

На правах рукописи



Суворов Александр Петрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ
ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность: 05.02.07 - «Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Воронежский государственный технический университет".

Научный руководитель: **Кузовкин Алексей Викторович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Аверченков Владимир Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО "Брянский государственный
технический университет",
кафедра "Компьютерные технологии и
системы", профессор

Норман (Перова) Анна Валерьевна,
кандидат технических наук,
ГБПОУ ВО "ВАТ им. В.П. Чкалова",
преподаватель

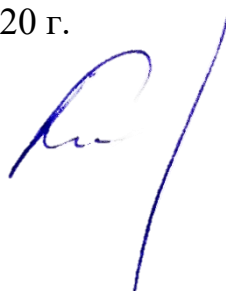
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего обра-
зования "Волгоградский государственный
технический университет" (г. Волгоград)

Защита состоится «20» мая 2020 года в 14⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет", ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет", по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежского государственного технического университета» <http://cchgeu.ru>

Автореферат разослан «16» марта 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук,
профессор



Кириллов О. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные изделия машиностроительного комплекса характеризуются наличием большого количества деталей (до нескольких тысяч в готовом изделии), часть из которых в силу различных причин (конструктивные особенности, прочностные и массогабаритные характеристики, показатели эргономики и эстетики) имеют сложную форму рабочих поверхностей. Получение таких поверхностей традиционными методами формообразования зачастую вызывает определенные технологические трудности (сложная траектория движения инструмента, необходимость создания специального инструмента и т.п.) или неоправданно высокие материально-экономические затраты (приобретение специализированного оборудования с ЧПУ; разработка конструкции, технологии и изготовление специального режущего, формирующего или иного инструмента и т.д.). Подобные проблемы возникают не только в связи со сложностью геометрии обрабатываемых поверхностей, но и, как правило, с высокими конструктивными требованиями по точности и качеству поверхностного слоя детали.

Одним из способов решения данной проблемы является применение электрических бесконтактных методов обработки (электрохимическая (ЭХО) и электроэрозионная (ЭЭО) обработки) фасонным электродом-инструментом (ЭИ). В этом случае сложная геометрия готовой детали обеспечивается за счет применения рабочей поверхности ЭИ, повторяющей профиль обрабатываемой детали с учетом изменения ее размеров на величину межэлектродного зазора, которой, в свою очередь, придается простейшие поступательное или вращательное движение. Таким образом снимается вопрос об использовании дорогостоящих исполнительных приводов, обрабатывающих сложную геометрию при традиционной механообработке.

Однако при этом возникает проблема создания собственно рабочей поверхности ЭИ, которая должна иметь сложную геометрию профиля, повторяющую профиль обрабатываемой детали с учетом изменения ее размеров на величину межэлектродного зазора (МЭЗ). Часто технологические и экономические затраты на изготовление такого ЭИ сопоставимы, а иногда и превышают, стоимость изготовления детали с применением традиционных процессов резания. В связи с этим возникает проблемное противоречие, которое заключается в следующем. Существуют и достаточно хорошо изученные методы электрообработки (ЭХО и ЭЭО), есть оборудование и апробированные технологические режимы процессов бесконтактного формообразования, однако технологическая сложность изготовления фасонного ЭИ и их высокая стоимость существенно ограничивают область технологического применения этих процессов в производстве, особенно на этапе опытно-конструкторской проработки пилотных образцов техники.

Решение данной проблемы представляется возможным на основе комплексного подхода, который включает:

- разработку методологии проектирования ЭИ за счет применения современных систем автоматизированного проектирования (САПР), когда рабочая

поверхность инструмента формируется как поверхность, повторяющая профиль обрабатываемой детали с учетом изменения ее размеров на величину МЭЗ; рабочего поступательного/поступательно-вращательного движения ЭИ; толщины токопроводящего покрытия исходя из электрических параметров процесса обработки и других факторов, влияющих на процесс обработки;

- предложение, апробацию и технологические рекомендации по процессу изготовления ЭИ из нетокопроводящих материалов методами быстрого прототипирования с последующим нанесением токопроводящего слоя, толщина которого гарантировано обеспечивает протекание электрических процессов в МЭЗ и приемлемую стойкость ЭИ.

Это открывает возможность применения комбинированных ЭИ для электрических методов обработки, характеризующихся широким разнообразием формы рабочей поверхности, адаптированной к геометрии обрабатываемой детали, не ограниченной степенью кривизны, низкой себестоимостью и практической возможностью создания индивидуального инструмента для единичного и опытного производства.

В связи с изложенным работа, направленная на разработку методики проектирования, технологии изготовления и практических рекомендаций применения комбинированного ЭИ на основе быстрого прототипирования с последующим приданием ему токопроводящих свойств на примере инструментов для ЭХО и ЭЭО, является актуальной.

Работа выполнялась в соответствии с постановлением Правительства РФ №2164-П "О проведении государственной программы "Мобильный комплекс" (раздел "Техническое перевооружение")" и с постановлением Правительства РФ №426 "О федеральной целевой программе "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы" (раздел 1.4 "Проведение прикладных исследований, направленных на решение комплексных научно-технологических задач"); федеральной целевой программой "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" и научным направлением ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет" по плану ГБ НИР № 2010.16 "Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства".

Научная проблема заключается в научном обосновании, оценке возможностей и развитии методов проектирования и изготовления комбинированного ЭИ для реализации процесса формообразования сложнопрофильных поверхностей в условиях единичного и опытного производства.

Целью работы является разработка теоретических основ проектирования конструкции и технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования для повышения эффективности электрических методов обработки сложнопрофильных деталей, выполненных из токопроводящих материалов.

Для достижение поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Проведение анализа поверхностей сложного профиля, их структурирование и обоснование необходимости применения инструмента со сложной геометрией рабочей части на основе обобщенного критерия.

2. Установление и формализация связей между геометрией обрабатываемой поверхности, методом формообразования и геометрией рабочей части ЭИ.

3. Разработка методики по расчету и проектированию рабочей части комбинированного ЭИ для электрообработки, учитывающей геометрические параметры обрабатываемой поверхности и применяемого оборудования.

4. Раскрытие особенностей проектирования технологического процесса по изготовлению комбинированного ЭИ методом быстрого прототипирования с последующим приданием ему токопроводящих свойств.

5. Обоснование области эффективного использования комбинированного ЭИ для электрообработки деталей со сложной геометрией.

Методология и методы исследований. При выполнении работы были использованы теоретические положения классических закономерностей в области технологии машиностроения, электрических методов обработки, известные закономерности быстрого прототипирования и аддитивных технологий.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований с использованием стандартных методов и средств измерений, высокой сходимостью расчетных и полученных экспериментальным путем результатов исследований, положительным опытом внедрения работы на машиностроительных предприятиях.

Объект исследования – элементы деталей из токопроводящих материалов и их участки, характеризующиеся сложной геометрией профиля и ограниченным или невозможным доступом традиционного инструмента в зону обработки.

Предмет исследования. Технологические способы и инструменты практической реализации для проектирования и изготовления комбинированного ЭИ и его применения для обработки поверхностей сложного профиля в условиях единичного и опытного производства.

Научная новизна включает:

1. Методику определения геометрии рабочей части комбинированного ЭИ во взаимосвязи с геометрией обрабатываемой поверхности.

2. Раскрытие механизма определения характеристик токопроводящего покрытия, учитывающего нестабильность величины МЭЗ в зоне обработки.

3. Разработку научных основ создания комбинированных ЭИ для электрических методов обработки методами быстрого прототипирования, снимающих ограничения существующих технологических процессов по созданию и изготовлению ЭИ.

