

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Болдырев Александр Иванович

Воронеж 2023

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 АНАЛИЗ СПРОЕКТИРОВАННЫХ И РЕАЛИЗОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	11
1.1 Технологические приемы для разделения листовых материалов и получения профильных углублений на деталях.....	11
1.2 Способы управления траекторией инструмента в опытном производстве.....	17
1.3 Специфика организации опытного производства запускаемых изделий машиностроения.....	20
1.4 Использование продуктов интеллектуальной собственности (открытий, изобретений, рационализаторских предложений) при создании конкурентоспособных изделий машиностроения	22
1.5 Обоснование затрат и сроков освоения новой продукции машиностроения путем перехода на типовые и групповые технологии.....	26
1.6 Пути повышения качества продукции путем отработки технологичности при освоении изделий.....	31
Анализ состояния вопроса, формирование цели и задач работы.....	36
Глава 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЦЕЛИ .....	38
2.1 Научные гипотезы для проведения исследований .....	38
2.2 Средства технологического оснащения для выполнения работы.....	39
2.3 Особенности изготовления фоторезистов.....	46
2.4 Научная база для решения поставленных задач.....	47
2.5 Последовательность выполнения исследований для достижения поставленной цели.....	50
Выводы по главе.....	55
Глава 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПО ФОТОШАБЛОНАМ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ОГРАНИЧЕННОГО ТИРАЖА.....	56
3.1 Специфика протекания процесса нанесения фоторезиста на фотошаблон.....	56

3.2	Моделирование процесса формирования по фотошаблонам границ точных профилей на деталях .....	57
3.3	Управление электрическим полем с переменным вектором воздействия.....	66
3.4	Экспериментальное подтверждение закономерностей для управления электрическим полем через фотошаблоны .....	69
3.5.	Разработка новых способов и устройств для создания и применения фотошаблонов.....	74
	Выводы по главе.....	79
Глава 4	<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАСШИРЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПО ФОТОШАБЛОНАМ В ОПЫТНОМ.ПРОИЗВОДСТВЕ.....</b>	<b>81</b>
4.1	Проектирование технологического процесса изготовления деталей по фотошаблонам.....	81
4.2	Технология нанесения фоторезистов на листовые заготовки перед формированием на них профиля шаблона .....	86
4.3	Технологические режимы для обработки деталей по фотошаблонам с покрытием фоторезистом.....	87
4.4	Типовые приложения технологии обработки деталей по фотошаблонам.....	89
4.5	Технология удаления с детали одноразовых фотопокровтий без нарушения эксплуатационных свойств деталей .....	101
4.6	Технология и использование аддитивной автоматизированной системы изготовления партий листовых деталей по одноразовым шаблонам.....	106
	Выводы по главе.....	112
	Заключение.....	113
	Список литературы.....	115
	Приложения А.....	128
	Приложение Б.....	130

## Введение

**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, потребовалась 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 ограниченного тиража металлических изделий из тонкого листа наиболее технологичным оказался комбинированный метод электрохимической размерной обработки по одноразовым фотошаблонам практически не требующих для их изготовления сложного оборудования и легко поддающихся 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 видов фотошаблонов, изучения их свойств применительно к комбинированным методам обработки и к опытному производству по отладке технологии изготовления деталей для 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, испытания и совершенствования 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 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 изделий 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 контурам.

## **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 отработки 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 условиях опытного производства.

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-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); XIV 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 «ГКНПЦ 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, защищенными 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.

## Глава 1 Анализ спроектированных и реализованных технологических систем опытного производства

### 1.1 Технологические приемы для разделения листовых материалов и получения профильных углублений на деталях

В таблице 1.1 приведен анализ применяемых в машиностроении способов обработки и разделения в основном металлических деталей, применяемых в различных видах производства изделий.

Таблица 1.1 – Анализ основных способов разделения и обработки листовых материалов

№	Вид обработки	Возможности	Недостатки	Основная область применения
1	2	3	4	5
1	Разрезка и вырезка на ручных ножницах	Получение листовых заготовок с толщиной до 0,3-0,5 мм простой формы	Низкая точность, высокая себестоимость, сложность получения фасонного профиля, большие отходы материала	Единичное производство несложных деталей из конструктивных материалов
2	Разрезка и вырезка на механических ножницах: - гильотинных, - дисковых	Получение листовых заготовок (толщина заготовки до 12 мм). Получение прямолинейных, криволинейных контуров заготовок	Невозможность получения точных прямолинейных срезов. Загиб кромки, заусенцы, разрыв перемычки. Требуется последующая обработка кромки профиля реза. Радиус скругления не менее 40-50 мм. Низкая точность контура ограниченные технологические возможности метода (сложность обработки внутренних контуров и др. Низкий коэффициент использования материала, ограничение по толщине материала и высокая стоимость абразивного отрезного инструмента	Малотиражное производство несложных деталей из конструктивных материалов

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
3	Разделение вулканитом	Получение листовых заготовок (толщина заготовки до 12 мм). Получение прямолинейных, криволинейных контуров заготовок и обработка материалов, не доступных для лезвийного инструмента	Невозможность получения точных прямолинейных срезов. Загиб, кромки, заусенцы, разрыв перемычки. Требуется последующая обработка кромки профиля реза. Радиус скругления не менее 40-50 мм. Низкая точность контура, ограниченные технологические возможности метода (сложность обработки внутренних контуров и др. Низкий коэффициент использования материала, ограничение по толщине материала, высокий износ и стоимость абразивного отрезного инструмента, «засаливание» и разрушение инструмента при разделении вязких материалов	Разделение труднообрабатываемых материалов в опытном и серийном производстве при хорошем доступе инструмента в зону обработки
4	Штамповка листовых материалов	Широкие технологические возможности по изготовлению заготовок из листа толщиной до 12 мм со сложным профилем из различных материалов. Обработка заготовок большой программой выпуска	Высокая стоимость штамповой оснастки. Наличие заусенцев на кромке заготовки после штамповки. Сложности штамповки вязких материалов. Ограничения по свойствам материала заготовки	Серийное, крупносерийное и массовое производство

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
5	<p>Электроэрозионная обработка:</p> <p>– профильным инструментом,</p> <p>– непрофилированным электродом</p>	<p>Возможность изготовления точных, нежестких деталей.</p> <p>Высокий коэффициент использования материалов.</p> <p>Высокое качество кромки.</p> <p>Отсутствие заусенцев</p> <p>То же</p>	<p>Низкая производительность.</p> <p>Большой расход инструмента и энергии.</p> <p>Ограничение по форме контура и размерам заготовки.</p> <p>Высокая стоимость оборудования.</p> <p>Требуется импортозамещение</p> <p>Необходимость изготовления сложных шаблонов или программ</p>	<p>Единичное и мелкосерийное производство</p> <p>То же</p>
6	<p>Электродуговая резка</p>	<p>Возможность разделения листов большой толщины по разметке</p>	<p>Низкий коэффициент использования материалов.</p> <p>Нарушение характеристик деталей</p> <p>Необходимость обработки кромки с удалением припуска до 3-5 мм.</p> <p>Коробление заготовок.</p> <p>Необходимость трудоемкой переналадки средств подготовки производства</p>	<p>Производство единичных, в основном крупногабаритных заготовок из металла</p>
7	<p>Лучевые методы разделения материалов</p>	<p>Высокая производительность</p> <p>Повышенная точность и чистота поверхности плоских тонких заготовок простого с прямолинейной поверхностью контура</p> <p>Резка заготовок из листа переменной толщины</p>	<p>Низкая точность сложнофасонных заготовок с криволинейной поверхностью. Низкое качество кромки.</p> <p>Высокая стоимость операции из-за малого ресурса узлов оборудования и дороговизны компонентов процесса</p>	<p>Единичное, мелкосерийное производство точных деталей</p>

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
8	Электрохимическая и комбинированная размерная обработка по одnorазовым фотошаблонам, шаблонам и управляющим программам	Экономичное изготовление точных заготовок из листа при любом тираже выпуска. Простота подготовки производства. Быстрая перенастройка оснастки. Получение заготовок любого контура по программе или с чертежа. Отсутствие заусенцев на кромке	Резкое снижение точности при толщине листа более 0,2 мм. Предельная толщина листа около 1 мм Высокие энергозатраты. Падение производительности и разделения с увеличением толщины листа и при переменной обрабатываемости материала заготовки	Опытное и мелкосерийное производство прецизионных тонколистовых деталей и сложных контурных контуров и каналов с плоской и криволинейной зоной разделения
9	Изготовление деталей по одnorазовым шаблонам, полученным по аддитивным технологиям	Быстрая перенастройка средств технологического оснащения Устранение Штамповой оснастки. Малая энергоемкость процесса Возможность создания шаблонов в трудно-обрабатываемых участках детали	Недостаток средств технологического оснащения. Необходимость в переподготовке кадров. Недостаточная изученность процесса и его технологических возможностей. Ограниченная стойкость и адгезионная связь шаблонов с заготовкой	Изготовление открытых и закрытых контуров в опытном и мелкосерийном производстве

Применяемые на малых предприятиях и в опытном производстве слабомеханизированные ручные операции разделения (вид обработки 1 в таблице 1.1) имеют множество ограничений и позволяют изготавливать только достаточно простые детали. Они требуют высокой квалификации исполнителей, поэтому не могут считаться технологичными и перспективными для использования при очередных этапах освоения новых изделий из листа и требуют замены современными технологическими способами обработки [87, 88].

Повышение уровня механизации (вид обработки 2) устраняет ряд недостатков, но сохраняет рекомендации по преимущественной области использования в рассматриваемой отрасли машиностроения [88].

Применение обработки (вид обработки 3) для разделения абразивного инструмента целесообразно применять при ограниченных партиях листовых деталей в случае обработки специальных, труднообрабатываемых лезвийным инструментом, невязких материалов при хорошем доступе инструмента в зону обработки [85].

Штамповка на разделительных и других штампах (вид обработки 4) имеет существенные преимущества, но практически не пригодна для быстрой перестройки на новые детали, даже близкие по геометрии; требует больших затрат на наладку оборудования и экономически оправдана при крупносерийном и массовом выпуске продукции.

Современное высокомеханизированное оборудование, в частности электроэрозионное [59, 102, 104] (вид обработки 5), относят к оборонным отраслям машиностроения. В России оно в основном импортное, попадает под санкции, имеет высокую стоимость и успешно применяется в основном в авиакосмической отрасли машиностроения. Попытки его использования взамен других методов в опытном производстве оказались обоснованными только при наличии универсального оборудования и высококвалифицированных кадров наладчиков и операторов, что для малых предприятий трудно осуществить.

Проводимые научные исследования в области комбинированных методов обработки с наложением электромагнитных полей [83], расширяют область использования электроэрозионных тепловых воздействий для создания большого количества новых способов и отечественных средств оснащения для выпуска высокотехнологичных изделий.

Для получения заготовок из металлического листа с толщиной до 350-400 мм используется электродуговая резка (вид обработки 6), характеристики которой приведены в таблице 1.1. Применительно к тонколистовым материалам этот способ не рассматривается.

Лучевые методы (вид обработки 7), в частности плазменная резка, лазерная прошивка и разрезка, электроннолучевая прошивка отверстий и каналов, имеют широкие перспективы использования [44, 56, 88], в основном в среднесерийном производстве, но эти методы ограничены особенностями процесса, указанными в таблице 1.1 и пока недостаточно изученными. Главным ограничением является прямолинейное движение луча и пока не освоенное управление его траекторией, особенно на участках, труднодоступных для прохождения луча и при сложной криволинейной форме зоны обработки. Пока не удалось преодолеть нестабильность процесса, например, при групповой прошивке отверстий и каналов, что может нарушить работоспособность изделий типа фильтров для тонкой очистки топлива.

Представляются перспективными проведенные исследования [37, 57, 89] в области аддитивных технологий, которые показали возможность расширенного применения в наукоемком машиностроении ограниченных партий листовых деталей. Операции выполняются по управляющим программам, шаблонам, фотошаблонам с гарантированным сохранением эксплуатационных характеристик деталей в процессе изготовления деталей из листа бесконтактными комбинированными методами [83, 102], (вид обработки 8). В рассматриваемой работе решаются вопросы, ограничивающие область эффективного использования наиболее перспективных на уровне изобретений быстропереналаживаемых фотошаблонов [64, 79], адаптация разработанных комбинированных технологических процессов к использованию в опытном производстве. При этом не требуется импортного оборудования и технологий, так как здесь отечественные ученые занимают приоритетные позиции в области машиностроения и способны расширить область эффективного использования достигнутых результатов с использованием комбинированных методов разделения материалов для прецизионных деталей с ранее не достижимыми параметрами.

Исследования последних лет показали (вид обработки 9) принципиальную возможность изготовления диэлектрических и металлических шаблонов без



использования фотослоев, в том числе, для фоторезистов, аддитивным послойным наращиванием тонких слоев [57, 70, 89], с высокой адгезией к заготовке, но для этого требуется комплекс исследований по изготовлению быстропереналаживаемых шаблонов с требуемыми характеристиками и совершенствование технологических процессов обработки деталей комбинированными методами [83, 102].

Анализ таблицы 1.1 позволяет оценить преимущества и ограничения для назначения известных и разработки перспективных технологий для опытного производства и служит базой для совершенствования технологического процесса на стадии его освоения в промышленности.

## **1.2 Способы управления траекторией инструмента в опытном производстве [35, 37, 43, 57, 70, 89 и др.]**

Для контактной и бесконтактной обработки технологические показатели процесса зависят от способа управления и параметров перемещения инструмента относительно места обработки в детали.

Как следует из раздела 1.1 применительно к малотиражному выпуску продукции на стадии опытного производства прецизионных деталей из листа наиболее эффективно использовать носители информации в форме шаблонов, получаемых с изображений геометрии деталей после их корректировки по результатам предшествующего этапа испытаний. Здесь инструментом может служить электромагнитное поле, формируемое на границе шаблона, вектор действия которого определяет геометрические показатели детали. На рисунке 1.1 приведены основные виды шаблонов, применяемых для управления траекторией действия поля или луча для получения требуемых границ зоны обработки детали.



Рисунок 1.1 – Шаблоны, используемые для управления траекторией инструмента в опытном производстве

На современном этапе развития технологии для применения в опытном малотиражном производстве взамен штамповки, пластического формообразования, механической обработки наиболее широкие технологические возможности по разделению плоских и сложнопрофильных, в том числе, металлических деталей из листа с ограниченным доступом инструмента в зону обработки, имеют фотошаблоны. Они позволяют с высокой точностью удалять припуск до получения канавок или сквозного разделения материалов и иметь гибкую или жесткую конструкцию. Здесь перспективно создание шаблонов с

использованием аддитивных технологий путем наращивания материала, например, диэлектрика, по контуру, защищающему воздействие на заготовку электромагнитного поля, с помощью которого происходит формирование деталей. Это требует расширения научных исследований процесса в области создания быстропереналаживаемых, в основном несъемных шаблонов.

Если требуется последовательное изменение формы и размеров изделия в процессе совершенствования его конструкции, то целесообразно использовать быстропереналаживаемые шаблоны одноразового использования. Они могут наноситься и, при необходимости, быстро удаляться с участков деталей, имеющих произвольную форму зоны разделения и криволинейные (в том числе, с переменной кривизной), поверхности в месте обработки по шаблонам. Их преимущественно целесообразно создавать на базе фоторезистов и адаптировать к условиям использования в опытном производстве. Разработанные в работе новые конструкции фотошаблонов подробно рассмотрены в [24, 25, 26, 49, 50] и главе 4 работы.

Применяемые в промышленности технологии разделения тонких листовых материалов по фотошаблонам со слоем из фотожелатина имеют ряд достоинств (освоенность, доступность материалов, отработанность режимов), но им свойственны недостатки. Это неустойчивая адгезия покрытия, недостаточная стойкость, ограниченная и нестабильная толщина слоев, что значительно ограничивает область их применения и качество деталей, получаемых по таким фотошаблонам. Основными ограничениями можно считать слабую адгезию покрытия, вызывающую снижение предельной толщины листа и глубины отверстий или пазов на детали, что требует изыскания новых видов фото-материалов, позволяющих повысить уровень технологичности получаемых деталей и зону применения технологии в опытном производстве. Анализ исследований в родственных отраслях [29, 49, 50] показал, что при изготовлении в основном, осесимметричных плоских полупроводников успешно применяют фоторезисты, которые значительно снижают недостатки фотошаблонов на базе желатины. Но материалы для их нанесения дефицитны, в основном

приобретаются из-за рубежа, на порядок и значительно дороже отечественных компонентов и практически не изучены при использовании их в качестве шаблонов в опытном производстве. Работы последних лет позволили значительно удешевить технологические процессы нанесения фоторезистов, поэтому возникла необходимость в изучении процесса применения фоторезистов в опытном машиностроении для получения малых партий со сквозным мелким профилем углублений. Это позволит расширить область применения новых видов фотошаблонов.

Свойства, аналогичные современным фотошаблонам, имеют конструкции, получаемые по аддитивным технологиям по методу, но в текущий период подобный процесс [51, 57, 69 и др.], применительно к шаблонам (рис. 1.1), находится на стадии изучения, так как пока не обеспечивает технико-экономических преимуществ при отработке технологичности. Поэтому с учетом результатов современных исследований (в том числе, приведенных в рассматриваемой работе) область его реализации пока не ясна и значительно уступает области применения новых видов фотошаблонов в опытном производстве.

Таким образом, критерием выбора фотошаблонов для единичного производства являются эксплуатационные требования к деталям из листа при работе в изделии и оцениваемых по показателям технологичности. В их числе технико-экономический анализ, приведенный в главе и адаптированный к опытному производству.

### **1.3 Специфика организации опытного производства запускаемых изделий машиностроения**

Особенности организации производства на стадии освоения наукоемкой продукции в опытном производстве достаточно детально раскрыты во многих исследованиях технологического профиля [83, 85-88, 102 и др.]. Опытное производство является необходимым этапом создания и освоения

конкурентоспособных изделий новой техники, большая часть которой замещает импортную продукцию оборонного и гражданского профиля. Здесь в процессе испытаний создаваемых машин выполняется поэтапное совершенствование перспективных и модернизированных единичных образцов изделий, достигается заданный уровень технологичности. Опытные образцы продукта позволяют доказать реальность получения показателей, заявленных на этапе маркетинговых исследований, доказать степень совершенства разрабатываемого продукта, реальность обеспечения заявленных эксплуатационных характеристик создаваемого объекта, реальность научных идей (интеллектуального продукта: открытий, изобретений), заложенных в основу новой разработки. Дополнительные затраты на опытные образцы необходимы, так как положительные результаты испытаний нового изделия или использования нового процесса являются мощным стимулом для создания новой техники.

Опытное производство имеет существенные отличия от серийного, а объекты новой техники в процессе их совершенствования и отработки технологичности на опытных образцах могут претерпевать кардинальные изменения. Длительность изготовления опытных образцов и затраты на эти цели зависят от структуры опытного производства направленного на выпуск ограниченного количества изделий, требуемого для испытаний. Это вызывает необходимость в быстропереналаживаемом производстве на базе универсальных средств технологического оснащения, новых технологий, учитывающих специфику выпуска опытных образцов на этапах их совершенствования.

Здесь организация производства зависит от выполнения ряда требований.

К ним относятся:

1. Технический уровень материальной базы и соответствие ее профилю работ по созданию опытного образца.

2. Наличие или возможность привлечения ограниченного количества высококвалифицированных (следовательно, хорошо оплачиваемых) кадров исполнителей, что определяет уровень технологичности, стоимость и

конкурентоспособность создаваемой техники, особенно в авиакосмической отрасли.

3. Возможность и целесообразность изготовления части или всего опытного изделия на стороне, включая технологический потенциал зарубежных предприятий, что следует учитывать в процессе отработки технологичности.

4. Степень преемственности конструкции опытного образца относительно ранее освоенных аналогичных изделий.

5. Возможность использования имеющейся технической базы серийного предприятия (оборудования, средств технологического оснащения) для создания опытного продукта (изделия).

6. Объемы финансирования исследований из различных источников на стадии подготовки к серийному производству с учетом сроков освоения серийной конкурентоспособной продукции.

7. Наличие технических средств для объективной оценки качества и испытания созданного продукта на этапах его совершенствования, которые позволяют ускорить запуск в серийное производство новой техники.

8. Возможность отработки технологичности за счет создания и применения новых (на уровне изобретений) способов, технологических упрощений структуры созданного продукта и изготовления отдельных фрагментов опытного образца, если их испытания дают достоверную картину для оценки показателей будущего серийного продукта.

Специфика опытного производства наиболее доказательно раскрывается на примерах ограниченного изготовления деталей по фотошаблонам на этапах запуска новых изделий в авиакосмической отрасли.

#### **1.4 Использование продуктов интеллектуальной собственности (открытий, изобретений, рационализаторских предложений) при создании конкурентоспособных изделий машиностроения [1-10, 46, 49-55]**

Применение продукции интеллектуальной собственности на стадии создания опытных образцов изделий позволяет:

1. Поднять технический уровень создаваемых изделий вплоть до мирового или превзойти его, обеспечив конкурентоспособность отечественной продукции и независимость от импортозамещения в условиях недружелюбных санкций.

2. Применять высокоэффективные технологические приемы и расширить область использования в промышленности новых, в том числе, защищенных патентами, новых способов и устройств.

3. Снизить трудоемкость и затраты на создание опытного образца изделия за счет чего повысить уровень технологичности и конкурентоспособность создаваемой и модернизируемой техники.

4. Повысить потенциал изделия для завоевания рынков сбыта и снизить зависимость страны от зарубежных поставок машиностроительной продукции.

5. Обеспечить в период действия патента монопольные цены на сбыт серийной продукции и создать задел для ускорения научных и прикладных исследований.

6. Иметь возможность получения дополнительной прибыли путем продажи патентов другим фирмам (отечественным и зарубежным) и ускорить решение собственных социальных проблем.

Рационализаторские предложения позволяют оперативно решать частные вопросы и получать в основном экономический эффект за счет повышения прибыли, премиального вознаграждения авторов и соисполнителей, их награждения. Для ускорения освоения новой продукции через опытное производство интеллектуальный вклад позволяет снизить сроки изготовления, поднять качество создаваемой продукции, улучшить условия труда, повысить творческий потенциал исполнителей.

Для расчета авторского вознаграждения в [78] предложена упрощенная методика расчета экономической эффективности (Э)

$$\Xi = (C_{C1} - C_{C2})N - K, \quad \dots\dots (1.1)$$

где  $C_{C1}$  – себестоимость рассматриваемого элемента конструкции или технологической операции до использования вносимого рацпредложения;

$C_{C2}$  – расчетная или ожидаемая по опыту себестоимость после применения рацпредложения;

$K$  – дополнительные затраты на использование рацпредложения при выпуске количества изделий ( $N$ )

Рацпредложения решают, как правило, локальные задачи. Часто это относится к снижению расхода материалов. Применительно к такому варианту оценки  $\Xi$  формула (1.1) примет вид:

$$\Xi = (M_1 - M_2)N, \quad (1.2)$$

где  $M_1, M_2$  –затраты на материалы при авниваемых вариантах обработки.

Расчеты затрат на материалы выполняют по зависимостям

$$M_{1,2} = M_0 + M_{BT} = N_H C_M - N_0 C_0 + M_{BT}, \quad (1.3)$$

где  $M_0$  – стоимость материала на деталь, сборочную единицу или изделие, для которого подано рацпредложение;

$M_{BT}$  – стоимость на программу вспомогательных материалов, требуемых для использования предложения;

$N_H$  – масса материала заготовки;

$C_M$  – цена единицы массы материала;

$N_0$  – масса реализуемых отходов при изготовлении объекта с использованием

рацпредложения;

$C_0$  – цена отходов

По зависимости (1.2) и действующему на предприятии положению устанавливают сумму денежного вознаграждения разработчикам. Если рацпредложение не дает прямого эффекта (например, замена токсичных материалов в опытном изделии на безопасные), то сумма эффекта назначается как поощрение или разовая поощрительная выплата, которая не может быть менее установленного минимума.



