

На правах рукописи



Стародубцев Игорь Геннадьевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ
ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПО ФОТОШАБЛОНАМ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ
В ОПЫТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Специальности: 2.5.6. Технология машиностроения,
2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель **Болдырев Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кадырметов Анвар Минирович**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф.
Морозова», заведующий кафедрой
«Машиностроительные технологии»

Поташников Михаил Григорьевич
кандидат технических наук, доцент,
ГБПОУ ВО «Воронежский политехнический
техникум», директор

Ведущая организация Акционерное общество
«Научно-производственное объединение
«Техномаш» имени С.А Афанасьева», г. Москва

Защита состоится 17 апреля 2024 г. в 12⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://www.cchgeu.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Автореферат разослан «___»_____2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета
кандидат технических
наук, доцент



Мандрыкин Андрей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях действия международных санкций одной из актуальных проблем государственного уровня в машиностроении России стало импортозамещение. В большей степени это коснулось наукоемких изделий авиакосмической отрасли, потребовалось ускоренное создание новой техники и модернизация продукции оборонного и гражданского назначения, где ранее широко использовались импортные составляющие выпускаемых изделий. Переход на отечественную продукцию вызвал для них необходимость ускоренного создания, отработки производственной технологичности создаваемых образцов, многократные усовершенствования конструкции и технологии на опытных образцах в процессе подготовки изделий к серийному выпуску. Специфика опытного производства требует поэтапного совершенствования конструкции создаваемой новой техники. Для этого нужно при ограниченном количестве средств технологического оснащения производства выпускать для испытаний постоянно усложняющиеся образцы опытной продукции с качеством не ниже заложенной в техническом задании при минимальных затратах труда и средств, обеспечивающих требуемую технологичность осваиваемой продукции. Конструкторы стремятся применять наибольшее количество штампованных деталей, в том числе из листа, с приближением их геометрии к конечному контуру. Здесь требуется большое количество дорогостоящей штамповой оснастки, которая в процессе запуска изделия в серийное производство должна многократно совершенствоваться, а предшествующий вариант становится непригодным для дальнейшего использования и вызывает убытки, снижающие уровень технологичности и конкурентоспособности создаваемой продукции. Требуется создание универсальных методов обработки и быстропереналаживаемой оснастки с возможностью обеспечить производственную технологичность опытных изделий по мере их совершенствования в период запуска серийного производства малыми партиями с использованием минимального количества средств технологического оснащения и высококвалифицированного персонала.

Опыт отработки технологичности изготовления наукоемких изделий однозначно показал, что при производстве ограниченных по количеству партий металлических изделий из тонкого листа наиболее технологичным оказался комбинированный метод электрохимической размерной обработки по одноразовым фотошаблонам, практически не требующий для их изготовления сложного оборудования и легко поддающийся переналадке. Однако в процессе применения шаблонов в основном из фотоэмульсии выявился ряд недостатков, ограничивающих их использование даже в опытном производстве. К ним относятся: ограничение глубины зоны разделения материала детали, значительное снижение точности обработки и качества граничных поверхностей по глубине профиля, слабая изученность связей между свойствами фотошаблонов и режимами разделения или обработки контура металлических заготовок с обеспечением требуемого качества деталей, особенно прецизионных, с малым тиражом их изготовления. Это потребовало создания и применения новых видов фотошаблонов, изучения их свойств применительно к комбинированным методам обработки и к опытному производству, отладки технологии изготовления деталей перспективных изделий машиностроения.

Актуальность тематики подтверждается тем, что она выполнялась в соответствии с федеральной космической программой РФ на 2016-2025 годы под шифром «Феникс», утвержденной постановлением Правительства РФ.

Основные разделы работы выполнены по тематическим карточкам Государственной корпорации «Роскосмос» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и научным направлением Воронежского государственного технического университета по ГБ НИР 2019.15: «Разработка, исследование и практическое использование нетрадиционных методов и средств проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности аэрокосмической техники нового поколения».

Цель работы: создание универсальной ресурсосберегающей технологии ускоренного изготовления по фотошаблонам ограниченных тиражей деталей со сложнопрофильными элементами и повышенной глубиной зоны обработки для выпуска опытных образцов и сборочных единиц; испытание и совершенствование перспективных изделий отечественного производства на последовательных этапах отработки их технологичности с сокращенными сроками и ресурсопотреблением на стадии запуска в серийное производство.

Для достижения поставленной цели были поставлены, сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих технологий изготовления по шаблонам малых партий индивидуальных металлических деталей и обоснование критериев выбора технологичных методов получения малотиражных изделий расширенной номенклатуры по одноразовым фотошаблонам с учетом условий опытного производства.

2. Разработка механизма и моделирование процесса создания фотошаблонов повышенной стойкости и технологичности.

3. Создание системы построения технологического процесса изготовления малых партий металлических прецизионных деталей из листа и разработка технологий для производства новых видов шаблонов.

4. Разработка и реализация эффективных способов и устройств для изготовления по созданным фотошаблонам ограниченных партий деталей с возможностью поэтапного совершенствования их эксплуатационных характеристик в процессе испытания изделий на стадии запуска в серийное производство.

5. Обоснование перспектив расширения технологических возможностей изготовления деталей по фотошаблонам с использованием разработанных технологий и средств технологического оснащения с адаптацией к опытному производству.

Объект исследования: Технологические процессы изготовления фотошаблонов и изделий по фотошаблонам ограниченных партий деталей для их испытания и повышения технологичности конструкции на стадиях создания и освоения перспективных объектов отечественной техники.

Предмет исследования: конструкция, технологичность, технология изготовления одноразовых быстропереналаживаемых фотошаблонов и малотиражных партий деталей расширенной номенклатуры из металлического листа.

Степень разработки темы: в исследуемой области работы известны результаты научных школ из Казани, Воронежа, Уфы, Тулы, Москвы, Минска, Киева, Кишинева, Санкт-Петербурга и других городов технически развитых стран мира. Ученые и специалисты этого профиля достаточно убедительно доказали принципиальную возможность использования фотошаблонов для изготовления углублений ограниченной глубины, что послужило базой для научных исследований по расширению технологических возможностей и области использования созданных с участием автора (в том числе защищенных патентами) новых технологических процессов и средств технологического оснащения, приведенных в рассматриваемой работе.