4. Научное обоснование структуры технологического процесса изготовления ЭИ с корректировкой геометрии рабочей части на величину токопроводящего покрытия, не требующего при его выполнении чистовых операций.

Вклад в технологическую науку – создание нового метода проектирования комбинированного ЭИ для электрических методов обработки, способа изготовления на основе аддитивной печати с последующим нанесением токопроводящего покрытия с управлением его характеристиками в зависимости от геометрических параметров обрабатываемых поверхностей.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана методика проектирования конструкции комбинированного ЭИ с учетом изменяемой величины МЭЗ в ходе обработки.

2. Создан способ изготовления комбинированного ЭИ, учитывающего особенности геометрии обрабатываемой поверхности.

3. Экспериментально подтверждена возможность создания комбинированного ЭИ, спроектированы и внедрены технологические процессы его изготовления и последующего применения в единичном и экспериментальном производстве, что расширило область технологического использования электрических методов обработки.

4. Разработано программное обеспечение по автоматизированному проектированию конструкции комбинированного ЭИ с учетом величины МЭЗ и толщины токопроводящего покрытия.

Личный вклад соискателя

Результаты, выносимые на защиту, созданные соискателем:

- разработанная методика обоснования технологической целесообразности применения комбинированного ЭИ для обработки поверхностей сложного профиля в условиях единичного и опытного производства;

- разработанные теоретические основы проектирования геометрии рабочей части комбинированного ЭИ с учетом изменения величины МЭЗ за счет управления характеристиками нетокопроводящей основы и параметрами токопроводящего слоя, обеспечивающими формирование требуемой точности профиля инструмента;

- создание рационального технологического подхода к получению комбинированного ЭИ методами аддитивной печати, минимизирующего материальные и технико-экономические ресурсы в условиях единичного и опытного производства;

- доказательная база для назначения толщин токопроводящих покрытий, обеспечивающих требуемую стойкость инструмента исходя из условий единичного и опытного производства.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.02.07 – "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" по пунктам: 4 – Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки; 3 – Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и

повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки; 6 – Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации.

Положения, выносимые на защиту, включают:

1. Обоснование использования новой на уровне зарегистрированного программного продукта подсистемы, положенной в основу проектирования профиля комбинированного электрода-инструмента, выполненного из токонепроводящего материала с последующим приданием ему токопроводящих свойств.

2. Формализацию связей между профилем обрабатываемой поверхности и автоматизированным выбором геометрии рабочей части электрода-инструмента для его последующей реализации методами быстрого прототипирования в условиях единичного и опытного производства.

3. Разработку технологических рекомендаций по автоматизированному проектированию технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента с учетом технологических режимов электрохимической обработки.

4. Проведение теоретических и экспериментальных исследований и работ по внедрению результатов на машиностроительных предприятиях в условиях единичного и опытного производства. Процесс внедрен в производство на Воронежском механическом заводе – филиал ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и ООО “Воронежагротехсервис”.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлялись и обсуждались в рамках следующих научно-практических конференций: VII Международной научно-практической телеконференции «Российская наука в современном мире» (г. Пенза, 2016), VIII Международной научно-технической конференция «Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (г. Москва, 2016), IV Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (г. Рыбинск, 2017), Международной научно-практической конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности» (г. Пермь, 2017), Регионального конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов по приоритетным направлениям развития науки и технологий «Научная опора Воронежской области» (г. Воронеж, 2017), международной конференции "The International Conference on Digital Image & Signal Processing (DISP'19)" (29-30 April, 2019, Held at St Hugh's College, Oxford University, United Kingdom), V семинара «Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий» (г. Томск, 2019).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования прошли апробацию и внедрены на 2-х предприятиях машиностроительного комплекса (ООО “Воронежагротехсервис”, Воронежский механический завод – филиал ФГУП “ГКНПЦ им. М.В. Хруничева”) с годовым экономическим эффектом 170 тыс. рублей. Материалы работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО “Воронежский

государственный технический университет” при подготовке студентов машиностроительных специальностей по выполнению ГБ НИР ВГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 22 научные работы, общим объемом 9,1 п.л., где соискателю принадлежит 5,59 п.л. В их число входит одна публикация в издании, индексируемом в цитатно-аналитической базе данных Scopus, 9 публикаций в изданиях из перечня ВАК РФ, 1 свидетельство о регистрации программного продукта.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа изложена на 161 странице основного текста, включает 20 таблиц, 86 рисунков. Приложения содержат программы, копии документов о внедрении результатов работы в промышленность, обработанные результаты экспериментальных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная и практическая значимость материалов диссертации.

В первой главе дан анализ понятия сложнопрофильная поверхность на примере проектируемых и выпускаемых промышленностью образцов наукоемкой и ресурсоемкой продукции. Приведены примеры таких поверхностей и их классификация с использованием критерия гладкости кривой, получившей в литературе обозначение G_n (n изменяется от 0 до 3) - характеристика соединения между двумя кривыми или вдоль общей границы между двумя поверхностями. Показано, что с ростом этого показателя от G_0 до G_3 резко возрастает степень кривизны поверхности и как следствие - требования к механообработывающему оборудованию и режущему инструменту. Гладкие поверхности сложного профиля (G_2 и G_3) могут быть изготовлены только с применением дорогостоящего многокоординатного оборудования с ЧПУ, что в условиях опытного и единичного производства вызывает серьезные экономические затраты. На результатах анализа достижений отечественных технологических школ Воронежа, Казани, Москвы, Санкт-Петербурга, Брянска, Орла, Ростова-на-Дону и др. показано, что альтернативой механической обработки поверхностей с высокой степенью кривизны (G_2 и G_3) являются бесконтактные электрические методы обработки (ЭХО и ЭЭО), при которых ЭИ с рабочей поверхностью, повторяющей профиль обрабатываемой детали с учетом изменения ее размеров на величину межэлектродного зазора, позволяет выполнять формообразование с высокой точностью и качеством поверхностного слоя. Однако получение ЭИ требуемой формы методами механического формообразования приводит к необходимости применения дорогостоящего многокоординатного металлорежущего оборудования. Что, в свою очередь, существенно снижает экономическую эффективность производства и увеличивает материальные затраты на изготовление опытных и единичных образцов техники. Именно поэтому электрические методы обработки в настоящее время применяются зачастую лишь в серийном производстве, когда затраты на изготовление ЭИ

раскладываются на большое количество деталей, снижая тем самым экономическую нагрузку на конечного потребителя. Автором работы на основе этих данных установлен критерий, основываясь на котором, еще на этапе разработки технологического процесса обработки сложнопрофильных поверхностей можно говорить о целесообразности применения электрических методов обработки комбинированным ЭИ в условиях единичного и опытного производства (рис. 1).