Аналогичную методику обоснования экономического эффекта от внедрения изобретений (авторских свидетельств, патентов) для любого вида производства [78] можно предложить при расчетах по нескольким вариантам:

1. Если изобретение лежит в основе созданного технологического процесса, станка, приспособления, изделия, то экономический эффект (Э) рассчитывается по формуле:

$$\text{Э} = K_1 C_c \quad (1.4)$$

где  $C_c$  – себестоимость продукции, выпущенной за расчетный год;

$K_1$  – доля экономии от изобретения (принимается 0,12-0,15), приходящаяся на 1 год.

2. Если изобретение относится к изготовлению части продукции, то расчет выполняется для программы  $N$  по зависимости:

$$\text{Э} = K_1 C_c \frac{T_1}{T} N \quad (1.5)$$

Или

$$\text{Э} = K_1 C_{c1} N, \quad (1.6)$$

где  $T_1$  – трудоемкость изготовления узла или изделия, выполненного с использованием изобретения

$T$  – трудоемкость изделия;

$C_c$  – себестоимость изделия;

$K_1$  – коэффициент использования рассматриваемого изобретения,

( $K_1 = 0,05-0,12$ );

$C_{c1}$  – себестоимость узла.

3. В случае, если используемое изобретение приносит годовую прибыль  $N_{г}$ , то экономический эффект следует учитывать как часть прибыли:

$$\text{Э} = K_2 N_{г}, \quad (1.7)$$

где –  $K_2 = 0,15-0,20$ .

4. В случае если изобретение позволяет увеличить выпуск продукции, то

$$\Theta = \left( \frac{\bar{C}_1 \alpha_1}{N_1} - \frac{\bar{C}_2 \alpha_2}{N_2} \right) N_2, \quad (1.8)$$

где  $\bar{C}_1$  – суммарные расходы, используемые для содержания и эксплуатации оборудования, на оплату исполнителей по базовому варианту обработки (без применения изобретения);

$\bar{C}_2$  – после внедрения изобретения;

$\alpha_1, \alpha_2$  – доля затрат на изделие в общей себестоимости выпускаемого наименования до и после внедрения (в частности при изготовлении изделий с использованием изобретения или без него);

$N_1, N_2$  – годовой выпуск продукции до и после внедрения изобретения.

### **1.5 Обоснование затрат и сроков освоения новой продукции машиностроения путем перехода на типовые и групповые технологии [46, 78, 92 и др.]**

На стадии отработки технологичности опытных образцов можно использовать типовые и групповые технологические процессы взамен единичных. В справочниках [85-88 и др.] типовым процессом считают технологические документы на объекты, технологически однородные в пределах конструкторских или технологических разработок. Применительно для технологических процессов к типовым относят документацию на всю номенклатуру однородных изделий (например, втулок, шпонок, винтов и др.).

При этом может использоваться несколько видов технологий:

1) Анализируемый типовой технологический процесс применим для изготовления деталей рассматриваемых типов без внесения корректировок. Тогда отпадает необходимость в обосновании целесообразности замены единичного процесса на типовой. Новый процесс может значительно сократить сроки технологической подготовки производства для каждого этапа совершенствования опытных образцов после их доработки по результатам предшествующих испытаний, сокращает потребность в высококвалифицированных кадрах, расширяет возможности использования имеющегося оснащения серийного

предприятия, особенно при перспективе дальнейшего выпуска на нем создаваемой продукции.

2) Имеющийся технологический процесс требует доработки или частичной замены. Здесь следует оценить дополнительные материальные и временные затраты, установить границы эффективного использования типовой технологии. Для этого можно применять упрощенный (типа приведенного в п.1.4) технико-экономический анализ возможных вариантов изготовления деталей из листа, пригодных для использования в опытном производстве, где в качестве базового процесса выбрать разделение металлических материалов по фотошаблонам.

Экономический эффект ( $\mathcal{E}$ ) от такого выбора рассчитывается для  $i$ -типов деталей по зависимости:

$$\mathcal{E} = \sum_1^i (\bar{z}_{mn1} + \bar{z}_{mn2} - \bar{z}_n), \quad (1.9)$$

где  $\bar{z}_{mn1}$  – затраты на проектирование, оформление единичного процесса на рассматриваемую деталь, включая разработку управляющих программ в случае применения станков с программным управлением или аддитивных технологий для получения информации по доработке создаваемого изделия. Выбирается укрупнено по аналогии с подобными единичными техпроцессами, в том числе из справочников, иными способами и устройствами;

$\bar{z}_{mn2}$  – выигрыш в затратах на подготовку производства за счет сокращения времени проектирования типового технологического процесса, его отладки. Последнее позволяет ускорить запуск в серийное производство нового изделия, сократить затраты на переналадку оборудования, изучение документации, повысить загрузку оборудования, усилить позиции в конкурентной борьбе по завоеванию рынков сбыта новой продукции, достичь эффективного импортозамещения (особенно при использовании в изделии собственных изобретений);

$\bar{z}_n$  — затраты на поиск в базе данных требуемого типового технологического процесса, создание требуемого для опытного производства

новых технологических способов, оснастки, средств на их доработку, обоснование в процессе испытаний в опытном производстве, подготовки для этого кадров исполнителей.

Если типовой технологический процесс требует доработки без замены оборудования или средств технологического оснащения (СТО), то в этом случае на стадии опытного производства сравнительный технико-экономический анализ и обоснование выбора типового процесса взамен единичного или мелкосерийного не проводится, а экономический эффект определяется по зависимости:

$$\mathcal{E} = \sum_1^i (\bar{z}_{mn1} + \bar{z}_{mn2} - \bar{z}_n - \bar{z}_{mn3}), \quad (1.10)$$

(где обозначения аналогичны (1.9), кроме  $\bar{z}_{mn3}$ , которое учитывает затраты на доработку типового технологического процесса для нового изделия: изменение режимов, времени обработки, количества проходов инструмента и др.).

3) Типовой технологический процесс требует доработки технологических операций, изменения (перенастройки, замены, приобретения, изготовления) оборудования, СТО, что учитывается как дополнительные затраты  $\bar{z}_{mn4}$

$$\mathcal{E} = \sum_1^i (\bar{z}_{mn1} + \bar{z}_{mn2} - \bar{z}_n - \bar{z}_{mn3} - \bar{z}_{mn4}). \quad (1.11)$$

Если при расчете «Э» (1.11) окажется, что  $\mathcal{E} \leq 0$ , то типовой процесс не целесообразен (что встречается крайне редко).

При групповых процессах технологическая документация создается для однородных изделий с постоянными параметрами технологического процесса, видами оборудования и, в основном, с переналаживаемыми средствами технологического оснащения. Это наиболее полно соответствует требованиям опытного производства при отработке технологичности на этапах поэтапного совершенствования осваиваемой высокотехнологичной продукции.

Технология групповой обработки имеет много общего с применяемой в опытном производстве, так как включает:

– анализ номенклатуры изделий по геометрическим признакам, технологическим показателям, габаритам, назначению и другим факторам. На этом этапе проектирования технологического процесса и по результатам его анализа формируют группы геометрически или технологически близких деталей, количество которых желательно иметь близким к тиражу в серийном производстве;

– создание классификаторов деталей на каждую группу с символьными обозначениями геометрических размеров длин, диаметров и других технологических показателей, заданных в чертеже (допусков, шероховатости, отклонений формы и размеров, твердости и др.);

– проектирование комплексной детали с геометрической формой, объединяющей элементы всех деталей одной или нескольких групп из классификатора. Особенностью комплексной детали является возможность получить объединение геометрических форм, часть которых не доступна для обработки известными технологическими методами. Такой подход расширяет возможности ускоренного совершенствования изделий до конкурентоспособного уровня по этапам изготовления в опытном производстве;

– разработку плана построения технологического процесса изготовления детали с учетом использования нетрадиционных методов обработки всех или большинства или всех деталей в группе желательно на оборудовании, имеющимся в опытном производстве. Здесь можно принять заказы на мелкосерийную продукцию от других производственных подразделений и предложения от сторонних предприятий;

– оценку серийности выпуска каждой группы деталей и разработку технологического процесса опытного производства с детализацией операций и переходов, определяемых серийностью выпуска деталей;

– проектирование технологического процесса изготовления комплексной детали, включающего технологические процессы отдельных деталей одной или нескольких групп. При этом должны сохраняться единые управляющие программы с одинаковыми обозначениями размеров и показателей в форме

символов и табличными сведениями о численных значениях символов для каждой детали (например, путем присвоения шифров);

- разработку сводной ведомости оборудования и СТО с указанием использования их для конкретных шифров деталей, объединенных комплексной деталью, и с указанием выполняемых операций для комплексной детали;

- создание автоматизированной системы хранения и поиска информации о технологических процессах, оборудовании, СТО (САПР-Т), которая вводится в базу данных ЭВМ и оснащается системой быстрого поиска (как правило, по шифру детали, намечаемой для изготовления). Информация может выдаваться в форме документации на операции для конкретных деталей или непосредственно на станки в форме команд на установку заготовок, их перестановку, обработку, контроль, вспомогательные операции (промывку, сушку и др.), снятие и складирование деталей. В случае, когда в групповой технологии используется САПР-ТП, то создается инструкция пользователю с алгоритмом выбора информации для обработки рассматриваемой детали;

Опыт показал, что чем больше количество деталей в группе, тем выше в опытном производстве экономический эффект от использования групповых технологий.

При обосновании выбора технологического процесса для опытного производства необходимо изучить факторы, способные увеличить эффект от мероприятия.

К ним относятся:

- достоинства и показатели для включения деталей в классификатор группы, позволяющий перейти от переналадки оборудования на более быструю и дешевую подналадку (для обработки деталей в пределах группы) путем настройки, замены станков, других СТО, программ (для станков с ЧПУ), задания новых режимов обработки;

- возможность увеличения количества деталей в группах, например, за счет выполнения в опытном производстве части операций по изготовлению серийной продукции, что позволяет полнее загрузить оборудование, сократить

подготовительно-заключительное время и за счет этого поднять конкурентоспособность нового изделия;

– расширить номенклатуру деталей, выпускаемых групповыми процессами, что позволяет в опытном производстве использовать при малом тираже каждого наименования деталей экономически более выгодные технологические процессы серийного производства.

Экономический эффект от применения групповой обработки с учетом специфики опытного производства:

$$\mathcal{E} = \sum_1^i (\bar{Z}_{m31} - \bar{Z}_{m32} - \bar{Z}_{nn}), \quad (1.12)$$

где  $Z_{m31}$ ,  $Z_{m32}$  – затраты на подготовительно-заключительное время при единичном и групповом процессе обработки на партию деталей;

$i$  – количество партий деталей обрабатываемых в течение года по аналогичным групповым технологиям;

$\bar{Z}_{nn}$  – дополнительные средства на подготовку групповых технологий (внесение информации в классификатор, затраты на последующие операции, уточнение геометрии и технических условий для комплексной детали, корректировка информации и др.).

## **1.6 Пути повышения качества продукции путем отработки технологичности при освоении изделий**

Наибольший экономический эффект на стадии создания опытного образца дает глубокая отработка технологичности конструкции изделия. Под технологичностью понимают соответствие конструкции изделия требованиям производства и эксплуатации, обеспечивающиеся при его разработке с обеспечением оптимальных затрат труда, времени, средств, материалов при

технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации, ремонте, а также обеспечение производственной технологичности и всего изделия.

Отработка технологичности включает изменение конструкции опытного образца, доработку проекта по результатам испытаний опытного образца, обоснование использования варианта технологического процесса (индивидуальный, типовой, групповой и т.д.), обоснование разработки или применения новых технологий. На этапе отработки технологичности изделия результатом может быть использование или создание нового технологического процесса, оптимизация цикла изготовления, снижение затрат, упрощение конструкции объекта. Здесь должны учитываться ограничения, свойственные опытному производству, их характеристики, как правило, улучшающиеся по мере перехода к серийному выпуску продукции, технические и организационные мероприятия на всех этапах выпуска продукции. Так при рассмотрении возможных вариантов конструкций не следует рассматривать случаи, реализация которых технически не выполнима при современном уровне исследований или экономически не приемлема, так как требует для выполнения явно не оправданных затрат (приобретения дефицитных в условиях санкций материалов, дорогостоящего оборудования зарубежной поставки, переучивания кадров и др.). Обычно после первичного анализа изделия остается несколько вариантов конструкции и технологических процессов, которые могут принести реальный экономический эффект, выражаемый через разницу в затратах при базовом (принятом ранее) варианте конструкции или технологии. А также при одном из предлагаемых вариантов, дающих наибольший эффект в ходе процесса подготовки СТО, в производстве, эксплуатации, и не вызывающих организационных сложностей.

Отработка технологичности конструкции включает по [66] в качестве критериев более 15 факторов. В первую очередь на стадии создания и отработки конструкции опытного образца учитывают показатели, которые на первом этапе испытаний головного образца (или модели) обеспечивают принципиальную возможность функционирования нового объекта (реальность заложенной идеи,



например, в виде патента), достижение показателей технического задания (выходные данные, масса, энергопотребление, габариты, ресурс, конкурентоспособность, доступность материалов и технологий и др.). На этом этапе отработки технологичности на малотиражных образцах оценивают приемственность конструкции на этапах опытного и серийного производства, позволяющую многократно использовать имеющиеся СТО, оборудование, материалы, освоенные технологические процессы, эффективность производственных связей, оценить целесообразность разработки (в том числе, на уровне изобретений) новых способов и устройств, сохранить профиль предприятия, ускорить переход на серийное производство.

Оптимизацию выбора варианта конструкции на стадии внедрения нового изделия по результатам испытания опытного объекта или его составляющих выполняют путем сравнения результатов испытаний на этапе опытного производства [66] по методу графов (рисунок 1.2).

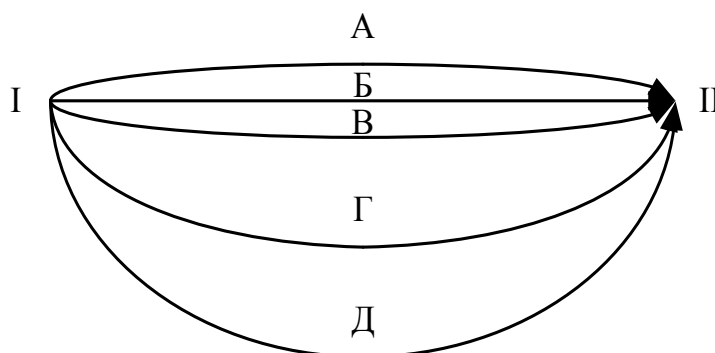


Рисунок 1.2 – Графическое изображение вариантов изготовления базовой детали опытного образца изделия

I, II – сроки начала и окончания изготовления;

A – вариант, под который разрабатывался проект;

B - оптимальный для предлагаемой конструкции вариант по времени изготовления;

C, D – возможные варианты изготовления рассматриваемой и аналогичных деталей

Подобные же (рисунок 1.2) зависимости можно рассмотреть для различных вариантов изготовления деталей. В них должны содержаться:

- базовый вариант, рекомендованный или принятый при проектировании опытного образца (А),
- вариант, обеспечивающий наилучшие показатели (Б),
- другие рассмотренные случаи (В, Г, Д).

Конечные результаты рассмотрения включают: обеспечение эксплуатационных показателей изделия при минимальной себестоимости, снижение цикла производства, доводки, испытаний, результаты отработки технологичности, полученных на опытных образцах, что численно может быть оценено экономически (по эффективности). На рисунке 1.2 длина графов показывает длительность ограниченной партии металлических листовых деталей ракетного двигателя различными технологическими приемами, из которых наибольший выигрыш по времени дает вариант «Б», где за 3 этапа доводки конструкции сложнопрофильной контровочной шайбы толщиной 0,3 мм, выполненной по шаблонам-фоторезисторам, суммарная длительность операций в 1,9 раз ниже по сравнению с изготовлением таких деталей слесарно-механическим методом (вариант «Д»).

Если при оценке других показателей технологичности не выявится новых вариантов, дающих большой экономический эффект, то может быть принят вариант «Б» изготовления по односторонним фотошаблонам с покрытием фотоэмульсией или двухстороннее разделение по фотошаблонам (В) как технологически и экономически и организационно выигрышный вариант.

Для оптимального варианта можно по тарифным ставкам исполнителей или средней по предприятию величине заработной платы в процессе отработки технологичности можно установить выигрыш (экономический эффект) от применения улучшенного варианта конструкции, процесса испытаний в опытном производстве и др.

В качестве примера в таблице 1.2 приведены варианты трудоемкости изготовления корпуса ракетного двигателя с применением различного уровня

оснащенности производства специальным оборудованием (высокоавтоматизированные электроэрозионные станки с ЧПУ и проволочным электродом-инструментом), быстропереналаживаемыми приспособлениями, многослойным инструментом. При нормативной оснащенности по [78] средние коэффициенты технологической оснащенности для единичного и серийного производства могут составлять:

- общие 0,1-0,17 и 0,56-1,1;
- созданными приспособлениями 0,03-0,05 и 0,15-0,3;
- инструментом 0,04-0,05 и 0,15-0,25.

Таблица 1.2– Трудоемкость изготовления и себестоимость варианта изделия при различных способах изготовления, предлагаемых в процессе отработки технологичности

Варианты на рис. 1.2	Трудоемкость на деталь, н/час				Себестоимость, руб.
	Подготовка производства	Изготовление	Испытания	Всего	
Базовый А	130	61	11	202	10100
Оптимальный Б	98	53	11	162	8100
Возможные					
В	143	57	11	211	10550
Г	200	51	11	262	13100
Д	260	46	11	318	15900

Экономический эффект ( $\text{Э}_T$ ) от отработки технологичности изготовления изделия по варианту «Б» и способ, используемой для этого технологии относительно базового варианта (А), укрупнено составит:

$$\text{Э}_T = C_{CA} - C_{CB}.$$

Общий экономический эффект от всех используемых (i) мероприятий для повышения качества продукции после освоения серийного выпуска создаваемых изделий, составит:

$$\mathcal{E}_0 = \sum_1^i \mathcal{E}_\tau. \quad (1.13)$$

Вариантные исследования возможных и создаваемых видов технологических процессов позволяют научно обосновать программы исследований и затраты на повышение качества на стадии разработки и освоения конкурентоспособной продукции машиностроения.

### **Анализ состояния вопроса, формирование цели и задач работы**

1. Выявленные за период использования недостатки и ограничения по применению фотошаблонов на базе эмульсий для выпуска преимущественно деталей из листа требуют перехода на новые виды покрытий шаблонов с повышенной стойкостью, возможностью разделения материалов у деталей большей толщины, быстрой переналадкой, с высокими технико-экономическими показателями деталей высокой точности при малом тираже выпуска, свойственном опытному производству, для обеспечения их точности не ниже, чем после разделения материалов на штампах. Для этого требуется создание и применение новых видов фотоматериалов, технологий их применения в фотошаблонах и в опытном производстве ограниченных партий изделий.

2. Требуются технологические процессы изготовления в опытном производстве деталей для перспективных изделий машиностроения с повышенными эксплуатационными характеристиками и расширенной областью использования при высоких технико-экономических показателях изготовления малых партий многократно изменяемых деталей малого тиража.

3. В доступной литературе практически отсутствует достоверная информация о применении в машиностроении в качестве шаблонов фоторезисторов, освоенных в радиотехнике, где показаны хорошие технико-экономические показатели на операциях, аналогичных разделению. Но в основном из-за высокой стоимости и дефицитности материала такие шаблоны для обработки листовых материалов не изучались и не применялись. В настоящее

время дефицит снижен и требуются технологические исследования обработки с фоторезисторами ограниченных партий прецизионных деталей.

4. Требуются расширенные исследования в области управления траектории перемещения по фотошаблонам вектора магнитного поля для расширения области использования освоенных технологий линейного разделения листовых материалов лучевыми методами и на разделительных штампах, требующих больших затрат на технологическую подготовку производства, имеющих ограничения по форме зоны обработки деталей, доступности проводить обработку вне района доступа луча или профильного инструмента.

5. Практически отсутствуют методы технико-экономических исследований для обоснования области расширенного применения фотошаблонов и выполнения по ним технологических операций с учетом специфики опытного производства, что тормозит запуск перспективных изделий в серийное производство, снижает показатели технологичности и конкурентоспособности, возможности ускоренного импортозамещения продукции, особенно в точном отечественном машиностроении.

Приведенный анализ позволил сформулировать цель и задачи рассматриваемой работы.

## **Глава 2 Технологические методы и пути решения задач для достижения поставленной цели**

### **2.1 Научные гипотезы для проведения исследований**

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 желатины имеют много общего с аналогичными операциями по изготовлению объектов повышенной толщины с различной формой исходной поверхности по другим видам шаблонов, но не всегда обеспечивают удовлетворительные эксплуатационные показатели для таких объектов, однако материал может быть использован для отработки производственной технологичности при назначении других видов фотослоев покрытий и для исследования процессов формирования на них профиля деталей с возможностью управления вектором действия электромагнитного поля.

2. Применяемый в промышленности метод отработки технологичности вновь создаваемых изделий вызывает необходимость поэтапного совершенствования изделия и его составляющих по результатам испытаний малых партий образцов. По результатам анализа результатов должно производиться выполнение оперативных доработок конструкции изделий, в том числе путем изменения геометрии деталей с частичным изменением формы шаблона. 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 на этапах их серийного освоения.

3. Эксплуатационные свойства фотошаблонов на базе эмульсий и резистов связаны с технологическими режимами 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 фотопокровтий, к которым в первую очередь относится их толщина, адгезионные свойства, определяющие стойкость шаблона, и точность получаемой детали. Это приводит к необходимости поиска технологичных покрытий для фотошаблонов, обеспечивающих расширение области эффективного их использования в опытно-производстве.

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 анализе состояния исследований по работе, показали достаточную сходимость теоретических и прикладных результатов. Это позволяет использовать предложенные методики для научного обоснования назначения новых видов покрытий и использования их для изготовления шаблонов и партий прецизионных деталей расширенной номенклатуры по документации опытного производства с наибольшим применением имеющегося отечественного оборудования и собственной быстропереналаживаемой технологической оснасткой, в том числе новых видов фотошаблонов с покрытием резистами, что ускоряет запуск перспективных изделий машиностроения.

## **2.2 Средства технологического оснащения для выполнения работы**

Для экспериментальной обработки плоских образцов применялся оригинальный полуавтомат с адаптивной системой управления, приведенный на

рисунке 2.1, который после модернизации средств управления позволил выполнять разделение листовых материалов по фоторезисторам и групповую прошивку отверстий комбинированными методами по патенту [52]. Конструкция станка защищена патентами и авторскими свидетельствами. [2, 7].

На основании патентного анализа и проработки информационных источников был разработан станок, приведенный на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Станок для изготовления деталей из листа по фотошаблонам и групповой прошивки отверстий малого сечения



Станок на рисунке 2.1 позволяет изготавливать детали из плоских заготовок повышенной толщины и выполнять групповую прошивку отверстий круглого и многогранного профиля с использованием однослойных и многослойных шаблонов.

Рассматриваемая группа деталей, изготавливаемых по фотошаблонам, в том числе фоторезистам, объединяет большое число видов станков, общим признаком которых является отсутствие перемещения электродов в процессе обработки. Взаимные перемещения агрегатов, как правило, выполняют в процессе наладки оборудования по настройке положения электродов при приведении их в рабочее положение, обеспечивающем поддержание заданного межэлектродного зазора. Вид операций определяет конструкцию электродов, шаблонов и режимы работы.

Технические характеристики станка:

Габариты обрабатываемых деталей, мм	От 10x10x10 до 100x100x100
Давление в сети сжатого воздуха, МПа (кг/см <sup>2</sup> )	От 0,4 (4,0) до 0,6 (6,0)
Регулируемое выходное напряжение холостого хода, коммутируемое источником питания, В	6, 9, 12, 15, 18
Технологический ток, А	Не более 600
Давление электролита, МПа	Не более 0,3
Точность углового позиционирования, мин.	±5
Габаритные размеры (ширина, длина, высота), мм	Не более
1) станка	700x700x1800
2) источника питания	650x500x1050
3) гидроагрегата	1000x1800x1385
Масса, кг	Не более
1) станка	300
2) источника питания	250
3) гидроагрегата	250
Потребляемая мощность (макс), кВт	12

Время подготовки к выходу на рабочий режим, мин	Не более 15
Продолжительность непрерывной работы, в часах	Не более 8
Максимальное время отработки позиционирования, сек	Не более 5
Точность изготовления деталей толщиной, мм	От 0,05 до 0,15 мм
По 11 качеству	
По 12 качеству	От 0,15 до 0,3 мм
По 14 качеству	От 0,4 до 0,8 мм

В станке предусмотрен микропроцессор, который позволяет автоматизировать стабильное управление для получения по фотошаблонам прецизионных деталей из листа указанной толщины, групп отверстий различного сечения и кривизной оси, пазов с заданным шагом и глубиной обработки. Программа управления хранится в постоянно запоминающем устройстве (ПЗУ), но при необходимости ее можно корректировать.

