстояния от электрода до подложки 0,01–0,1 м; диапазон регулирования подачи дисперсного абразива 0–0,5 кг/мин. Приемочные испытания изготовленной партии доказали, что поворот зерен электрокорунда на 120 – 140° , относительно тканевой основы приводит к росту производительности механической обработки заготовок из стали 45 в 1,3–1,5 раза. Все образцы инструмента соответствуют предъявляемым требованиям базового стандарта ГОСТ 5009 «Лента шлифовальная тканевая», что позволило разработать технические условия ТУ ВУ 300220696.001–2018 «Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированными абразивными зёрнами». В производственных условиях ОАО «ПРОММАШРЕМОНТ» освоено получение нового ленточного шлифовального инструмента с использованием электрокорунда 14А шириной 60 мм в количестве 50 000 п.м/год стоимостью 10 000 у.е. и годовым экономическим эффектом от изготовления и использования взамен приобретаемого на сумму 16 855,32 у.е./год. Срок окупаемости составил 0,95 года. Основные результаты работы также подтверждены ОАО «Оршанский инструментальный завод».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе разработанной математической модели образования рабочего слоя из рационально ориентированных в электростатическом поле зерен абразива ленточного шлифовального инструмента, учитывающей взаимосвязь между физико-механическими и геометрическими параметрами абразивных материалов (плотностью ρ и размером абразива a), углами ориентированности зерен абразива β , расстоянием перемещения зерен L , напряженностью электростатического поля E , скоростью перемещения абразива v_0 , определен диапазон технологических параметров электростатического

нанесения абразивных зерен на тканевую основу со связкой: для электрокорунда 14А зернистостью 0,10–0,40 мм расстояние переноса абразивных зерен – 150–275 мм, напряженность электростатического поля – 5–9 кВ/см, начальная скорость перемещения абразива (обеспечивающая проникновение абразивного зерна в связку на глубину $H_{\max} = 1/2a$) – 0,5–0,7 м/с, угол поворота основы – 120–140°, внутри которого может быть реализована технология получения ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зёрнами абразива [1, 2, 7–10, 13–16, 19, 23, 25, 33].

2. В результате теоретического исследования влияния геометрических параметров абразивных зерен, определенным образом сориентированных в рабочем слое относительно основы инструмента на его режущую способность установлена зависимость, позволившая определить рациональные значения углов ориентирования абразивных зерен, обеспечивающих увеличение режущей способности в 1,3–1,5 раза в сравнении с традиционным инструментом: при ориентировании абразива зернистостью $a = 0,10$ мм под углом $\beta = 123^\circ$ увеличение режущей способности инструмента в 1,3 раза; при ориентировании абразива зернистостью $a = 0,16$ мм под углом $\beta = 135^\circ$ увеличение режущей способности инструмента в 1,4 раза, а при ориентировании абразива зернистостью $a = 0,20$ мм под углом $\beta = 140^\circ$ увеличение режущей способности инструмента в 1,5 раза [6, 8, 14, 24, 25, 33–35].

3. В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров электростатического нанесения зерен абразива (марка, форма и размер абразива, расстояние перемещения зерен абразива в электростатическом поле, выходное напряжение генератора электростатического поля, скорость протягивания тканевой основы) на параметры получаемого рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента из ориентированных зерен (ориентированность зерен, концентрация абразива в рабочем слое, глубина проникновения абразива в связку) установлено, что исследуемые параметры подчиняются закону нормального распределения. Для электростатического нанесения рабочего слоя из нормального электрокорунда 14А пластинчатой и игольчатой формы размером зерен абразива 0,16–0,20 мм рекомендуется уменьшить расстояние перемещения абразива в электростатическом поле до 50 мм, увеличить выходное напряжение генератора до 40 кВ и снизить скорость протягивания тканевой основы до 0,5 м/мин [4, 6, 11, 12, 15, 19–21, 24–26, 31, 33–36].

