

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.792.4

**БОГДАН  
Павел Сергеевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОЧНЫХ, ЛЕНТОЧНЫХ  
И ДИСКОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАСПИЛИВАНИЯ  
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ БЕЗ И С ПРИМЕНЕНИЕМ  
СВОБОДНОГО АБРАЗИВА**

**Автореферат**

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

Минск 2019

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный  
руководитель

**КИСЕЛЕВ Михаил Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета

Официальные  
оппоненты:

**ДАНИЛОВ Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологическое оборудование» Белорусского национального технического университета;

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

Оппонирующая  
организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 17 мая 2019 г. в 14<sup>00</sup> часов 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, ауд. 202; тел. ученого секретаря (8-017) 292-24-04

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 12 апреля 2019 г.

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



О. Г. Девойно

© Богдан П.С., 2019

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов на штучные заготовки, которая широко применяется в различных отраслях промышленности, в качестве инструмента используется тонкая проволока, стальная лента (штрипса), отрезной диск. В зависимости от физико-механических свойств, стоимости, формы и размеров исходного сырья рабочая поверхность таких инструментов может быть гладкой или иметь алмазно-абразивное покрытие. Инструменты с покрытием обеспечивают высокую производительность выполнения операции, но характеризуются значительной шириной пропила и невысоким качеством распиленной поверхности, что в совокупности приводит к существенным безвозвратным потерям обрабатываемого материала. Поэтому при распиливании дорогостоящего сырья с целью его экономии применяют инструменты с гладкой рабочей поверхностью и подачей в зону обработки свободного абразива. В этом случае достигается меньшая ширина пропила и более высокое качество поверхности реза, однако процесс распиливания характеризуется низкой производительностью так как разрушение материала происходит в основном за счет воздействия на него перекатывающихся в зоне обработки абразивных зерен. С целью устранения явления их перекатывания, а соответственно, повышения производительности распиливания, предлагается осуществлять электроэрозионное модифицирование исходной гладкой рабочей поверхности инструментов. В результате на ней образуется совокупность не перекрывающихся друг друга лунок, препятствующих перекатыванию абразивных зерен в зоне обработки и способствующих их закреплению на поверхности инструмента.

Следует подчеркнуть, что получаемые на поверхности лунки имеют по краям наплывы (валики) металла, выходящие за ее исходный контур, которые придают ей режущую способность при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу наплывов. Однако на сегодня отсутствуют систематизированные научные данные о влиянии режимов и условий электроэрозионного модифицирования гладкой поверхности инструментов на их эксплуатационные показатели при распиливании неметаллических материалов. В этой связи разработка технологии электроэрозионного модифицирования поверхности таких инструментов, обеспечивающая повышение ее режущей способности при распиливании неметаллических материалов как с использованием свободного абразива, так и без него, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное практическое значение для производств, связанных с распиливанием заготовок и изделий различного назначения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Ряд результатов, составляющих содержание данной диссертационной работы, получен в рамках выполнения заданий по грантам ГБ 13-14 «Повышение режущей способности проволочного инструмента путем модификации его исходной поверхности с применением электроконтактной обработки» (№ ГР 20130771, сроки выполнения 02.01.2013 – 31.12.2013) и ГБ 14-01 «Исследование технологических показателей процесса распиливания материалов проволочным инструментом с предварительно модифицированной путем электро-контактной обработки поверхностью» (№ ГР 20140414, сроки выполнения 02.01.2014 – 31.12.2014).

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследований является разработка технологии электроэрозионного модифицирования исходной гладкой рабочей поверхности проволочного, ленточного и дискового инструментов, обеспечивающей повышение ее режущей способности при распиливании неметаллических материалов без и с применением свободного абразива.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

– обосновать перспективность применения электроэрозионного модифицирования исходной гладкой поверхности инструментов для механического распиливания неметаллических материалов с целью повышения ее режущей способности;

– исследовать влияние геометрических параметров наплывов металла по краю лунки на придание исходной гладкой поверхности инструмента режущей способности при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу наплывов;

– исследовать влияние геометрических параметров лунки, полученной на поверхности инструмента в результате воздействия электрического разряда, на условия, обеспечивающие неподвижное закрепление на ней абразивного зерна в процессе распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием свободного абразива;

– разработать методику проведения экспериментальных исследований по оценке влияния режимов электроэрозионного модифицирования поверхностей испытуемых инструментов на их эксплуатационные показатели при распиливании образцов из хрупких неметаллических материалов с использованием свободного абразива, а также образцов из материалов, уступающих по твердости металлу инструмента;

– провести экспериментальные исследования влияния режимов электроэрозионного модифицирования поверхности испытуемых инструментов на их режущую способность, шероховатость поверхности реза, ширину пропила и износостойкость при распиливании образцов из хрупких

неметаллических материалов с использованием свободного абразива и образцов из материалов, уступающих по твердости металлу инструмента;

– разработать и внедрить технологию электроэрозионного модифицирования поверхности инструментов, применяемых при распиливании заготовок и изделий различного назначения.

### **Научная новизна**

1. Установлены эффекты положительного влияния лунок и наплывов металла по их краям на повышение режущей способности модифицированной поверхности инструмента, заключающиеся в снижении явления перекатывания абразивных зерен в зоне обработки при распиливании материалов с использованием свободного абразива, а также в придании исходной гладкой поверхности режущей способности при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу наплывов.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что наплывы металла на модифицированной поверхности представляют собой своеобразные малоразмерные режуще-деформирующие элементы, режущая кромка которых имеет в плане замкнутый контур близкий к окружности и в диаметральном сечении характеризуется высотой наплывов (высота зуба), радиусом их скругления (радиус скругления режущей кромки) и отрицательным передним углом, что позволяет осуществлять микроцарапание материалов, уступающих по твердости металлу наплывов.

3. Разработана математическая модель процесса перекатывания абразивного зерна в зоне обработки, позволившая установить количественное соотношение между его размерами и геометрическими параметрами лунки, при котором оно будет неподвижно закреплено на поверхности инструмента.