Способы, обоснованность, достоверность исследований

В работе использованы результаты исследований в области технологии машиностроения, комбинированных методов обработки деталей по шаблонам, положения теории подобия в технических системах, закономерности теории формообразования граничных и переходных участков. Используются классические, проверенные временем, закономерности для сравнения полученных и общепризнанных результатов по технологичности, применено оригинальное оборудование, адаптированное к опытному производству.

Достоверность материалов подтверждена хорошей сходимостью результатов, полученных в процессе испытаний опытных образцов деталей, выполненных по разработанным фотошаблонам, и в процессе внедрения в серийное производство материалов диссертации.

Научная новизна работы:

1. Научные обоснования назначения материалов и способов нанесения светочувствительных материалов на фотошаблоны для достижения требуемых эксплуатационных характеристик изготовленных деталей.
2. Моделирование механизма формирования на фотошаблоне и детали контура зоны обработки с учетом технологических режимов, параметров получаемого углубления детали, и эксплуатационных свойств фотошаблона.
3. Формализация связей между свойствами фотошаблонов и технологическими режимами для изготовления металлических деталей из листа. с поэтапным совершенствованием конструкции и технологического процесса.
4. Закономерности управления направлением вектора анодного растворения через фотошаблон для получения прецизионных контуров в детали с заданными углублениями и контурами.

Вклад в теорию технологической науки

Установлены закономерности для управления вектором действия через предложенные фотошаблоны электрическим полем, что расширяет зону использования теории подобия на технологию комбинированных методов обработки.

Практическое использование результатов работы:

1. Адаптация механизма обработки производственной технологичности изготовления предложенных фотошаблонов и малотиражных партий деталей к условиям их изготовления в опытном производстве.
2. Расширение области использования технологии разделения листовых материалов и локальная размерная обработка углублений на управляемую глубину точного контура с различным положением оси зоны обработки.
3. Повышение уровня производственной технологичности на стадии освоения перспективной продукции, особенно наукоемких изделий новых поколений в авиакосмическом машиностроении.
4. Ускорение и удешевление в несколько раз технологической подготовки производства в условиях многократного совершенствования геометрии и свойств одноразовых фотошаблонов и использования их для изготовления малых партий точных деталей в опытном производстве.
5. Развитие отечественного машиностроения для замены импортной продукции машиностроения технологичными изделиями собственного изготовления.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отраслевых научно-технических конференциях: IX международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2018» (Казань, 2018); 5-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2019) (Сочи, 2019); X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019), (Кемерово, Шерегеш, 2019); X международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (Казань, 2019); XI международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (Калининград, 2019); XII международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении» (Тамбов, 2020); II Всероссийской научно-технической конференции «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2020); конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021) (Севастополь, 2021); 14 международной научно-практической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы прошли проверку в цехах «ВМЗ» – филиала ФГУП «ГКНППЦ им. М. В. Хруничева» (г. Воронеж), доказали свою достоверность и приняты к производству ракетных двигателей в АО КБХА с реальным

экономическим эффектом. Результаты работы использованы при создании двигателей новых поколений на предприятиях Роскосмоса (см приложения в работе).

Положения, выносимые на защиту, и личный вклад соискателя:

Личное участие при решении всех поставленных задач для достижения цели работы и получения результатов, имеющих научную и практическую значимость для обеспечения существенного вклада в развитие технологической науки в машиностроении.

Доказательства преимуществ применения и внедрения в производство быстропереналаживаемых фотошаблонов с повышенной стойкостью для изготовления в опытном производстве ограниченных партий деталей из листа с регулируемым профилем зоны обработки по разработанным с участием автора новым, защищенным патентами РФ, способам и устройствам.

Разработанные конструкции и технологии изготовления новых видов фотошаблонов и партий деталей, требуемых для отработки технологичности создаваемых и осваиваемых изделий машиностроения, в том числе по импортозамещению.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ. В их число входят: монография (в соавторстве), 1 патент на изобретения, 6 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 публикации в международной базе «Scopus».

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 113 наименований, 2 приложений. Материал изложен на 156 страницах с 4 таблицами, 34 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы, раскрыт личный вклад соискателя в выполнение и реализацию результатов исследований.

Первая глава содержит результаты анализа особенностей, спроектированных и реализованных технологических систем опытного производства, специфику построения технологического процесса и организации опытного производства запускаемых изделий машиностроения с использованием продуктов интеллектуальной собственности. Рассмотрены способы управления траекторией инструмента и обоснованы пути повышения качества продукции путем отработки технологичности при освоении изделий, проанализированы вопросы научного обоснования затрат и сроков освоения новой продукции машиностроения в условиях импортозамещения. Выполненные исследования послужили базой для обоснования цели и решаемых в работе задач, приведенных во введении диссертации.

Во второй главе рассмотрены технологические методы и пути решения поставленных задач для достижения цели работы. Для этого сформулированы научные гипотезы:

1. Достаточно полные и изученные технологии разделения тонких листовых плоских деталей по фотошаблонам с покрытием слоями на базе желатина имеют много общего с аналогичными операциями по изготовлению объектов повышенной толщины и с различной формой исходной поверхности, но не обеспечивают удовлетворительных эксплуатационных показателей для таких объектов, что требует использования других видов фотослоя и исследования процессов формирования на них профиля деталей с возможностью управления вектором действия электромагнитного поля.

2. Применяемый в промышленности метод отработки технологичности вновь создаваемых изделий требует поэтапного совершенствования изделия и его составляющих по результатам испытаний малых партий образцов и их оперативных доработок, в том числе путем изменения формы. Последнее требует увеличения стойкости используемых в фотошаблонах покрытий и объективных доказательств возможности расширения области их эффективного применения в опытном производстве для выпуска ограниченных партий точных (в том числе прецизионных) изделий.

3. Эксплуатационные свойства фотошаблонов на базе эмульсий и фоторезистов зависят от технологических режимов комбинированной обработки для изготовления металлических

деталей из листа, что требует разработки новых, защищенных патентами, методов и средств технологического оснащения, обеспечивающих приоритеты отечественного машиностроения и возможности импортозамещения наукоемкой продукции.

4. Технологические показатели процесса обработки деталей, изготавливаемых по шаблонам, зависят от параметров и свойств фотопокрывания, к которым в первую очередь относятся его толщина, адгезионные свойства, определяющие стойкость шаблона, и точность получаемой детали.