Программа позволяет назначать и использовать контроль за установкой фотошаблонов и режимами комбинированной обработки управления процессом изготовления деталей по созданному алгоритму в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах.

В процессе проведения экспериментов в основном использовался ручной режим, а средства автоматизации процесса обеспечивают повторяемость технологических режимов для всей партии выпускаемых деталей.

Подобные станки выпускались малыми сериями и в них, кроме настроечных режимов работы, успешно используются полуавтоматические и автоматические варианты с управлением от микропроцессорной системы управления. По этим командам могут выполняться перемещения стола по осям x и y на заданный размер и с различной скоростью, включение электрода-инструмента, подача напряжения и электролита. Скорость перемещения стола можно варьировать. Процесс разделения по фотошаблонам и обработка с

углублением профиля или отверстия регулируется автоматически по командам, заданным с пульта управления.

Для изготовления по фотошаблонам сложных профилей в форме углублений применялись модернизированные станки, типа приведенных на рисунке 2.2.

На рисунке 2.2 показан станок Form 20 фирмы Adie Char millers, модернизированный под комбинированную групповую прошивку отверстий.



Рисунок 2.2 – Электроэрозионнохимический станок Form 20 фирмы Adie Char millers с управлением вектором действия электромагнитного поля

Станок (рисунок 2.2) позволяет обрабатывать технологические режимы для прошивки по фотошаблонам отверстий различного профиля и сечения.

В работе использовалась установка с 3D принтером для изготовления одноразовых диэлектрических плоских шаблонов с готовой геометрией детали, которую ранее получали по фотошаблонам с последующим проявлением и закреплением защитного слоя по контуру детали.



Рисунок 2.3 – Промышленный 3D принтер Fortus 450 mc

На рисунке 2.3 приведен современный промышленный 3D принтер модели Fortus 450 mc фирмы «Stratasys». Он позволяет по аддитивным технологиям на плоских шаблонах создавать покрытия с использованием модели-прототипа

изделия или макетного образца или по компьютерной трёхмерной модели деталей выполнять конструкции новых изделий.

3D принтер может использоваться для осаждения расплавленной нити термопластичного материала-пластика, который через фильеры в печатающей головке подается на подложку (на вакуумном столе), пошагово перемещающуюся вниз на высоту сформированного слоя по технологии «моделирования методом послойного наплавления» или «Fused Deposition Modeling» или «FDM»).

При печати моделей из инженерного пластика одновременно используется два типа материала: основной материал и материал поддержки. Расходный материал в виде нити поставляется в катушках с намотанной на них нитью материала. Нить материала подаётся в печатающую головку 3D принтера приводами, расположенными в зоне захвата из катушки и в зоне печатающей головки; затем, продавливается через модуль фильер. В печатающей головке расположены два модуля фильер: – один для основного материала, второй для материала поддержки. Модуль фильер обеспечивает заданную толщину печатаемого слоя. До момента поступления расходного материала в печатающую головку, происходит процесс удаления влаги из нити материала за счёт применения отдельного модуля вакуумной сушки пластика.

Основные технические характеристики:

Объем создаваемой модели (мм)	не менее - 406x355x406
Параметры электропитания	230 В, 50/60 Гц, 3 фазы, 16А
Нагрев (К) фильер для экструзии пластика	до 570
Рабочая температура (К) в камере	до 340
Тип подложки:	лист акриловой основы
Принцип крепления подложки:	вакуумным всасыванием от компрессора
Габариты установки	1270x902x1943мм
Масса (кг) установки:	601
Основной материал	ABS – M30 (АБС пластик) фирмы «Stratasys» (производство Израиль),

Материал поддержки модели	SR-30 (растворимая поддержка для ABS-M30) фирмы «Stratasys» (производство Израиль).
Точность построения модели: – для моделей с габаритами менее 127 мм	±0.127
– или для моделей с габаритами менее 127 мм на каждый мм детали	±0.0015 мм

Принтер имеет программное обеспечение:

- 1) Программное обеспечение – Insight;
- 2) Поддерживаемые форматы файлов – STL;
- 3) Интерфейс подключения - Ethernet TCP/IP;
- 4) Совместимые ОС -Windows XP, Windows Vista, Windows.

### 2.3 Особенности изготовления фоторезистов

Преимущества и недостатки фоторезистов рассмотрены в главе 1.

Для их изготовления в [2, 7, 29] предлагается использовать различные методы нанесения покрытий для получения деталей, преимущественно в радиопромышленности: полив, окувание, центрифугирование, струйный метод подачи форсунками. Два первых метода хорошо освоены для шаблонов на базе эмульсии, просты в использовании, не требуют больших затрат, но им свойственны все недостатки, приведенные в разделе 1.2 для фотошаблонов с покрытием эмульсией. Для фоторезистов, после углубленных исследований технологии применения фоторезистов, при обработке деталей удастся достичь значительно более высоких эксплуатационных результатов. Применение центробежных устройств и форсунок раскрывает возможность получения расширенной номенклатуры деталей, но ограничено требованиями по геометрии зоны обработки, увеличению толщины листа в заготовке при сквозной прошивке, трудоемкости операции и подготовке средств технологического оснащения (СТО). Тем не менее, испытания фоторезистов после их нанесения центробежным методом необходимы для оценки пределов адгезионной

прочности покрытия. На рисунке 2.4 показана механическая часть экспериментальной установки для центробежного нанесения фоторезисторных покрытий, учитывающей новизну изобретений [2, 7]. Для уменьшения влияния вибраций и радиальных биений частоту вращения образцов смещают относительно их частоты.

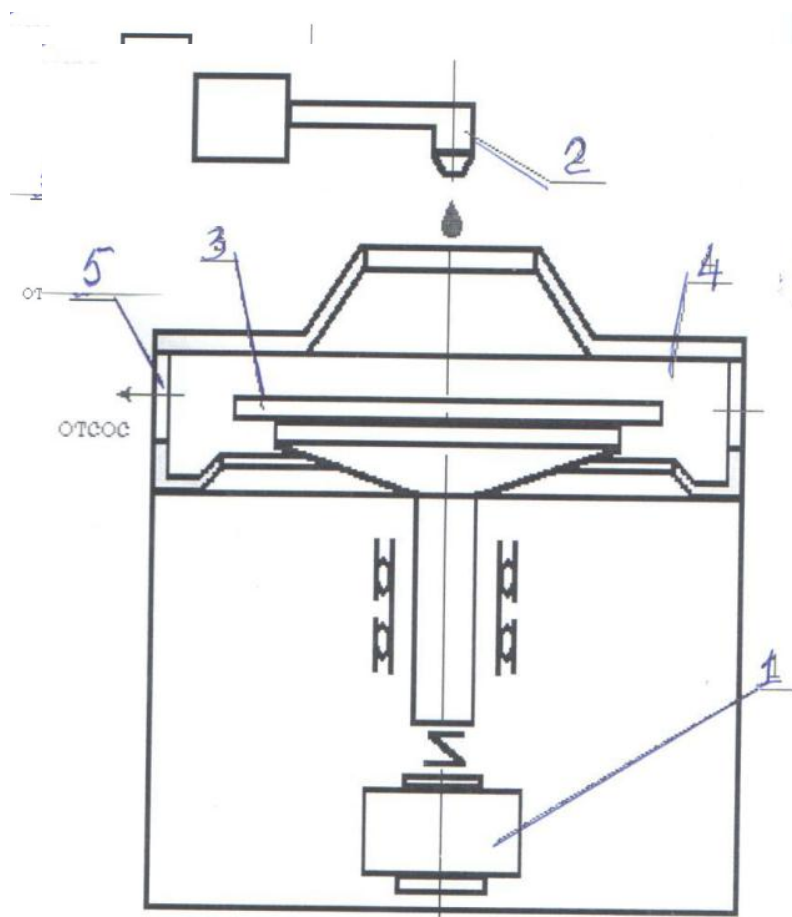


Рисунок 2.4 – Схема механической части установки для центробежного нанесения фоторезистов

В установке на рисунке 2.4 нанесение фоторезистов типа марок ФП-383 и ФП-4-04 производилось на опытные осесимметричные плоские образцы 3, установленные в защитном корпусе 5 на вращающемся от электропривода 1 в вакуумируемой полости 4. Вытяжная вентиляция представляет из себя часть регулируемой системы 2 подачи фоторезиста, позволяющей настраивать технологические режимы и силы, воздействующие на наносимый слой.

## 2.4 Научная база для решения поставленных задач

Приведенная на рисунке 2.4 установка выполнена на базе изобретения [47] «Устройство для нанесения покрытий на пластины», где для нанесения слоя фоторезиста центрифугированием на круглые полупроводниковые пластины устанавливаются с зазором между вращающимся столом и установленной на ней пластиной (образцом на рисунке 2.4). Устройство содержит слоеформирующую пластину с механизмом вертикального перемещения в период формирования покрытия повышенного качества. Пластина имеет кольцевые полости и центральное отверстие для сообщения полостей. Для устранения возможности попадания на наносимый слой загрязнений над наружной поверхностью слоеформирующей пластины установлена крышка, герметизированная относительно полости.

Развитием устройства в [47] является патент [50] «Устройство для нанесения покрытий на пластины», в котором для повышения качества за счет управления расходом материала покрытия фоторезистов при их нанесении на пластины и некоторые виды фотошаблонов. Здесь для дозированной подачи фоторезиста используют выдвижное сопло, размещенное в защитном кожухе. Образующаяся в кожухе герметичная полость устраняет возможность доступа из окружающей среды загрязненного воздуха к наносимому слою фоторезиста, что снижает брак изделий. Для этого отток воздуха из герметичной полости производится регулируемым отсосом без подсоса среды, что сохраняет чистоту слоя в течение всего времени его нанесения. В патенте [50] указывается на возможность таким способом выравнивания толщины слоя фоторезиста, что также может быть бракующим признаком операции при изготовлении шаблонов. Регулирование расхода материала фоторезиста выполняется давлением подаваемого через форсунку очищенного воздуха и поддержанием повышенного давления внутри герметичной полости.

Закрепление слоя фоторезиста аналогично процессам, изученным в [79], и выполняется на режимах, защищенных патентом [49] «Способ получения



покрытия из фоторезиста и устройство для его осуществления». Способ отличается тем, что он осуществляется в несколько этапов при нанесении слоя на подложку, размещенную на пневмовихревой воздушной прослойке. Толщина слоя покрытия регулируется за счет сброса излишков фоторезиста отсосом и центробежными силами, а его закрепление осуществляется подогревом и охлаждением воздуха, подаваемого на покрытие, регулируется нагревательным элементом внутри камеры по сигналам датчика температуры на центрифуге.

Как показано в [82], легкопассивирующиеся сплавы имеют окисные пленки, которые могут изменять свою величину. К этой же группе сплавов следует отнести детали с диэлектрическими и металлическими защитными покрытиями, например, кадмием, цинком, хромом, никелем, медью. Большинство из них легко обрабатываются комбинированными методами с анодной составляющей процесса, например, при разделении листа или прошивке материала, но обработка кадмиевых покрытий, например, по аддитивным технологиям с нанесением слоев, вызывает большие сложности. Здесь может быть применено изобретение (а.с. № 341628), по которому процесс ведут в растворе молибденово-кислого аммония при свойственной аддитивным технологиям обратной полярности тока. Экспериментальная проверка этого изобретения показала, что процесс осуществим, но границы знака получаются, в основном, нечеткими. Это указывает на нарушение критериев, предложенных нами для размерной обработки.

Протекание процесса можно описать следующим образом: при обратной полярности на поверхности покрытия происходит осаждение продуктов реакции в местах, противоположащих выступам или рабочим участкам инструмента, что не вызывает технологических сложностей, поэтому указанный способ следует считать перспективным для точного машиностроения при использовании в опытном производстве.

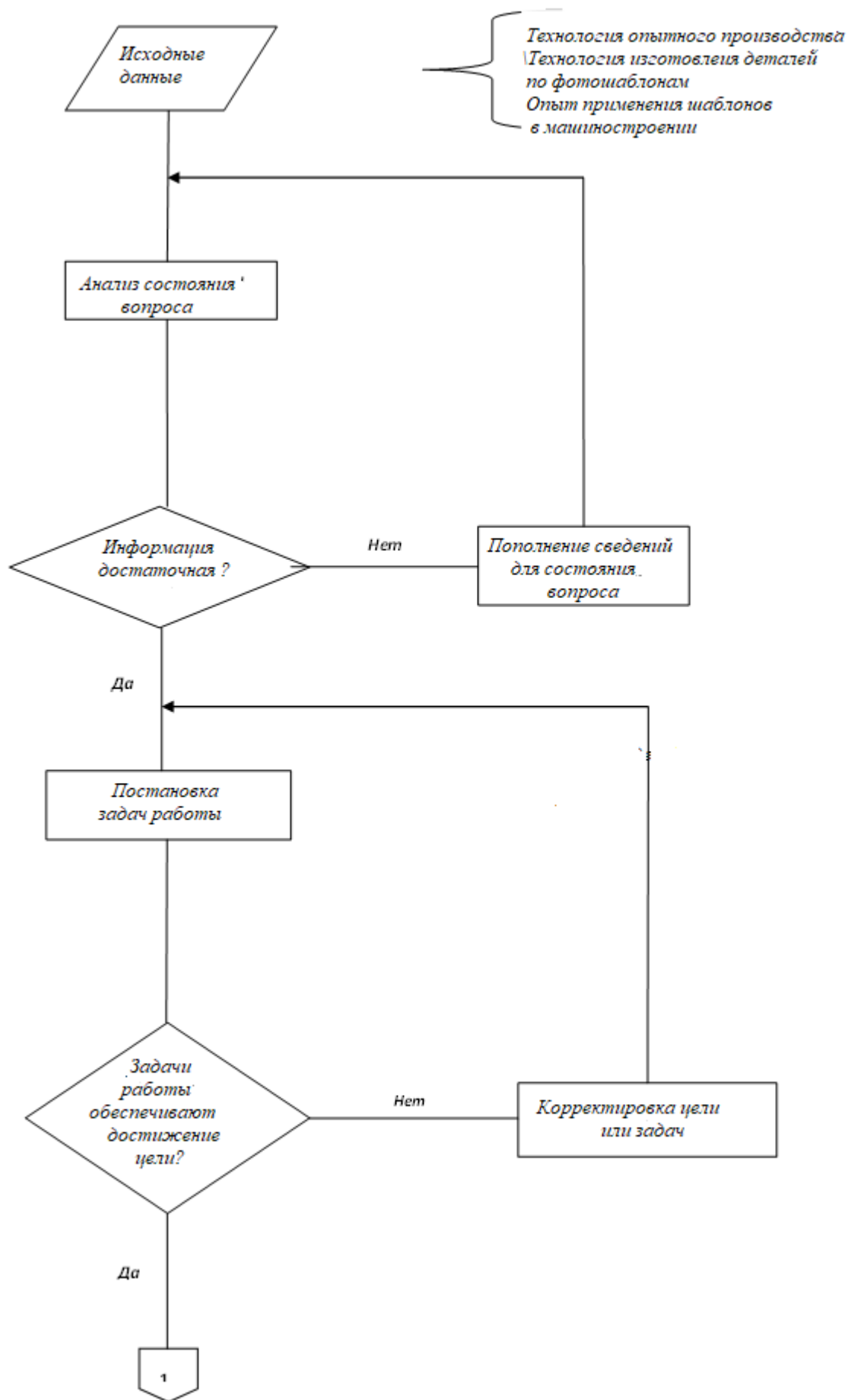
## **2.5 Последовательность выполнения исследований для достижения поставленной цели**

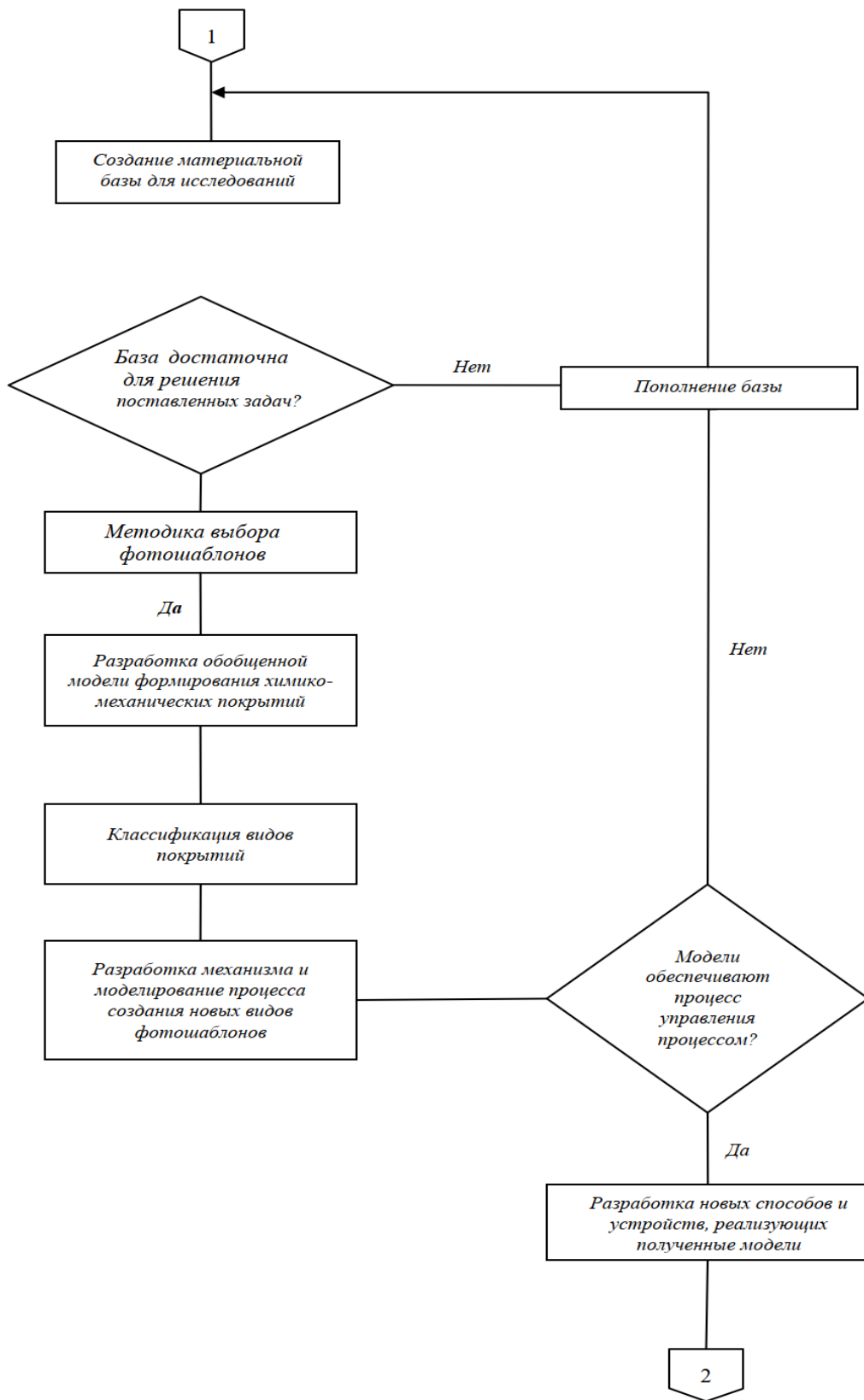
Поставленные задачи решались в последовательности согласно алгоритму на рисунке 2.5, что позволило получать на фотошаблонах качественные покрытия на базе резисторов и сделать экономически обоснованной изготовление в опытном производстве ограниченных партий деталей высокой точности, имеющих повышенную глубину зоны обработки. Предложенный алгоритм (рисунок 2.5) позволил ускорить поиск и систематизацию исходной информации, создать новые способы ускоренного изготовления партий деталей в опытном производстве с использованием фотошаблонов на базе фоторезистов, разработать модель и механизм протекания процесса при изготовлении прецизионных деталей из металлического листа, создать научные основы для разработки универсальной ресурсосберегающей технологии ускоренного изготовления по фотошаблонам с новым составом покрытия. Последовательность проведения исследований по алгоритму на рисунке 2.5 включает:

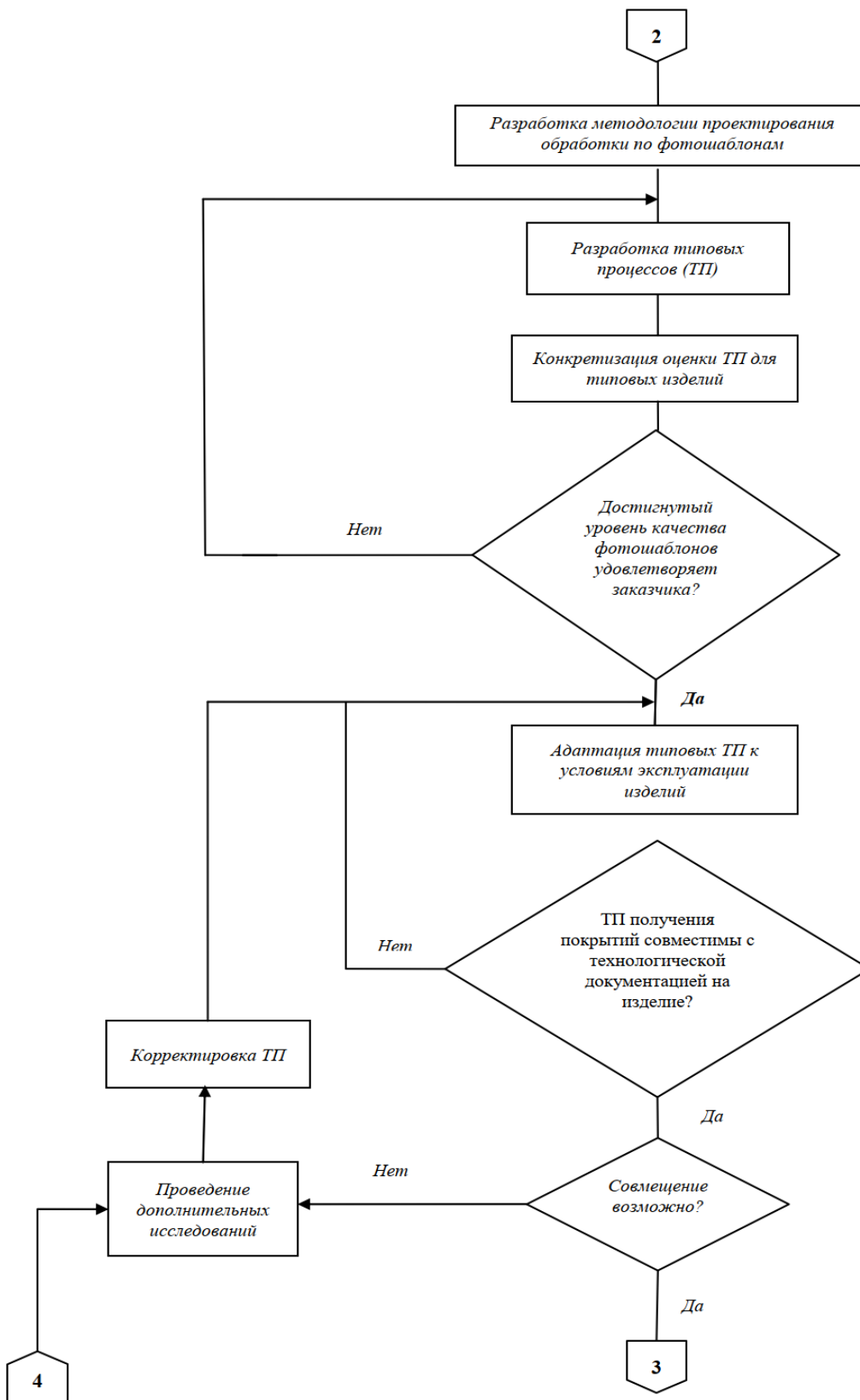
- анализ рационального применения опыта использования известных технологических процессов опытного производства, литературных источников о состоянии исследований в области создания высокоресурсных покрытий для фотошаблонов и перспективы их применения в создаваемых изделиях на стадии отработки технологичности;