4. Получены новые экспериментальные данные, отражающие влияние режимов электроэрозионного модифицирования гладкой поверхности проволочного инструмента, штрипсы и отрезного диска на их режущую способность, шероховатость поверхности реза, ширину пропила и износостойкость, при распиливании неметаллических материалов как с использованием свободного абразива, так и без его применения.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты анализа условий разрушения хрупких материалов в процессе их распиливания с использованием свободного абразива, на основании которых обоснована положительная роль лунок, формируемых на модифицированной гладкой поверхности инструмента, в повышении ее режущей способности, заключающаяся в снижении явления перекатывания абразивных зерен в зоне обработки.

2. Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния энергии электрического разряда и условий его протекания (на воздухе или с применением дистиллированной воды) на изменение геометрических параметров единичной лунки и наплывов металла по ее краю на поверхности образца из стали У8А, на основании которых представлена

геометрическая модель этих элементов на модифицированной поверхности, позволившая теоретически оценить их влияние на ее режущую способность в зависимости от энергии разряда и условий его протекания.

3. Результаты геометрического моделирования и экспериментальных исследований, отражающие влияние геометрических параметров наплывов металла по краю лунки на состояние модифицированной поверхности, позволившие установить, что они представляют собой своеобразные режуще-деформирующие элементы, способные осуществлять микро-царапание материалов, уступающих по твердости металлу наплывов.

4. Результаты математического и макетного моделирования процесса перекатывания абразивного зерна в зоне обработки при распиливании хрупких неметаллических материалов инструментами с модифицированной поверхностью, позволившие установить соотношение между формой и размерами абразивного зерна и геометрическими параметрами лунки, при котором оно будет неподвижно закреплено на поверхности инструмента, обеспечивая тем самым повышение ее режущей способности.

5. Экспериментально установленные зависимости влияния режимов модифицирования исходной гладкой поверхности проволочного инструмента, штрипсы и отрезного диска на их режущую способность, шероховатость поверхности реза, ширину пропила и износостойкость инструмента при распиливании неметаллических материалов с использованием свободного абразива и без него, позволившие определить режимы модифицирования поверхности инструментов, обеспечивающие их наибольшую режущую способность.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Представленные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований получены лично соискателем. М. Г. Киселев, как научный руководитель, оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения данной работы; А. В. Дроздов участвовал в разработке математической модели закрепления абразивного зерна в единичной лунке; С. Г. Монич – в проведении экспериментов по исследованию параметров единичной лунки; В. Л. Габец – в проведении экспериментов по восстановлению режущей способности зубных боров; А. В. Москаленко – в проведении экспериментов по модифицировании поверхности инструментов.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты работы представлены на следующих международных научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2012 г.), Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2012 г.), Республиканская

научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 2012 г.), Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения (научные чтения, посвященные П. О. Сухому)» (Гомель, 2012 г.), Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2016), Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности» (Пермь, 2017 г.), Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (Минск, 2017 г.), Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2017).

Штрипсы с модифицированной поверхностью нашли применение для распиливания заготовок углеситалла на пластины при изготовлении створок искусственного клапана сердца. Разработанная технология восстановления режущей способности зубных боров применяется в стоматологической практике для увеличения продолжительности их использования.

#### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, в том числе в 10 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 3,5 авторских листа, в 8 материалах и тезисах докладов научных конференций, получен 1 патент на полезную модель. Других публикаций – 2.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации 170 страниц. Работа содержит 147 страниц машинописного текста, 99 рисунков, 11 таблиц, список использованных источников в количестве 83 наименования, включая 21 авторскую работу, и 3 приложения на 12 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи исследования.

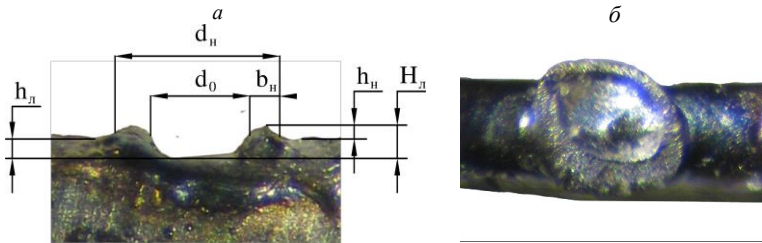
**В первой главе** приведен аналитический обзор литературных данных по вопросу конструкций и эксплуатационных показателей инструментов для распиливания хрупких неметаллических материалов на штучные заготовки. В зависимости от размеров, формы, физико-механических свойств и стоимости исходного сырья операция распиливания может выполняться с использованием инструментов различной формы (диски, лента, полотно, проволока), отличающихся состоянием их рабочей поверхности. Инструменты с алмазно-абразивным покрытием обеспечивают высокую производительность выполнения операции, но характеризуются значительной шириной пропила и невысоким качеством распиленной поверхности, что приводит к значительным безвозвратным потерям обрабатываемого материала. Поэтому при распиливании дорогостоящего сырья с целью его экономии, в ущерб производительности, применяются инструменты с гладкой рабочей поверхностью при подаче в зону обработки свободного абразива, которые обеспечивают меньшую ширину пропила и более высокое качество поверхности реза. В этом случае разрушение материала происходит за счет его выкалывания вершинами перекатывающихся в зоне обработки абразивных зерен, что в сравнении с микрорезанием закрепленными зернами обуславливает существенно меньшую производительность. Следовательно, для ее повышения необходимо создать условия, обеспечивающие устранение или, по крайней мере, ограничение явления перекатывания абразивных зерен в зоне обработки. Для решения этой задачи предлагается осуществлять электроэрозионную обработку (модифицирование) исходной гладкой поверхности инструмента, в результате которой на ней образуются лунки (углубления), препятствующие перекатыванию абразивных зерен в зоне обработки и способствующие их закреплению на рабочей поверхности инструмента.

Без должного внимания со стороны исследователей остались вопросы, касающиеся изучения режущей способности металлической поверхности после ее электроэрозионной обработки, которую ей придают образовавшиеся по краям лунок наплывы (валики) застывшего металла. Поэтому на сегодня отсутствуют систематизированные научные данные, отражающие взаимосвязь режимов и условий электроэрозионного модифицирования исходной гладкой поверхности инструментов с их эксплуатационными показателями при распиливании неметаллических материалов без и с применением свободного абразива.