5. Управление поверхностью разделения материала детали зависит от режимов анодного растворения по границам шаблона и может осуществляться изменением вектора действия и интенсивности электромагнитных полей на границах рабочего контура фотошаблона.

6. Технико-экономические исследования, приведенные в работе, показали достаточную сходимость теоретических и прикладных результатов, что позволяет использовать предложенные методики для обоснования назначения видов конструкции и разработки для изготовления шаблонов и партий прецизионных деталей по документации опытного производства с наибольшим использованием имеющегося отечественного оборудования и собственной быстропереналаживаемой технологической оснастки, в том числе новых видов фотошаблонов, что ускоряет запуск перспективных изделий машиностроения.

Обоснован выбор средств технологического оснащения для проведения экспериментальных исследований, подтверждающих правомерность теоретических изысканий, выполненных автором, технологичность применения прикладных решений.

По разработанным критериям выбора технологических процессов изготовления фотошаблонов обосновано применение для этой цели фоторезисторов. По методике оценки показателей технологичности, приведенной в первой главе, по заданным эксплуатационным требованиям к инструменту создана программа выбора фотошаблонов для конкретных видов деталей, выпускаемых на стадии освоения перспективных изделий ограниченным тиражом в опытном производстве на универсальном и модернизированном оборудовании.

Рассмотрены новые (на уровне изобретений) способы формирования геометрии деталей по фотошаблонам на базе фоторезистов, что ранее в машиностроении не использовалось. Это послужило основой для создания технологических процессов изготовления деталей для изделий, которые в процессе отработки конструкции становятся технологичными и конкурентоспособными на современном этапе создания и выпуска наукоемкой техники.

Спроектирован алгоритм, учитывающий специфику организации опытного производства и открывающий пути решения задач для достижения цели, поставленной в работе.

В третьей главе рассмотрены вопросы моделирования процесса изготовления по фотошаблонам прецизионных деталей ограниченного тиража с использованием в качестве покрытия фоторезистов. С учетом научных гипотез, сведений о фоторезистах сформулирована физическая модель, определяющая возможность назначения и расчета технологических режимов электрохимической и комбинированной обработки по быстропереналаживаемым фотошаблонам высокоточных деталей в опытном производстве. Научно обосновано (применительно к фоторезистам и изделиям машиностроения) применение наиболее эффективных способов и схем нанесения на шаблоны различных видов фоторезистов.

На базе физической модели проведено математическое моделирование и создана система управления размерным формообразованием по быстропереналаживаемым фотошаблонам на базе фоторезистов.

Схема размещения фотошаблона на анод приведена на рис. 1.

Для моделирования процесса обработки на прямой полярности по фотошаблонам, установленным на аноде, используют классические закономерности (законы Фарадея, Ома, массовыноса, гидродинамики и подобия).

Задача моделирования процесса, приведенного на рис. 1, сводится к нахождению закона изменения границы электролизера от времени обработки в электрическом поле с переменными взаимосвязанными параметрами.

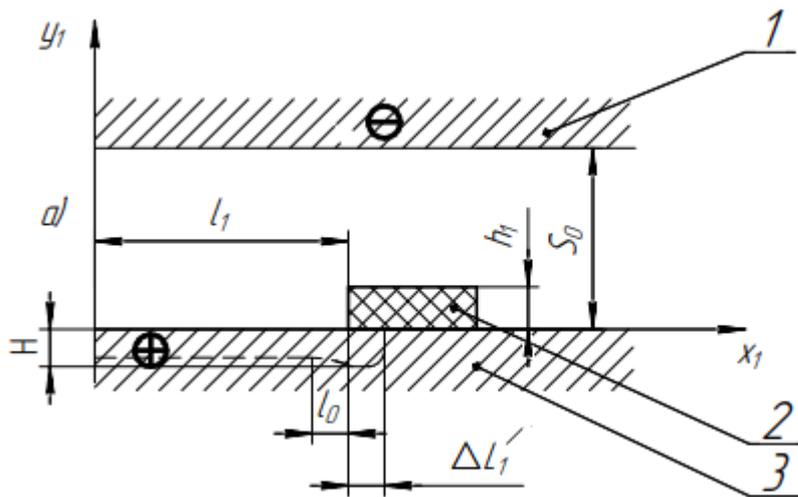


Рис. 1 – Схема нестационарного процесса обработки при расположении однослойного фотошаблона на аноде:

1 - катод-инструмент; 2 - диэлектрическое покрытие фотошаблона; 3 - анод-деталь;

h_1 - толщина диэлектрического покрытия;

$\Delta L_1'$ - подтравливание под фотошаблон; l_1 - половина ширины зоны обработки фотошаблона; S_0 – начальный межэлектродный зазор при наличии фотошаблона в межэлектродном пространстве; H - глубина обработки; l_0 - зона аномального съема металла по глубине

Начальные условия для модели, описывающей механизм обработки детали по фотошаблону:

- потенциалы анода, катода (U_a, U_k) по длине электродов постоянны. Таким образом, выполняется условие эквипотенциальности границы электродов;
- ток через диэлектрическое покрытие не проходит ($du/dy=0$);
- процесс анодного удаления припуска прекращается при достижении предельного нижнего значения плотности тока ($i=i_{пр}$);
- характеристики процесса анодного растворения металла анода за период обработки не изменяются.

– процесс протекает под действием комбинированной обработки преимущественно под действием анодного управляемого по шаблонам тока при растворении припуска по схеме с нестационарным режимом при неподвижных или дискретно перемещаемых электродах (рис. 1).

В качестве управляющей системы размерной обработки используют однослойные (рис. 1) и многослойные шаблоны, где покрытием может служить диэлектрик, по границам которого происходит разделение или углубление материала. При этом вектор действия электромагнитного поля, определяющий направление и интенсивность съема припуска, формируется под воздействием многослойного шаблона, где управление полем происходит одним или несколькими металлическими шаблонами, совмещаемыми с диэлектрическим фотошаблоном (рис. 2).

Граничными условиями модели для схемы на рис. 1 являются:

- при односторонней схеме разделения по фотошаблону с покрытием фоторезистом толщина листа заготовки (в зависимости от материала детали, свойств шаблона и режимов обработки) не более 0,45-0,55 мм;
- при расположении фотошаблона на противоположных сторонах обрабатываемого листа его толщина не должна превышать 1,3-1,5 мм.

Аналогичные граничные условия свойственны механизму формирования по фотошаблону профиля размерных углублений в виде пазов – толщина покрытия на фотошаблоне (h_1) не должна перекрывать начальный межэлектродный зазор (S_0).