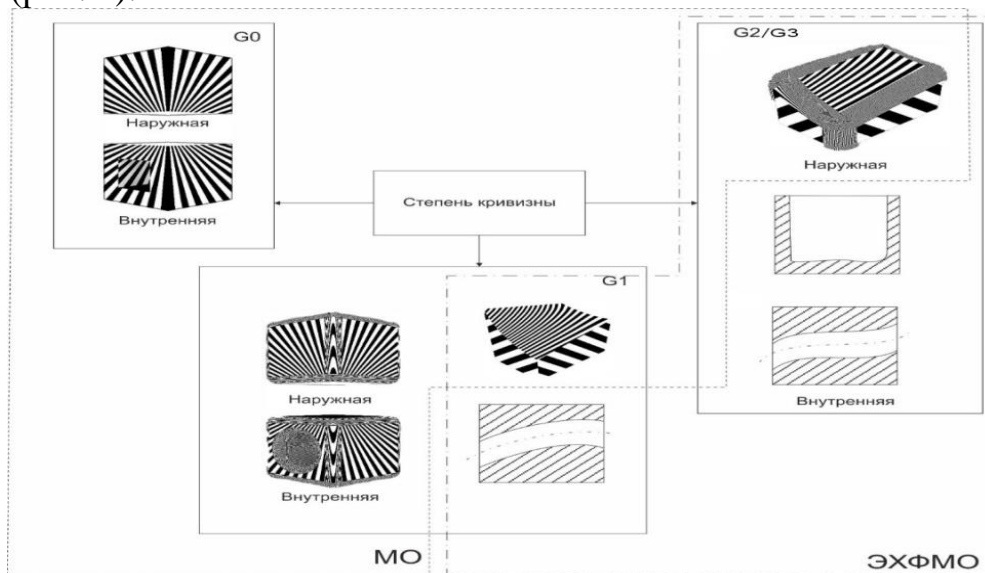


Рис. 1. Влияние степени кривизны на выбор метода обработки

Существующие методики проектирования поверхности ЭИ на сегодняшний момент представляют собой в большей степени методики, основанные на экспериментальных исследованиях, и носят характер ноу-хау той или иной технологической школы. Однако в основе всех методик лежит положение, что профиль рабочей части ЭИ представляет собой зеркальную копию заданной формы поверхности детали, с размерами уменьшенными на величину межэлектродного зазора (МЭЗ) и припуска на последующую обработку. Сам же электрод - инструмент должен быть выполнен из определенных токопроводящих материалов, оснащен специальными каналами подвода/отвода рабочей среды, токоподводами и т.п. конструктивными элементами.

Проведенный критический анализ литературных данных по поверхностям, обрабатываемым с применением электрических методов, способам проектирования и изготовления ЭИ в промышленности, применимым конструкционным материалам и методам реализации токопроводящих свойств позволяет выработать несколько условий, которые могут выступать в роли обобщенного критерия применимости исследуемого метода изготовления ЭИ, как правило, это опытно-конструкторское и единичное производство; кривизна обрабатываемой поверхности имеет показатель G2 и выше; радиус кривизны поверхности пересекает ось вращения осевого режущего инструмента; обрабатываемые поверхности соответствуют зоне ЭЭО и ЭХО.

Анализ существующих методик проектирования ЭИ позволил сформулировать тезис о возможности формализации подхода к проектированию ЭИ на основе построения цифрового прототипа, когда за основу будущей рабочей

поверхности берется цифровая модель готовой детали, а на основе алгоритмов, учитывающих математические зависимости проектирования ЭИ для ЭХО и ЭЭО, строится профиль рабочей поверхности инструмента. При этом установлено, что в процессе работы ЭИ для электрических методов обработки возможна передача необходимой энергии в рабочую зону по проводнику достаточной толщины. То есть появляется потенциальная возможность создания комбинированных ЭИ, выполненных из токонепроводящих материалов методами 3D-печати с последующим нанесением токопроводящего покрытия с толщиной, гарантированно обеспечивающей протекание электрических процессов в рабочей зоне.

В целом это позволило решить первую задачу настоящего исследования: в качестве обобщенного критерия целесообразности использования комбинированного ЭИ в условиях единичного и опытного производства использовать критерий гладкости кривой G_n , где n равен значениям 2 или 3.

Анализ доступных литературных данных, методик проектирования и изготовления ЭИ и опыт их промышленной эксплуатации позволил сформулировать цель и задачи работы, которые приведены во введении.

Во второй главе на основе анализа данных по проектированию и изготовлению ЭИ, приведенных в первой главе, была выдвинута концепция и рабочие гипотезы диссертационного исследования, что послужило основой в качестве базовых положений данной работы.

В качестве рабочей концепции формулируются следующие условия:

- необходимо разработать методологию проектирования ЭИ за счет применения современных систем автоматизированного проектирования (САПР), когда рабочая поверхность инструмента формируется как поверхность, повторяющая профиль обрабатываемой детали с учетом: изменения ее размеров на величину межэлектродного зазора, рабочего поступательного/поступательно-вращательного движения ЭИ, толщины токопроводящего покрытия, исходя из электрических параметров процесса обработки и т.д.;

- предложить, апробировать и дать технологические рекомендации по процессу изготовления ЭИ из нетоконепроводящих материалов методами быстрого прототипирования с последующим нанесением токопроводящего слоя, толщина которого гарантированно обеспечивает протекание электрических процессов в МЭЗ и приемлемую стойкость ЭИ.

Исходя из этого сформулированы рабочие гипотезы исследования:

1. Процесс проектирования ЭИ для электрических методов обработки может быть в значительной степени автоматизирован для геометрии деталей любой степени кривизны за счет их модификации и доработки на основе встроенных средств логического проектирования и собственных языков программирования с учетом рекомендаций по расчету МЭЗ, выработанных в ходе выполнения настоящего исследования.

2. Проектирование ЭИ должно осуществляться на принципах параметризации (взаимоувязывания) геометрических размеров модели ЭИ с геометрией обрабатываемого профиля и параметрами обработки на основе

известных и апробированных теоретических зависимостей электроэрозионной или электрохимической обработок с учетом величины межэлектродного зазора, толщины токопроводящего покрытия, режимов обработки, применяемого оборудования и рабочих сред.

3. Применение ЭИ полностью выполняемых из токопроводящих материалов, целесообразно заменить на комбинированные, в которых основная функция создания формы реализована методами аддитивных технологий, а рабочая зона и токоподводы формируются путем металлизации поверхности, исходя из условий обеспечения такой толщины покрытия, которая обеспечивает стабильность протекания процессов ЭХФМО.

4. Процесс изготовления комбинированного ЭИ должен состоять из двух этапов:

- первый этап: "выращивание" основы из нетокопроводящего материала с использованием технологии 3D-печати с учетом величины МЭЗ и толщины создаваемого в дальнейшем токопроводящего покрытия;

- второй этап: нанесение на подготовленную заготовку ЭИ токопроводящего покрытия как в рабочей зоне, так и в зоне токоподводов, толщиной обеспечивающей протекание процесса электрообработки.

5. Процесс электрообработки осуществляется с применением инструмента, выполненного индивидуально под конкретный типоразмер детали с учетом особенностей обрабатываемых поверхностей, когда профиль рабочей поверхности ЭИ автоматически сгенерирован подсистемой "Параметризации электрода-инструмента для электроэрозионной обработки".

Выдвинутые гипотезы позволили предложить программу достижения заявленных целей и выполнение работы в несколько этапов. Исходя из рабочих гипотез было выбрано экспериментальное и технологическое оборудование для реализации процесса формообразования комбинированным ЭИ и апробации предложенного решения.

Обоснован выбор объектов и предмета исследования по теме диссертации, что позволило конкретизировать объем проводимой работы. На рис. 2 показан макет рабочего колеса турбонасосного агрегата (ТНА), для которого проводилось изготовление опытных образцов комбинированного ЭИ, спроектированного в разработанном автором программном модуле (рис. 3).

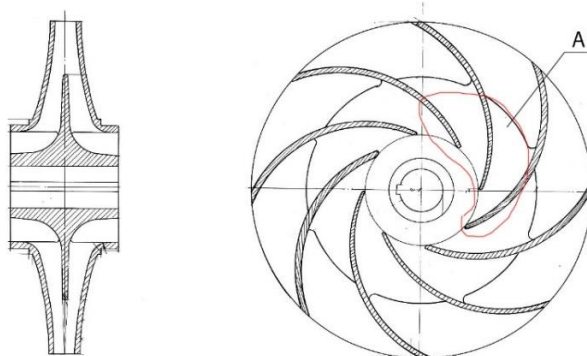


Рис. 2. Макет рабочего колеса ТНА для изготовления опытных образцов ЭИ:
А – зона, для которой проектируется комбинированный ЭИ

Данные исследования позволили решить вторую задачу диссертационного исследования по установлению связей между геометрией обрабатываемой поверхности и геометрией рабочей части ЭИ с учетом параметров формообразования на основе создания программного продукта.