**Вторая глава** посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям влияния получаемых на модифицированной поверхности инструмента лунок, имеющих по краям наплывы металла, на придание ей



режущей способности при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу напылов, а также на условия закрепления на ней абразивных зерен при распиливании материалов с использованием свободного абразива. В начале проанализированы экспериментальные данные, отражающие влияние энергии электрического разряда  $E$  и условий его протекания (на воздухе или с использованием дистиллированной воды) на геометрические параметры единичной лунки на поверхности образца из стали У8А (рисунок 1), а также на микротвердость ее поверхностного слоя.



**$a$  – вид сбоку;  $b$  – вид сверху;  $d_n$ ,  $h_n$  и  $b_n$  – соответственно, диаметр напылов металла по краю лунки, их высота и ширина;  $d_0$  и  $h_n$  – соответственно, диаметр и глубина лунки относительно положения исходной поверхности;  $H_n$  – глубина лунки с учетом высоты напылов металла**

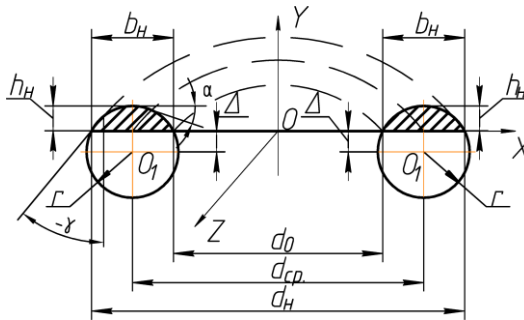
**Рисунок 1. – Фотография единичной лунки, полученной на рабочей поверхности штрипсы**

С повышением  $E$  с 0,5 до 4,5 Дж значения указанных параметров лунки возрастают, при этом увеличение  $d_n$  происходит более интенсивно, чем  $d_0$  (отношение  $d_n/d_0$  возросло с 1,11 до 1,65); увеличение  $h_n$  несколько опережает увеличение  $h_n$  (отношение  $h_n/h_n$  уменьшилось с 2,0 до 1,73); увеличение  $b_n$  происходит более интенсивно, чем  $h_n$  и  $h_n$  (отношение  $b_n/h_n$  увеличилось с 1,5 до 4,7 и отношение  $b_n/h_n$  – с 3,0 до 8,1), а отношение  $H_n/h_n$  практически не изменилось и составило 1,5–1,57. Применение дистиллированной воды по сравнению с обработкой на воздухе не влияет на характер изменения рассматриваемых параметров лунки от энергии электрического разряда, а только приводит к уменьшению их значений. Так значения  $b_n$ ,  $h_n$ ,  $h_n$ ,  $d_0$  и  $d_n$ , соответственно, снизились на 30–33%, 10–15%, 7–10%, 3–4% и 5–6%.

Исследования состояния и микротвердости поверхности единичной лунки, включая напылы металла по ее краю, показали, что на ней образуется так называемый белый слой, ниже которого располагается переходной слой и под которым находится металл в исходном состоянии. С повышением  $E$  с 0,5 до 4,5 Дж толщина белого слоя на поверхности лунки увеличивается с 4–5 до 15–18 мкм, а его микротвердость – с 460 до 660 HV (при микротвердости основного металла 175 HV) и одновременно возрас-

тает глубина изменения микротвердости основного металла с 40–43 до 65–68 мкм. Использование дистиллированной воды приводит к снижению на 18–20% значения микротвердости поверхности лунки и уменьшению на 22–26% глубины изменения микротвердости.

На основании результатов анализа формы и геометрических параметров наплывов металла по краю лунки и сделанных допущений (наплывы металла, образовавшиеся по краю лунки, имеют гладкую поверхность и симметричную относительно центра лунки форму и размеры) показано, что, в первом приближении, их можно представить в форме открытого тора, срезанного по плоскости, совпадающей с исходной поверхностью (рисунок 2), имеющего в диаметральном сечении форму сегмента круга радиусом  $r$ , высотой  $h_n$  и основанием сегмента  $b_n$ .



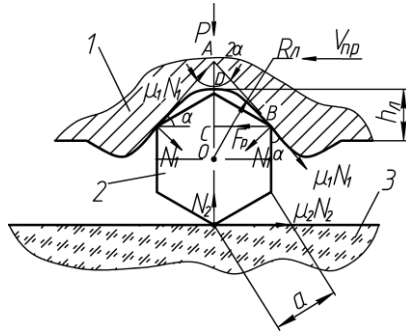
**Рисунок 2.** – Схематическое представление диаметрального сечения наплывов металла и форма образуемой ими поверхности по краю лунки

Сопряжение наружной и внутренней поверхностей наплывов металла образует режущую кромку, которая в плане имеет замкнутый контур близкий к окружности и скругленную в диаметральном сечении по радиусу  $r$  выступающую часть (аналог зуба). Режущая кромка наплывов металла характеризуется отрицательным передним углом  $\gamma$  ( $\alpha$  – задний угол), величина которого, равно как и радиуса ее скругления  $r$ , определяются отношением  $b_n/h_n$ , с увеличением которого значения указанных параметров возрастают.

Результатами экспериментов процесса однократного взаимодействия наплывов металла на штрипсе и их макетов с поверхностью различных материалов (алюминий, гипс, парафин) установлено, что получаемый на ней след является результатом микрорезания материала наплывами металла с образованием, в зависимости от его свойств, стружки различного вида и с формированием заусенцев (навалов) по краям микроцарапины. Увеличение диаметров наплывов и их высоты за счет повышения энергии электрического разряда приводит к возрастанию размеров полученной

на поверхности образца микроцарапины, включая ее ширину, глубину и высоту заусенцев по ее краю.

Для теоретического определения условий, обеспечивающих неподвижное положение абразивной частицы на модифицированной поверхности инструмента (отсутствие ее перекатывания) использовалась расчетная схема, приведенная на рисунке 3.