С учетом начальных и граничных условий по схеме на рис. 1 с неподвижными электродами глубина H анодного растворения припуска может быть получена из основного уравнения электрохимической размерной обработки через начальный зазор (S_0), выход по току (η), электрохимический эквивалент (α) и плотность (γ) обрабатываемого металла, электропроводность (χ) жидкой среды в зазоре, напряжение на электродах (U), потери напряжения (ΔU), время (τ) протекания процесса:

$$H = \sqrt{S_0^2 + 2 \frac{\eta \alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U) \tau} - S_0. \quad (1)$$

В (1) приняты постоянными: начальный зазор, плотность материала, напряжение на электродах (если оно стабилизируется или изменяется в узких пределах), электрохимический эквивалент (хотя при переменной валентности элементов этот показатель может изменяться). Остальные показатели могут изменяться в зависимости от электрических, гидравлических режимов, численные значения которых оценивают в основном через межэлектродный зазор, где область его исследования ограничена границами, рекомендуемыми для конкретных технологических приложений (например, в случае обработки по типовым и групповым технологиям).

Учитывая выдвинутые ограничения узкого диапазона изменения переменных составляющих, для процесса обработки по фотошаблонам в формуле (1) можно использовать в расчетах осредненные значения, полученные экспериментально и используемые для указанных условий обработки в виде численных коэффициентов.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований по динамике формообразования деталей по фотошаблонам позволяет ограничить пределы активного воздействия на параметры внешних факторов, входящих в (1). Так выход по току в рабочем диапазоне режимов практически не зависит от напряжения на электродах (при изменении его в рекомендуемом интервале 8-16 В), скорости рабочей среды (более 6 м/с), состава и концентрации наиболее употребительных электролитов для сталей и большинства сплавов хлорид натрия – более 6 %; алюминиевых и титановых сплавов – нитрат натрия – более 8 %, а также при их совместном составе и с добавками:

$$\eta = K_1 [1 + K_2 (T - T_0)] S, \quad (2)$$

где K_1 – размерный коэффициент (1/мм), учитывающий рабочую среду, ее температуру (T), состояние электромагнитного поля в зазоре. Для хлорида натрия при температуре $T = T_0$,

$K_1 = 0,8-0,82$, нитрата натрия – соответственно 0,63-0,66; S – торцевой межэлектродный зазор в зоне удаления припуска

$$S = S_0 + H_{\text{заг}}, \quad (3)$$

где $H_{\text{заг}}$ – толщина листа при его разделении; K_2 – размерный коэффициент (1/°C), учитывающий воздействие температурной среды в зазоре. В диапазоне 288 К < T < 310 К при обработке конструкционных материалов величина $K_2 = (4-4,5) \cdot 10^{-3}$ (кроме случаев формообразования углублений в сложных электролитах, принятых для титановых и алюминиевых сплавов).

Учитывая, что при прокачке жидкой рабочей среды имеет место узкий диапазон изменения ее температуры и, соответственно влияния температуры на выход по току (η), зависимость (2) можно использовать для разделения листа в упрощенном виде по конечному результату в конце обработки по глубине:

$$\eta = KS, \quad (4)$$

K – размерный коэффициент (1/мм), учитывающий условия обработки. Для хлорида натрия, нитрата натрия – $K = 0,05-0,052$.

Электропроводность рабочей среды в (1);

$$\chi = K_3 S [1 + \beta(T - T_0)] \quad (5)$$

где K_3 – размерный коэффициент (1/ом·мм²), учитывающий условия обработки, для хлорида натрия, нитрата натрия – $K_3 = 0,05-0,052$;

β – температурный коэффициент,

T – температура в процессе обработки;

T_0 – начальная температура.

В случае обработки деталей по фотошаблонам условия протекания процесса позволяют считать температурный коэффициент постоянным ($\beta \approx 0,0225$).

Потери напряжения в (1):

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3, \quad (6)$$

где ΔU_1 – потери напряжения на зажимах и токоведущих шинах в местах подвода тока к электродам и элементам оснастки. Их величина не превышает 1% и в расчетах может не учитываться;

ΔU_2 – потери напряжения при прохождении тока через заготовку в случае необходимости подвода тока с одного или нескольких удаленных от места обработки участков. Как правило, эти потери учитываются в тонкостенных заготовках, обрабатываемых по всей длине одновременно.

Потери напряжения в зоне протекания процесса анодного растворения:

$$\Delta U_3 = \Delta U_0 (1 + K_4 S), \quad (7)$$

где ΔU_0 – потери напряжения в зазоре без учета омической составляющей (зависит от длины токоподводов и сопротивления переходных участков в электродах).

С некоторым приближением для тока, используемого при обработке деталей по фотошаблонам, потери напряжения выбирают:

– для хлорида натрия $\Delta U_0 = (1,7 - 1,8)$ В;

– для нитрата натрия $\Delta U_0 = (3 - 3,2)$ В;

K_4 – размерный коэффициент (1/мм), учитывающий влияние омической составляющей потерь напряжения для межэлектродного зазора S . Величина $K_4 = 0,12-15$.

Из (1) можно установить длительность процесса обработки по однослойному фотошаблону или многослойным шаблонам для рассматриваемых операций.

Расчетное значение времени обработки τ_{1-1} при одностороннем шаблоне

$$\tau_{1-1} = \frac{H_{\text{заг}}^2 - S_0^2}{2 \frac{\eta \alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U)} \quad (8)$$

при двухстороннем расположении фотошаблонов

$$\tau_{1-2} = \frac{H_{\text{заг}}^2 - S_0^2}{4 \frac{\eta \alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U)} \quad (9)$$

Расчет времени обработки по (8) или (9) позволяет снизить погрешность по глубине паза и по профилю контура относительно шаблона, в частности, за счет стабилизации поднутрения

(рис. 1). Нерасчетное снижение этих показателей приводит к браку деталей, а завышение вызывает повышенное неконтролируемое отклонение размеров детали, что может стать браковочным признаком.

Граничным условием при решении уравнения (1) следует считать момент, при котором съём материала прекращается. Тогда это условие будет выглядеть как $U = \Delta U$, что соответствует положению, при котором все подаваемое напряжение уходит на компенсацию его потерь. При этом минимальная плотность тока (j) для хлорида натрия может составлять 0,5-1 А/см².