4. В результате экспериментальных исследований влияния геометрических параметров ориентированных абразивных зерен рабочих слоев ленточных шлифовальных инструментов на их эксплуатационные характеристики установлено, что нанесение электрокорунда 14А в электростатическом поле к тканевой основе размером: $a = 0,10$ мм под углом $\beta = 120^\circ \pm 4^\circ$; $a = 0,16$ мм под углом $\beta = 130^\circ \pm 4^\circ$; $a = 0,20$ мм под углом $\beta = 140^\circ \pm 4^\circ$ приводит к увеличению эксплуатационных характеристик в 1,3–1,5 раза в сравнении с традиционными эластичными шлифовальными инструментами, что реализовано в электростатической камере для ориентирования зерен абразива в установке для изготовления производительного ленточного шлифовального инструмента [3, 5, 6, 19, 26, 31, 33, 34, 36].

5. В результате анализа экспериментальных данных влияния геометрических параметров ориентированных абразивных зерен однослойных ленточных шлифовальных инструментов на шероховатость обработанных поверхностей установлено, что значения параметра шероховатости поверхностей валов из стали 45 $Ra=0,14–0,54$ мкм,

обработанных ленточным инструментом зернистостью 10, 16, 20 и углом ориентации абразивных зерен 120–140° соответствуют значениям показателей шероховатости $Ra=0,16-0,63$ мкм, полученным при обработке традиционным ленточным шлифовальным инструментом аналогичной зернистости и в большей степени зависят от зернистости абразива нежели от угла их ориентированности в инструменте [3, 6, 7, 18, 22, 27, 31, 33, 34, 36].

Рекомендации по практическому применению результатов

На основе полученных результатов исследований создан технологический процесс и установка УЛШ-60 по изготовлению ленточного шлифовального инструмента в производственных условиях ОАО «Полоцкий завод ПРОММАШРЕМОНТ». В результате освоено получение 50 000 п.м./год нового ленточного шлифовального инструмента шириной 60 мм с ориентированными на 120° и 140° относительно тканевой основы зернами электрокорунда 14А обладающего повышенной в 1,3–1,5 раза режущей способностью и стойкостью при меньшей в 1,8 раза стоимости, составляющей 0,218 у.е./п.м. в сравнении с известными однослойными шлифовальными инструментами на гибкой основе, что позволило использовать его в отделочной обработке шеек коленчатых валов с годовым экономическим эффектом от изготовления и использования взамен приобретаемого 108 099 409 руб./г. в ценах 2005 года или 16855,32 у.е./г. с учетом инфляции, роста тарифов и деноминации в ценах 2017 года и обеспечило решение проблемы ресурсосбережения и импорт замещения собственной продукцией. Срок окупаемости составил 0,95 года. Результаты исследований защищены 5 патентами Республики Беларусь. Перспективным является развитие использования процессов массопереноса и образования покрытий в электростатическом поле для изготовления и интенсификации шлифовальных инструментов на эластичной основе при обработке различных конструкционных материалов. Механизм ориентирования зерен абразива использован в устройстве для изготовления пилок к медицинским ампулам, а также при исследовании вопросов, связанных с развитием аддитивных технологий 3D-печати металлообрабатывающего инструмента. ОАО «Оршанский инструментальный завод» выявлена возможность освоения промышленного производства ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зернами абразива. Осуществлено внедрение результатов работы в учебный процесс Полоцкого государственного университета при преподавании цикла технических дисциплин: «Производственные технологии», «Технология обработки металлов», «Технология обработки древесины» [3, 5, 10, 12, 17–22, 27–32, 34–39].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках

1. Завистовский, С.Э. Оценка случайных процессов при конструировании оптимального абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Машиностроение: респуб. межвед. сб. науч. тр. / УП Технопринт; ред. кол.: И.П. Филонов [и др.]. – Минск, 2003. – Вып. 19. – С. 184–186.
2. Завистовский, С. Э. Разработка эффективного абразивного инструмента для лентошлифовальной обработки напыленных поверхностей / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Сварка и родственные технологии : респуб. межвед. сб. науч. тр. / ГУ НИКТИ СП с ОП ; ред. кол.: Г.Н. Здор [и др.]. – Минск, 2004. – Вып. 6. – С. 87–89.
3. Завистовский, С.Э. Лентошлифовальный инструмент для отделочной обработки восстановленных и упрочненных шеек коленчатых валов / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2005. – № 12. – С. 127–131.
4. Завистовский, С.Э. Блок транспортирования частиц абразива в электростатическом поле для специальной установки по производству ленточного абразивного инструмента. / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, П.П. Редько // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 6. – С. 26–29.
5. Кириенко, А.С. Технология изготовления специального ленточного абразивного инструмента и оценка его производительности / А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский, // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 6. – С. 20–25.
6. Кириенко, А. С. Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя / А.С. Кириенко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2018. – № 6. – С. 90–95.
7. Кириенко, А. С. Влияние технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с ориентированными зернами на его эксплуатационные характеристики / А.С. Кириенко // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр./редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. - Минск: Беларус. навука, 2018. Вып. 41. – С.257-262.

Материалы конференций

8. Завистовский, С. Э. Моделирование процесса электростатического осаждения абразивных покрытий / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская, А.С. Кириенко // Практика и перспективы развития институционального партнерства : материалы 3-го Междунар. науч.-практ. семинара. – Донецк–Таганрог : Известия ТРТУ, 2002. – Кн. 1. – № 2. – С. 72–74.
9. Завистовский, С. Э. Рационализация конструкции и особенности технологии изготовления оптимального абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская, А.С. Кириенко // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления : в 3-х т. : сб. тр. первой Междунар. научно-техн. конф., Минск, 11-13 дек. 2002г. / Белорус. национ. техн. ун-т. ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : УП Технопринт, 2002. – Вып. 1. – Т. 3. : Технология изготовления машин / под общ. ред. П.А. Витязя. 2002. – С. 27–31.

10. Завистовский, С. Э. Оценка случайных процессов при конструировании оптимального абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении : сб. науч. тр. Междунар. научно-техн. конф., Минск, 2003 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2003. – С. 21–25.

11. Завистовский, С. Э. Электростатическая восприимчивость дисперсных абразивных материалов / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин : тем. сборник / Новополоцк, УО ПГУ ; под общ. ред.: П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Минск : УП Технопринт, 2003. – С. 375–376.

12. Кириенко, А. С. Воздействие электростатического поля для получения новых материалов / А.С. Кириенко, С.К. Толстиков // Новые материалы и технологии их обработки : материалы 4-й Республ. студ. научно-техн. конф., Минск, 28-30 апреля 2003г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2003. – С. 38–40.

13. Завистовский, С. Э. Технология изготовления специального ленточного абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : материалы Междунар. научно-техн. конф., Могилев, 15-16 мая 2003 г. / Могилев. гос. техн. ун-т. – Могилев, 2003. – С. 156–158.

14. Завистовский, С. Э. Особенности формообразования мелкодисперсных порошков абразивных материалов в электростатическом поле / С. Э. Завистовский, Ю. Н. Гафо, А. С. Кириенко, Т. И. Завистовская // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы докл. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6-7 апреля 2004 г. : БГ НПК ПМ НАНБ ; редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. Минск : ОДО Тонпик, 2004. – С. 308–309.

15. Завистовский, С. Э. Аналитические и технологические основы изготовления ленточного шлифовального инструмента с регулированием ориентации зерен абразива / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская, А.С. Кириенко // О природе трения твердых тел : материалы докл. Междунар. симпозиума, Гомель, 8-10 июня 2004 г. / ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2004. – С. 28–31.

16. Завистовский, С. Э. Моделирование процесса электростатического осаждения дисперсных абразивных слоев / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Современные материалы и технологии в механообработке : материалы Междунар. научно-техн. конф.. – Донецк–Таганрог : Известия ТРТУ, 2004. – Кн. 3. – № 1. – С. 81–83.