**Рисунок 3. – Расчетная схема для определения условий, обеспечивающих закрепление (отсутствие перекатывания) абразивного зерна на модифицированной поверхности инструмента**

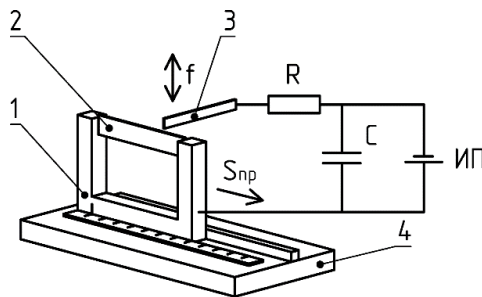
На ней абразивное зерно (частица) представлено в виде плоского элемента 2 шестиугольного сечения со стороной  $a$ , масса которого в силу ее малой величины не учитывается. Ось вращения элемента при его перекатывании совпадает с его геометрическим центром (точка  $O$ ) и направлена перпендикулярно плоскости чертежа. Элемент расположен в лунке, полученной на поверхности инструмента 1 в результате воздействия единичного электрического разряда, которая имеет сферическую форму радиусом  $R_{л}$ . Под действие усилия  $P$  элемент прижимается к обрабатываемой поверхности 3, а инструмент совершает относительно ее поступательное движение со скоростью  $v_{пр}$ .

Исходя из равенства нулю сил и моментов сил, действующих относительно оси вращения элемента, получена система из трех уравнений, описывающая условие его неподвижности на модифицированной поверхности. В результате ее решения с помощью программной среды MathCad определены параметры лунки, в частности, ее радиус  $R_{л}$ , глубина  $h_{л}$  и угол раскрытия  $2\alpha$ , обеспечивающие отсутствие поворота (перекатывания) абразивного зерна в зоне обработки. Так, для абразивной частицы, моделируемой шестиугольником с размером стороны  $a = 20$  мкм, минимальная глубина лунки  $h = 9,2$  мкм, ее радиус  $R_{л} = 65$  мкм и угол раскрытия  $2\alpha = 125^\circ$ . С использованием специального устройства были проведены эксперименты по макетному моделированию процесса перекатывания

промежуточного стального элемента шестиугольного профиля с размером стороны 5 мм и длиной 7 мм (модель абразивного зерна) в зоне обработки при наличии на движущейся поверхности инструмента лунок различного размера. Сравнение экспериментально полученных значений параметров лунки, обеспечивающих отсутствие перекатывания элемента, с расчетными, показали, что расхождение между ними не превышает 15%, что подтверждает адекватность теоретических исследований.

**Третья глава** содержит описание методики проведения экспериментальных исследований. Объектом исследований являлись инструменты, применяемые для механического распиливания различных материалов, в частности, проволочные, ленточные и дисковые. Образцом первого служил отрезок стальной (У8А) проволоки длиной 150–160 мм и диаметром 0,3 мм. В качестве образца ленточного инструмента использовалась штрипса – стальная (У8А) полоса длиной 110 мм, шириной 8 мм и толщиной 0,3 мм. Стальной (У8А) диаметром 75 мм и толщиной 0,2 мм диск служил образцом отрезного диска.

Для модифицирования поверхностей инструментов были созданы три устройства: одно для модифицирования поверхности проволочного образца и штрипсы, второе и третье – для модифицирования, соответственно, рабочей и боковых поверхностей образца отрезного диска. В первом устройстве (рисунок 4) стальная рамка 1 с закрепленным на ней инструментом 2 (проволока или штрипса) устанавливается на основании 4, выполненном из диэлектрического материала, таким образом, чтобы обрабатываемая поверхность инструмента располагалась вверх. Электродом-инструментом служит стальная пластина 3 толщиной 0,3 мм, которой сообщаются колебания с частотой  $f$ , направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности и обеспечивающие прерывание электрической цепи, состоящей из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора  $C$  и токоограничивающего резистора  $R$ , что сопровождается формированием на поверхности инструмента лунки.



**Рисунок 4.** – Принципиальная схема устройства электроэрозионного модифицирования поверхности проволочного инструмента и штрипсы

Для получения требуемого значения коэффициента расположения лунок  $\beta = d_n/l$  ( $l$  – расстояние между центрами соседних лунок) по длине обрабатываемой поверхности рамка за время между двумя последовательными разрядами перемещается на необходимую величину продольной подачи  $S_{пр}$ . Аналогичный принцип используется в установках для модифицирования поверхности образца отрезного диска с той только разницей, что ему сообщается дискретная круговая подача, а в качестве электрода-инструмента при обработке его боковых поверхностей используется стальная диаметром 0,3 мм проволока. Напряжение накопительного конденсатора  $U$  изменялось от 18 до 75 В при его емкости  $C = 350$  мкФ, использовалась прямая полярность, диэлектрическая жидкость не применялась. Глубина лунки, ее диаметр, диаметр и ширина наплывов металла измерялись с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2, а высота наплывов – с помощью микрометра МК-25-01 как разность размеров поверхности в исходном состоянии и при наличии на ней лунки.

Режущая способность испытываемых инструментов оценивалась по интенсивности распиливания  $i$  ими образцов из различных материалов, значение которой определялось отношением площади пропиленной поверхности  $S$  образца к продолжительности обработки  $t$  ( $i = S/t$ , мм<sup>2</sup>/мин).

Для распиливания образцов были созданы два устройства, одно при использовании проволочного инструмента и штрипсы, второе – при использовании отрезного диска. В первом устройстве образец, закрепленный на подвижном столе совершает возвратно-поступательное движение с частотой 120 двойных ходов в минуту с длиной хода 50 мм, относительно испытываемого инструмента, который с постоянным усилием 10 Н прижимается к его поверхности. При распиливании образцов из хрупких неметаллических материалов (мрамора, стекла, феррита и кремния, имеющих, соответственно, твердость по шкале Мооса 3, 5, 6 и 6,5), использовалась алмазная паста, состоящая из одной части алмазного микропорошка АСМ 20/14 и двух частей машинного масла. В процессе обработки она с помощью кисточки с периодичностью один раз в минуту наносилась на рабочую поверхность инструмента. Частота вращения отрезного диска составляла 250 мин<sup>-1</sup> с усилием прижатия образца 2 Н. В одном случае образцы распиливались инструментами в исходном состоянии, а во-втором – с модифицированными рабочими поверхностями.