- формирование задач, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели. Здесь учитываются возможности известных технологических процессов, требования заказчиков и разработчиков новой техники;

- научное обоснование использования новых видов быстропереналаживаемых шаблонов с расширенными технологическими возможностями для их использования в опытном производстве;







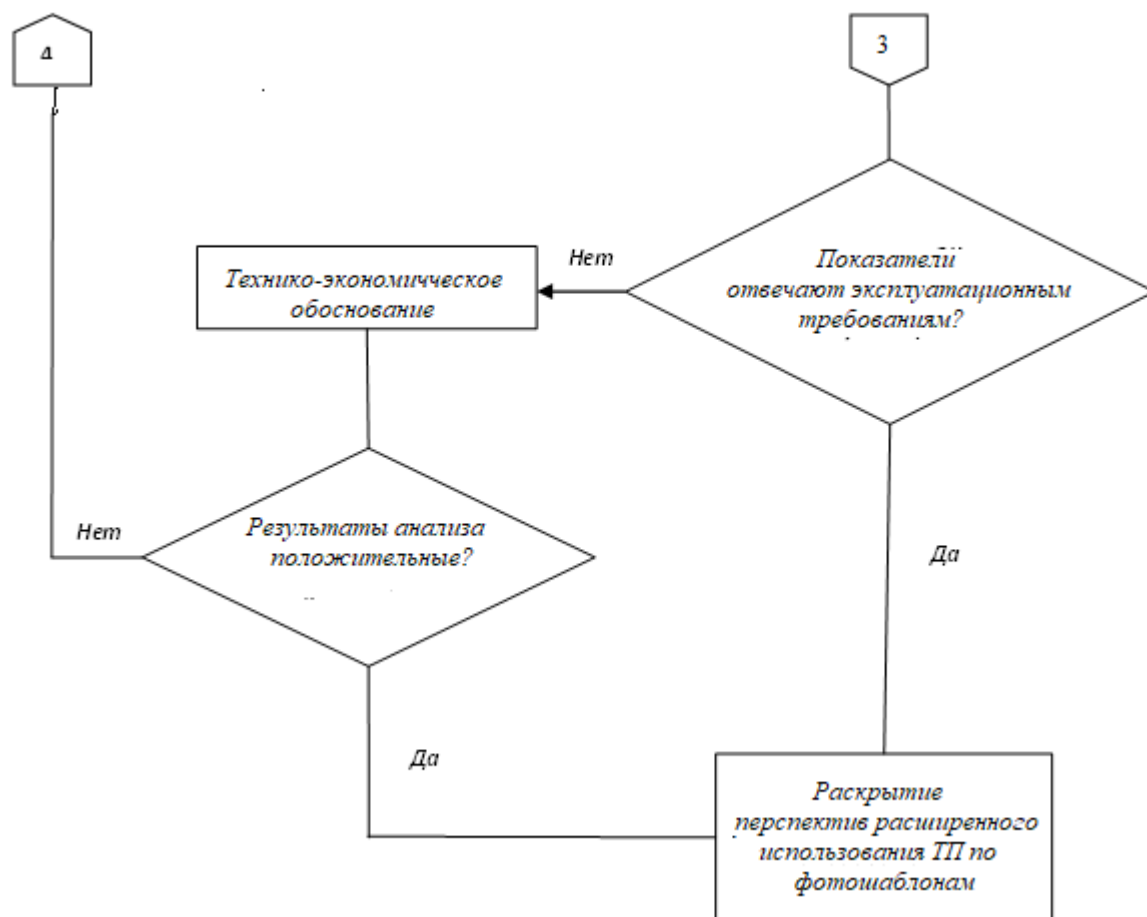


Рисунок 2.5 – Алгоритм выполнения исследований для достижения поставленной цели

- моделирование процесса нанесения фоторезистов на шаблоны, обеспечивающие получение прецизионных деталей при отработке технологичности изделий на всех этапах их совершенствования при запуске в производство перспективных изделий;

- описание механизма и создание алгоритма для проектирования технологических процессов получения в опытном производстве по фотошаблонам комбинированными методами партий деталей с усовершенствуемой геометрией для типовых изделий авиакосмической отрасли и других отраслей машиностроения;

- разработка новых способов и устройств, на базе которых возможна разработка технологических процессов, расширяющих область использования изделий перспективной техники;

– создание системы проектирования технологических процессов изготовления прецизионных деталей по фотошаблонам на базе фоторезистов с использованием преимуществ и особенностей опытного производства;

– обоснование путей расширения области использования технологий изготовления ограниченных партий точных деталей из листа для оснащения создаваемых изделий отечественного машиностроения.

### **Выводы по главе**

1. Разработан алгоритм, определяющий последовательность проведения научных исследований для решения задач и достижения поставленной цели.

2. Разработаны или выбраны средства технологического оснащения при создании необходимой технической базы для экспериментальных исследований.

3. Показаны пути создания методологии проектирования и изготовления фотошаблонов, предложены новые способы повышения качества изготовленных по фотошаблонам деталей в опытном производстве.

## **Глава 3 Моделирование процесса изготовления по фотошаблону прецизионных деталей ограниченного тиража**

### **3.1 Специфика протекания процесса нанесения резиста на фотошаблон**

С учетом научных гипотез, сведений о фоторезистах (раздел 2.3) можно сформулировать физическую модель, определяющую возможность назначения и расчета технологических режимов электрохимической и комбинированной обработки по быстропереналаживаемым шаблонам партий высокоточных деталей. На базе физической модели создается математическое описание процесса для определения параметров фотошаблона и режимов обработки деталей.

В разделе 2.3 приведено обоснование выбора схемы подачи фоторезиста в зависимости от формы и вида шаблона, технологичности конструкции изделия. Это определяет технологические возможности, режимы обработки деталей по шаблонам, допущения, принятые при моделировании процесса создания фотошаблонов и изготовления по ним деталей. Учитывая доступность подачи фоторезиста в зону его нанесения, чаще для этих целей используют полив, окунание, где силы, определяющие адгезию, толщину и другие свойства фотопокртия, зависят не от давления центробежного действия или свойств струи на срезе форсунки для подаваемой жидкости, а от вязкости, текучести среды, положения шаблона, гравитационных сил, вектора их действия, времени нанесения покрытия, рассчитываемого по зависимостям, разработанным в математическом описании процесса. Это определяет допущения, необходимые для описания механизма течения фоторезиста на шаблон. Гравитационные силы значительно меньше по сравнению с внешним давлением струи, поэтому время нанесения покрытия заметно сокращается до полной остановки перетекания. Интенсификация этого процесса путем воздействия вибрации (включая ультразвуковые колебания) шаблона, других мероприятий улучшает его



эксплуатационные свойства в диапазоне, ограниченном условиями изготовления шаблона.

С учетом специфики механизма обработки деталей по фотошаблонам рассмотрена физическая модель, описывающая закономерности протекания дискретного процесса электрохимического формообразования углублений с произвольной формой, в том числе, с переменным положением оси. Это изменяет не только угол поворота вектора поля, но и направления течения потока электролита, определяющего интенсивность массовыноса продуктов обработки. От этого зависит выбор режимов процесса, технологические показатели, геометрия и точность зоны разделения поверхностей.

Резкий поворот потока, протекающего в межэлектродном зазоре по [35] возможен до 35 градусов. Последующее увеличение угла поворота вызывает отрыв потока в месте установки токопроводящего шаблона со стороны заготовки при наложении на него положительного полюса тока, ухудшение массовыноса. Тогда плотность тока по глубине обработки и на выходе отверстия из заготовки при значительной толщине материала становится ниже предельной величины, необходимой для стабильного анодного растворения материала заготовки. Возникает неуправляемый боковой съём в форме поднутрения, вызывающий нестабильный поворот поверхности детали в зоне ее обработки.

Опыт применения фоторезистов в радиоэлектронике [29, 49, 50] и исследования, выполненные в рассматриваемой работе, подтверждают возможности применения фоторезистов для покрытия фотошаблонов при изготовлении деталей с открытой и закрытой для доступа в зону обработки профильного инструмента.

### **3.2 Моделирование процесса формирования по фотошаблонам границ точных профилей на деталях**

Как показано в разделе 1.2 одноразовые и особенно многократные фотошаблоны могут размещаться при обработке на поверхности, как

инструмента, так и детали. Общим признаком для описания процесса является использование при обработке по шаблонам нестационарного режима удаления припуска между электродами из-за возрастания межэлектродного зазора при неподвижных или поэтапно изменяющих взаимное положение электродах.

Расположение электродов при обратной полярности (инструмент-анод) может вызвать анодное растворение активных участков инструмента и нарушение границ между активной и пассивной зонами. Поэтому требуется защита диэлектрических покрытий от разрушений при интенсивном газообразовании под ними на месте стыковки с основой инструмента. Такие функции выполняет диэлектрический фотошаблон. Для повышения точности контура детали относительно шаблона его в большинстве случаев наносят или накладывают на деталь (анод), но известны варианты (например, при использовании аддитивных технологий), где используют обратную полярность. Схема размещения фотошаблона приведена на рисунке 3.1 [82].

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 рисунке 3.1, сводится к нахождению законов изменения границы электролизера от времени обработки в электрическом поле с переменными взаимосвязанными параметрами.

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 тока, управляемого по шаблонам при растворении припуска по схеме с нестационарным режимом при неподвижных или дискретно перемещаемых электродах (рисунок 3.1).

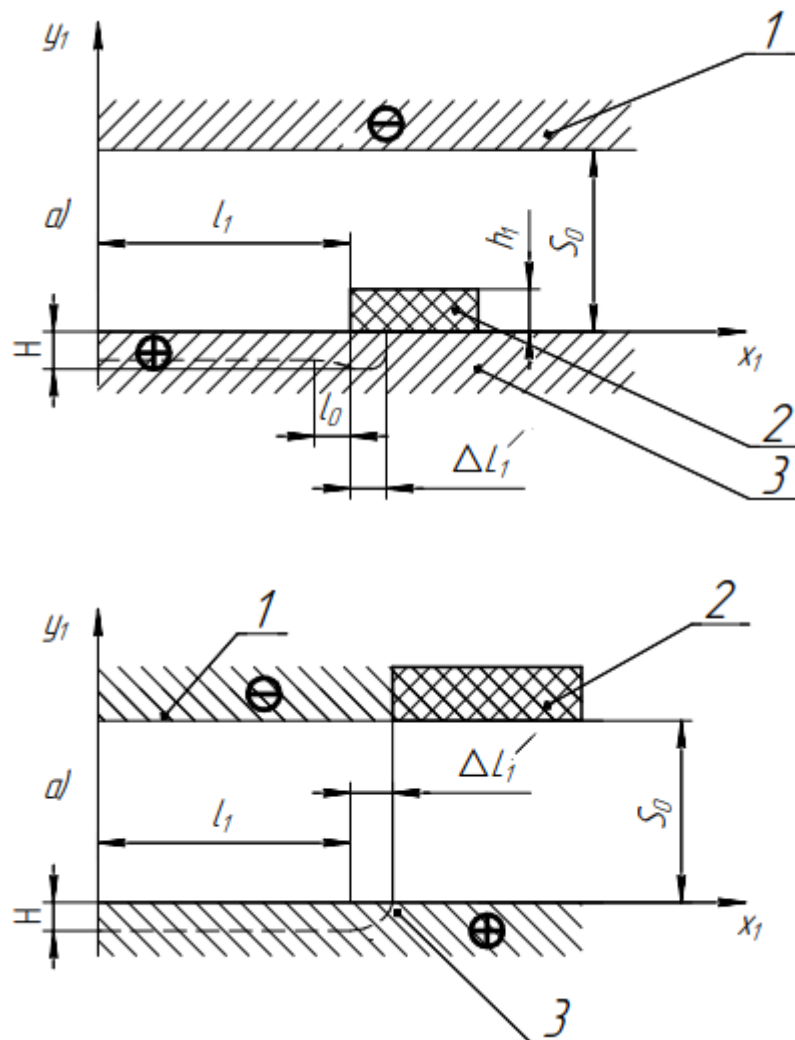


Рисунок 3.1 – Схема нестационарного процесса обработки при расположении однослойного фотошаблона на аноде (а) и катоде (б): 1 – катод-инструмент; 2 – диэлектрическое покрытие фотошаблона; 3 – анод-деталь;  $h_1$  – толщина диэлектрического покрытия;  $\Delta L_1'$  – подтравливание под фотошаблон;  $l_1$  – 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

В качестве управляющей системы размерной обработки используют однослойные (рисунок 3.1) 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 (рисунок 3.2).

Граничными условиями модели для схемы на рисунке 3.1 являются:

- при односторонней схеме разделения по фотошаблону с покрытием резистом: 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 фотошаблонам 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 [82, 83] по схеме на рисунке 3.1 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 ( $\eta$ ), электрохимический эквивалент ( $\alpha$ ) и плотность ( $\gamma$ ) обрабатываемого металла, электропроводность ( $\chi$ ) жидкой среды в зазоре, напряжение на электродах ( $U$ ), потери напряжения ( $\Delta U$ ) время ( $\tau$ ) протекания процесса:

$$H = \sqrt{S_0^2 + 2 \frac{\eta \alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U) \tau} - S_0. \quad (3.1)$$

В (3.1) 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 (3.1) 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 (3.1). Так выход по току в рабочем диапазоне режимов практически не зависит от напряжения на электродах (при изменении его в рекомендуемом [83] 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, приведенными в [83]:

$$\eta = K_1[1 + K_2(T - T_0)]S, \quad (3,2)$$

где  $K_1$  – размерный коэффициент (1/мм), учитывающий рабочую среду, ее температуру ( $T$ ), состояние электромагнитного поля в зазоре. По [82, 83] 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:

$$S = S_0 + H_{\text{заг}}, \dots \dots \dots (3.3)$$

где  $H_{\text{заг}}$  – толщина листа при его разделении;

$K_2$  – размерный коэффициент ( $1/^\circ\text{C}$ ), учитывающий воздействие температурной среды в зазоре. В диапазоне  $288\text{K} < T < 310\text{K}$  при обработке конструкционных материалов [82] величина  $K_2 = (4-4,5) \cdot 10^{-3}$  (кроме случаев формообразования углублений в сложных электролитах, принятых для титановых и алюминиевых сплавов [83]). Учитывая, что при прокатке жидкой рабочей среды имеет место узкий диапазон изменения ее температуры (и, соответственно, влияния температуры на выход по току ( $\eta$ ), зависимость (3.2) можно использовать для расчета режимов разделения листа в упрощенном виде по конечному результату в конце обработки по глубине:

$$\eta = KS, \quad (3.3)$$

где  $S = S_0 + H_{\text{заг}}, \quad (3.4)$

$K$  – размерный коэффициент ( $1/\text{мм}$ ), учитывающий условия обработки [82]. Для хлорида натрия, нитрата натрия –  $K = 0,05-0,052$ .

Электропроводность рабочей среды в (3.1)

$$\chi = K_3 S [1 + \beta(T - T_0)], \quad (3.5)$$

где  $K_3$  – размерный коэффициент ( $1/\text{ом} \cdot \text{мм}^2$ ), учитывающий условия обработки [82], для хлорида натрия, нитрата натрия –  $K_3 = 0,05-0,052$ ;

$\beta$  – температурный коэффициент ( $1/^\circ\text{C}$ ). В случае обработки деталей по фотошаблонам условия протекания процесса позволяют считать температурный коэффициент постоянным ( $\beta \approx 0,0225$ );

$T$  – температура в процессе обработки;

$T_0$  – начальная температура.

Потери напряжения в (3.1):

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3, \quad (3.6)$$

где  $\Delta U_1$  – 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;

$\Delta U_2$  – 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.

$\Delta U_3$  – потери напряжения в зоне протекания процесса анодного растворения:

$$\Delta U_3 = \Delta U_0(1 + K_4 S), \quad (3.7)$$

где  $\Delta U_0$  – 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  $\Delta U_0 = (1,7 - 1,8) \text{ В}$ ,

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

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

$$K_4 = 0,12-15.$$

На изменение условий массовыноса при обработке по фотошаблонам влияет назначение скорости  $V$  прокачки жидкости через межэлектродный зазор. Это влияние незначительно, его доля по [82] составляет  $K_5 = (1-1,5) \cdot 10^{-3}$  и проявляется вблизи нижней границы скорости ( $V_0$ ), необходимой для снятия диффузионного ограничения при выносе из зазора продуктов обработки. В расчетах принимают  $V_0 = 6-7 \text{ м/с}$ . После  $V_0 = 9-10 \text{ м/с}$  влияние скорости можно не учитывать до значения, соответствующего началу развития кавитационных явлений. В зависимости от размера зазора и его геометрии для обеспечения стабильного значения средней скорости протекания электролита,

обеспечивающей однородное течение. Она не может превышать 25-30 м/с. Поэтому в большинстве случаев для расчета технологических режимов при обработке по фотошаблонам скорость назначают по расходу рабочей среды через зазор.

Из (3.1) можно установить длительность процесса обработки по однослойному фотошаблону или многослойным шаблонам для рассматриваемых операций. Расчетное значение времени обработки  $\tau_{1-1}$  при одностороннем шаблоне:

$$\tau_{1-1} = \frac{H_{\text{заг}}^2 - S_0^2}{2 \frac{\eta \alpha}{\gamma} \chi(U - \Delta U)} \quad (3.8)$$

При двухстороннем расположении фотошаблонов:

$$\tau_{1-2} = \frac{H_{\text{заг}}^2 - S_0^2}{4 \frac{\eta \alpha}{\gamma} \chi(U - \Delta U)} \quad (3.9)$$

Расчет времени обработки по (3.8) или (3.9) позволяет снизить погрешность по глубине паза и по профилю контура относительно шаблона, в частности за счет стабилизации поднутрения (рисунок 3.1). Нерасчетное снижение этих показателей приводит к браку деталей, а завышение вызывает повышенное неконтролируемое отклонение размеров детали, что может стать браковочным признаком.

С учетом представленных зависимостей из основного уравнения электрохимической размерной обработки по [83] находят закон изменения межэлектродного зазора, определяющий скорость удаления припуска, плотность тока в зоне обработки. Эти факторы позволяют прогнозировать производительность и время протекания процесса, точность детали, качество поверхности в месте ее обработки, стойкость шаблона, рассчитать его профиль с учетом поднутрения границы анодного растворения. Для случая обработки по фотошаблону численным методом для любого момента времени можно установить величину зазоров, а, следовательно, границу обработки.



Граничным условием при решении уравнения (3.1) 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 по [83] может составлять 5-10 А/см<sup>2</sup>.

В силу ограничений по глубине обработки или толщины заготовки при разделении материала, если принять по [82] линейный закон изменения плотности тока, то рабочий диапазон периода обработки можно ограничить изменением  $J_p$ :

$$J_p = \frac{1}{2}j_0, \quad (3.10)$$

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  $\tau$  в нестационарном режиме, требуемое для отработки производственной технологичности при обосновании применения обработки деталей по фотошаблонам на глубину активного анодного удаления припуска оценивается по (3.11):

$$\tau_p = \frac{(S^2 - S_0^2)\gamma}{4S_0\mu\alpha j_p}. \quad (3.11)$$

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.

### **3.3 Управление электрическим полем с переменным вектором воздействия**

Для исследования 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 по (3.8) не ниже значения, обеспечивающего размерный съем 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 рассмотрении физической модели изготовления деталей по шаблонам установлено, что за счет локального изменения интенсивности поля возможно плавно повернуть поток электролита и изогнуть поверхности разъема в детали на угол до  $35^\circ$ . Дальнейшее увеличение угла поворота не осуществимо, так как в месте установки токопроводящего шаблона со стороны заготовки при наложении на него положительного полюса тока его плотность на выходе отверстия из заготовки при значительной толщине материала становится ниже предельной величины, необходимой для анодного растворения материала заготовки, то есть боковой съем, обеспечивающий поворот оси отверстия, прекращается. Процесс формирования криволинейных отверстий зависит от гидродинамики потока, так как на скорость массовыноса в углублениях влияет давление жидкости на входе в

зону обработки. Долговечность, износ и работоспособность фотошаблона определяется величиной силы от воздействия электролита, воздействующей на него со стороны заготовки, поэтому требуется определить минимальное давление, достаточное для массовыноса продуктов обработки, но не вызывающее отрыва фотошаблона от обрабатываемой поверхности.

В физической модели требуется учитывать особенности электрических, гидравлических процессов и механические свойства шаблонов (жесткость, прочность, адгезию и др.), что приведено в [24, 25, 26].

На базе физической модели разработана математическая модель. Расчетная схема процесса приведена на рисунке 3.2.

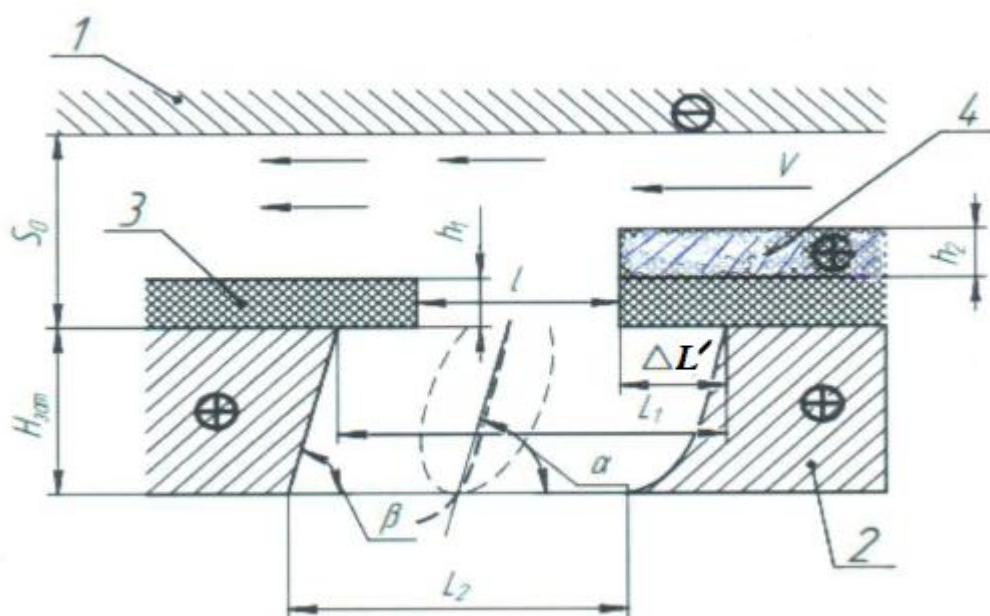


Рисунок 3.2 – Схема образования криволинейного канала

$S_0$  – расстояние (начальный зазор) 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;  $\alpha$  – угол наклона вектора действия поля к поверхности детали;  $\beta$  – 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  $\alpha$  поворота вектора действия поля (обозначения см. на рисунке 3.2):

$$\alpha = \text{arcctg} \frac{L_1 - L_2 + \frac{H}{\text{tg}\beta}}{2H}. \quad (3.12)$$

Величина  $L_1$  зависит от зазора, толщины и положения шаблонов, поднутрения ( $\Delta L'_1$ ), то есть 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 рисунке 3.2):

$$L_1 = S_0 + \Delta L'_1 + L''_1, \quad (3.13)$$

где  $\Delta L'_1$  - поднутрение со стороны размещения нетокопроводящего шаблона (3 на рисунке 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 [82, 83 и др.]. 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  $J = 10-15 \text{ А/см}^2$  и используя метод отображения зоны обработки на область межэлектродного зазора, можно с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца [82] установить величину поднутрения  $\Delta L'_1$ , определяющего смещение контура детали относительно фотошаблона:

$$\Delta L_1 = \frac{2}{\pi\gamma} \int_0^1 \frac{(1-\gamma-\tau^2)d\tau}{\sqrt{1-\gamma} (1-\tau^2)(2-\tau^2)^{3/2}}, \quad (3.14)$$

где  $\tau$  – безразмерная величина, характеризующая длительность растворения припуска, как отношение длительности процесса от начала обработки к времени выполнения операции;

$\gamma$  – 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 шаблона с заготовкой ( $\Gamma$ )

$$j = \frac{j_A}{j_\Gamma}. \quad (3.15)$$

### **3.4 Экспериментальное подтверждение закономерностей для управления электрическим полем через фотошаблоны**

Экспериментальное подтверждение установленных закономерностей для управления вектором действия электрического поля через фотошаблоны, обеспечивающим получение каналов с поворотом их оси, приведено в расчетной зависимости (3.12) для механизма, показанного на рисунке 3.2 (например, для охлаждающих систем ракетных двигателей) для случая прохода жидкого топлива через просвет шириной 2 мм при толщине листа заготовки 1 мм. Здесь ширина канала в детали со стороны шаблона  $L_1$  достигает 0,5 мм, угол  $\beta$  составляет около  $87^\circ$ . Тогда по зависимости (3.12) предельный угол наклона вектора действия поля к поверхности детали  $\alpha$ , 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

$\Delta L'_1$  (см. рисунок 3.1) и установить с минимальной погрешностью отклонения для получаемой прецизионной детали.