17. Завистовский, С. Э. Проблемы изготовления специального инструмента для отделочной обработки восстановленных шеек коленчатых валов / С.Э. Завистовский, Ю.Н. Гафо, А.С. Кириенко // Научные проблемы и перспективы развития ремонта, обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей : материалы докл. Международной научно-техн. конф. – Москва, 2004. – С. 19–22.

18. Завистовский, С. Э. Эффективность использования лентошлифовального инструмента при автоматизированном машинном шлифовании / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская, А.С. Кириенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы докл. Междунар. научно-техн. конф.. – Могилев : ГУ ВПО «Бел.-Рос. ун-т», 2004. – С. 102–105.

19. Завистовский, С. Э. Эффективность регулирования ориентации зерен абразива в электростатическом поле / С.Э. Завистовский, Ю.Н. Гафо, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Прогрессивные технологии обработки металлов давлением : материалы докл. Междунар. науч. техн. конф. – Минск, 2004. – С. 53–56.

20. Завистовский, С. Э. Технология изготовления специального ленточного абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы докл. Междунар. научно-техн. конф., Могилев, 21-22 апреля 2005 г. / ГУ ВПО «Бел.-Рос. ун-т». – Могилев : ГУ ВПО «Бел.-Рос. ун-т», 2005. – Ч.1. – С. 65–67.

21. Завистовский, С. Э. Блок транспортирования частиц абразива в электростатическом поле для рационального использования физико-механических свойств электрокорунда при производстве гибкого абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, П.П. Редько // Соединение и резка материалов, покрытия : материалы докл. Междунар. техн. конф., Минск, 29-30 марта 2006 г. ; редкол.: А.Ф. Илющенко [и др.]. – Минск, 2006. – С. 38–42.

22. Завистовский, С. Э. Ленто-шлифовальный инструмент для отделочной обработки восстановленных и упрочненных шеек коленчатых валов. / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин : материалы докл. Междунар. научно-техн. конф., Новополоцк, УО ПГУ, 2006. – С. 28–31.

23. Завистовский, С. Э. Рационализация технологических параметров электростатического формообразования абразивных поверхностей с регулируемой ориентацией зерен абразива при производстве гибкого абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Соединение и резка материалов, покрытия: материалы докл. Междунар. техн. конф., Минск, 29-30 марта 2006 г. ; редкол.: А.Ф. Илющенко [и др.]. – Минск, 2006. – С. 33–38.

24. Завистовский С. Э. Управление процессом напыления поверхностей гибкого абразивного инструмента с применением электростатического поля / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Порошковая металлургия в автотракторном машиностроении. Сварка и резка материалов. Материалы, технологии и оборудование для нанесения функциональных защитных покрытий : сб. докл. Междунар. науч. техн. симпозиумов и конф., Минск, 28-30 марта 2007 г. ; редкол.: А.Ф. Илющенко [и др.]. – Минск, 2007. – С. 209–210.

25. Завистовский, С. Э. Применение электростатического воздействия для управления процессом формообразования эластичных абразивных поверхностей / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Инженерия поверхности : сб. науч. ст. Междунар. научно-техн. конф., Брест, 25-27 октября 2007 г. ; редкол.: В.М. Хвисевич [и др.]. – Брест : издательство БрГТУ, 2007. – С. 38–41.

26. Завистовский, С. Э. Совершенствование метода и разработка конструкции устройства для комплексной оценки износостойкости и режущей способности гибкого абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы докл. Междунар. научно-практ. конф., Барановичи, 23-24 ноября 2007 г. ; редкол.: В.В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : издательство РИО БарГУ, – 2007. – С. 17–20.

27. Пинчук, Ю. М. Разработка и использование технологии отделочной обработки специальным ленточным абразивным инструментом на предприятиях Ви-

тебского региона / Ю.М. Пинчук, А.С. Кириенко // Инновационное развитие Придвинского края : сб. науч. тр. Регион-й. научно-практ. конф. студ., магистр. и аспирантов, Новополоцк – Полоцк, 18-19 декабря 2007 г. / Полоцк. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2007. – С. 211–215.