В силу ограничений по глубине обработки или толщины заготовки при разделении материала, если принять линейный закон изменения плотности тока, то рабочий диапазон периода обработки можно ограничить изменением J_p :

$$J_p = \frac{1}{2} j_0 \quad (10)$$

где J_p – плотность тока на границе рабочего диапазона;

J_0 – средняя плотность тока в течение времени обработки в пределах изменения величины зазора ($S-S_0$).

Машинное время эффективной работы τ в нестационарном режиме, требуемое для отработки производственной технологичности при обосновании применения обработки деталей по фотошаблонам на глубину активного анодного удаления припуска, оценивается по формуле (11)

$$\tau_p = \frac{(S^2 - S_0^2) \gamma}{4 S_0 \mu \alpha j_p} \quad (11)$$

Разработанная модель позволяет оптимизировать процесс формообразования по фотошаблонам при неподвижных электродах или при дискретной обработке с периодическим изменением величины межэлектродного зазора (если это осуществимо) и при импульсно-циклической обработке. Используя технические требования к чертежу, можно рассчитать режимы, обеспечивающие получение одного или нескольких заданных показателей (например, предельной глубины обработки, погрешности расположения границ контура относительно фотошаблона, показателей качества поверхности, производительности). Если заданный показатель не достижим, то на стадии отработки технологичности в период опытного производства можно изменить технологический процесс, для чего ввести, например, финишную операцию чистовой обработки.

Рассмотрено управление электрическим полем с переменным вектором воздействия, что позволяет выполнять по фотошаблонам каналы и отверстия переменного сечения и с поворотом оси, в том числе на полузакрытых для доступа инструмента участках детали.

Для моделирования процесса формирования зоны обработки электрическими методами (электрохимическое формообразование, комбинированные методы обработки) по фотошаблонам на базе фоторезистов рассмотрен механизм протекания дискретного процесса с произвольной формой и положением вектора действия рабочего тока с плотностью не ниже значения, обеспечивающего размерный съём припуска.

На базе накопленного опыта и выдвинутых гипотез (глава 2) проведено физическое и математическое моделирование процессов с анодным воздействием электромагнитного поля, протекающих при управлении электрическим полем для достижения требуемой формы и положения вектора действия тока. При этом в физической модели требуется учитывать особенности использования в опытном производстве электрических, гидравлических процессов и механические свойства шаблонов (жесткость, прочность, адгезию и др.).

На базе физической модели разработана математическая модель.

1. Расчетная схема процесса приведена на рис. 2.

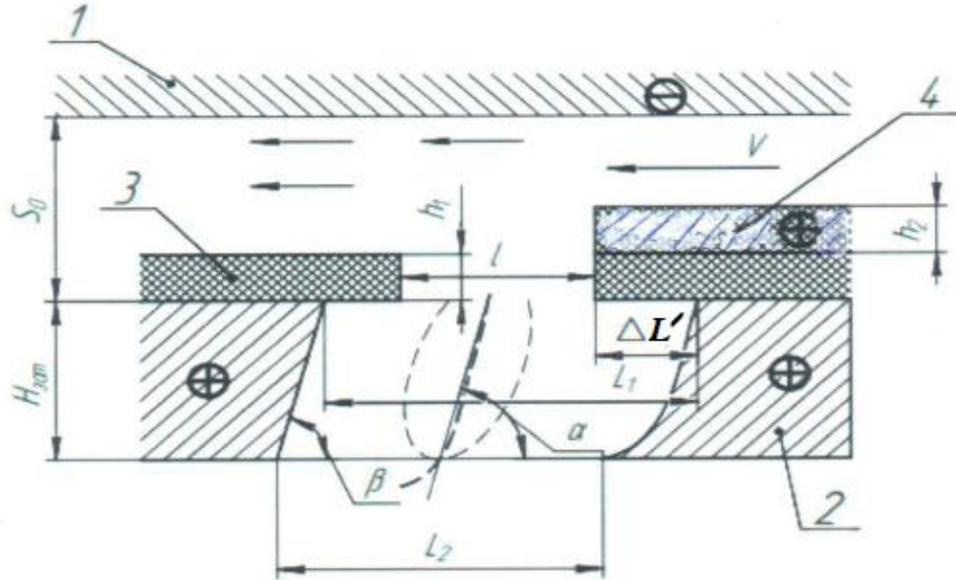


Рис. 2. Схема образования криволинейного канала:

S_0 – расстояние между катодом-инструментом 1 и заготовкой 2; h_1 – толщина диэлектрического шаблона 3; h_2 – толщина токопроводящего шаблона 4; V – скорость прокачки электролита в зазоре; $H_{заг}$ – толщина листа заготовки детали; l – ширина канала в шаблоне; L_1 – ширина канала в детали со стороны шаблона; L_2 – размер канала в детали на его выходе; α – угол наклона вектора действия поля к поверхности детали; β – угол наклона боковой поверхности канала в детали под действием электрического поля

В модели приняты допущения, что при малой глубине обработки ось и стенки канала прямолинейны, а изменение электрического поля по глубине зависит только от межэлектродного зазора S . При таких допущениях можно найти угол α поворота вектора действия поля (обозначения на рис. 2):

$$\alpha = \text{arccctg} \frac{L_1 - L_2 + \frac{H}{\text{tg} \beta}}{2H}. \quad (12)$$

Величина L_1 зависит от зазора, толщины и положения шаблонов, поднутрения ($\Delta L'_1$), т.е. увеличения бокового съема материала под шаблоном, что требуется для расчета геометрии детали на фотошаблоне для сдвига границ ее контура на величину поднутрения. Величина $\Delta L'_1$ зависит от расстояния S_0 , доли электрического поля, действующего со стороны токопроводящего шаблона (4 на рис. 2):

$$L_1 = S_0 + \Delta L'_1 + L''_1, \quad (13)$$

где $\Delta L'_1$ – поднутрение со стороны размещения нетокопроводящего шаблона (3 на рис. 3.2);

$\Delta L''_1$ – то же со стороны шаблона 4.

Величина L_2 зависит в основном от глубины обработки, режимов процесса, массовыноса и выбирается из справочных материалов или рассчитывается из условия обеспечения требуемой скорости рабочей среды в случае ее протекания через фотошаблон.