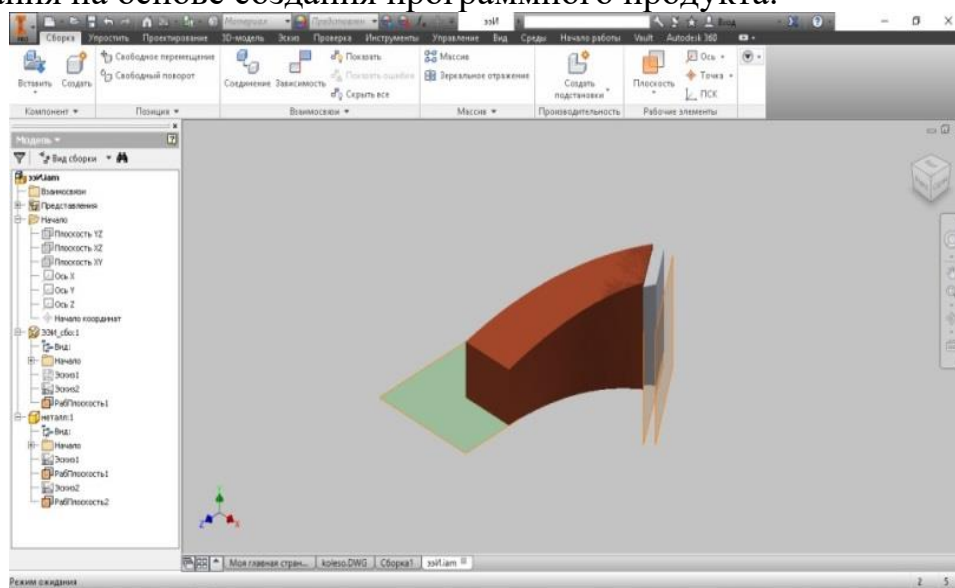


Рис. 3. Пример проектирования опытного образца ЭИ средствами разработанного программного продукта для зоны А на рис. 2

В третьей главе осуществлена разработка алгоритма проектирования и изготовления комбинированного ЭИ, который послужил основой для изготовления геометрии инструмента на основе цифрового прототипа изделия. Общий принцип создания которого базируется на физической модели процесса, изложенной в настоящей главе.

Укрупненно модель состоит из нескольких элементов, обладающих логической взаимосвязью:

- моделирование процесса ЭХФМО с применением комбинированного ЭИ для определения основных закономерностей;
- определение величины межэлектродного зазора для ЭХФМО, где начальными условиями являются форма обрабатываемой поверхности, площадь обработки, требуемая производительность, схема обработки, возможности оборудования, требуемая шероховатость обрабатываемой поверхности, точность и т.д.;
- установленные величины межэлектродного зазора позволяет сформулировать требования к форме ЭИ с учетом геометрии рабочей поверхности;
- определение толщины токопроводящего покрытия, комбинированного ЭИ на основе условий протекания процесса электрообработки.

Согласно на описанным в литературе методикам расчета геометрии инструмента для различных видов электрообработки были предложены общая компоновка ЭИ (рис. 4) и расчетные схемы для вычисления толщин токопроводящего покрытия для случаев ЭХО и ЭЭО. Схемы представлены на рис. 5.

В работе показано, что, основываясь на компоновочной схеме ЭИ (рис. 4) и расчетной схеме для ЭХО (рис. 5, а), геометрия ЭИ для 3D-печати $L_{\text{мод}}$ определяется по выражению:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}i} - S_i - F_o \frac{\chi(U-\Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}}(L_{\text{дет}i} - S_i)}, \quad (1)$$

где $L_{\text{мод}}$ – размер токонепроводящей модели основания; $L_{\text{дет}i}$ – размер детали на i -м участке; S_i – зазор на i -м участке; F_o – площадь обрабатываемой поверхности, мм; ΔU – потеря напряжения в МЭП; $J_{\text{пр}}$ – предельная плотность тока (А/мм^2); U – рабочее напряжение на электродах, В; χ – удельная проводимость, электролита, См/м.

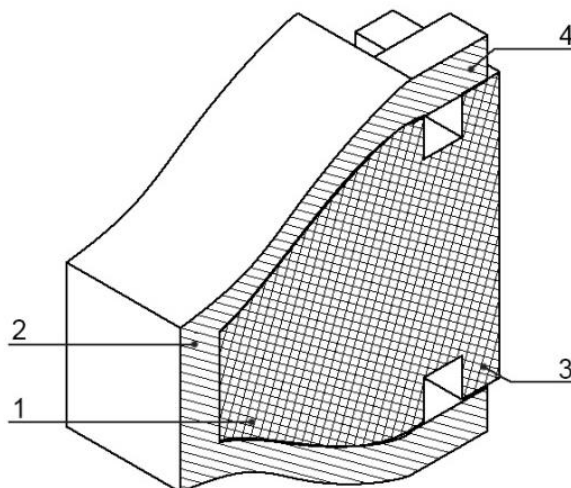


Рис. 4. Обобщенная компоновка комбинированного ЭИ:

1 - токонепроводящий материал; 2 – токопроводящее покрытие; 3 – место крепления в электрододержатель; 4 - токоподвод

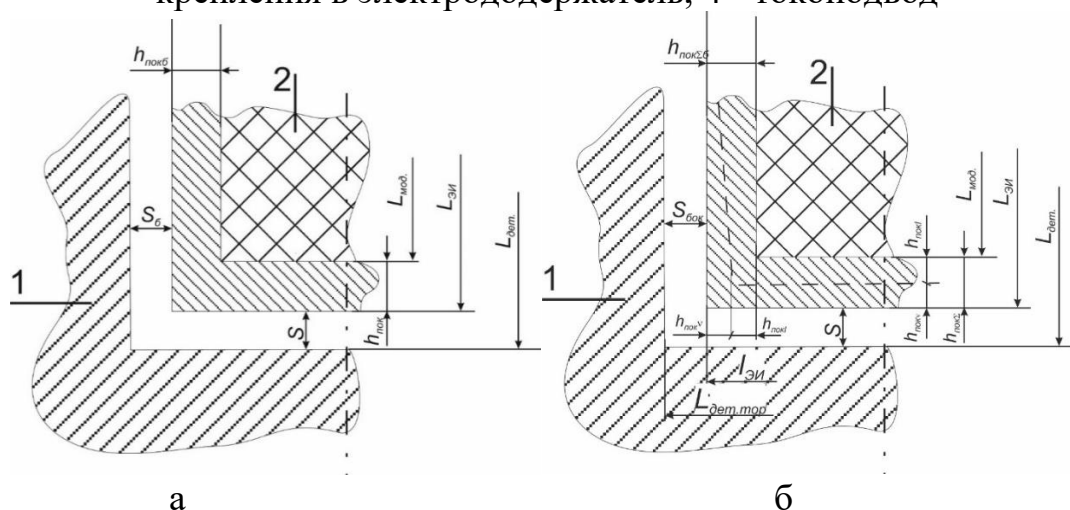


Рис. 5. Расчетные схемы для проектирования комбинированного ЭИ:

а – для случая ЭХО; б – для случая ЭЭО с учетом износа ЭИ

Толщины токопроводящего покрытия на торце $h_{\text{пок}}$ и боковой стороне ЭИ $h_{\text{бок.пок}}$, обеспечивающие стабильное протекание анодного процесса на электродах, определяются по выражениям:

$$h_{\text{пок}} = F_o \frac{\chi(U-\Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}}(L_{\text{дет.торц}} - S_{\text{бок}})}, \quad (2)$$

$$h_{\text{бок.пок}} = F_o \frac{\chi(U-\Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}}(L_{\text{дет.бок}} - S)}, \quad (3)$$

где $L_{\text{дет.торц}}$ – линейный торцевой размер обрабатываемой поверхности, мм; $L_{\text{дет.бок}}$ – линейный боковой размер обрабатываемой поверхности, мм.