28. Завистовский, С. Э. Особенности получения рабочей поверхности специального гибкого абразивного инструмента на предприятиях Витебской области / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : сб. докл. 8-й Междунар. научно-техн. конф., Минск, 27-28 мая 2008 г. ; редкол.: А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 125–128.

29. Кириенко, А. С. Технология и оборудование для получения эластичного инструмента с ориентированными зёрнами абразива / А.С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конференции, посвящ. 35-летию машиностр. факультета Полоцкого гос. ун-та (19-20 октября 2011 г., г. Новополоцк) / М-во образования РБ ; Нац. АН Беларуси ; Госкомитет по науке и технологиям ; Полоцкий гос. ун-т ; под ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк: ПГУ. – 2011. – С. 98–101.

30. Кириенко, А. С. Тенденции развития современных технологий производства эластичных инструментов с ориентированными зёрнами абразива / А.С. Кириенко // В кн.: Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию академика П. И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета Полоцкого гос. ун-та (Новополоцк, 28-29 октября 2015 г.) / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 112–114.

31. Кириенко, А. С. Развитие шлифовального инструмента на эластичной основе / А.С. Кириенко, П.Н. Рогов // В кн.: Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию академика П.И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета Полоцкого гос. ун-та (Новополоцк, 28-29 октября 2015 г.) / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 115–118.

32. Кириенко, А. С. Перспективы использования технологии 3D-печати в производстве шлифовального инструмента / А.С. Кириенко, П.Н. Рогов // В кн.: Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию академика П.И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета Полоцкого гос. ун-та (Новополоцк, 28-29 октября 2015 г.) / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 118–120.

33. Кириенко, А. С. Аспекты формирования рельефа абразивосодержащих поверхностных слоёв эластичных инструментов / А.С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвящённой 50-летию Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 19-20 апреля 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В.К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 81–85.

34. Кириенко А. С. Получение ориентированного рельефа покрытий из абразивосодержащих дисперсных порошков / А.С. Кириенко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия

тия, сварка : материалы 13-й Междунар. научно-техн. конф. (Минск, 16-18 мая 2018 г.) ; ред.кол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2018. – С. 293–296.

Патенты

35. Устройство для электростатического нанесения абразивного зерна на тканевую основу : пат. 2124 Респ. Беларусь : МПК7 И 24В 11/00 / С.Э. Завистовский, Ю.Н. Гафо, А.С. Кириенко, К.Е. Белявин ; заявители: ГУ НИКТИ СП с ОП, УО Полоцкий гос. ун-т. – № u 20040607 ; заявл. 20.12.2004 ; дата публ. 16.05.2005.

36. Устройство для комплексной оценки производительности шлифовального инструмента : пат. 2256 Респ. Беларусь : МПК7 G 01N 3/56, G 01N 3/58 / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко ; заявитель Полоцкий гос. ун-т. – № u 20050206 ; заявл. 11.04.2005 ; дата публ. 01.07.2005.

37. Устройство для изготовления пилочек к медицинским ампулам : пат. 4277 Респ. Беларусь : МПК (2006) В 67В 7/00 / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.В. Глухова, Ю.М. Пинчук ; заявитель Полоцкий гос. ун-т. – № u 20070549 ; заявл. 23.07.2007 ; дата публ. 17.12.2007.

38. Генератор для нанесения дисперсных порошков в электростатическом поле : пат. 5181 Респ. Беларусь : МПК (2006) Н 02N 1/00 / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, П.П. Редько, Н.Э. Гаврилова, А.И. Осипова ; заявитель Полоцкий гос. ун-т. – № u 20080584 ; заявл. 22.07.2008 ; дата публ. 05.01.2009.

39. Устройство для 3D-печати металлообрабатывающего инструмента: пат. 10904 Респ. Беларусь : МПК В24D 11/00, В24D 99/00, С08J 5/00, С08J 5/16 / А.С. Кириенко П.Н. Рогов; заявитель Полоцкий гос. ун-т. – № u 20150205 ; заявл. 22.06.2015 ; дата публ. 02.11.2015.