Принимая в качестве граничного условия минимальную плотность тока в зоне анодного растворения и используя метод отображения зоны обработки на область межэлектродного

зазора, можно с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца установить величину поднутрения $\Delta L'_1$, определяющего смещение контура детали относительно фотошаблона ($\Delta L''_1$):

$$\Delta L'_1 = \frac{2}{\pi\gamma} \int_0^1 \frac{(1-\gamma-\tau^2)d\tau}{\sqrt{1-\gamma}(1-\tau^2)(2-\tau^2)^{3/2}}, \quad (14)$$

где τ - безразмерная величина, характеризующая время протекания процесса, как отношение его длительности от начала обработки к времени выполнения операции;

γ - параметр, характеризующий скорость анодного растворения, относительно плотности тока

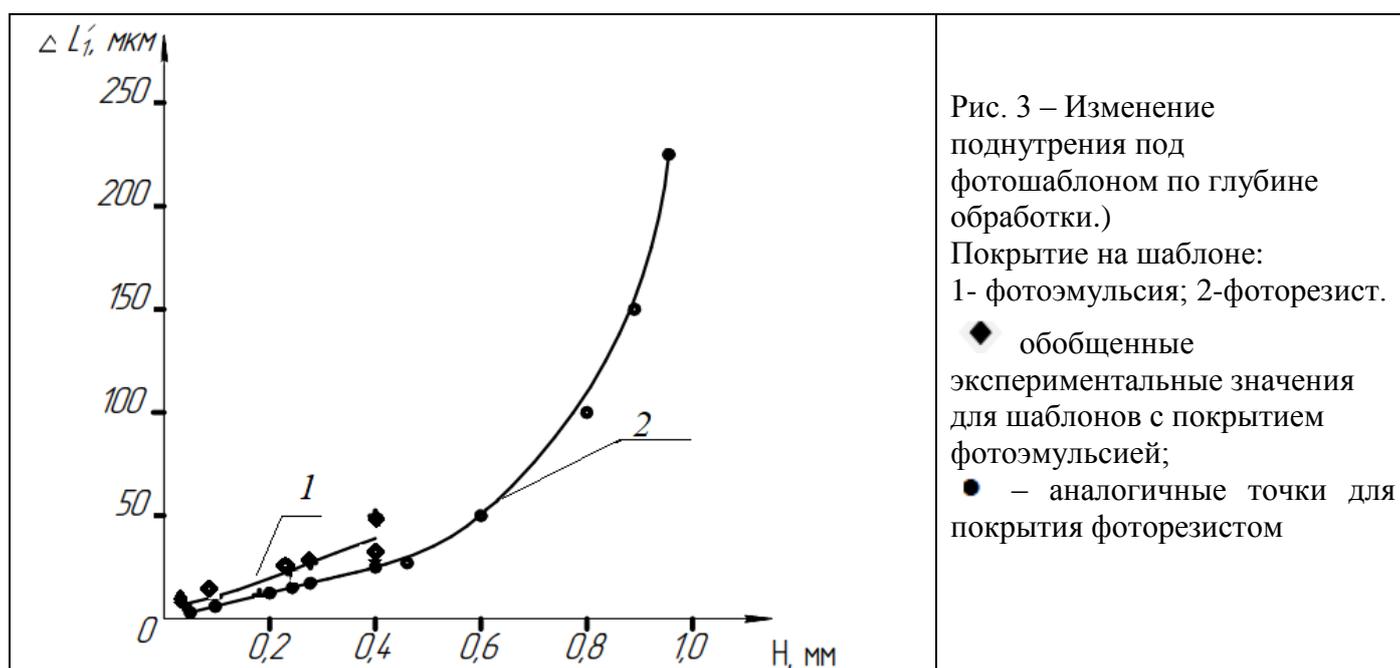
$$\gamma = \frac{j}{2+j},$$

где j – отношение плотности тока в расчетной точке А к плотности на границе Г шаблона с заготовкой

$$j = \frac{j_A}{j_r}. \quad (15)$$

Выполнено экспериментальное подтверждение полученных закономерностей для управления электрическим полем через фотошаблоны, показавших правомерность установленных показателей для управления вектором действия электрического поля через фоторезисты. Это позволило получать каналы с поворотом их оси. Доказана правомерность расчетной зависимости (12) на примере механизма, показанного на рис. 2. Здесь ширина канала в детали со стороны шаблона L_1 достигает 0,5 мм, угол β составляет около 87° . Тогда по зависимости (12) предельный угол наклона вектора действия поля к поверхности детали α , характеризующий поворот, составляет $33^\circ 40'$, что имеет минимальное расхождение (в пределах 5-7 %) с экспериментом и подтверждается прямыми измерениями на экспериментальном оборудовании.

Для проектирования контура шаблона необходимо рассчитать величину сдвига его границ относительно их положения в детали на размер поднутрения $\Delta L'_1$ (рис. 2 и 3) и установить с минимальной погрешностью отклонения для получаемой прецизионной детали.



В результате проведенных исследований установлено:

!расхождение расчетных и экспериментальных показателей для изученных покрытий не превышает допустимого диапазона рассеивания данных при проведении опытных работ;

1) технологические возможности фоторезистов для покрытия шаблонов значительно шире, поэтому проводимое исследование по их использованию для операций в машиностроении (вполне оправдано) экспериментальные результаты подтверждают правомерность использования приведенной модели в технических расчетах геометрии шаблонов с покрытием фоторезистом, а в упрощенном варианте возможность использования эмульсии, позволяющей получать углубления меньшей глубины на участках деталей труднодоступных для инструмента.

Технологические возможности обработки деталей по фотошаблонам зависят от глубины профиля под шаблоном и определяют предельные значения толщины листа при его разделении. Зависимость глубины обработки по фотошаблонам от режимов комбинированного процесса с анодным растворением материала (динамика процесса показана в (13;14) приведена на рис. 4.