Точность построения геометрии комбинированного ЭИ и его последующей печати обеспечивается программными средствами за счет разбиения обрабатываемой поверхности ЭИ на участки с последующей аппроксимацией профиля (рис. 6).

В работе показано, что геометрия комбинированного ЭИ для 3D-печати в условиях ЭЭО определяется по выражению:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}i} - S_i - k_{\text{и}} \frac{W_{\text{и}} \cdot f}{0,75 U_{\text{xx}} \cdot 1,25 J_{\text{пр}} (L_{\text{дет}i} - S_i)}, \quad (4)$$

где $L_{\text{мод}}$ – размер токонепроводящей модели основания; $L_{\text{дет}i}$ – размер детали на i -м участке; $W_{\text{и}}$ – энергии импульсов, участвующих в электроэрозионном процессе; $k_{\text{и}}$ – коэффициент увеличения толщины покрытия за счет износа ЭИ, который для покрытия из меди составляет $1,5 \div 1,75$; для латуни $1,5 \div 1,65$; для покрытий на основе графита $1,1 \div 1,25$; где U_{cp} – напряжение в МЭЗ, которое находится в диапазоне $0,5 \div 0,75 U_{\text{xx}}$ (напряжения холостого хода); I_{cp} – ток на электродах, который находится в диапазоне $0,5 \div 0,75 I_{\text{кз}}$ (ток короткого замыкания).

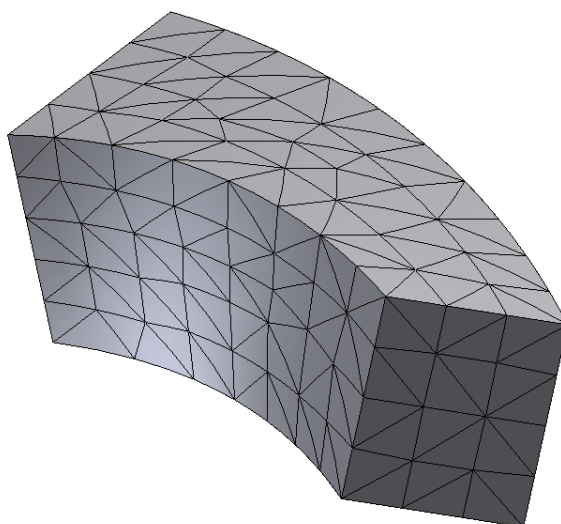


Рис. 6. Построение геометрии комбинированного ЭИ с разбиением на участки для повышения точности 3D-печати (рекомендуемое количество итераций – 10 единиц на 1 мм^2)

Толщина покрытия определяется по выражению:

$$h_{\text{пок}\Sigma} = k_{\text{и}} \frac{W_{\text{и}} \cdot f}{0,75 U_{\text{xx}} \cdot 1,25 J_{\text{пр}} \cdot (L_{\text{дет.тор}} - S_{\text{бок}})} \quad (5)$$

Полученный в работе комплекс уравнений (1) - (5) позволил решить третью задачу по разработке методики расчета и проектирования рабочей части комбинированного ЭИ, с последующей подготовкой цифровой модели ЭИ для изготовления методами 3D-печати.

В четвертой главе изложены материалы по технологии изготовления сложнопрофильного комбинированного ЭИ методом быстрого прототипирования, способам создания токопроводящего покрытия и представлено описание апробации предложенной технологии.

Спроектированные цифровые модели комбинированного ЭИ были получены методом экструзии, который характеризуется низкой

себестоимостью процесса и оборудования и достаточной точностью геометрии ($\pm 0,1$ мкм) получаемых объектов.

Технологические режимы изготовления комбинированного ЭИ и металлического ЭИ методом быстрого прототипирования представлены в табл. 1.

Для обеспечения требуемого качества параметров комбинированного ЭИ, изготавливаемого с использованием аддитивных технологий, проведены исследования по определению коэффициента термоусадки, учитывающие величину изменения линейных размеров объектов (рис. 7). Эти поправочные коэффициенты получены эмпирическим путем и представлены в табл. 2.

Таблица 1

Режимы изготовления ЭИ

Параметры	Значения
ABS пластик	
Температура экструдера, °К	533,15
Температура рабочего стола, °К	388,15
Диаметр сопла, мм	0,3; 0,4; 0,6; 0,8
Скорость печати, мм/с	40
Процент заполненности, %	25 - 90
Состав металлизации	медь (II) сернокислая 5%-водная; калий-натрий виннокислый 4-водный; натрий гидроокись; натрий углекислый; никель двухлористый 6-водный; ингибитор КИ-1(0,5%-й раствор); натрия N, N-диэтилдитокарбонат (0,15%-й раствор); формалин технический.
Температура раствора, °К	295,15
Время металлизации, мин	30
Давление металлизации, Па	10^{-2}
Скорость осаждения, мкм/мин	0,3
PLA пластик	
Температура экструдера, °К	488,15
Температура рабочего стола, °К	353,15
Диаметр сопла, мм	0,3
Скорость печати, мм/с	40
Процент заполненности, %	25
Параметры металлизации PLA пластика	аналогичны параметрам для ABS пластика
3D-печать металлическими материалами	
Диаметр пятна лазера, мкм	40~100
Мощность лазера, Вт	200/500
Толщина слоя, мкм	20
Расход защитного газа при построении, л/мин.	200
Скорость печати, мм/с	35-45

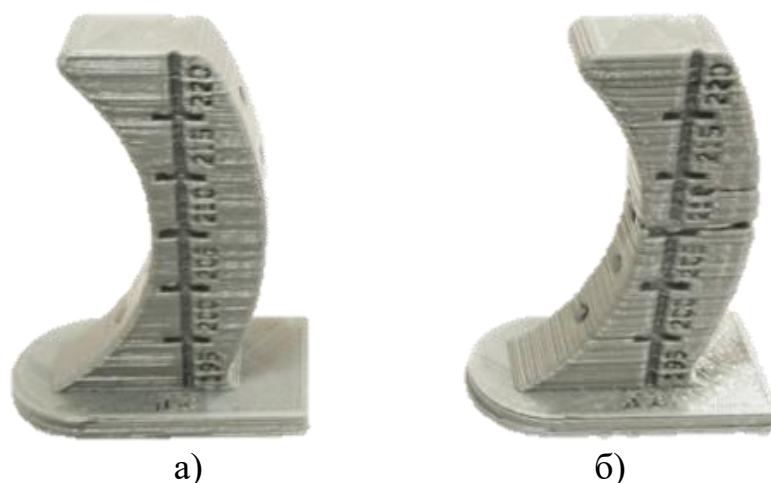


Рис. 7. Опытные образцы для определения коэффициента термоусадки моделей ЭИ: а – толщина нити 0,4 мм; б – толщина нити 0,8 мм

С учетом этих коэффициентов выражения (1) и (4) принимают следующий вид для определения геометрии комбинированного ЭИ для условий ЭХО:

$$L_{\text{мод}} = k_{\text{л}} (L_{\text{дет } i} - S_i - F_o \frac{\chi(U-\Delta U)}{S_i J_{\text{пр}}(L_{\text{дет } i} - S_i)}); \quad (6)$$

и условий ЭЭО:

$$L_{\text{мод}} = k_{\text{л}} (L_{\text{дет } i} - S_i - k_{\text{и}} \frac{w_{\text{и}f}}{0,75 U_{\text{xx}} \cdot 1,25 J_{\text{пр}}(L_{\text{дет } i} - S_i)}), \quad (7)$$

где $k_{\text{л}}$ – коэффициент изменения размера готовой 3D-модели вследствие термоусадки. Он зависит от применяемого материала для 3D-печати и заполненности модели в процессе изготовления.