В другой серии экспериментов использовались инструменты только с модифицированной рабочей поверхностью. Ими, без применения свободного абразива распиливались образцы из дерева, кости, углесталла и текстолита, т.е. из материалов, уступающих по твердости металлу инструмента. Распиливание образцов отрезным диском выполнялось при частоте его вращения 1500 мин<sup>-1</sup> и статическом усилии прижатия образца 2 Н. Глубина  $h$  и ширина  $b$  пропила на образцах измерялись на микроскопе ММИ-2, а шероховатость их распиленной поверхности – на профи-

лометре-профилографе Taylor Hobson. Приведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных.

**В четвертой главе** приведены и проанализированы экспериментальные данные, отражающие влияние режимов модифицирования поверхностей испытываемых инструментов на интенсивность распиливания образцов из различных материалов, как с использованием свободного абразива, так и без него, на шероховатость поверхности реза, ширину пропила и износостойкость. По сравнению с распиливанием хрупких неметаллических материалов (мрамор, стекло, феррит, кремний) инструментами в исходном состоянии с использованием свободного абразива модифицирование их поверхности приводит к повышению интенсивности распиливания  $i$ , увеличению параметра  $R_a$  шероховатости поверхности реза (за исключением мрамора) и ширины пропила  $b$  на образцах. Степень влияния модифицирования поверхности инструментов на изменение этих показателей оценивалась с помощью соответствующих коэффициентов  $k_i$ ,  $k_R$ ,  $k_b$ , которые определялись отношением значения данного показателя при использовании инструмента с модифицированной поверхностью к его значению при распиливании инструментом в исходном состоянии. С повышением в процессе модифицирования напряжения накопительного конденсатора (энергии электрического разряда) значения указанных коэффициентов возрастают, достигая при  $U = 75$  В наибольших своих величин, которые приведены в таблице.

Таблица – Значения коэффициентов  $k_i$ ,  $k_R$  и  $k_b$  при распиливании образцов из хрупких неметаллических материалов инструментами с модифицированной поверхностью ( $U = 75$  В)

Испытуемый инструмент	Материал образца	$k_i$	$k_R$	$k_b$
Штрипса	Мрамор	14,29	0,65	1,05
	Стекло	1,34	1,44	1,17
	Феррит	1,33	1,14	1,14
	Кремний	1,33	1,09	1,17
Проволока	Мрамор	25,10	0,91	1,21
	Стекло	2,39	1,70	1,19
	Феррит	2,15	1,59	1,29
	Кремний	2,13	1,72	1,36
Диск	Стекло	1,22	2,09	1,39

С увеличением твердости материала образца значения указанных коэффициентов снижаются, в частности, степень влияния модифицирования поверхности инструментов на повышение интенсивности распиливания падает с 14,29 и 25,1 при распиливании мрамора, соответственно, штрипсой и проволокой до 1,33 и 2,13 – при распиливании кремния. Применение проволочного инструмента обеспечивает в сравнении со штрипсой и дис-

ком наибольшее повышение интенсивности распиливания. Так при распиливании стекла проволочным инструментом  $k_i = 2,39$ , при распиливании штрипсой –  $k_i = 1,34$  и при распиливании диском –  $k_i = 1,22$ .

Модифицирование исходной гладкой поверхности инструментов позволяет придать ей режущую способность при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу напльвов (дерево, кость, углеситалл, текстолит), которая имеет наибольшее значение при  $U = 75$  В,  $C = 350$  мкФ,  $\beta = 1,1-1,15$ , обработка на воздухе. С повышением твердости материала образца интенсивность его распиливания  $i$  испытываемыми инструментами снижается, и одновременно уменьшаются шероховатость распиленной поверхности и ширина пропила. Так при обработке дерева штрипсой и проволокой значение  $i$ , соответственно, составило 27,78 и 16,2; при обработке кости – 9,8 и 8,0; при обработке углеситалла – 9,2 и 6,67 и при обработке текстолита – 5,77 и 3,14 мм<sup>2</sup>/мин. Значение параметра Ra шероховатости поверхности распила, соответственно, составило при обработке дерева 12,57 и 16,31, при обработке углеситалла – 11,2 и 14,35 и при обработке текстолита – 8,49 и 12,53 мкм. Ширина пропила при распиливании штрипсой (исходной толщины 0,3 мм) составила для дерева 0,45, для углеситалла – 0,41 и для текстолита – 0,39 мм. Применение отрезного диска с модифицированной рабочей поверхностью, благодаря значительной скорости резания (350 м/мин), обеспечивает более, чем в 20 раз большую интенсивность распиливания образцов по сравнению со штрипсой и проволокой, а также меньшую шероховатость поверхности распила. Так значение Ra при обработке дерева составило 9,11, при обработке углеситалла – 8,53 и при обработке текстолита – 7,83 мкм. Дополнительное модифицирование боковых поверхностей диска позволяет повысить в среднем на 10% интенсивность распиливания и устранить заклинивание инструмента в процессе выполнения операции.

Экспериментально установлено, что применение периодического модифицирования изношенной поверхности исследуемых инструментов позволяет обеспечить ее высокую режущую способность, практически соответствующую первоначальной. С учетом этого, было предложено использовать операцию модифицирования изношенной поверхности стальных и твердосплавных зубных боров с целью восстановления ее режущей способности.