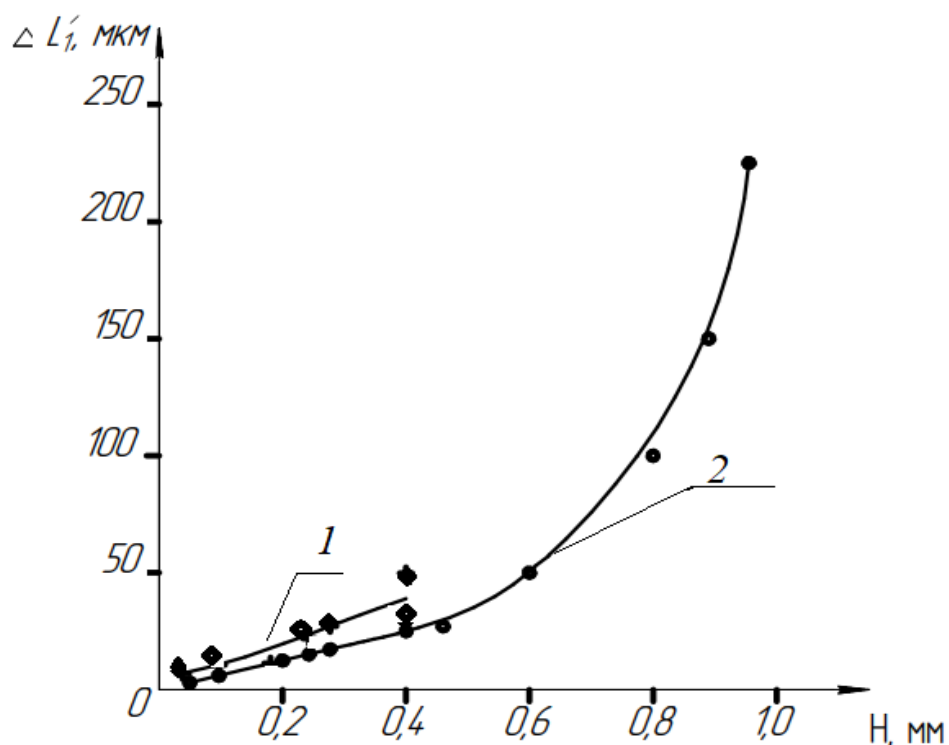


Рисунок 3.3 – Изменение поднутрения под фотошаблоном по глубине обработки, полученные расчетами по (3.18)

Покрывание на шаблоне: ◆ фотоэмульсия; ● - фоторезист.

- ◆ обобщенные экспериментальные значения для шаблонов с покрытием фотоэмульсией;
- – аналогичные точки для покрытия фоторезистом

Условия для расчетов и проведения экспериментов: обработка по односторонним фотошаблонам; напряжение на электродах 10-12В;  $S_0 = 0,15$  мм; электролит – 10% раствор NaCl; материал детали 12X18H10T. Обработка экспериментов выполнялась методом наименьших квадратов.

В результате проведенных исследований установлено:

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

– 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 позволяют использовать эмульсии, позволяющие получать углубления на участках деталей труднодоступные для инструмента.

Технологические возможности обработки деталей по фотошаблонам зависят от глубины обработки профиля под шаблоном и определяют предельные значения толщины листа при его разделении, что было обосновано в (3.11).

Зависимость глубины обработки по фотошаблонам от режимов комбинированного процесса с анодным растворением материала (динамика процесса приведена на рисунке 3.4).

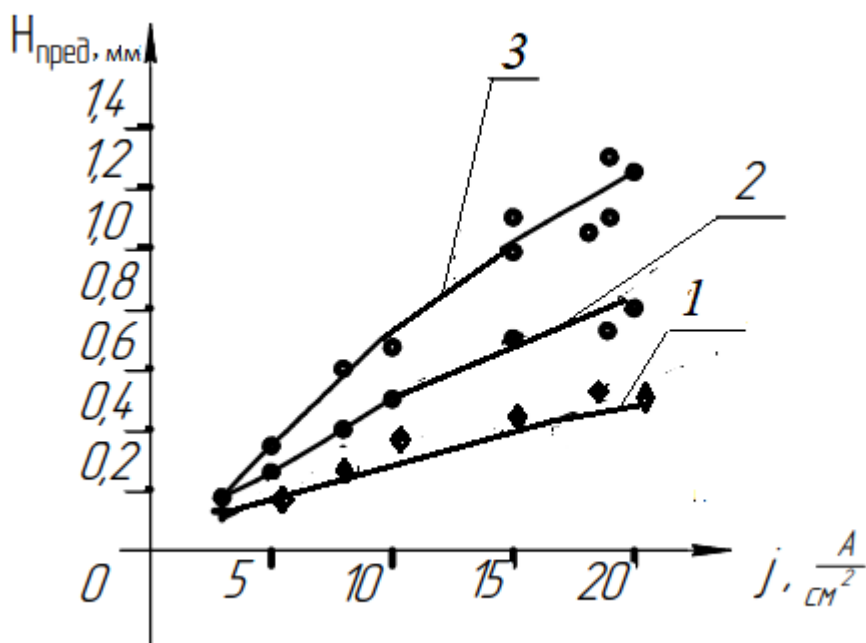


Рисунок 3.4 – Изменение предельной глубины обработки  $H_{пред}$  от плотности тока на аноде

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

Условия для расчетов и проведения экспериментов: обработка по фотошаблонам; напряжение на электродах 8-16В; S0,12 мм; электролит 10% раствор NaCl; материал детали 12X18H10T. Обработка экспериментов выполнялась методом наименьших квадратов.

Как показано в приведенной модели съем припуска происходит за счет анодного растворения металла детали (3.1). Если зона обработки доступна для установки или нанесения шаблона, то используют фотошаблоны всех видов, приведенных на рис. 3.4, с односторонним (1;2 на рисунке 3.4) и двухсторонним (3) покрытием эмульсией и фоторезистом. На рисунке 3.4 показано, что расхождение расчетных и экспериментальных показателей для проведенных исследований не превышает допустимого диапазона рассеивания данных при проведении опытных работ 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 противоположных поверхностях листа заготовки при сквозной прошивке. Таким образом, 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 при обработке участков деталей труднодоступных для инструмента. Стойкость (длительность работы) при использовании фотошаблонов для получения качественных покрытий приведена на рисунке 3.5 (а – рассеивание результатов измерений).



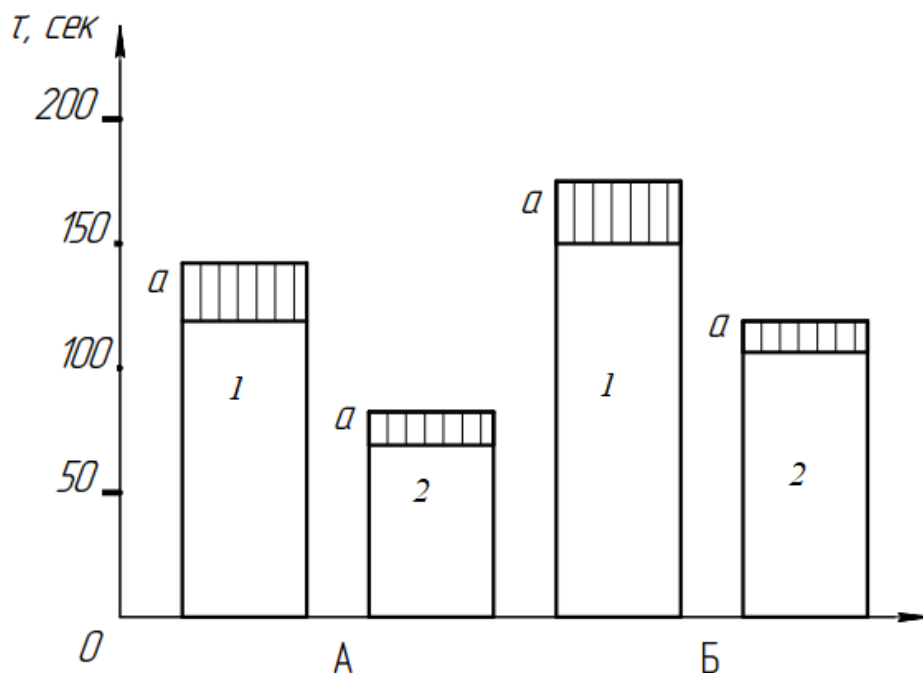


Рисунок 3.5 – Стойкость (длительность работы, сек) при использовании фотошаблонов для получения качественных покрытий

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 рисунках 3.3 и 3.4 при высокой плотности тока.

Во всех случаях рассчитанное по (3.8, 3.9) время использования шаблона и экспериментальные исследования показывают (рисунок 3.5), что принятая технология получения покрытий и опытных партий деталей различной сложности обеспечивают выпуск их партиями требуемого качества с быстрой корректировкой геометрии, что также подтверждает правомерность описанного механизма обработки деталей по фотошаблонам и высокие показатели от применения предложенных для шаблонов покрытий на базе фоторезистов.

### **3.5 Разработка новых способов и устройств для создания и применения фотошаблонов**

Изобретения, выполненные в последние годы в области обработки деталей с использованием шаблонов для управления процессом, в основном направлены на расширение технологических возможностей применения комбинированных методов с наложением электрического поля. Это расширяет область использования метода разделения материалов по фотошаблонам, прошивку глубоких прецизионных отверстий, углублений на участках деталей, не доступных для доступа других видов инструмента.

В [35] предложен новый способ обработки по фотошаблонам глубоких точных отверстий в листовых деталях, включающий поэтапную прошивку. На первом этапе анодным растворением по одному из фотошаблонов формируется отверстие или группа отверстий на глубину 0,75-0,8 толщины листа. Далее переключают ток на противолежащий катод-инструмент и по фотошаблону вскрывают одно или группу отверстий, калибруют полученный канал.

При проведении процесса прошивки используют два одинаковых шаблона, которые устанавливают с противоположных сторон листа так, чтобы оси отверстий совмещались. На каждом шаблоне выполнен контур обрабатываемой детали. При этом толщину шаблона для выполнения первого этапа делают примерно в 2 раза толще по сравнению с противолежащим (рисунок 3.6), что позволяет осуществлять калибровку и повышать точность отверстия, не меняя технологического режима по времени обработки. Схема осуществления способа приведена на рисунке 3.6.

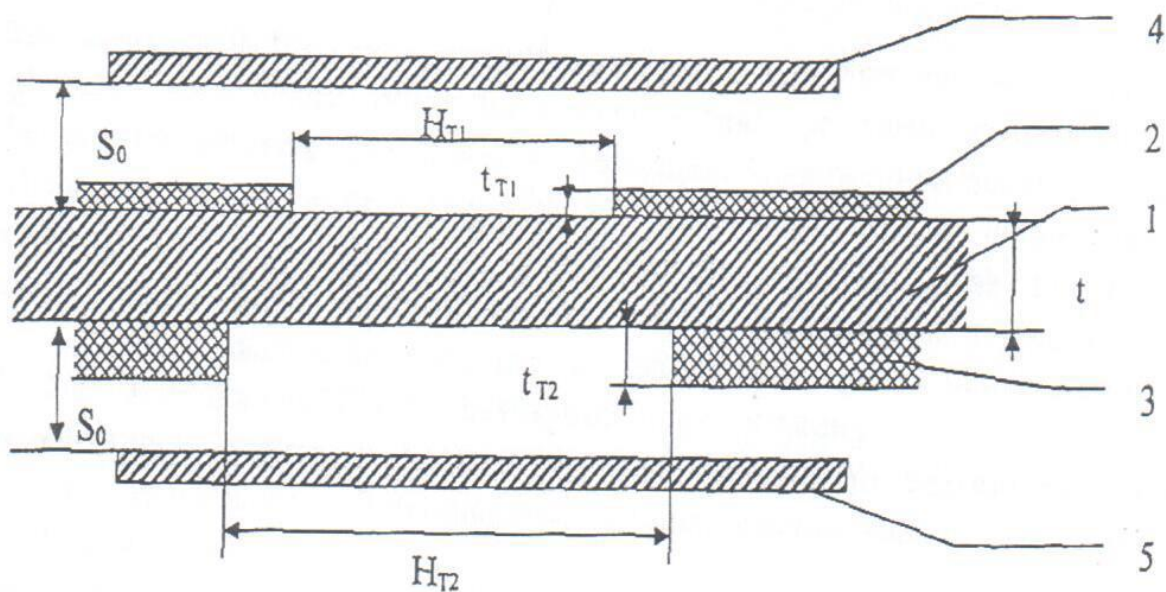


Рисунок 3.6 – Схема подготовки системы к обработке по фотошаблонам глубоких точных отверстий в листовых деталях

1 – листовая деталь; 2;3 – диэлектрические шаблоны;  
4;5 – катоды-электроды

Перед выполнением операции (рисунок 3.6) на заготовку 1 с двух сторон детали (заготовка 1 из листа толщиной  $t$ ) устанавливают или наносят готовые электрические шаблоны 2 и 3 толщиной  $t_{T1}$  и  $t_{T2}$ , удаленные относительно катодов 4 и 5 на величину начального межэлектродного зазора  $S_0$ . Просвет в контуре шаблона 1 составляет  $H_{T1}$ , а для шаблона 2 –  $H_{T2}$ . Они могут быть одинаковыми или рассчитываться с учетом толщины шаблонов 2 и 3. В конце первого этапа обработки (рисунок 3.7) с подключенным к току шаблоном со стороны этого шаблона за счет бокового растворения углубления формируется поднутрение на границе шаблона.

При используемой толщине листа около 1 мм (рисунок 3.7) это поднутрение может быть в пределах допуска на контур детали и тогда просветы контура в шаблонах можно не учитывать или располовинить.

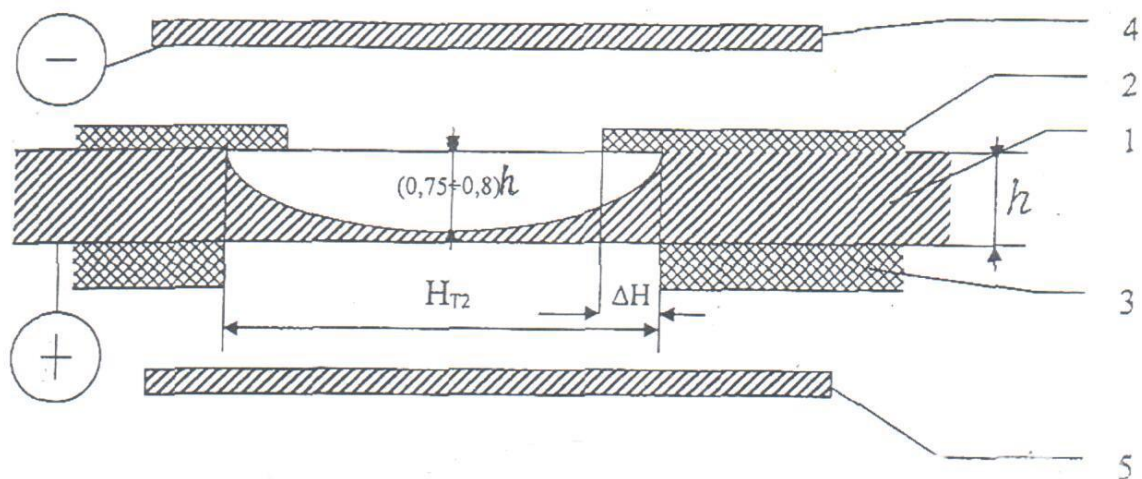


Рисунок 3.7 – Контур углубления после первого этапа обработки

После второго этапа (рисунок 3.8), когда удаляется около 1/5 припуска, встречные отверстия соединятся.

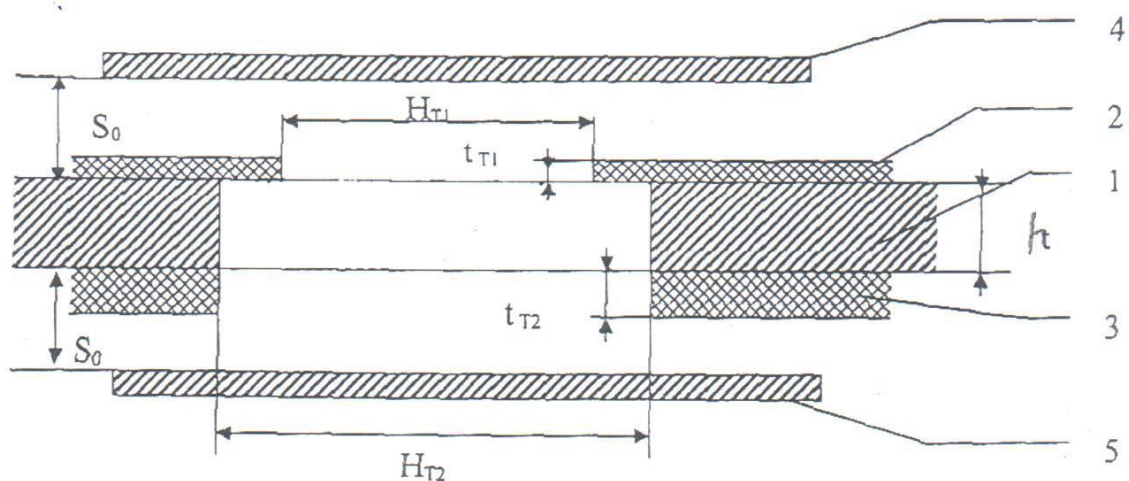


Рисунок 3.8 – Отверстие в детали после прошивки и калибровки

После второго этапа и калибровки (рисунок 3.8) размер окна в детали будет иметь минимальное искажение по глубине, так как при работе только катода 5 и увеличенной толщине шаблона 3 сьем припуска с этой стороны увеличит интенсивность анодного растворения на боковых поверхностях отверстия в детали и выровняет границы контура детали.

Для получения прецизионных деталей следует по приведенной в разделе 3.2 модели рассчитать время каждого этапа. Для расчета времени прошивки используют эмпирические зависимости, аналогичные (3.8).

$$\tau_1 = \frac{[(0,75 \div 0,8)h + S_0]^2 - S_0^2}{2\alpha\eta\chi(U - \Delta U)} \gamma, \quad (3.16)$$

$$\tau_2 = \frac{[(0,2h + S_0)^2 - S_0^2]}{2\alpha\eta\chi(U - \Delta U)} \gamma. \quad (3.17)$$

В (3.16) и (3.17) численные значения учитывают специфику обработки по схеме на рисунке 3.7 и 3.8.

По патенту [56] достигается устранение размыва границ, получаемого по фотошаблонам контура детали, что позволяет получать прецизионные детали взамен штамповки из листа без использования штамповой оснастки. Схема обработки приведена на рисунке 3.9.

Новый способ по [56] раскрыт на рисунке 3.9.

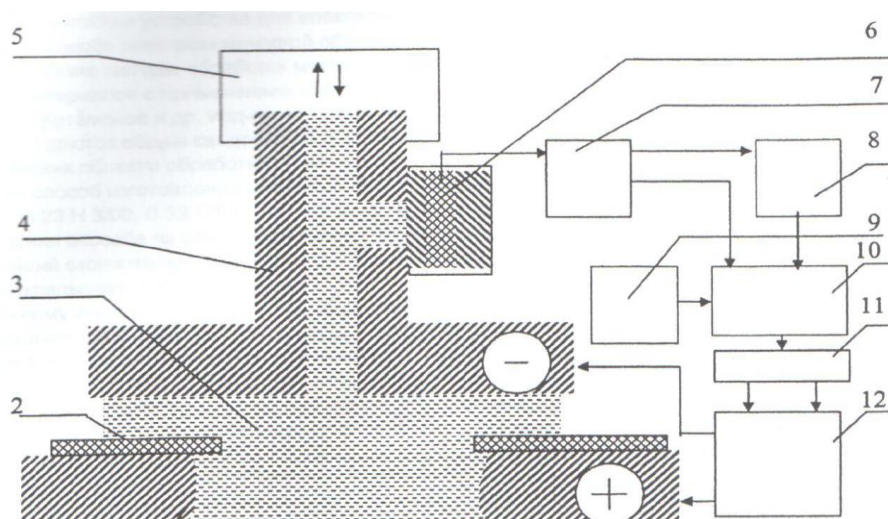


Рисунок 3.9 – Схема регулирования процесса обработки по фотошаблону путем стабилизации давления жидкой рабочей среды:

- 1 – обрабатываемая деталь; 2 – фотошаблон; 3 – жидкая рабочая среда (электролит); 4 – катод-инструмент; 5 – вибратор; 6 – датчик давления; 7 – преобразователь сигнала давления в цифровой код; 8 – блок памяти; 9 – блок уставок; 10 – компаратор; 11 – блок управления рабочим напряжением; 12 – генератор напряжения

Он отличается тем, что в начале обработки создают режимы течения электролита с минимальным и максимальным давлением, измеряемым по установленным на станке датчикам, затем начинают обработку и автоматически регулируют изменение давления в гидравлической системе, а в случае его превышения предельного значения отключают подачу тока на электроды и сохраняют без тока режим промывки межэлектродного зазора до удаления продуктов обработки. Это оценивается по величине давления на входе или выходе электролита из межэлектродного зазора.

Стабилизация режима обеспечивается вибратором, преобразователем сигнала давления и удержания его в блоке памяти. Процесс выполняется в следующей последовательности: на деталь 1 устанавливают фотошаблон с выполненным изображением границ зоны обработки, через инструмент 4 подают электролит 3, включают вибратор 5, который способствует прокачке жидкости. Сигнал с датчика давления 6 поступает на вход преобразователя 7 (например, пьезоэлектрического типа) и запоминается блоком 8. Далее сигнал проходит через блок уставок 9, компаратор 10 к блоку управления напряжением от источника 12.

В [56] приведен пример использования способа и устройства при изготовлении металлических сеток для однослойных фильтров тонкой очистки топлива из стали 12Х18Н9Т с многогранными отверстиями 0,035 x 0,05 мм с перемычкой не более 10 мкм, что позволило получить плотность разделения материалов по фотошаблонам. Он направлен на управление профилем боковых поверхностей мест обработки для получения наклонных или криволинейных стенок по глубине обработки. Способ характеризуется тем, что регулируется количество электричества, поступающего в зону обработки. Для этого на шаблон дополнительно устанавливают металлический анод, подключают его к источнику постоянного тока и с его помощью регулируют положение вектора действия тока, определяющего локальный съём припуска с боковых стенок углублений. Способ используется при изготовлении горячей зоны ракетных двигателей для получения

в узких (около 1 мм) каналах дополнительных турбулизаторов в закрытых участках роторов и статоров.

Схема реализации способа показана на рисунке 3.10.