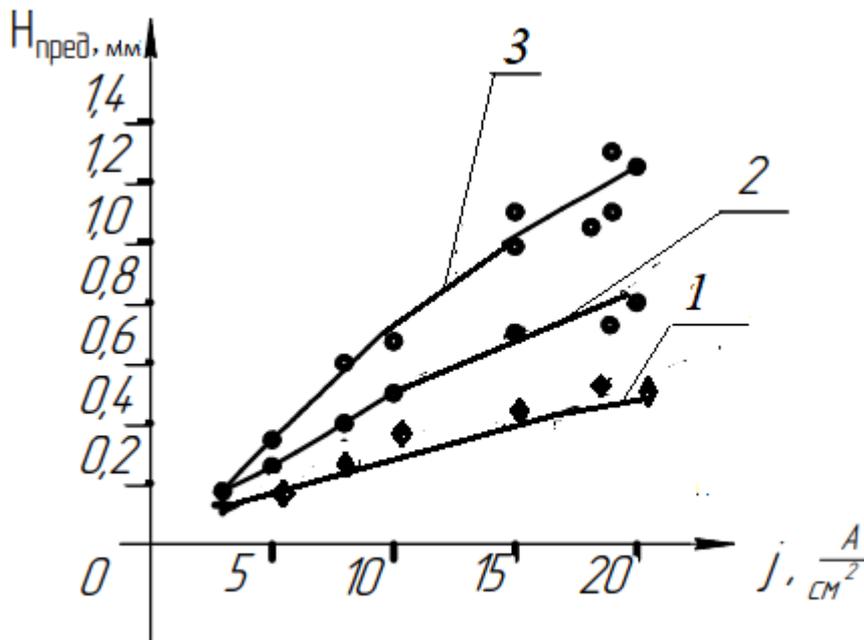


Рис.4 – Изменение предельной глубины обработки $H_{пред}$ от плотности тока на аноде:

- 1 – одностороннее покрытие шаблона эмульсией методом полива;
 2. – одностороннее покрытие шаблона фоторезистом центробежным методом;
 3. – двухстороннее покрытие шаблона фоторезистом методом погружения;
- ◆ - обобщенные экспериментальные значения для шаблонов с покрытием фотоэмульсией;
● – аналогичные точки для покрытия фоторезистом

На рис. 4 показано, что расхождение расчетных и экспериментальных показателей для проведенных исследований не превышает допустимого диапазона рассеивания данных при проведении опытных работ, а ряд технологических возможностей фоторезистов для покрытия шаблонов превышают показатели инструмента с покрытием эмульсией. Применение центробежного метода (2) дает значительные преимущества, но часто не осуществимо из-за сложностей нанесения покрытия на труднодоступные участки деталей или из-за сложностей совмещения контуров на противоположащих поверхностях листа заготовки при сквозной прошивке.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают правомерность использования приведенной модели в технических расчетах геометрии шаблонов с покрытием

фоторезистом и обосновывают возможность применения упрощенного варианта с использованием эмульсии для оперативной подготовки производства для обработки участков деталей труднодоступных для инструмента.

Стойкость (длительность работы) при использовании фотошаблонов для получения качественных покрытий приведена на рис. 5.

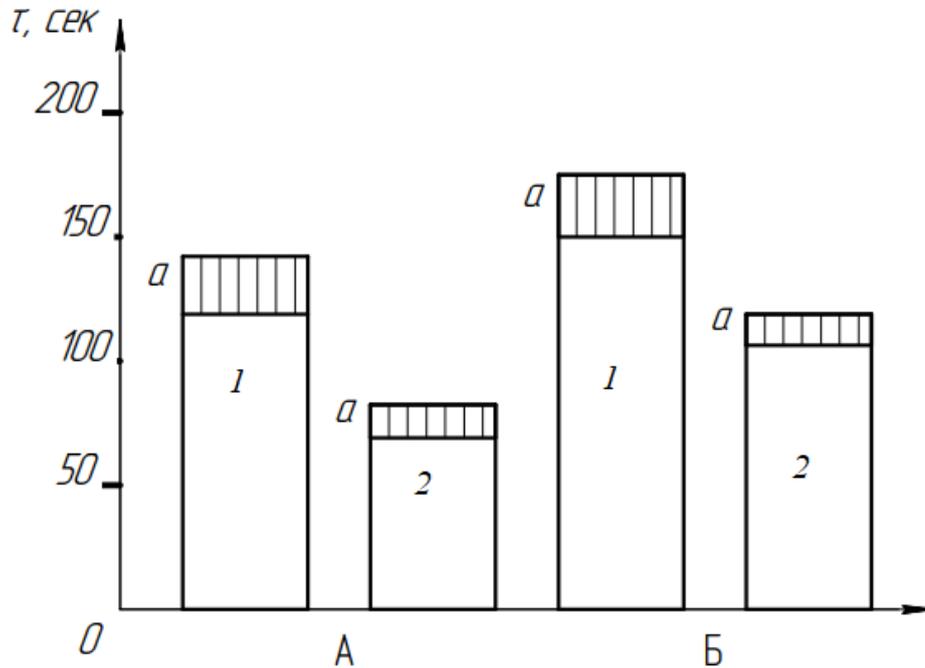


Рис. 5 – Стойкость (длительность работы) при использовании фотошаблонов для получения качественных покрытий.

А – покрытия нанесены поливом. Толщина покрытий 8-12 мкм;

Б – покрытия нанесены центробежным методом. Толщина покрытий 15-18 мкм;

Покрытия: 1 – фоторезист; 2 – фотоэмульсия

Условия обработки аналогичны приведенным на рис. 3 и 4 при высокой плотности тока.

Во всех случаях рассчитанное по формулам (12) и (15) время использования шаблона экспериментальных исследований показывает (рис. 5), что принятая технология получения покрытий и опытных партий деталей различной сложности обеспечивает выпуск их партиями требуемого качества с быстрой корректировкой геометрии, что также подтверждает правомерность описанного механизма обработки деталей по фотошаблонам, высокие показатели от применения предложенных для шаблонов покрытий на базе фоторезистов.

Показано место созданных новых (на уровне изобретений) способов и устройств для расширения технологических возможностей процессов обработки малых партий деталей по быстроперенастраиваемым средствам технологического оснащения. Примеры реализации вышеприведенных теоретических положений представлены в диссертационной работе.

В четвертой главе рассмотрено проектирование, реализация и перспективы расширенного использования технологии обработки деталей по фотошаблонам с учетом специфики и перспектив снижения затрат на ограниченные партии деталей с использованием преимуществ опытного производства.

В работе сформулированы основные положения процедуры построения методологии проектирования комбинированных технологических процессов с использованием созданных фотошаблонов с покрытиями на базе фоторезистов, что позволило расширить технологические возможности для применения известных и создания перспективных способов выпуска

прецизионных деталей малыми партиями в процессе отработки технологичности с использованием возможностей опытного производства.

Рассмотрены особенности расчета и назначения технологических режимов для типовых операций опытного производства, что дало возможность реализовать преимущества быстропереналаживаемых технологий и средств технологического оснащения на стадии запуска в серийное производство осваиваемых изделий.