Таблица 2

Результаты термоусадки пластика и поправочные коэффициенты для расчета геометрии моделей

Тип пластика	Процент заполненности, %	Процент термоусадки, %	Поправочный коэффициент $k_{\text{л}}$
ABC	55	2,4	1,024
	60	3,5	1,035
	65	4,5	1,045
	70	5,1	1,051
	75	6,5	1,065
	80	7,0	1,070
	85	7,2	1,072
	90÷100	7,5	1,075
PLA	55	0,7	1,007
	60	1,2	1,012
	65	1,5	1,015
	70	1,9	1,019
	75	2,1	1,021
	80	2,3	1,023
	85	2,4	1,024
	90÷100	2,5	1,025

Точность изготовления комбинированного ЭИ методами 3D-печати контролируется путем измерения в процессе нанесения по эталонной модели (рис. 8).

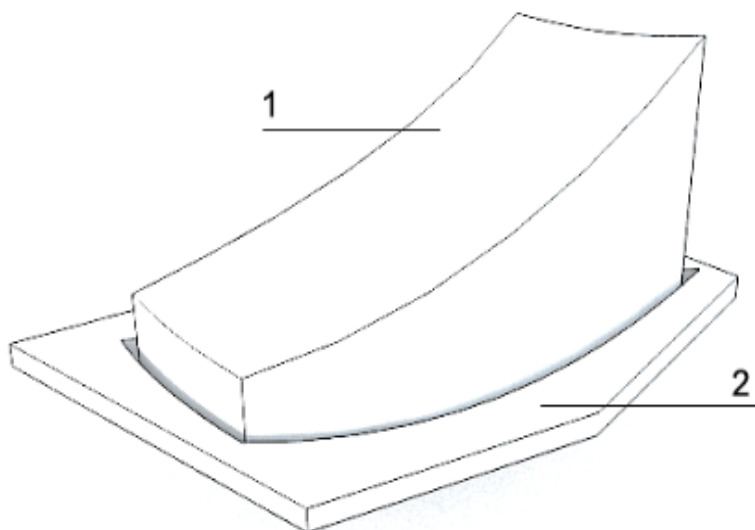


Рис.8. Цифровая модель комбинированного ЭИ с покрытием 1 и шаблона 2, выполненного методом 3D печати

В результате практической апробации были изготовлены ЭИ с новыми качественными характеристиками. На рис. 9 представлены: а - диэлектрическая основа комбинированного ЭИ под нанесение покрытия, выполненная методами 3D-печати (а) и готовый комбинированный ЭИ для обработки поверхности с кривизной G2 и G3 (б). На рис. 10 показана деталь, в которой производилось удаление заусенцев и скругление кромок в труднодоступной части рабочего колеса ТНА.

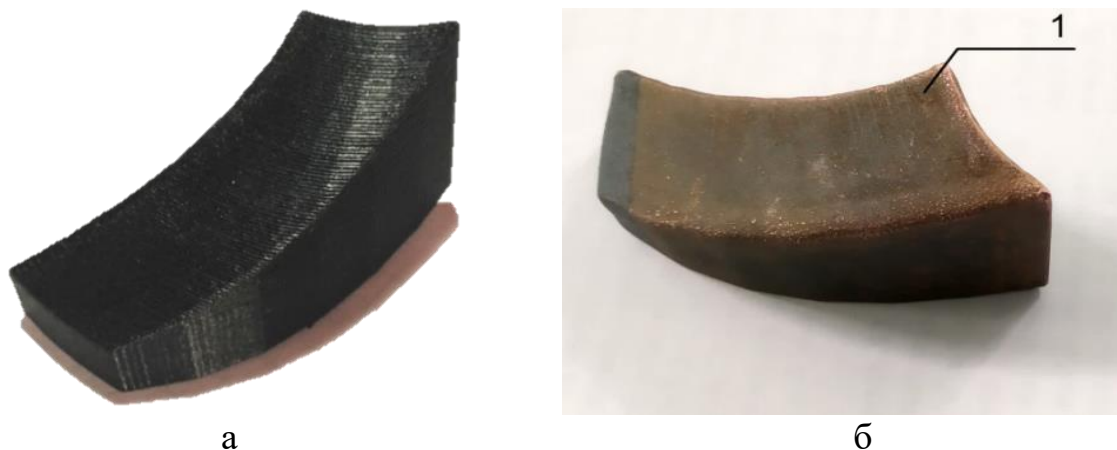


Рис. 9. Диэлектрическая основа комбинированного ЭИ с рабочими поверхностями с кривизной 3G и 2G (а) и комбинированный ЭИ с покрытием 1 (б)

Для изготовленных комбинированных ЭИ было произведено исследование точности профиля комбинированного ЭИ и шероховатости его рабочей части. Данные показали, что полученные комбинированные ЭИ ничем не уступают цельным ЭИ, применяемым в промышленности.



Рис.10. Рабочее колесо ТНА, послужившее прототипом для создания формы экспериментального ЭИ

Кроме того был исследован износ образцов ЭИ в реальных условиях работы. При проведении оценки использовался косвенный метод, заключающийся в периодическом взвешивании ЭИ и его визуальном осмотре. Данные представлены в табл. 3 и на рис. 11.

Таблица 3

Износ ЭИ после ЭЭО

Средняя сила тока I_{cp} , А	Вес ЭИ по времени работы t_p , г					
	$t_p=0$	$t_p=1$	$t_p=1,5$	$t_p=2$	$t_p=2,5$	$t_p=3$
11	50	49,2	47,32	40,12	29,75	19,35
12	50	48,56	46,8	38,7	27,32	17,3
13	50	48,1	45,2	37,2	25,12	13,75
14	50	47,56	44,32	36,11	24,78	12,43

При проведении экспериментов были установлены следующие режимы: частота следования импульсов $f=200$ кГц; скважность $\tau_u=2,5$ мкс; рабочая среда керосин; скорость прокачки рабочей жидкости 1 м/с.

Максимальный износ ЭИ составил около 70 %, однако даже при таком износе визуального нарушения токопроводящего покрытия на поверхности не наблюдалось. Присутствовало изменение цвета покрытия, что не сказалось на его токопроводящих свойствах.