**Пятая глава** посвящена экспериментальной оценке эффективности применения предложенного способа восстановления режущей способности изношенной рабочей поверхности зубных боров. Приведены основные сведения об этих инструментах и изложены вопросы методики проведения экспериментальных исследований. Указано, что максимальный ресурс рабочего времени стального (XB5) и твердосплавного (BK6M) боров, соответственно, составляет 9 и 40 минут после чего, из-за износа режущих кромок, они далее не используются, а утилизируются. Применение моди-

фицирования изношенной поверхности боров ( $U = 120$  В при  $C = 350$  мкФ,  $\beta = 1,1-1,15$ , обработка на воздухе) позволяет восстановить ее режущую способность по отношению к первоначальной у стального бора на 80–82% и у твердосплавного на 46–50% и тем самым увеличить продолжительность их использования в стоматологической практике.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основании анализа условий разрушения хрупких неметаллических материалов при их распиливании с использованием свободного абразива выявлена и обоснована положительная роль лунок, получаемых в процессе модифицирования гладкой поверхности инструмента, в повышении ее режущей способности, заключающаяся в снижении явления перекатывания абразивных зерен в зоне обработки и интенсификации за счет этого процесса микрорезания материала закрепившимися на поверхности инструмента абразивными зёрнами [1, 11, 17, 19, 20].

2. На основании экспериментальных исследований влияния энергии электрического разряда и условий его протекания (на воздухе или с применением дистиллированной воды) на геометрические параметры единичной лунки и наплывов металла по ее краю на поверхности образца из стали У8А, разработана геометрическая модель этих элементов на модифицированной поверхности, учитывающая изменение соотношений между диаметральными и высотными параметрами лунки и наплывами металла по ее краю в зависимости от энергии разряда  $E$  и условий его протекания [10, 18].

3. На основе полученных данных о форме и геометрических параметрах наплывов металла по краю лунки, выходящих за исходный контур модифицированной поверхности, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что они представляют собой своеобразные режуще-деформирующие элементы, способные осуществлять микроцарапание материалов, уступающих по твердости металлу наплывов. Показано, что в первом приближении эти элементы имеют в плане замкнутую по окружности режущую кромку, которая в диаметральном сечении характеризуется высотой зуба (высота наплыва), радиусом скругления режущей кромки (радиус скругления наплывов) и отрицательным передним углом. С повышением энергии электрического разряда значения указанных параметров, а также микротвердость поверхности лунки и наплывов металла по ее краю увеличиваются, обуславливая тем самым повышение режущей способности модифицированной поверхности [6, 15, 16, 18].

4. На основе результатов математического моделирования процесса перекатывания абразивного зерна различной формы и размеров в зоне обработки, подтвержденных данными его макетного моделирования, получена зависимость, позволяющая рассчитать параметры лунки, при которых



абразивное зерно будет неподвижно закреплено на модифицированной поверхности инструмента. Так для абразивной частицы, моделируемой шестигранником с размером стороны 20 мкм, минимальная глубина лунки составляет 9,2 мкм, ее радиус – 65 мкм и угол раскрытия лунки –  $125^\circ$  [4].

5. В результате экспериментальных исследований влияния модифицирования исходной гладкой поверхности инструментов (диска, штрипсы, проволоки) на их эксплуатационные показатели при распиливании хрупких неметаллических материалов (мрамор, стекло, феррит, кремний) с использованием свободного абразива (АСМ 20/14) определены режимы электроэрозионной обработки ( $U = 75\text{--}80$  В при  $C = 350$  мкФ, коэффициент расположения лунок  $\beta = 1,1\text{--}1,15$ , обработка на воздухе), обеспечивающие в сравнении с инструментом в исходном состоянии поверхности, наибольшее повышение интенсивности распиливания  $i$ . Так при распиливании стекла проволочным инструментом значение  $i$  возросло в 2,39 раза, при распиливании штрипсой – в 1,34 раза и при распиливании диском – в 1,22 раза. С повышением твердости материала образца степень влияния модифицирования поверхности на повышение интенсивности распиливания испытываемым инструментом снижается. Так при распиливании мрамора проволочным инструментом значение  $i$  возросло в 25,1 раза, а при распиливании кремния – в 2,13 раз. По сравнению с исходным применением инструментов с модифицированной поверхностью приводит к увеличению значения параметра Ra шероховатости поверхности распила в среднем на 28% и ширины пропила на 19% [1, 8, 9, 12, 21].

6. В результате экспериментальных исследований процесса распиливания материалов, уступающих по твердости металлу наплавов (дерево, кость, углесталл, текстолит) испытываемым инструментом установлено, что модифицирование их гладкой поверхности обеспечивает придание ей режущей способности, которая имеет наибольшее значение при  $U = 75\text{--}80$  В;  $C = 350$  мкФ;  $\beta = 1,1\text{--}1,15$ ; обработка на воздухе. С повышением твердости материала образца интенсивность распиливания  $i$  испытываемым инструментом снижается при одновременном уменьшении параметра Ra шероховатости распиленной поверхности и ширины пропила  $b$ . Так при распиливании штрипсой (исходная толщина 0,3 мм) деревянного образца  $i = 27,78$  мм<sup>2</sup>/мин, Ra = 12,57 мкм и  $b = 0,45$  мм; при распиливании углесталла –  $i = 9,2$  мм<sup>2</sup>/мин, Ra = 11,2 мкм,  $b = 0,41$  мм; при распиливании текстолита –  $i = 5,77$  мм<sup>2</sup>/мин, Ra = 8,49 мкм,  $b = 0,39$  мм. Экспериментально установлено, что путем периодического модифицирования изношенной поверхности инструментов можно обеспечить поддержание ее режущей способности на уровне, близком к первоначальному. Так применение модифицирования изношенной поверхности зубных боров позволяет восстановить ее режущую способность по отношению к первоначальной для стального бора на 80–82% и для твердосплавного – на 46–50% и тем

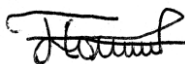
самым увеличить продолжительность их использования в стоматологической практике [2, 3, 5, 6, 7, 13, 14, 16].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная технология и созданное оборудование для электроэрозионного модифицирования исходной гладкой поверхности инструментов (диска, штрипсы, проволоки) для распиливания неметаллических материалов могут быть использованы в электронной промышленности, оптическом и ювелирном производствах при распиливании дорогостоящих хрупких неметаллических материалов на штучные заготовки, а также при разделении и вырезании заготовок из материалов, уступающих по твердости металлу инструмента, в частности, костной ткани при проведении медико-биологических исследований, углеситалла при производстве створок искусственного клапана сердца.