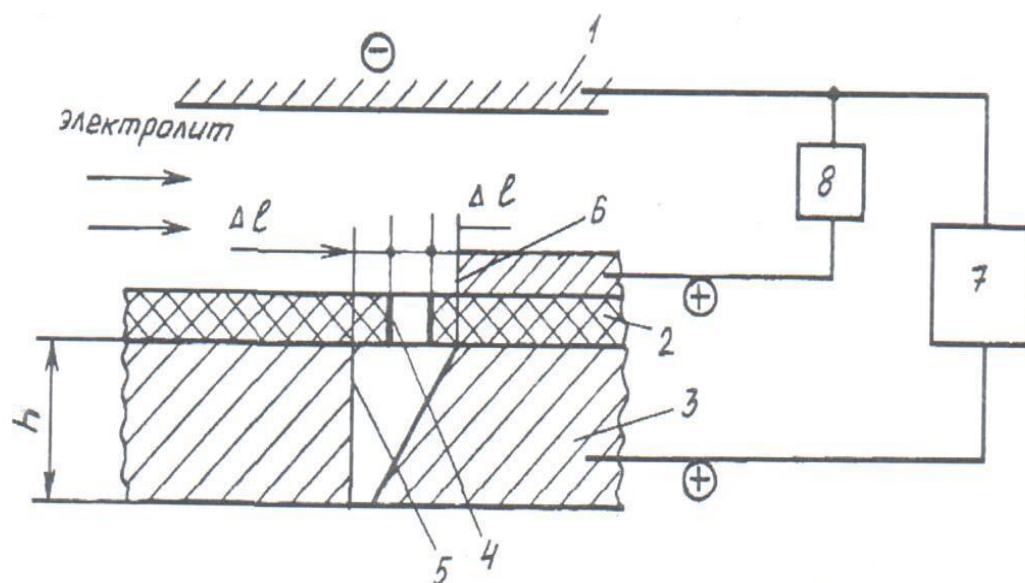


Рисунок 3.10 – Способ управления геометрией каналов с различной зоной течения жидкости: 1 – катод-инструмент; 2 – фотошаблон; 3 – деталь; 4 – контур разделения материала диэлектрического шаблона (фотошаблона); 5 – граница контура детали; 6 – металлический шаблон; 7, 8 – источники тока на металлический шаблон и деталь с регуляторами напряжения и силы тока,  $\Delta l$  – сдвиг границы металлического шаблона над контуром фотошаблона, вызывающий поднутрение под фотошаблоном;  $h$  – толщина заготовки

Способ осуществляют регулированием количества электричества, подаваемого на дополнительный анод, величиной сдвига металлического шаблона относительно диэлектрического, временем действия тока через деталь и дополнительный анод.

### Выводы по главе

1. Разработан механизм и создана модель процесса проектирования фотошаблонов повышенной стойкости и технологичности, что послужило доказательством преимуществ фотопокрываний на базе фоторезистов, ранее не

находивших широкого применения в машиностроении из-за дефицитности и дороговизны материала. На этом фоне показаны достоинства и рациональная область использования общедоступных покрытий на базе фотоэмульсий.

2. Установлена преемственность положений моделирования процессов разделения листовых материалов при обработке их по фотошаблонам с покрытием из эмульсии и фоторезистам, что открыло возможность с незначительной корректировкой использовать для разработанных фотошаблонов известных теоретических положений работы с шаблонами на базе эмульсии.

3. Установлены закономерности управления вектором воздействия тока на деталь по глубине зоны обработки, что послужило базой для разработки технологических процессов изготовления по многослойным шаблонам сквозных каналов и углублений с различным сечением по глубине и с поворотом вектора оси действия тока, что служит основанием для значительного расширения области обработки деталей, в том числе малого тиража в опытном производстве, часть которых ранее получалась по импортозамещению.

4. Показана область использования фотошаблонов и способов изготовления по ним деталей, расширение которой становится возможным на базе новых способов и устройств, защищенных отечественными патентами, что раскрывает перспективы ускоренного выпуска конкурентоспособной продукции мирового уровня.



## **Глава 4 Проектирование, реализация и перспективы расширенного использования технологии изготовления деталей по фотошаблонам в опытном производстве**

### **4.1 Проектирование технологического процесса изготовления деталей по фотошаблонам**

Для быстрой переналадки технологических средств, обеспечения повышенного ресурса и работоспособности фотошаблонов с покрытием фоторезистом по заявленному заказчиком и заложенному в проекте разработчиком уровню эксплуатационных показателей режимы обработки устанавливаются в пределах достигнутых диапазонов или создаются возможные режимы, в основном механического воздействия, комбинированного процесса, по которым, при необходимости, корректируются параметры химического воздействия.

Базой для построения методологии перспективных технологических процессов создаваемой техники служит уровень достигнутых технологических показателей, обеспечивающих получение заданных (или их превышение) эксплуатационных характеристик изделия, в первую очередь по надежности, долговечности и ресурсу безотказной работы. Это выполняется путем отработки технологичности производства по методикам для обоснования выбора наиболее эффективных технологических процессов или обоснования необходимости разработки новых способов и устройств.

Применение методологии отработки технологичности дает возможность ограничить зону поиска оптимального варианта из перечня известных воздействий при изготовлении деталей по фотошаблонам в комбинированном процессе и научно обосновать направление работ по созданию новых способов и устройств с комбинацией химических и механических воздействий, наиболее полно реализующих положительные стороны комбинированного процесса получения высокоресурсных покрытий, в том числе фоторезистами, что может

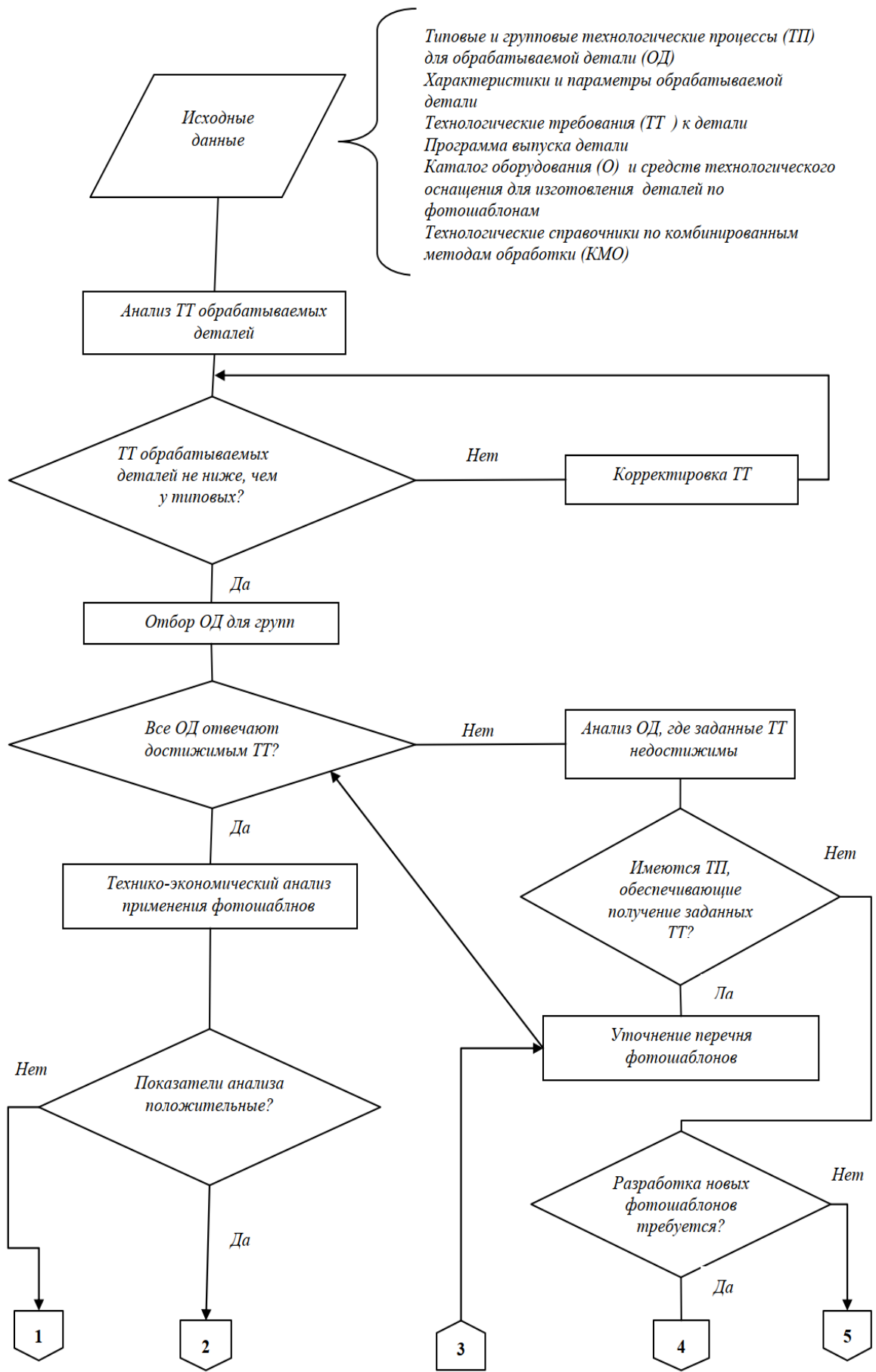
служить базой для создания и развития нового научного направления по комбинированным технологиям получения высокоресурсных покрытий.

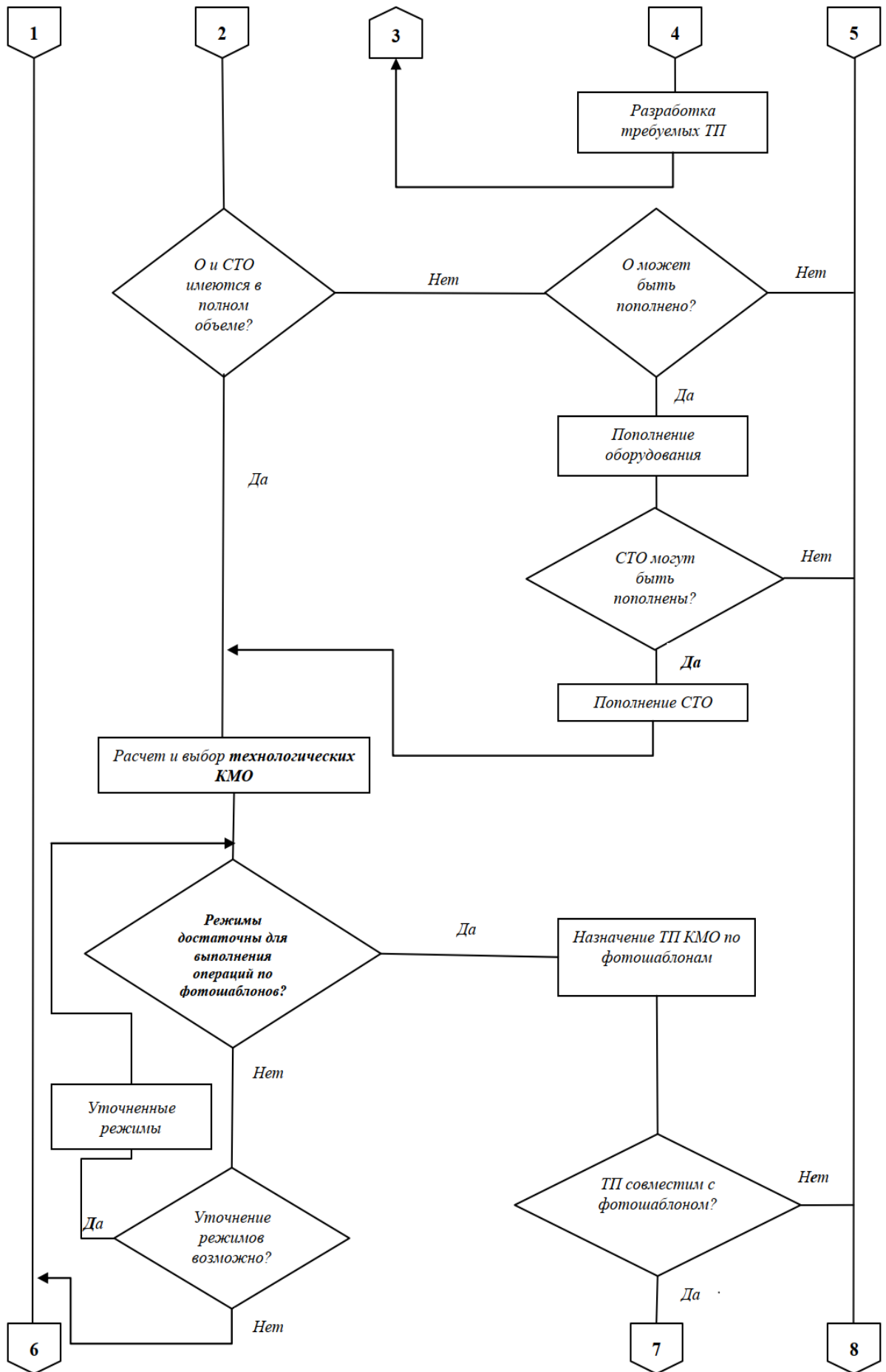
Сравнение достоинств вариантов проектируемых комбинированных процессов проводится по укрупненным технико-экономическим показателям, подтвержденным опытом применения аналогичных технологий с использованием фоторезисов и методов ускоренного перехода на детали с характеристиками, выявленными в процессе испытаний изделий в процессе отработки технологичности и освоения производством. Разработанная методология позволяет ускоренно спроектировать эффективный технологический процесс изготовления как одноразовых, так и сменных фотошаблонов для получения высокоресурсных деталей, обоснованно выбрать для них технологические режимы, оборудование и средства технологического оснащения, источники информации для экономического обоснования эффективности комбинированного процесса для изделий на стадии их поэтапного совершенствования. в процессе отработки технологичности.

На этапах доводки конструкции осваиваемых объектов новой техники требуется использовать известные и создавать новые (защищенные патентами) технологические приемы и средства их реализации по результатам испытаний и доводки в опытном производстве на стадии запуска серийного выпуска изделий.

Процедура использования методологии представлена в форме алгоритма на рисунке 4.1.

Алгоритм на рисунке 4.1 позволяет автоматизировать процесс технологической подготовки производства и расширить область использования различных видов шаблонов по результатам изготовления по ним ограниченных партий деталей с корректировкой геометрии и свойств по результатам испытаний продукции. В различных отраслях машиностроения, особенно при создании образцов новых поколений летательных аппаратов, где рассматриваемые технологии находят наибольшее применение.





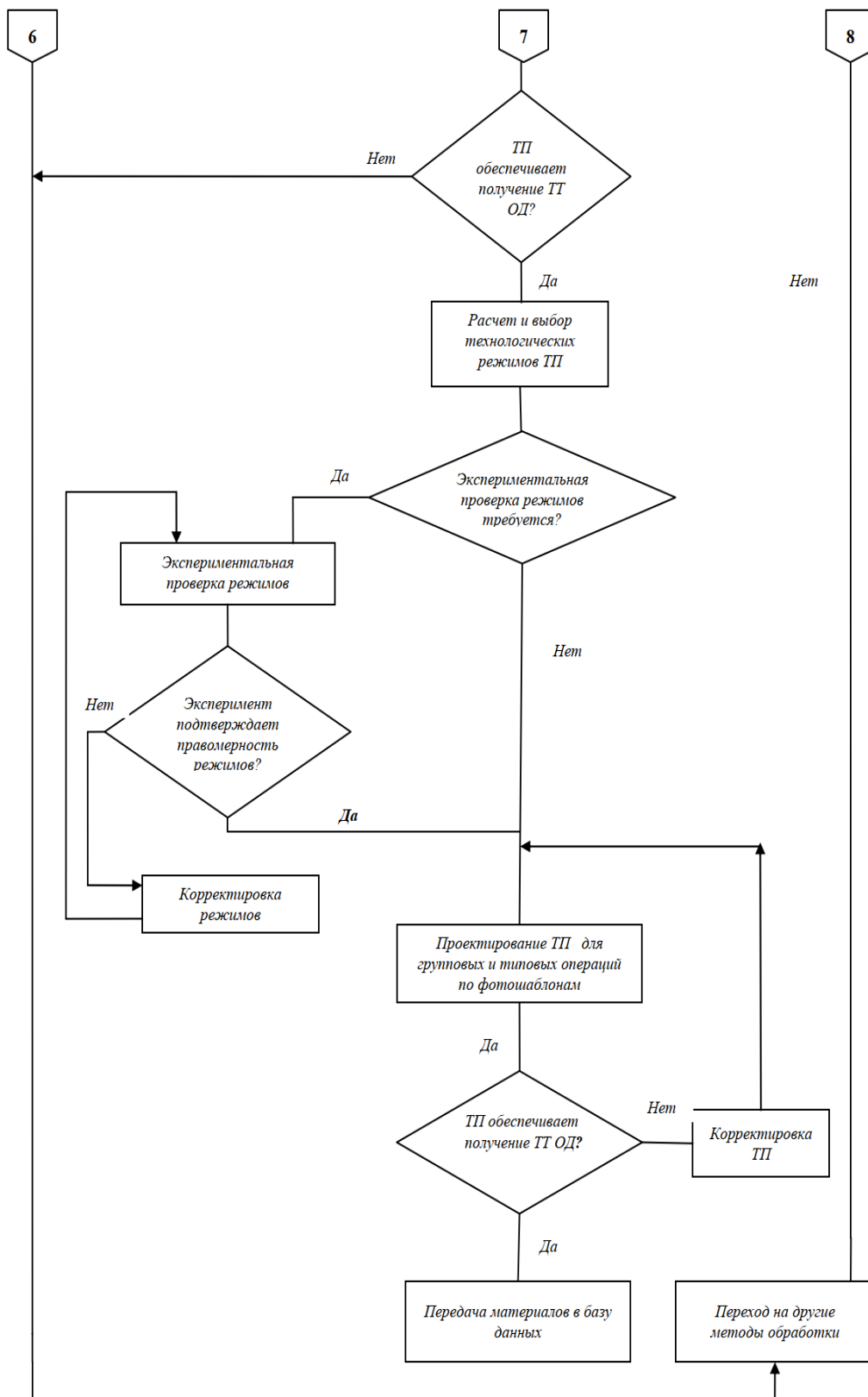


Рисунок 4.1 – Алгоритм для проектирования технологических процессов обработки листовых деталей по фотошаблонам с быстроперенастраиваемыми средствами технологического оснащения

## **4.2 Технология нанесения фоторезистов на листовые заготовки перед формированием на них профиля шаблона**

Одним из рекомендованных в разделе 2.3 способов нанесения фоторезистов одну или обе стороны детали в нужном масштабе покрывают светочувствительным слоем или несколькими связанными между собой слоями до достижения требуемой толщины шаблона (обычно не менее 8-15 мкм). Далее детали нагревают в сушильном шкафу при 310–320 К в течение 20–30 мин, что дает твердую поверхность покрытия. Выполняют визуальный контроль полученного покрытия на предмет отсутствия видимых дефектов и равномерность толщины покрытия (разброс не более 10%).

Следующим этапом является экспонирование контура зоны обработки детали, где светочувствительный слой облучают лампами дневного света. Время экспонирования зависит от условий проведения операции, устанавливается экспериментально на опытных образцах и может быть от 1 до 15 (и более) минут. Изображение проявляют при поливе теплой водой с температурой 315–320 К в течение 0,5-2,5 мин и после удаления необлученного светочувствительного слоя окрашивают его контрастным (обычно черным) красителем. После чего шаблон промывают теплой проточной водой и последовательно стирают продукты с поверхности шаблона. Затем покрытие обрабатывают в течение 30 – 40 с в закрепителе, следующего состава: на литр дистиллированной воды – 30 г хромовокалиевых квасцов, 50 г двуххромовокислого аммония, 50 мл спирта этилового. После чего шаблон промывают водой и сушат несколько секунд при температуре 290 – 300 К, затем 40-60 мин в сушильном шкафу при температуре 330 – 350 К.

Повторно контролируют качество покрытия. При необходимости деталь можно ретушировать нанесением цветного лака до его высыхания без нагрева, что может занимать до 40 мин.

Окончательное закрепление фоторезиста выполняют обжигом при температуре около 600 К до появления цветного изображения зоны обработки. После чего шаблон готов для применения.

### **4.3 Технологические режимы для обработки деталей по фотошаблонам с покрытием фоторезистом**

Как показано в главе 3 выбор и назначение технологических режимов обработки деталей по фотошаблонам зависит от материала детали.

Для их покрытия, технологии и способов изготовления шаблонов и деталей, режимов разделения и прошивки материалов в таблице 4.1 приведены рекомендации для выбора технологических режимов электрохимической обработки стальных (в том числе, из нержавеющей сталей) деталей по фотошаблонам на базе фоторезистов.

Аналогичные режимы выбираются по [83] для других видов металлических материалов при индивидуальной и групповой обработке деталей в опытном производстве.

Если обрабатывают детали, собранные из фрагментов с различной обрабатываемостью анодной составляющей комбинированного процесса (таблица 4.1), за счет состава рабочих сред, режимов процесса требуется задать условия, при которых расхождения по обрабатываемости будет минимальным.

Для известных токопроводящих материалов и месту их в детали подробные исследования режимов не требуются, но для материалов с неизвестной обрабатываемостью могут потребоваться расчеты и эксперименты на образцах для уточнения в первую очередь величины начального межэлектродного зазора и состава жидкой среды. Такие сведения необходимы при проектировании технологического процесса.

Таблица 4.1 – Технологические режимы электрохимической обработки деталей по фотошаблонам на базе фоторезистов

Размер зоны обработки детали по шаблону, мм	Толщина фотошаблона с покрытием фоторезистом, мм	Начальный межэлектродный зазор, мм	Напряжение на электродах, В	Минимальная скорость течения электролита через зазор, м/с	Схема обработки по шаблонам на базе фоторезистов
До 20 x20	До 0,2	0,05-0,2	6-10	1-2	Односторонняя обработка
	0,2-0,4	0,15-0,2	8-10	2-3,5	То же
	0,4-1,6	0,2-0,3	10-12	3-5	Двухсторонняя обработка
До 20-50x 50	До 0,2	0,2-0,25	8-10	2-3	Односторонняя обработка
	0,2-0,4	0,02-0,35	10-12	2-3	То же
	0,4-1,4		12-15	3-4	Двухсторонняя обработка
Свыше 5050	До 0,2	0,25-0,3	10-12	2-3	Односторонняя обработка
	0,2-0,4	0,3-0,4	12-15	2-4	Одно и двухсторонняя обработка
	0,4-1,0	0,4-0,5	12-15	3-4	Двухсторонняя обработка

Сведения включают:

- назначение рабочей среды (по марке обрабатываемого материала и схеме обработки);
- установление и назначение электрохимического эквивалента всех материалов, входящих в заготовку;
- расчет напряжений на фрагментах заготовки;
- построение и корректировка плана построения технологического процесса;
- уточнение режимов (при необходимости).



#### 4.4 Типовые приложения технологии обработки деталей по фотошаблонам

Опыт использования фотошаблонов позволил выделить типовые детали, приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Техничко-экономические показатели обработки металлических изделий по фотошаблонам в опытном производстве

№ пп	Наименование и характеристика детали	Способы и средства управления процессом	Техничко-экономические преимущества процесса
1	2	3	4
1.	Статорные и роторные электродвигателей систем управления из материала ЭЧ с толщиной 0,35-0,45 мм	Разделение листовых материалов по однослойным одноразовым шаблонам покрытием фоторезистам	Замена дорогостоящих вырубных твердосплавных штампов в опытном производстве. Исключение технологических операций по доработке кромок деталей. Ускорение перенастройки средств технологического оснащения (СТО) на изменение характеристики деталей. Расширение области использования процесса разделения листовых материалов. Ускорение технологической подготовки производства на порядок и более. Увеличение толщины листа до 2-3 раз. Замена импортных изделий на отечественные.
2.	Ламели, окантовки, вкладыши и другие детали из листа толщиной до 1,2 мм	Разделение листа на прецизионные детали по одноразовым фото-шаблонам	Исключение в опытном производстве операций штамповки на вырубных гибочных штампах. Ускорение перенастройки СТО на измененную форму детали. Расширение области использования обработки по фоторезистам на детали с увеличением толщины листа в 2-3 раза.