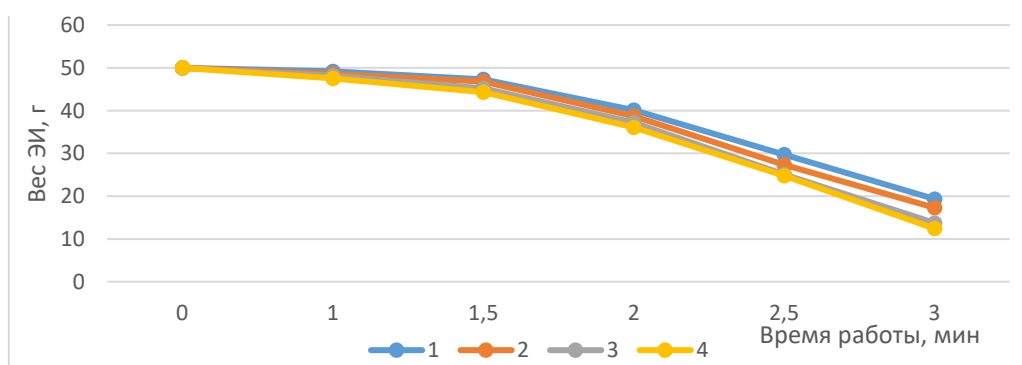


Рис. 11. Графический анализ износа комбинированного ЭИ при ЭЭО:
1-износ при $I_{cp}=11$ А; 2- $I_{cp}=12$ А; 3- $I_{cp}=13$ А; 4- $I_{cp}=14$ А

Результаты сравнительного технико-экономического анализа комбинированного ЭИ, изготовленного с использованием аддитивных технологий, и инструмента, изготовленного на основе традиционных технологий, представлены в табл. 4 и рис. 12 и 13. Они показали приемлемую величину стойкости комбинированных ЭИ, достаточную для случая единичного и опытного производства. Это приводит к тому, что разработанная методика проектирования и изготовления комбинированного ЭИ в условиях единичного и опытного производства в 10-20 раз повышает технико-

экономические показатели электрических методов обработки по сравнению с использованием ЭИ, изготавливаемых традиционными методами.

Таблица 4

Сравнительный анализ ЭИ, изготовленных с использованием традиционных и аддитивных технологий

Параметры	Комбинированный ЭИ для опытного и единичного производства		ЭИ изготовленные из металла на основе аддитивных технологий		Инструмент на основе традиционных технологий			
	ЭХО	ЭЭО	ЭХО	ЭЭО	Получение профиля ЭИ механической обработкой		Изготовление ЭИ методом пластического деформирования	
					ЭХО	ЭЭО	ЭХО	ЭЭО
Стойкость, мин.	30	5	30	5	30	5	30	5
Себестоимость, рубль	350		≈12000 ³		1500		≈45000 ¹	
Трудоемкость изготовления, час	≈1		≈3		≈18 ²		≈36 ²	
Точность изделия, квалитет	6		6		6		6	

Примечание к таблице: 1 – учитывается стоимость изготовления штампа; 2 – включает время на написание УП для станка ЧПУ; 3 – включает амортизационные отчисления на 3D принтер для печати металлом.

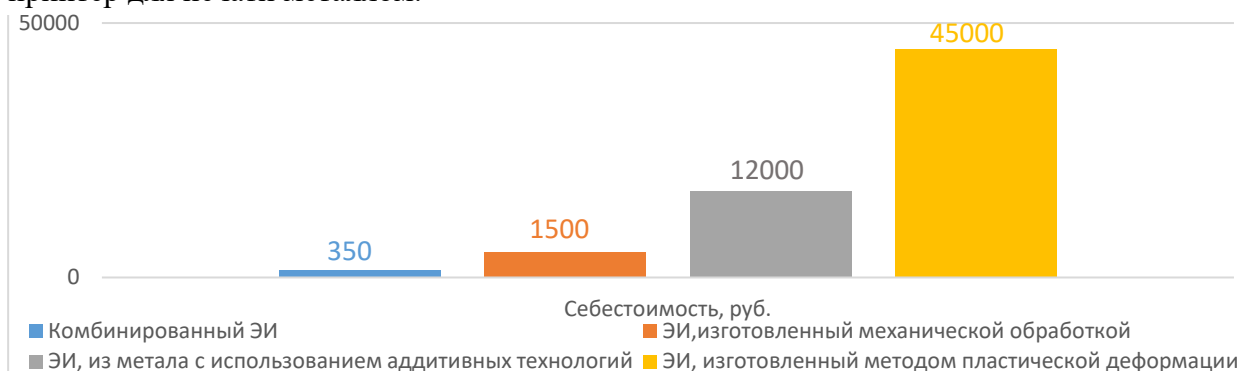


Рис. 12. Сравнительный анализ затрат на изготовление ЭИ

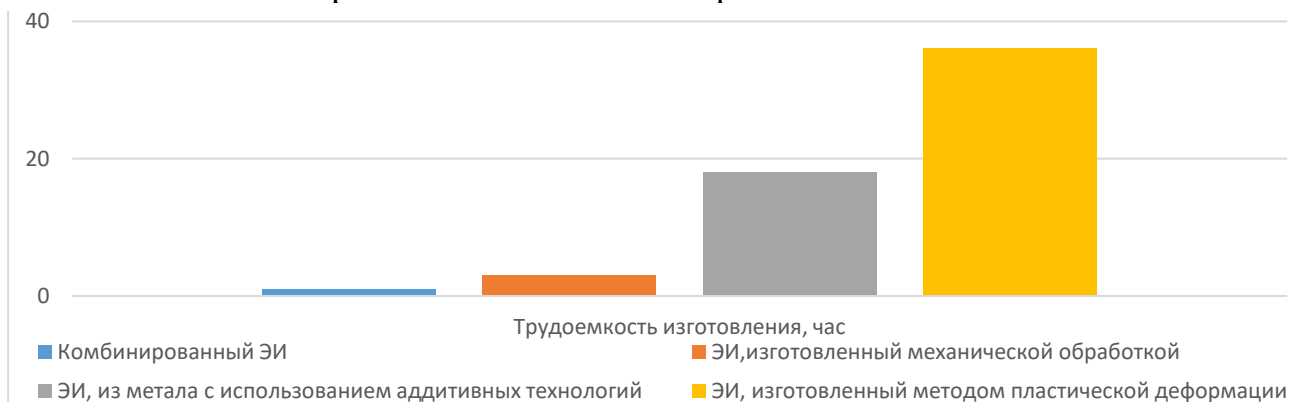


Рис. 13. Сравнительный анализ трудозатрат на изготовление ЭИ

Некоторое снижение стойкости комбинированного ЭИ, которое наблюдается в сравнении с цельнометаллическими аналогами (для случая ЭЭО), компенсируется быстротой изготовления и относительной простотой процесса (достигается повышение производительности до 10 – 30 раз). Полученные данные позволили решить четвертую и пятую задачи настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны и апробированы на промышленных предприятиях методики проектирования и изготовления средствами аддитивных технологий комбинированных электродов-инструментов, которые основаны на построении цифровой модели ЭИ с высокой степенью кривизны (G2 и G3) рабочих поверхностей с последующей корректировкой в зависимости от величины межэлектродного зазора и величины изнашивания в процессе электрообработки.

Создана методика учета корректировки линейных размеров цифровых моделей ЭИ, подготовленных к 3D-печати, учитывающая величину термоусадки в процессе печати, обеспечивающая точность готовых изделий в пределах 6 качества, что соответствует требованиям, предъявляемым к ЭИ, изготовленным традиционным способом.

Приведен опыт практического применения комбинированного ЭИ в промышленном производстве при финишной обработке поверхностей с высокой степенью кривизны, показавший высокую стойкость инструмента (в пределах 10-30 минут), достаточную для их использования в условиях единичного и опытного производства. За счет снижения технико-экономических затрат на производство ЭИ появляется реальная возможность расширения области технологического применения электрических методов.

В соответствии с заключением сформулированы **общие выводы:**

1. Установлены параметры обрабатываемых поверхностей (степень кривизны G2 и G3), которые являются условием эффективного применения электрических процессов формообразования с использованием комбинированных ЭИ, полученных методами 3D-печати с корректировкой их линейных размеров на величину межэлектродного зазора и режимов обработки.