2. Разработанная технология АТЮФ.01300.00006-2018 и созданное оборудование АТЮФ.041815.0001-2018 для восстановления режущей способности изношенной поверхности зубных боров путем ее электроэрозионной обработки могут быть использованы стоматологическими клиниками и центрами, связанными с применением этих инструментов.

3. Результаты исследований по электроэрозионному модифицированию исходной гладкой и изношенной поверхности инструментов для распиливания (обработки) неметаллических материалов внедрены в учебный процесс подготовки инженеров по дисциплине «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов» и по дисциплине «Технология производства изделий медицинского назначения».



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Влияние режимов электроконтактной обработки поверхности проволочного инструмента на ее режущую способность, износостойкость и прочность на разрыв / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 55–62.
2. Влияние режимов электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента на величину сил резания в процессе распиливания им материалов без использования абразивной суспензии / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – Т. 42, № 1. – С. 15–22.
3. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроконтактной обработки рабочей поверхностью / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. Л. Габец, П. С. Богдан // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – Т. 28, № 3. – С. 64–68.
4. Математическое и физическое моделирование процесса перекачивания абразивных зерен между обрабатываемой поверхностью и модифицированной поверхностью проволочного инструмента / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Механика машин, механизмов и материалов. – 2015. – Т. 30, № 1. – С. 41–46.
5. Определение эксплуатационных показателей отрезного диска с модифицированной путем электроконтактной обработки поверхностью / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. С. Богдан, А. И. Цихович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 4 (49). – С. 22–32.
6. Влияние геометрических параметров лунки, полученной на металлической поверхности в результате воздействия электрического разряда, на ее режущую способность / М. Г. Киселев, Г. А. Есьман, А. В. Дроздов, П. С. Богдан // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 5. – С. 391–396.
7. Киселев, М. Г. Влияние электроэрозионного модифицирования гладких рабочей и боковых поверхностей стального отрезного диска на его эксплуатационные показатели / М. Г. Киселев, П. М. Богдан, А. П. Русанов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2017. – № 1. – С. 34–42.
8. Эксплуатационные показатели стальных отрезных дисков с модифицированной поверхностью при резке хрупких неметаллических материалов / М. Г. Киселев В. Л. Габец, П. С. Богдан, Д. В. Роцин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 2. – С. 57–64.
9. Киселев, М. Г. Влияние электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности штрипсы на ее режущую способность и шероховатость распиленной поверхности образцов из хрупких неметаллических материа-

лов с использованием свободного абразива / М. Г. Киселев, П. С. Богдан, А. П. Русанов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2017. – Т. 54, № 1. – С. 5–15.

10. Влияние энергии электрического разряда и условий его протекания на геометрические параметры единичной лунки и микротвердость ее поверхностного слоя / М. Г. Киселев, С. Г. Монич, П. С. Богдан, А. С. Ничипорук // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 29–35.

### **Материалы конференций**

11. Богдан, П. С. Технологические схемы модификации исходной поверхности проволочного инструмента / П. С. Богдан, М. Г. Киселев // Материалы 1-й Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», Гомель, 17 апр. 2012 г. : в 2 т. / Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2012. – Т. 1. – С. 13–15.

12. К вопросу повышения интенсивности распиливания материалов проволочным инструментом путем модификации его поверхности / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 сен. 2012 г. : в 3 т. / Физ.-техн. инст ; редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 2. – С. 181–188.

13. Богдан, П. С. Получение и восстановление режущих элементов на отрезных дисках с помощью электроконтактной обработки / П. С. Богдан, М. Г. Киселев // Материалы 12-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», Минск, 25–27 мая 2016 г. / ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 246–248.

14. Киселев, М. Г. Влияние ЭЭО рабочей поверхности штрипсы на ее режущую способность / М. Г. Киселев, П. С. Богдан, А. П. Русанов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 27–28 апреля 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 23–24.

15. Методика физического моделирования условий взаимодействия распиливаемого материала с напльвами металла, полученными на гладкой поверхности инструмента, в результате воздействия электрических разрядов / М. Г. Киселев П. С. Богдан, Д. А. Ямная, К. А. Давыдова // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2017», Минск, 1–3 ноября 2017 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 215–217.

16. Киселев, М. Г. Придание режущей способности отрезным дискам с помощью электроэрозионной обработки их рабочей поверхности / М. Г. Киселев, П. С. Богдан // Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 12–13 декабря 2017 г. / Пермский национальный исследовательский политехнический университет ; редкол.: А. М. Ханов, С. А. Оглезнева, Т. Р. Абляз. – Пермь, 2017. – С. 75–77.

### **Тезисы докладов**

17. Богдан, П. С. Модификация исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности путем применения электроконтактной обработки / П. С. Богдан, М. Г. Киселев // Материалы 5-й Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения», Минск, 18–20 апр. 2012 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск, 2012. – С. 71.

18. Характеристики процесса электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Тезисы докладов IX международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения (научные чтения, посвященные П. О. Сухому)», Гомель, 25–26 окт. 2012 г. / Гом. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого ; редкол.: под общ. ред. С. И. Тимошкина [и др.]. – Гомель, 2012. – С. 39–40.

### **Патенты**

19. Способ электроконтактной обработки поверхности заготовки из токопроводящего материала: пат. 19510 Респ. Беларусь, МПК7 С2 В 23Н 1/00 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. С. Богдан, С. Г. Монич; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а 20130323; заявл. 15.03.2013; опубл. 30.10.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 5 (106). – С. 52.

### **Другие публикации**

20. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволочного инструмента / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. А. Новиков, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Метрология и приборостроение. – 2012. – Т. 56, № 1. – С. 23–25.

21. Влияние параметров режима электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента на его режущую способность / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Доклады БГУИР. – 2013. – Т. 73, № 3. – С. 5–11.