РЭЗІЮМЭ

Кірыенка Аляксандр Сяргеевіч

Тэхналогія вырабу істужачнага шліфавальнага інструмента з кіраваннем арыентацыяй абразіўных зерняў у электростатычным полі

Ключавыя словы: шліфавальны інструмент, электростатычнае поле, арыентацыя зерня абразіва, электростатычнае нанясенне абразіва, рэжучая здольнасць, стойкасць шліфавальнага інструмента.

Мэта працы: распрацоўка тэхналогіі вырабу істужачнага шліфавальнага інструмента з кіраваным арыентаваннем абразіўных зерняў у электростатычным полі, што даць магчымасць павысіць прадукцыйнасць аддзелачнай апрацоўкі паверхняў дэталей машын.

Метады даследавання: фундаментальныя палажэнні тэорыі рэзання і тэхналогіі машынабудавання, сучасны матэматычны апарат мадэлявання, стандартныя і арыгінальныя метадыкі і абсталяванне ў лабараторных і прамысловых умовах з ужываннем метадаў матэматычнай апрацоўкі дадзеных і аналізу, пакеты праграм MathCAD, Statistica 10.

Атрыманя вынікі і іх навізна: распрацаваны спосаб тэхналагічнага кіравання геаметрыяй і эксплуатацыйнымі ўласцівасцямі аднаслаёвых працоўных паверхняў істужачных інструментаў на аснове парашкоў электракарунду з ужываннем электростатычнага нанясення, які дазваляе павысіць іх прадукцыйнасць у 1,3–1,5 раза, за кошт выкарыстання ўнутранага патэнцыялу абразіўнага зерня, інтэнсіфікуючы яго строгай арыентаванасцю атрыманай паверхні ў электростатычным полі. Вызначаны аптымальныя крытэры выбару абразіўных зерняў. Выведзены залежнасці ступені і вугла арыентацыі абразіўных часціц, дыстанцыі нанясення абразіўнага пласта ад велічыні напружанасці электростатычнага поля, хуткасці транспартавання, маркі матэрыялу і памераў прыблізнай часціц, што дазволіла вызначыць аптымальныя рэжымы для забеспячэння кіруемай арыентацыі зерняў абразіва ў электростатычным полі пры атрыманні эластычнага шліфавальнага інструмента і спецыяльнай тэхналагічнай аснасткі. Устаноўлена, што дадзеныя рэжымы спрыяюць павышэнню арыентаванасці зерняў абразіва і прыводзяць да павелічэння рэжучай здольнасці ў параўнанні з традыцыйнымі гнуткімі шліфавальнымі інструментамі ў 1,3–1,5 раза.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: створана абсталяванне і ўкаранены тэхналагічны працэс вырабу эластычнага шліфавальнага інструмента з утварэннем арыентаванай макраструктуры паверхняў з абразіўных матэрыялаў нанясеннем ў электростатычным полі, якія выкарыстоўваюцца на ААТ Полацкі завод «ПРОММАШРЕМОНТ» пры вырабе абразіўнай стужкі на аснове электрокорунду 14А, шырынёй 60 мм, якая выкарыстоўваецца для аддзелачнай апрацоўкі адноўленых шыек каленчатых валаў.

Галіна выкарыстання: інструментальная вытворчасць, аддзелачная апрацоўка канструкцыйных матэрыялаў.

РЕЗЮМЕ**Кириенко Александр Сергеевич****Технология изготовления ленточного шлифовального инструмента с управлением ориентацией абразивных зерен в электростатическом поле**

Ключевые слова: шлифовальный инструмент, электростатическое поле, ориентация зерен абразива, электростатическое нанесение абразива, режущая способность, стойкость шлифовального инструмента.

Цель работы: разработка технологии изготовления ленточного шлифовального инструмента с управляемым ориентированием абразивных зерен в электростатическом поле, что позволит повысить производительность отделочной обработки поверхностей деталей машин.

Методы исследования: фундаментальные положения теории резания и технологии машиностроения, современный математический аппарат моделирования, стандартные и оригинальные методики и оборудование в лабораторных и промышленных условиях с применением методов математической обработки данных и анализа, пакеты программ MathCAD, Statistica 10.