2. Показано, что существующие способы проектирования и изготовления ЭИ со сложной геометрией рабочей части, реализуемые в виде конструкторско-технологической многофакторной задачи, могут быть формализованы и описаны в виде алгоритма, который, в свою очередь, может быть реализован методами САПР, что повышает скорость и точность проектно-технологических решений до 10 раз, снижает себестоимость изготовления ЭИ до 10-20 раз и позволяет эффективно применять электрические методы в условиях единичного и опытного производства.

3. Разработана методика проектирования рабочей части ЭИ, впервые реализованная в виде цифровой подсистемы конструирования формы, в которой используется наиболее полный набор факторов, учитывающих форму обрабатываемой поверхности детали, режимы протекания электрических процессов в зоне обработки, методики изготовления ЭИ и компенсации изменения формы ЭИ в процессе 3D-печати за счет введения в аналитические зависимости поправочного коэффициента k_d , который находится в диапазоне от 1,007 до 1,075 в зависимости от применяемого материала для 3D-печати.

4. Теоретически обоснована, экспериментально подтверждена и представлена в виде номограммы для технологов-практиков рациональная толщина токопроводящего покрытия комбинированного ЭИ. В зависимости от метода электрообработки и площади обрабатываемой поверхности она находится в диапазоне от 0,2 мм до 1,2 мм, обеспечивая при этом стойкость инструмента в диапазоне от 10 до 30 мин., что является рациональной величиной для условий единичного и опытного производства.

5. Экспериментально доказано, что точность профиля комбинированного ЭИ после 3D-печати находится в диапазоне 8÷11 качества точности, а шероховатость поверхности в диапазоне $R_a=1,25÷2,5$ мкм. Эти параметры соответствуют показателям, характерным для ЭИ, полученным методами традиционного формообразования, а следовательно, не снижают область технологического применения электрических методов обработки.

6. Проведены опытные и промышленные испытания методики проектирования формы комбинированного ЭИ, технологии его изготовления и апробации ЭИ при изготовлении опытных образцов деталей, которые показали, что точность

поверхности после обработки комбинированным ЭИ находится в диапазоне $6\div 8$ качества точности, а шероховатость $R_a=0,32\div 1,25$ мкм, достигает 30 мин., что отвечает запросам производителей продукции в условиях единичного и опытного производства.

7. На основе сравнения технико-экономических показателей выявлен существенный рост экономической эффективности защищаемой методики проектирования-изготовления ЭИ по сравнению с классическими методами изготовления ЭИ: по себестоимости до 10 раз, по производительности до 10-20 раз, что существенно влияет на себестоимость готового изделия в условиях единичного и опытного производства.

8. Раскрыты перспективы расширения предлагаемой методики проектирования, за счет ее универсальности, для случая технологий 3D-печати цельного ЭИ из токопроводящих материалов, что позволяет внедрить ее серийное производство с сохранением условий экономической эффективности и целесообразности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях Scopus

1. Suvorov A. Parametrization and manufacturing of a combined electrode tool using additive technologies and modern computer-aided design systems // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1278. – № 1. – С. 012031.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Кузовкин А.В. Разработка технологии изготовления фасонного инструмента на основе быстрого прототипирования / А.В. Кузовкин, А.П. Суворов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 1. - С. 35-37.

3. Технологические возможности комбинированных и аддитивных процессов в формообразовании проточных поверхностей гидрооборудования / А.В. Кузовкин, А.П. Суворов, Г.А. Сухочев, А.О. Родионов // Насосы. Турбины. Системы. - 2014. - № 1. - С. 53-59.

4. Суворов А.П. Методика изготовления сложнопрофильного электрода-инструмента по технологии быстрого прототипирования / А.П. Суворов, А.В. Кретьинин, А.В. Кузовкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 2. - С. 11-14.

5. Суворов А.П. Проектирование комбинированного инструмента для обработки сложнопрофильных поверхностей / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 5 (53). - С. 16-22.

6. Суворов А.П. Параметрическое проектирование электрода-инструмента для электрообработки с помощью модуля iLogic/ А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 5 (53). С. 16-22.

7. Суворов А.П. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. - 2017. - № 2 (41). - С. 9-15.

8. Суворов А.П. Использование современных информационных технологий при разработке сложнопрофильного электрод-инструмента / А.П. Суворов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 4 (19). С. 11.

9. Суворов А.П. Особенности расчета комбинированного электрода-инструмента для электрических методов обработки, изготавливаемого на основе аддитивных технологий/ А.П. Суворов, А.В. Кузовкин// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 158-162.

10. Суворов А.П. Исследование процесса изготовления комбинированного электрода-инструмента для электрохимической обработки в условиях единичного и опытного производства/ А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2019. - Т. 15. - № 5. - С. 117-121.

Статьи и материалы конференций:

11. Суворов А.П. Перспективы развития современных технологий на основе трехмерной графики / А.П. Суворов, А.В. Бесько // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: межвузовский сб. науч. тр. Воронеж: ФГБОУ "Воронежский государственный технический университет", Областное правление НТО машиностроителей, - 2015. - С. 229-232.

12. Суворов А.П. Перспективы развития методов получения сложнопрофильных поверхностей в машиностроении / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин, О.В. Скрыгин // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж, - 2016. - С. 105-114.

13. Программирование процессов электрических методов обработки / А.В. Кузовкин, А.П. Суворов, О.В. Скрыгин, А.В. Мандрыкин // Научно-технические технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Москва, - 2016. - С. 99-101.

14. Суворов А.П. Перспективы использования современных информационных технологий в обработке сложных поверхностей / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник воронежского института высоких технологий. - 2016. № 1 (16). С. 83-87.

15. Суворов А.П. Перспективы развития методов получения сложнопрофильных поверхностей в машиностроении / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Вестник Воронежского института высоких технологий - 2016 № 1 (16) с. 46-52

16. Суворов А.П. Разработка технологии изготовления комбинированного электрод-инструмента методом быстрого прототипирования / Суворов А.П. // Научная опора Воронежской области: сб. трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий, Воронеж - 2017. - С. 143-144.

17. Suvorov A.P. Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD / A.P. Suvorov // Инфографика и информационный дизайн: визуализация данных в науке: материалы Междунар. науч.-практ. конф. - Омск, - 2017. - С. 148-152.

18. Суворов А.П. Перспективы использования аддитивных технологий и САПР в производстве фасонных поверхностей / А.П. Суворов - В сборнике: Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве Труды Международной научно-технической конференции. 2017. С. 163-166.

19. Суворов А.П. Современные способы изготовления фасонных инструментов для электрических методов обработки / А.П. Суворов // Вестник Воронежского института высоких технологий. - 2018. - № 3 (26). - С. 25-27.

20. Суворов А.П. Изготовление электрода-инструмента методом быстрого прототипирования / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий: сборник тезисов V Всерос. науч. семинара, – Томск, 2019. – С: 48-49.

21. Суворов А.П. Определение коэффициента термоусадки при изготовлении комбинированного электрода-инструмента/ А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий: сб. тез. V Всерос. науч. Семинара. – Томск: 2019. – С: 50-51.

Свидетельство о регистрации программного продукта

22. Подсистема "Параметризации электрода-инструмента для электроэрозионной обработки" / А.П. Суворов, А.В. Кузовкин // Свидетельство о регистрации в государственном информационном фонде ФГАНУ "Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти" № 50201650510 от 15.12.2016.

Подписано в печать 11.03.2020 года
Формат 60x84/16. Формат для множительных препаратов.
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 80 экз. Заказ № ___
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14