Обоснованы диапазоны рабочих режимов для получения новых видов фотошаблонов, что позволило назначать параметры получения покрытий с учетом свойств объектов обработки и состояния исходной поверхности материала детали.

Обоснована и реализована возможность регулирования управления технологическими режимами и электромагнитными полями с помощью многослойных шаблонов для изменения геометрии сечений и положения осей каналов и отверстий для создания перспективных изделий преимущественно для авиакосмической отрасли машиностроения, в том числе для замены покупных изделий в импортозамещении.

Раскрыты перспективы расширенного использования новых технологий с развитием аддитивных технологий автоматизированного получения шаблонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В работе научно обоснованы критерии для выбора и отработки технологичности при изготовлении по разработанным фотошаблонам, в том числе с покрытием фоторезистами, ограниченных партий сложнопрофильных металлических изделий высокой точности для получения деталей с различным профилем и наклоном поверхностей в зоне разделения листовых материалов и стенок углублений с учетом специфики опытного производства, обеспечивающего ускорение темпов запуска в серийное производство перспективных, в том числе отечественных изделий.

В результате:

1. Разработаны и защищены патентами новые способы и устройства для изготовления и использования быстропереналаживаемых фотошаблонов.

2. Разработан комбинированный технологический процесс эффективного изготовления по фотошаблонам с покрытием фоторезистом прецизионных металлических деталей из листа с повышенной до 2 раз глубиной зоны обработки, возможностью получения произвольного профиля и положения оси формируемой зоны.

3. Раскрыты пути ускоренной технологической подготовки производства с использованием быстропереналаживаемых шаблонов с покрытием фоторезистами при поэтапном совершенствовании конструкции деталей в процессе отработки технологичности запускаемых в серийное производство конкурентоспособных изделий отечественного машиностроения.

4. Приведено технико-экономическое обоснование замены в опытном производстве разделительных штампов на изготовление малотиражных, в том числе прецизионных, деталей по быстропереналаживаемым, в основном, одноразовым, фотошаблонам, что позволило до 2-3 раз сократить трудовые и материальные затраты на листовые детали при изготовлении опытных образцов создаваемых изделий на этапах их испытаний при отработке технологичности в процессе совершенствования конструкции и технологии производства на стадии освоения серийного производства.

5. Расширена область эффективного использования разработанных технологий изготовления прецизионных деталей по фотошаблонам путем управления электрическим полем при воздействии на формируемые границы контура детали и положение оси углубления.

6. Показана возможность ускорения на 30-50 % перенастройки технологической подготовки производства для типовых деталей из листа на очередном этапе совершенствования изделия.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Стародубцев И. Г. Восстановление размеров и качества деталей комбинированным гальваномеханическим покрытием / И. Г. Стародубцев В. П. Смоленцев, В. Л. Мозгалин, Н. Н. Ненахов // Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – № 12. – С. 3-8.
2. Смоленцев В. П. Течение рабочих сред через каналы в корпусе электрода-инструмента / В. П. Смоленцев, Н. С. Поташникова, И. Г. Стародубцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т.17. – № 5. – С. 104-110.
3. Крохин Д. Е. Аддитивные технологии изготовления электродов-инструментов /В.П. Смоленцев, И. Г. Стародубцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т.18. – № 6. – С. 276–282.
4. Смоленцев В. П. Аддитивные технологии изготовления инструментов для комбинированных методов обработки / В. П. Смоленцев, Н. Н. Ненахов, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 3-8.
5. Стародубцев И. Г. Технология изготовления деталей по фотошаблонам / И. Г. Стародубцев, В. П. Смоленцев, М. В. Кондратьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. № 11.
6. Болдырев А. И. Влияние параметров потока электролита при электрохимической размерной обработке на качество формообразования отверстий в деталях ракетно-космической техники // А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, В. Н. Сухоруков, И. Г. Стародубцев / Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 3. – № 3 (37). – С. 3-10.

Публикации в изданиях в системе «Scopus»

7. Norman A. Additive Technology for Forming Channels with Galvanic-Mechanical Coatings / Anna Norman, Vladislav Smolentsev, Alexander Norman and Igor Starodubtsev // Key Engineering Materials ISSN: 1662-9795, Vol. 910, pp 375-380 doi:10.4028 /p-dq0y3u : 2022
8. Izvekov. A. The field of use of additive technologies/ Alexandr Izvekov,Vladislav Smolentsev,Nikolai Nenakhov, Igori Starodubtsev // Journal of Clinical Review J.Clin Cast Rep – 2022, Vol.7, Issue .8, P.1 03.

Патент

9. Пат. № 2778809 Российская Федерация, В23Н/600. Способ гальваноконтактного восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания и раскатки слоев гальванического покрытия / Смоленцев В. П., Ненахов Н. Н., Стародубцев И. Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»; – № 2021116268; заявл. 03.06.2021; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 24. – 10 с.

Публикации в других научных изданиях

10. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования. Гальваноконтактное восстановление геометрии деталей с использованием поверхностного пластического деформирования: монография: в 2-х т. / В. П. Смоленцев, М. В. Кондратьев, И. Г. Стародубцев, Н. Н. Ненахов; под ред. С.А. Зайдеса // Иркутск: Из-во ИРНТУ, 2022. Т. 2 – Гл. 23.– С. 475–479.

Публикации в научных сборниках и материалах конференций

11. Стародубцев И. Г. Технологическая система электрохимического разделения листовых металлических материалов с различными свойствами / И. Г. Стародубцев, А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, А. А. Падурец // Современные тенденции развития

инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-техн. конф. – Ростов/н/Д.: ДГТУ, 2023. – С. 208-213.

12. Болдырев А. А. Технологические возможности ЭХО при скруглении острых кромок и удалении заусенцев / А. А. Болдырев, А. А. Падурец, А. И. Болдырев, И. Г. Стародубцев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. – Воронеж: Научная книга, 2023. – Вып. 16. – С. 4-8.

13 Смоленцев Е.В. Возможности дополненной реальности в машиностроительном производстве / В. П. Смоленцев, В. Д. Воронина, И. Г. Стародубцев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. – Воронеж: Научная книга, 2023. – Вып. 16. – С. 93-99.

Подписано в печать 2024

Формат 60x84x16. Бумага для множительных аппаратов

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 90 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394006, Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84