Полученные результаты и их новизна: разработан способ технологического управления геометрией и эксплуатационными свойствами однослойных рабочих поверхностей ленточных инструментов на основе порошков электрокорунда с применением электростатического нанесения, позволяющий повысить их производительность в 1,3–1,5 раза за счет наиболее рациональной ориентированности зерен абразива в электростатическом поле. Определены оптимальные критерии выбора абразивных зерен. Выведены зависимости степени и угла ориентации абразивных частиц, дистанции нанесения абразивного слоя от величины напряженности электростатического поля, скорости транспортирования, марки материала и размеров ориентируемых частиц, что позволило определить оптимальные режимы для обеспечения управляемой ориентации зерен абразива в электростатическом поле при получении ленточного шлифовального инструмента и специальной технологической оснастки. Установлено, что данные режимы способствуют повышению ориентированности зерен абразива и приводят к увеличению режущей способности и стойкости в сравнении с традиционными гибкими шлифовальными инструментами в 1,3–1,5 раза.

Рекомендации по использованию: создано оборудование и внедрен технологический процесс изготовления эластичного шлифовального инструмента с образованием ориентированной макроструктуры поверхностей из абразивных материалов нанесением в электростатическом поле, используемые на ОАО «Полоцкий завод «ПРОММАШРЕМОНТ»» при изготовлении абразивной ленты на основе электрокорунда 14А, шириной 60 мм, которая используется для отделочной обработки восстановленных шеек коленчатых валов.

Область применения: инструментальное производство, отделочная обработка конструкционных материалов.

SUMMARY

Kirienko Alexander Sergeevich

The technology of manufacturing belt grinding tools with controlling the orientation of abrasive grains in the electrostatic field

Key words: grinding tool, electrostatic field, grain orientation of abrasive, electrostatic abrasive application, cutting ability, durability of the grinding tool.

The purpose of the work: development of a technology for manufacturing a belt grinding tool with controlled orientation of abrasive grains in an electrostatic field, which will improve the productivity of surface finishing of machine parts.

Methods of research: fundamental provisions of the theory of cutting and technology of engineering, modern mathematical modeling apparatus, standard and original techniques and equipment in laboratory and industrial conditions using mathematical data processing and analysis methods, software packages MathCAD, Statistica 10.

Obtained results and their novelty: a method of technological support for the management of geometry and performance properties of single-layer working surfaces of elastic tools based on electrocorundum powders with the use of electrostatic deposition has been developed, which makes it possible to increase their productivity by 1.3–1.5 times due to the use of the internal potential of abrasive grain. Intensifying it by the strict orientation of the resulting surface in the electrostatic field. Optimal selection criteria for abrasive grains are determined. Dependences of the degree and angle of orientation of abrasive particles, the distance between the application of the abrasive layer and the magnitude of the electrostatic field strength, the transport speed, the material grade and the dimensions of the orientable particles have been determined. This has made it possible to determine the optimum regimes for the technological support of the controlled orientation of the abrasive grains in the electrostatic field in the production of an elastic grinding tool and Special technological equipment. It is established that these regimes contribute to an increase in the orientation of grains of abrasive and lead to an increase in cutting ability in comparison with traditional flexible grinding tools in 1,3–1,5 times.

Recommended use: the equipment was created and the technological process of manufacturing an elastic grinding tool with the formation of an oriented macrostructure of surfaces made of abrasive materials by applying in the electrostatic field, used at the JSC "Polotsk Plant" PROMMASHREMONT "in the manufacture of abrasive tape based on 14A electrocorundum, 60 mm wide, used for finishing processing the restored crankshaft necks.

Scope of application: tool manufacture, finishing treatment of construction materials.

Научное издание

КИРИЕНКО
Александр Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО
ИНСТРУМЕНТА С УПРАВЛЕНИЕМ ОРИЕНТАЦИЕЙ АБРАЗИВНЫХ
ЗЕРЕН В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 18.04.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,23. Тираж 65. Заказ 255.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.