## РЭЗІЮМЭ

БОГДАН Павел Сяргеевіч

**Тэхналогія электраэразійнага мадыфікавання працоўнай паверхні дражных, стужачных і дыскавых інструментаў для распілоўвання неметалічных матэрыялаў без і з ужываннем вольнага абразіва**

**Ключавыя словы:** рэжучыя інструмент, штрыпса, тэхналогія, электраэразійнае мадыфікаванне, свабодны абразіў, перекатыванне абразіўных зерняў, рэжучая здольнасць, шурпатаць, паверхню рэзу, фізічнае мадэляванне.

**Мэта працы:** распрацоўка тэхналогіі электраэразійнага мадыфікавання зыходнай гладкай працоўнай паверхні дражнага, істужачнага і дыскавага інструментаў, якая забяспечвае павышэнне яе рэжучай здольнасці пры распілоўванні неметалічных матэрыялаў без і з выкарыстаннем вольнага абразіва.

**Метады даследавання і абсталяванне.** Тэарэтычная частка працы выкананая на аснове выкарыстання фундаментальных палажэнняў тэорыі электроэрозійнага разбурэння матэрыялаў і іх электраэразійнай апрацоўкі. Лікавыя даследаванні выконваліся з выкарыстаннем сучасных прыкладных праграм і сродкаў вылічальнай тэхнікі. Пры выкананні эксперыментальных даследаванняў выкарыстоўваліся як апрабаваныя, так і спецыяльна распрацаваныя метадыкі і апаратныя сродкі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Устаноўлены і раскрытыя аспекты станюўчага ўплыву лунак і наплываў металу па іх краях на павышэнне рэжучай здольнасці мадыфікаванай паверхні інструмента пры распілоўванні матэрыялаў з выкарыстаннем вольнага абразіва, а таксама ў наданні зыходнай гладкай паверхні рэжучай здольнасці пры распілоўванні матэрыялаў, якія саступаюць па цвёрдасці метале наплываў. Распрацавана матэматычная мадэль працэсу перакочвання абразіўнага збожжа ў зоне апрацоўкі, якая дазваляе ўсталяваць колькасныя суадносіны паміж яго памерамі і геаметрычнымі параметрамі лункі, пры якім яно будзе нерухома замацавана на паверхні інструмента. Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя, якія адлюстроўваюць уплыў рэжымаў электраэразійнага мадыфікавання паверхні рэжучых інструментаў на іх рэжучую здольнасць, шурпатаць паверхні рэзу, шырыню прапіла і зносаўстойлівасць, пры распілоўванні неметалічных матэрыялаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі працы выкарыстаны ў стаматалагічнай практыцы і ў вытворчасці штучных клапанаў сэрца.

**Галіна выкарыстання:** стаматалагічныя цэнтры і прадпрыемствы машына-і прыборабудаўнічай вобласці.

## РЕЗЮМЕ

**БОГДАН Павел Сергеевич**

### **Технология электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности проволочных, ленточных и дисковых инструментов для распиливания неметаллических материалов без и с применением свободного абразива**

**Ключевые слова:** режущий инструмент, электроэрозионное модифицирование, свободный абразив, режущая способность, шероховатость, поверхность реза, физическое моделирование.

**Цель работы:** разработка технологии электроэрозионного модифицирования исходной гладкой рабочей поверхности проволочного, ленточного и дискового инструментов, обеспечивающей повышение ее режущей способности при распиливании неметаллических материалов без и с применением свободного абразива.

**Методы исследования и оборудование.** Теоретическая часть работы выполнена на основе использования фундаментальных положений теории электроэрозионного разрушения материалов и их электроэрозионной обработки. Численные исследования выполнялись с использованием прикладных программ и средств вычислительной техники. При выполнении исследований использовались как апробированные, так и специально разработанные методики и аппаратные средства.

**Полученные результаты и их новизна.** Установлено положительное влияние лунок и наплывов металла по их краям на повышение режущей способности модифицированной поверхности инструмента при распиливании материалов с использованием свободного абразива, а также в придании гладкой поверхности режущей способности при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу наплывов. Разработана математическая модель процесса перекатывания абразивного зерна, позволяющая установить количественное соотношение между его размерами и геометрическими параметрами лунки, при котором оно будет закреплено на поверхности инструмента. Получены экспериментальные данные, отражающие влияние режимов электроэрозионного модифицирования поверхности режущих инструментов на их режущую способность, шероховатость поверхности реза, ширину пропила и износостойкость, при распиливании неметаллических материалов.

**Рекомендации по использованию:** результаты работы использованы в стоматологической практике и в производстве искусственных клапанов сердца.

**Область применения:** стоматологические центры и предприятия машино- и приборостроительной области.



## SUMMARY

**BOHDAN Pavel Siargeevich**

**The technology of electroerosive modification of the working surface of wire, tape and disk tools for cutting non-metallic materials without and with the use of free abrasive**

**Key words:** cutting tools, electroerosive modification, rolling of abrasive grains, cutting ability, roughness, cutting surface, physical modeling.

**The work purpose** development of the technology of electroerosive modification of the initial smooth working surface of wire, belt and disk tools, providing an increase in its cutting ability when cutting nonmetallic materials without and with the use of free abrasive.

**Research methods and equipment.** The theoretical part of the work carried out through the use of basic provisions of the theory of electro-erosion destruction of materials and electrical discharge machining. Numerical studies have been performed with the use of modern software applications and computer equipment. In carrying out pilot studies were used as tested and specially developed techniques and hardware.

**Achieved results and their novelty.** The aspects of the positive effect of the holes and metal deposits along their edges on the increase in the cutting ability of the modified surface of the tool when cutting materials with the use of free abrasive are established and disclosed, as well as in giving the initial smooth surface of cutting ability when sawing materials that are inferior to the hardness of the metal in the sags. A mathematical model of the rolling process of abrasive grains in the treatment zone has been developed, which makes it possible to establish a quantitative relationship between its dimensions and the geometric parameters of the well, at which it will be fixedly fixed to the surface of the tool. New experimental data are obtained that reflect the influence of the erosion-modifying surface modes of the cutting tools on their cutting ability, the roughness of the cutting surface, the width of the cut and the wear resistance, when cutting nonmetallic materials.

**Results of research** are used in dental practice and in the manufacture of artificial heart valves.

**Application area:** dental centers and enterprises of machine and instrument-making industry.