Продолжение таблицы 4.2

3.	<p>Детали системы охлаждения авиационных и космических двигателей с местными профильными углублениями глубиной до 0,5 мм</p>	<p>Изменения вектора движения охлаждающей среды многослойными диэлектрическими и металлическими шаблонами, включая фоторезисты.</p>	<p>Устранение «запираания» потока в каналах для течения жидкости. Повышение ресурса двигателей авиакосмической техники. Возможность использования гибких шаблонов многоразового применения, типовой и групповой технологии изготовления и использования шаблонов. Ускорение до 2-х раз перенастройки СТО. Замена импортной техники на отечественную.</p>
4.	<p>Многослойные фильтры из листа толщиной менее 0,4 мм и с сечением проходных отверстий от 0,02 до 3,0 мм с линейным вектором течения охлаждающей среды</p>	<p>Групповая прошивка каналов различного профиля через однослойные одноразовые и многоразовые шаблоны, в том числе на базе фоторезистов</p>	<p>Создание системы ускоренной отработки технологичности при групповой прошивке отверстий малого сечения произвольной формы с прямой осью. Расширение области использования многослойных листовых конструкций деталей. Ускорение до 2-3 раз темпов переналадки СТО. Снижение массы и размеров многослойных фильтров.</p>
5.	<p>Многослойные фильтры из листа толщиной менее 0,4 мм и с сечением проходных отверстий от 0,005 до 3 мм с перемещенным положением и кривизной вектора течения охлаждающей среды</p>	<p>Групповая прошивка каналов постоянного и переменного сечения через многослойные диэлектрические и металлические шаблоны одноразового и многоразового использования</p>	<p>То же и получение многослойных фильтров с управляемой траекторией течения охлаждающей среды. Обеспечение безударного энергосберегающего течения через каналы в фильтрах. Возможность быстрого изменения вектора течения охлаждающей среды. Снижение массы и габаритов многослойных фильтров.</p>
6.	<p>Детали с произвольной геометрией открытой и закрытой зоной нанесения графических контуров (чертежи, рисунки, тексты, шкалы и др.) с углублениями до 0,3 мм</p>	<p>Одноразовые и многоразовые фотошаблоны, в том числе на базе фоторезистов</p>	<p>Нанесение индивидуальной и групповой информации на наружные и внутренние поверхности деталей (в том числе нежесткой конструкции) при ограниченно доступе инструмента в зону обработки. Получение качественной информации в горячей зоне и на участках трения сопрягаемых элементов деталей.</p>

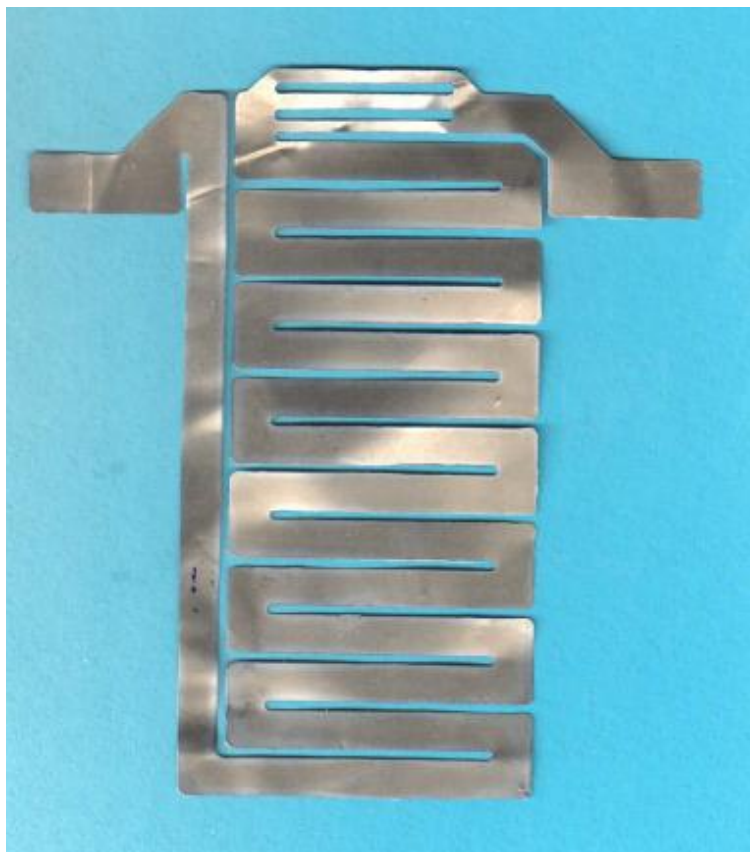


Рисунок 4.2 – Фрагмент системы нагрева элементов антиобледенения летательных аппаратов

На рисунке 4.2 представлен фрагмент системы нагрева элементов антиобледенения летательных аппаратов (материал детали – сталь 12Х18Н10Т, толщина листа 0,15 мм). Фотошаблон имеет покрытие фоторезистом толщиной 14-16 мкм. Допускаемая погрешность контура детали 0,05 мм. Длительность формообразования детали 0,8-1,0 мин, а подготовительно-заключительное время на деталь при тираже 15 штук около 1 минуты. При малой толщине листа и высоких требованиях по точности профиля использование других известных способов разделения (включая вырубные штампы и лазерную резку) вызывали значительную выбраковку дорогостоящих деталей, требовали больших временных и стоимостных затрат на переналадку в ходе отработки технологичности деталей при переходе от единичного к серийному производству.

Все эти недостатки были устранены на стадии запуска опытных изделий при использовании процесса изготовления по фотошаблонам ограниченных партий листовых деталей с толщиной для сталей и титановых заготовок менее 0,8-1,0 мм, алюминиевых (при двухсторонней обработке.) и медных сплавов до 1,4 мм (рисунок 4.3). Стойкость шаблонов с покрытием фоторезистами в 2-3 раза выше по сравнению с покрытием эмульсиями, что ускоряет доработку и уточнение профиля в несколько раз.

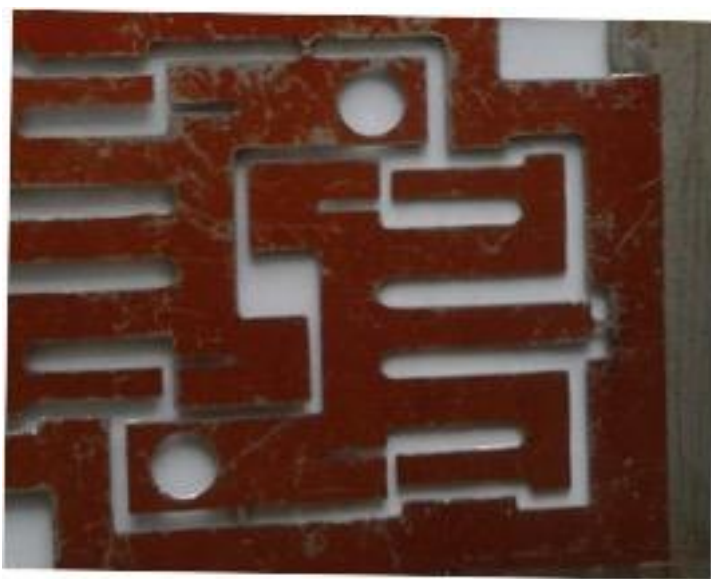


Рисунок 4.3 – Фотошаблон и деталь из алюминиевого листа, толщиной 0.65 мм при одностороннем положении фотошаблона

Режимы разделения материала: напряжение 7-8 В, время обработки 1,5–2 мин.

На рисунке 4.4 показана статорная пластина железа для электродвигателей, где при большой потребности элементов требуется обеспечить высокую взаимозаменяемость деталей. При отработке конструкции двигателей систем управления летательных систем даже незначительные изменения конструкции требуют больших затрат, поэтому изготовление единичных двигателей экономически целесообразно в опытном производстве по фотошаблонам, где требуется повышенный ресурс покрытия или многоразовые сменные шаблоны на базе фоторезистов.

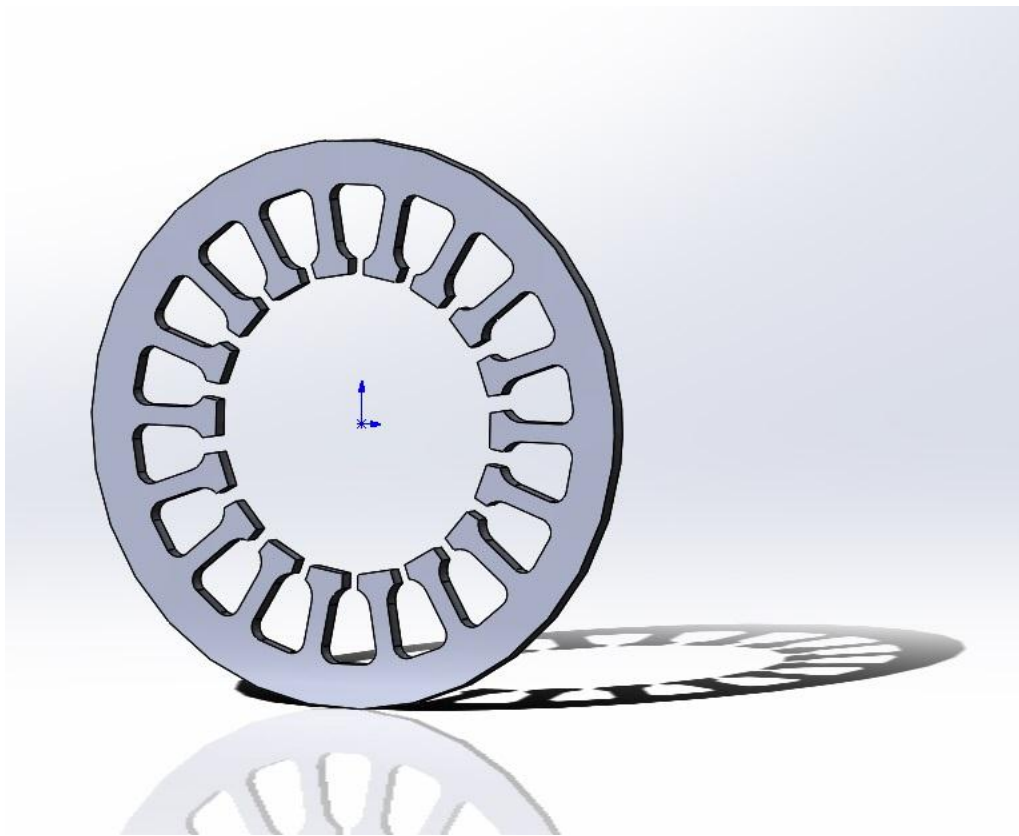


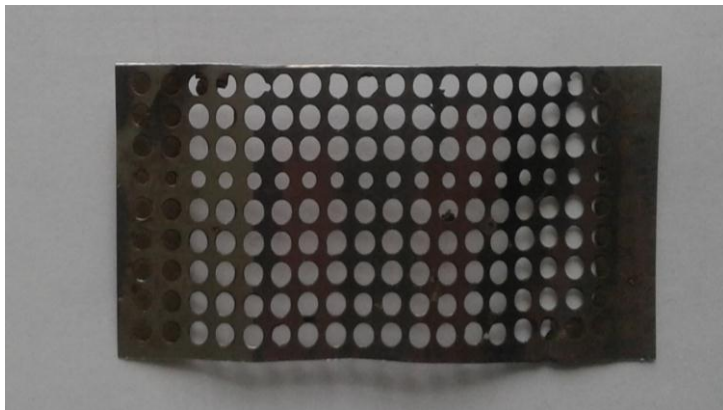
Рисунок 4.4 – Прецизионная сложнопрофильная пластина из железа Э4 толщиной 0,45 мм

Наиболее технологичны (рисунок 4.5) при обработке по фотошаблонам отверстий многослойные фильтры, где требуется обеспечить плавное течение рабочих средств за счет поворота оси и изменения формы отверстий. Применение фотошаблонов при уменьшении толщины каждого слоя позволило до 1,5 раз повысить фильтрующую способность фильтров или снизить до 30% габариты и массу таких деталей в авиационных и ракетных двигателях и их системах.

На рисунке 4.6 приведены изделия с толщиной листа 0,15 мм. Длина общей трассы зоны фильтрования по двухсторонним фотошаблонам 1,4 мм. Диаметр отверстий фильтров грубой очистки (рисунок 4.6, а) 0,8-1,2 мм, а тонкой фильтрации через сетки с размером отверстия 50x50 мкм в форме квадрата (рисунок 4.6, б) до 1,4 мм. Ось отверстия имеет двойную кривизну и при намотке листа создается безударный вход и выход потока фильтруемой жидкости.



Рисунок 4.5 – Сборные, в том числе многослойные, фильтры ракетных двигателей из нержавеющей стали и латуни, полученные групповым методом по фотошаблонам



а)



б)

Рисунок 4.6 – Сетки из листа для изготовления многослойных фильтров  
а) – для фильтров предварительной очистки; б) – для тонкой очистки

На рисунке 4.7 приведены детали с каналами для охлаждения горячей зоны ракетного двигателя, где в труднодоступной для инструмента зоны каналов требуется изготовить углубления для организации течения охлаждающей среды в корпусе и зоне форсунок изделия.

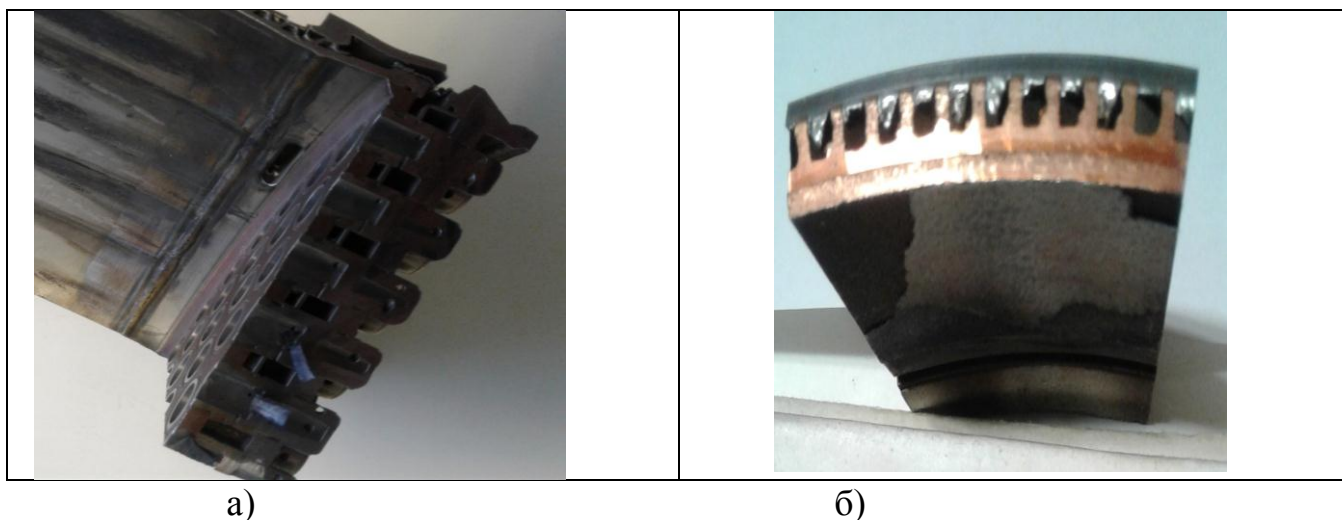


Рисунок 4.7 – Каналы для охлаждения горячей зоны ракетного двигателя:  
а) огневой диск с форсунками; б) фрагмент корпуса камеры сгорания

Операция выполняется использованием многослойных шаблонов по схеме обработки, приведенной на рисунке 4.8. Ширина канала для протекания охлаждающей жидкости (в ракетных двигателях это топливо) обычно находится в диапазоне от 0,8 до 3 мм. Глубина (рисунок 4.8) зависит от толщины стенки камеры сгорания и находится в тех же пределах. Для устранения запираания потока жидкой фазы в канале газообразными «пробками» требуется сдвинуть границы течения среды внутрь потока, оторвав его от стенок канала. Работы последних лет показали, что при использовании фотошаблонов можно на донной и боковых частях каналов получить локальные углубления величиной от 0,3 до 0,5 мм, что ранее считалось неосуществимым. Дальнейшие исследования дали возможность раскрыть закономерности получения в таких узких и глубоких пазах, находящихся в недоступной для инструмента зоне, локальных углублений с переменным профилем.

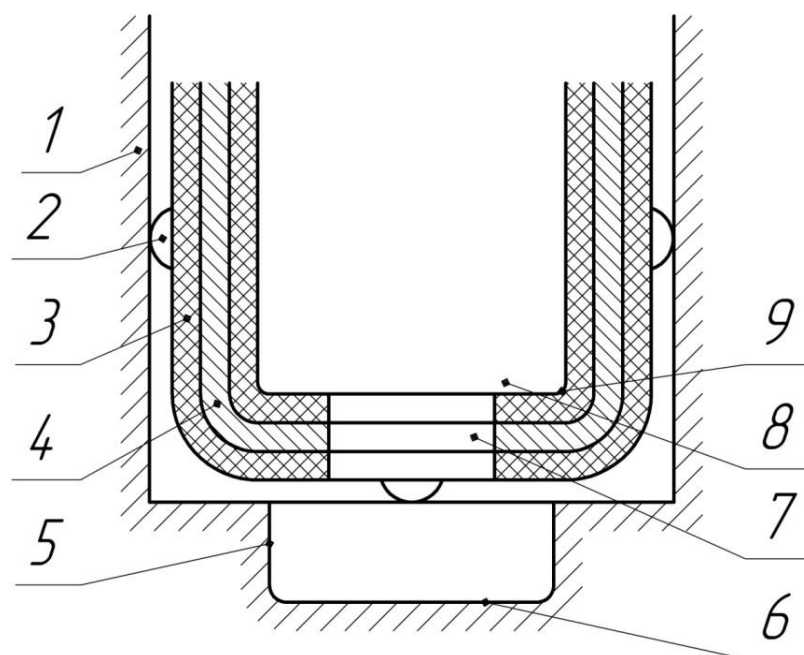


Рисунок 4.8 – Структура многослойного шаблона для получения углублений требуемого профиля в донной части паза:

1 – боковая поверхность (ребро) канала; 2 – выступы на поверхности шаблона; 3 – диэлектрический слой шаблона; 4 – металлический слой шаблона; 5 – боковая поверхность углубления; 6 – донная часть углубления; 7 – окно в многослойном шаблоне; 8 – катод; 9 – внутренний диэлектрический слой

Здесь удастся получить со стороны входа в зону углубления ступень с плавным безударным сопряжением на выходе потока со стенками паза, что улучшает теплообмен и повышает ресурс изделия, оцениваемый по числу пусков его при многократном использовании. Для снижения трудоемкости изготовления камер сгорания с местными углублениями в каналах предложены шаблоны с гибкими диэлектрическими слоями. Они позволяют вести групповую обработку многих углублений по единому гибкому шаблону со слоями 3, 9 (рисунок 4.8) и выступами 2, формирующими межэлектродный зазор для протекания электролита по схеме с неподвижными электродами при односторонней обработке. Метод защищен патентами РФ и применяется в современных летательных аппаратах страны.



В металлическом слое 4 (рисунок 4.8) шаблона выполнено сквозное окно 7 по форме углубления 5, 6. Слой 4 является частью дополнительных анодов, формирующих геометрию углублений по их глубине.

Технологические режимы обработки углублений по многослойным шаблонам с дополнительными анодами рассчитывают в зависимости от схемы анодного растворения, воздействия электромагнитного поля на границы углублений, степени воздействия составляющих на параметры процесса.

При этом следует учитывать:

- обрабатываемость материала деталей;
- геометрию зоны обработки;
- глубину обрабатываемого участка;
- форму поверхности углубления;
- доступность инструмента для подачи в зону обработки;
- ограничения по техническим и экономическим параметрам для оценки технологичности на стадии освоения изделия в опытном производстве;
- возможности подвода тока в зону обработки и к дополнительному аноду;
- материальную базу для проведения обработки.

На рисунке 4.8 рассматривается схема с многослойным шаблоном, где внутренний слой является токопроводящим и служит составной частью дополнительного анода, предназначенного для управления электромагнитным полем с целью получения углублений, обеспечивающих требуемую траекторию и характер течения газожидкостной охлаждающей среды при эксплуатации изделия.

Предлагаемая схема (рисунок 4.8) позволяет объединить технологические режимы химического и электромагнитного воздействия комбинированной обработки углублений с основными электродами и дополнительным анодом, где специфика процесса включает управление электромагнитным полем подачей тока на дополнительный анод.

Выбор рабочей среды для комбинированной обработки углублений выполняется по методологии, приведенной в [83]. Используют водные растворы

хлористого натрия с добавками. При изготовлении бронзовых деталей рекомендуются в качестве добавки 1,9 – 2,1 % углекислого калия, а также нитрат натрия, углекислый натрий, соли азотной кислоты. Межэлектродный зазор при использовании многослойного шаблона зависит от его структуры, толщины, размещения на аноде или катоде, возможности прокачки рабочей среды для обеспечения массовыноса.

Общими расчетными режимами для управления процессом комбинированной обработкой углублений являются:

– время обработки ( $\tau$ ), определяющее период воздействия дополнительного анода на изменение электрического поля, под действием которого формируется требуемый проточный тракт над углублением;

– давление  $P_n$  на входе в зону обработки газожидкостной рабочей среды, обеспечивающее массовынос продуктов обработки. Этот вопрос подробно рассмотрен в [83] и применительно к схеме с дополнительным анодом составляет 0,25 – 0,35 МПа.

На рисунке 4.8 заданная величина углубления для схемы комбинированной обработки с неподвижными электродами и дополнительным анодом может быть представлена как разность расстояний от катода до детали в конце обработки углубления и перед началом процесса. Тогда по [99] время обработки ( $\tau$ ) углубления рассчитывается по эмпирической зависимости

$$\tau = \frac{\gamma b [b + 2(h_1 + h_2 + h_3 + S)]}{2\eta\alpha\chi(U_1 - \Delta U_1)}, \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  – плотность материала детали;

$\eta$  – выход по току;

$\alpha$  – электрохимический эквивалент сплава детали;

$\chi$  – удельная проводимость рабочей среды;

$S$  – межэлектродный зазор;

$U_1$  – напряжение на электродах;

$\Delta U_1$  – суммарные потери напряжения выбираются в зависимости от схемы обработки и материала обрабатываемой детали, например по [83]

Выбор требуемых параметров можно выполнять расчетами или по справочным материалам [87, 88] и [83].

Предельное значение напряжения ( $U_{\text{пред}}$ ) рассчитывают по зависимости, полученной из основного уравнения анодного растворения [102];

$$U_{\text{пред}} = \Delta U_1 + J_1(h_1 + h_2 + h_3 + S)/\chi, \quad (4.2)$$

где  $J_1$ -плотность тока, рекомендуемая для работы с неподвижными электродами.

Зависит от величины зазоров, свойств материалов, режимов обработки. Выбирается по материалам [102, 83]. Для обработки по многослойным шаблонам (1;2;3) средняя плотность тока составляет 0,12- 0,15 А/мм<sup>2</sup>. Расчеты по (4.2) дают величину напряжения на электродах от 8 до 16 В.

Процесс обработки с дополнительным анодом имеет много общего с комбинированным механизмом удаления припуска: используется общая схема с неподвижными электродами, единая рабочая среда, одни составляющие межэлектродного зазора, единое время обработки, одинаковый режим гидродинамики течения газожидкостной или жидкой рабочей среды.

Различия состоят в электрической части: силе тока, поступающей на слой  $h_2$  (рисунок 3.2) дополнительного анода, для чего требуется рассчитать напряжение  $U_g$  на дополнительный анод, режимы работы которого регулируют про информации, снимаемой на выходе из генератора [99].

Большие перспективы открываются для комбинированной обработке по фотошаблонам изображений (схем, рисунков и др.), текстовых материалов (шрифты от 2 мм).



Рисунок 4.9 – Тексты и рисунки, полученные на сферической поверхности детали по фотошаблонам

На рисунке 4.9 показано изображение на сферической поверхности детали из алюминиевого сплава с толщиной листа 0,8 мм. Глубина контура знаков 0,2–0,3 мм. Время обработки по групповой технологии с использованием одноразовых шаблонов с резисторным покрытием около 1,5 минуты. Деталь имеет декоративное назначение, но, тем не менее, измерялись полученные параметры. Отклонение профиля в зависимости от кривизны поверхности было не более 0,05 мм. Шероховатость поверхности в зоне обработки ( $R_a$ ) в зависимости от кривизны профиля составляет от 1,25 до 3,6 мкм, Такие требования близки к предельным значениям для точных деталей машиностроения, а время обработки на порядок и более сокращается по сравнению с гравированием, что является несомненным преимуществом для использования такой технологии в опытном производстве.

#### **4.5 Технология удаления с детали одноразовых фотопокровтий без нарушения эксплуатационных свойств деталей**

Переход с использования фотошаблонов на базе эмульсий на применение фоторезистов значительно усложнил технологию удаления покрытий, если это предусмотрено в технологии изготовления деталей по фотошаблонам. Из-за повышенной адгезии, твердости фоторезистов, устойчивости их к химическому стравливанию усложняется удаление фоторезистов после получения детали, что требует поиска и обоснования других способов локального снятия покрытия (или его остатков) без повреждения поверхностного слоя и геометрии, особенно одноразовых покрытий. Попытки использовать для этой цели абразивного инструмента не дали устойчивого положительного результата, так как при малой (измеряемой микронами) толщине покрытия и значительной разнотолщинности не удается снять покрытие без повреждения прецизионной детали.

Такая задача решается в [30] при использовании комбинированной обработки электродом-щеткой, где регулируемое механическое воздействие пучками мягкой проволоки совмещается с анодным растворением заусенцев и скруглением кромок на деталях. Для сохранения точности профиля при обработке изделий по фотошаблонам требуется подбор материала, сечения проволоки инструмента, режимов обработки. Это обычно уточняется по результатам экспериментов и представляет сложностей в серийном производстве. Однако в процессе освоения новых изделий на опытной продукции перенастройка технологии весьма трудоемка и затратная, поэтому не получила широкого применения.

Наиболее приемлемыми оказались результаты, приведенные в [37] для струйной зачистки гранулами из мягкого токопроводящего материала по схеме на рисунке 4.10.

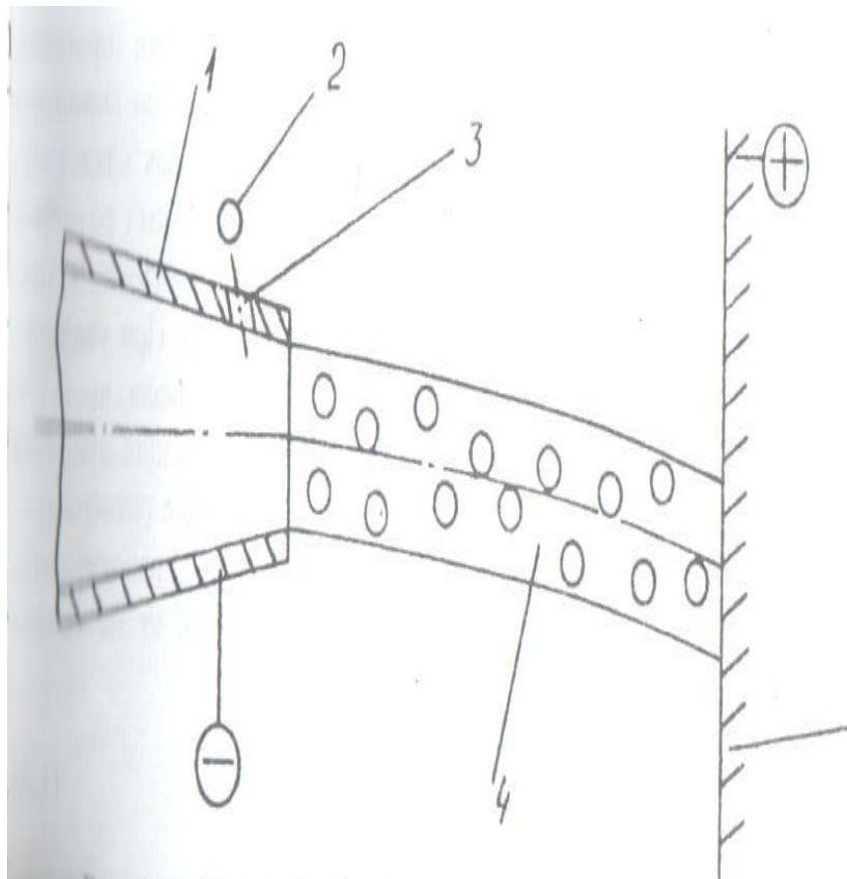


Рисунок 4.10 – Схема струйной обработки гранулами

1 – сопло; 2 – гранула; 3 – канал для подачи струи 4 гранул, подаваемых к зоне зачистки поверхности детали

Достоинством схемы на рисунке 4.10 является возможность обработки участков покрытий любой формы и размеров в труднодоступных (том числе внутренних ) частях деталей. Промышленное использование получила зачистка гранулами из соли, в том числе из общедоступной на базе хлористого натрия. Режимы обработки приведены в [37]

Аналогичная схема зачистки используется при использовании в качестве гранул частиц изо льда. Однако это достаточно сложная в эксплуатации и хранении система, где трудно совместить режимные параметры с показателями при изготовлении точных деталей в опытном производстве.

Взаимодействие покрытия и сверхзвукового потока гранул при гидроабразивной зачистке отмечено в [37], где установлено, что в результате их

столкновения при любых материалах происходит не всегда допустимое формирование поверхностного слоя обрабатываемого материала, обусловленное воздействием нескольких факторов: пластического деформирования, микрорезания и хрупкого разрушения, показанное на рисунке 4.11. Выделено три зоны, в которых может происходить изменение профиля разделения листа и свойств поверхностного слоя в период удаления покрытия.

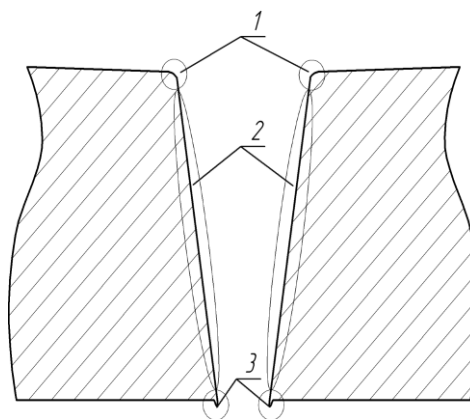


Рисунок 4.11 – Зоны воздействия потока гранул на обрабатываемый материал при гидроабразивной обработке

В первой зоне проявляется ударное воздействие гранул на покрытие и материал детали, когда образуется глубокий кратер (рисунок 4.11), соответствующий форме частицы абразива, что связано с его малой упругой деформацией. При соударении появляются осколки абразивных частиц, которые разлетаются и образуют кратеры на поверхности обрабатываемого материала на расстоянии до первого соударения между собой и обрабатываемой поверхностью. Такие кратеры не допустимы для особоточных деталей, так как образуют дефектные участки на детали (см. рисунок 4.11).

Толщина слоя, где формируются такие дефекты при чистовой обработке, может составлять 0,05-0,5 мм, а при черновой 0,5-1,2 мм. Этого можно избежать за счет отработки режимов гидроабразивной обработки с наложением электрического поля.

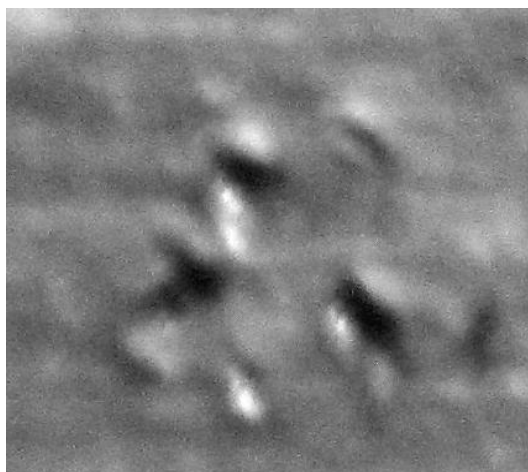


Рисунок 4.12 – Местные неровности, образованные при соударении гранул с обрабатываемой поверхностью

Вторая зона возникает (рисунок 4.12) при взаимодействии потока гранул в случае подачи их под малым углом атаки. Особенно это проявляется при сложном профиле участка в зоне обработки по фотошаблону, хотя такие соударения желательны при удалении хрупкого покрытия из фоторезиста, что замедляет или исключает нарушение качества поверхностного слоя детали под покрытием.



Рисунок 4.13 – Поверхность вдоль контура разделения на кромке детали со стороны входа гидроабразивной струи



Шероховатость, приведенная на рисунке 4.13, имеет гребенчатую структуру и может содержать дефектный измененный слой.

Для получения качественного поверхностного слоя после гидроабразивного разделения алюминиевых листов толщиной 1,2 мм на установке для гидроабразивной резки модели PTV WJ3020E 1Z-D 37 с давлением рабочей среды 415 МПа показали, что относительный наклеп поверхностного слоя на входе гидроабразивной струи в разделяемый материал составляет 132 %, а на выходе 139%. Глубина залегания наклепа составляет до 0,12 мм. Изменение режимов гидроабразивной обработки приводит к возрастанию степени относительного наклепа, что может создать уклон разделяемой поверхности, расширение гидроабразивной струи вдоль трассы ее течения, ухудшение точности обработки. Для удаления покрытия следует отрабатывать режимы гидроабразивной зачистки для каждого материала детали, что ограничивает использование метода в опытном производстве.

В источнике [37] приведен способ очистки деталей без использования струи, подаваемой под давлением по схеме на рисунке 4.14, где поверхностный слой удаляется гранулами 4 за счет анодного растворения при колебании гранул 4 в корпусе 1 на сетках 2 и 3.

Достоинством схемы на рисунке 4.14 является простота и возможность быстрой переналадки, а ограничением служит труднодоступность подачи гранул в зону обработки. Подобная схема нашла ограниченное использование при удалении загрязнений и заусенцев на кромках деталей.

Приведенный анализ показал, что для зачистки деталей из мягких материалов целесообразно преимущественно использовать струйные и анодномеханические процессы обработки непрофилированным инструментом с гранулами из мягких материалов, не нарушающих поверхностные характеристики детали и точность ее профиля.

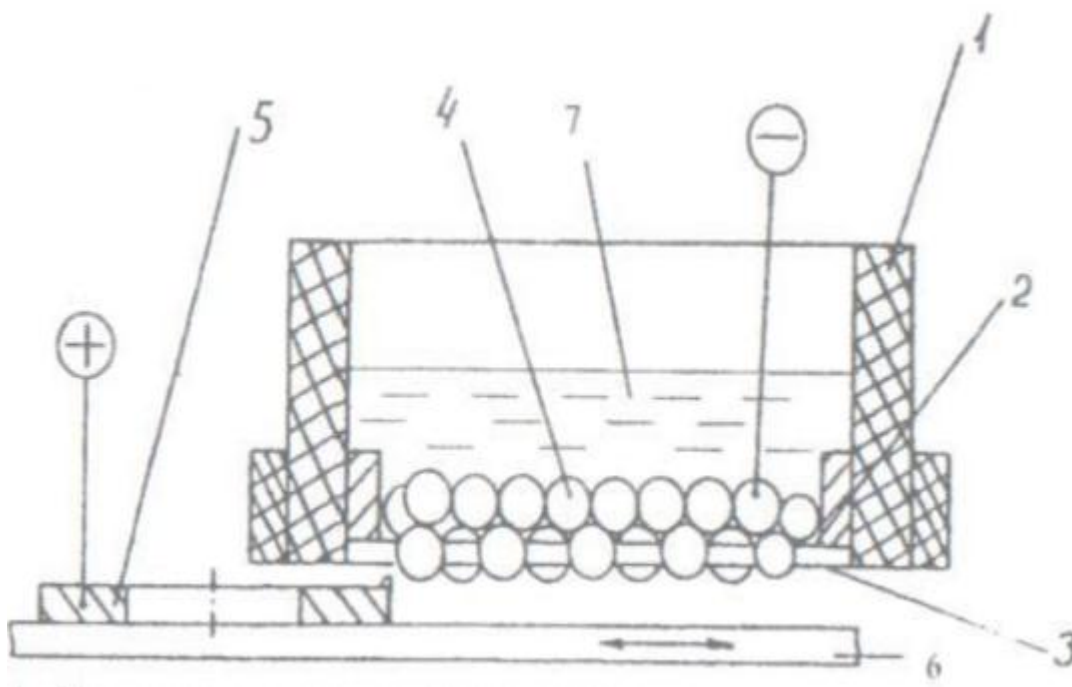


Рисунок 4.14 – Схема виброударной комбинированной зачистки поверхности гранулами

1 – корпус; 2 – диэлектрическая сетка; 3 – сетка металлическая; 4 – токопроводящая гранула; 5 – деталь; 6 – подвижный металлический стол; 7 – электролит

#### **4.6 Технология и использование аддитивной автоматизированной системы изготовления партий листовых деталей по одноразовым шаблонам**

Опыт использования фотошаблонов для изготовления малых партий деталей из листовых материалов показал, что дальнейшее развитие техники в этом направлении должно идти по пути устранения недостатков, выявленных при создании самих фотошаблонов. Для этого можно успешно применять результаты разработок последних лет по использованию взамен фотошаблонов шаблонов с контуром, получаемым аддитивным методом в готовом виде непосредственно на заготовке детали перед ее окончательной обработкой из листа. Такая система характеризуется высоким уровнем автоматизации процесса, не требует химической и термической обработки шаблона, связана с развитием применения в машиностроении достаточно простых и доступных 3D-принтеров.

Переход на аддитивные технологии получения высокоточных, быстропереналаживаемых шаблонов все больше становится основным способом получения деталей из листа в опытном производстве.

#### 4.6.1. Объект исследования

Построение технологии проектирования и изготовления шаблонов и по ним малых партий деталей включает несколько этапов. Объекты (рисунок 4.15) показаны на примере прецизионной детали – пластины из листа электротехнической стали толщиной 0,35 мм с допуском  $\pm 10$  мкм, применяемой для создания маломощных электродвигателей управления в авиакосмических системах [88].

Металлический лист поступает с завода-изготовителя с глянцевой поверхностью после проката, и возможно – нагартовки. До начала работ необходимо: обработать лист наждачной бумагой, придав ему неглубокую шероховатость. Далее поверхность необходимо травить кислотными составами. При проведении работы использовались два варианта: травитель марбле 100%,  $\frac{1}{2}$  травитель Марбле +  $\frac{1}{2}$  объема спирта. Наиболее ярко травится лист по варианту травителя Марбле 100%. Также использовался вариант нанесения клеевого состава на поверхность листа, что дало отрицательный результат.

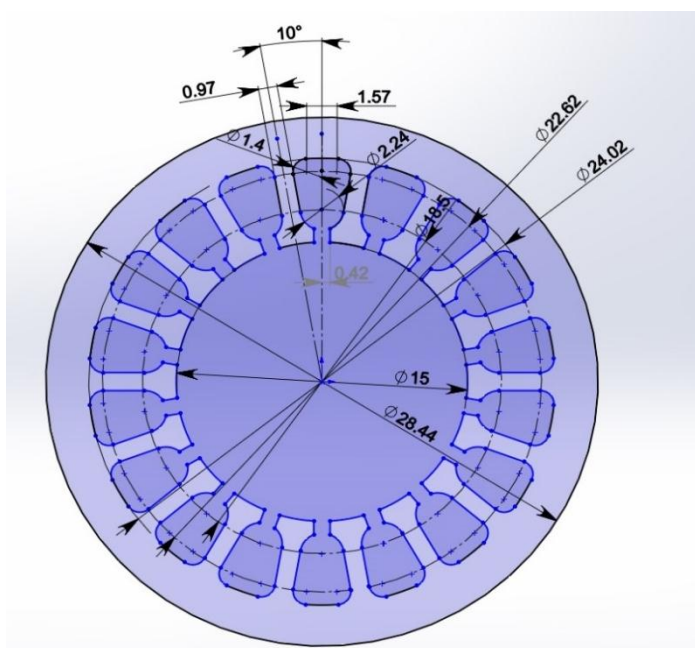


Рисунок 4.15 – Эскиз модели шаблона для изготовления пластины на 3D-принтере

По эскизу на бумажном носителе детали выполнено построение в CAD программе Solidworks 2018 эскиза на плоскости листа заготовки. (рисунок 4.15) Полученный контур эскиза в программе Solidworks 2018 после назначения толщины по листу может быть использован для создания объёмного тела., компьютерная модель которого в формате STL может быть передана на компьютер. управляющий нанесением слоев покрытия по контуру детали при нанесении шаблона.

4.6.2 Создание программы для 3D-печати детали по шаблону (см. приложение).

На втором этапе создания техпроцесса для изготовления детали по шаблону на рисунке 4.15 создают программу для 3D-печати детали по шаблону.

Программу типа Insight выполняют путем загрузки STL файла с разработанной трёхмерной моделью и разрабатывают программу для 3D-печати на оборудовании Fortus 450 mc фирмы «Stratasys».

Для получения рассматриваемой на рисунке 4.15 детали малых габаритов применимы следующие параметры в программы Insight:

- использованы фильтры T10. Толщина слоя для детали – 0,127 мм.
- достигнуто высокое качество поверхности детали;
- использован качественный пластик марки ABS-M30 (артикул 355-02110);
- исключен водорастворимый материал поддержки SR-30 в технологии за счет применения пластика с надежным прилеганием покрытия непосредственно к металлическому листу без прослойки материала поддержки;
- обеспечено максимальное заполнение тела детали.

Программа в автоматическом режиме разделяет тело STL файла на требуемое количество слоёв для нанесения. По результатам вычисляется затрачиваемое количество материала и время изготовления. Для одной детали шаблона потребовалось 0,76 см<sup>3</sup> пластика фирмы «Stratasys» марки ABS-M30. Время изготовления одной детали – 2 минуты, время нанесения слоя – 40 секунд

(не учитывая время на нагрев, калибровку, очистку фильер после каждого нанесения слоя).

Программа сохраняется в памяти компьютера в формате Job.

4.6.3 План построения технология изготовления диэлектрического шаблона на металлическом листе для детали

Далее создается план построения технология изготовления диэлектрического шаблона на металлическом листе с подложкой, где учитываются следующие условия:

1. Металлический лист под деталь нарезать на квадраты  $\sim 200 \times 200$  мм.
2. Подготовить квадраты (рисунок 4.16), для чего: наждачной бумагой мелкой зернистости (P400) нанести на поверхность листа шероховатость с произвольной направленностью, нанести тампоном на поверхность травитель Марбле, промыть лист в проточной воде или спирте и высушить на воздухе.

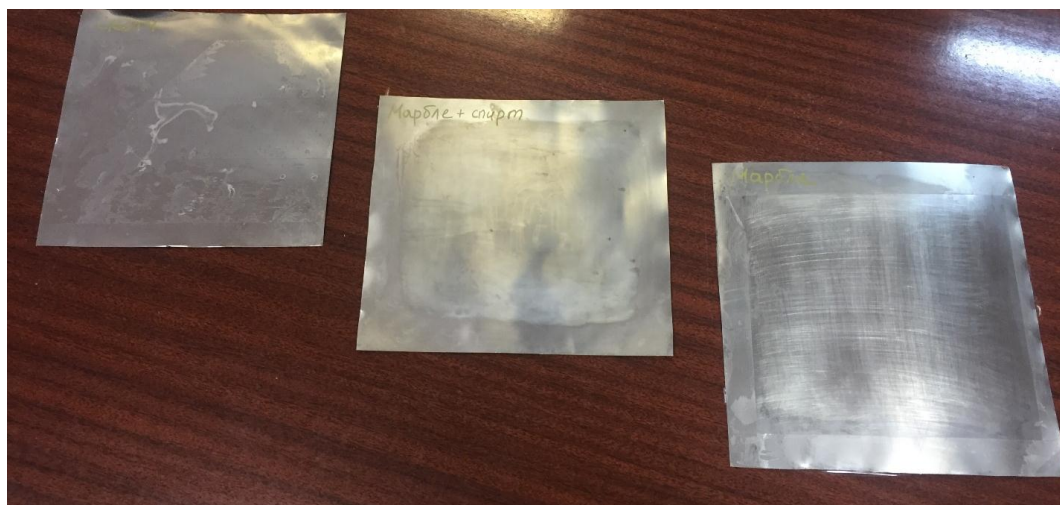


Рисунок 4.16 – Листы стали после подготовки к нанесению диэлектрического пластика (нанесение клея, использование травителя Марбле, промывка в спирте)

3. Приклеить клеящей лентой края металлического квадрата на акриловую подложку из листов фирмы «Stratasys» Foundation Sheet (ABS/PC) Fortus 450mc .

4. Настройки кинематической системы 3D-принтера изменить по оси «z» с учётом толщины металлического листа.

5. Установить акриловый лист на вакуумный стол 3D-принтера. Закрыть дверь камеры.

6. Включить 3D-принтер. Нагреть воздух в камере 3D-принтера до температуры 330 К.

7. Выполнить 3D-печать покрытия по заданной программе на поверхность металлического листа.

8. Вынуть лист акриловой подложки, остудить на воздухе.

9. Смочить пластиковую деталь кистью с натуральным ворсом ацетоном (технический, сорт 1 ГОСТ 2768-84). Выдержать лист с деталью на воздухе 2–3 минуты.

4.6.4. Построение технологических операций для изготовления детали по шаблону на 3D-принтере

Для изготовления детали используется ПО «Control center». После запуска ПО «Control center» загрузить созданный файл формата Job (площадь поля в программе соответствует площади рабочего стола установки Fortus.) В поле появится контур детали с элементами поддержки.

Далее необходимо отмерить фактические координаты по осям x, y приклеенного металлического листа относительно рабочего стола 3D-принтера. В программе «Control center» задают координаты для печати детали в соответствии с координатами приклеенного листа и нажать кнопку «Build Job».

Через время, необходимое для нагрева фильер до рабочих температур, установка приступает к печати.

При печати следует отслеживать наложение слоёв пластика на подложку в течение всего времени изготовления детали. В случае обнаружения отслоений пластика или наматывания остатков на печатающую головку требуется выполнить технологическую остановку печати. По окончании печати рабочий стол установки опустить вниз камеры. Открыть дверь камеры и, используя термостойкие перчатки, извлечь лист подложки с полученной моделью.

На рисунке 4.17 приведены детали, полученные по одноразовым шаблонам с использованием аддитивных технологий.

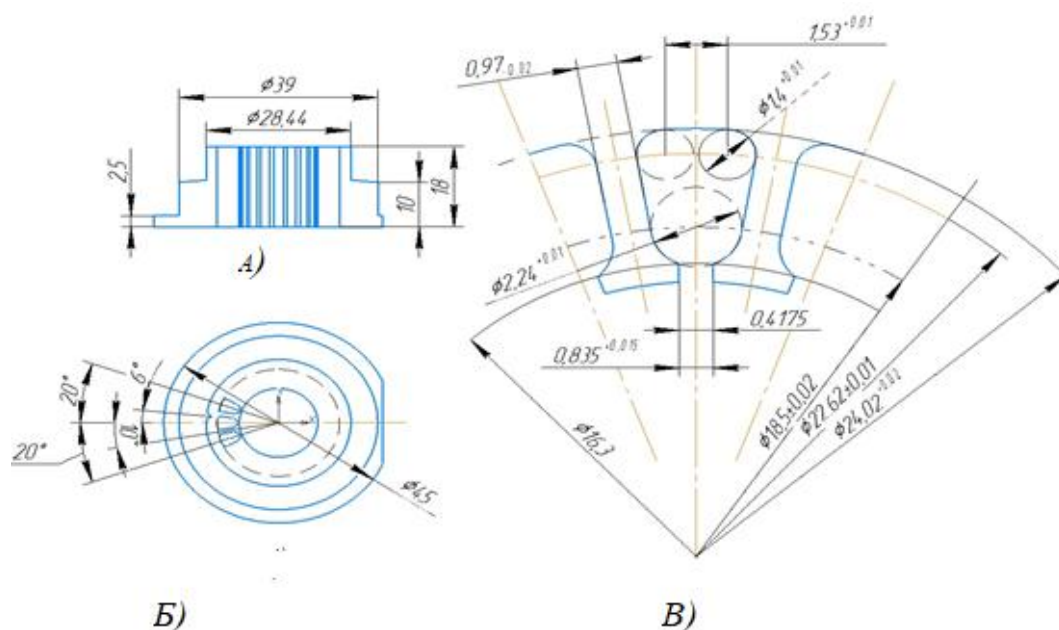


Рисунок 4.17 – Пластина статора (B), полученная по шаблону (рис. 4.) после изготовлению аддитивным методом по шаблону на рисунке 4, А – вырубной твердославной штамп для изготовления пластин (Б)

Сравнение результатов изготовления прецизионных деталей на вырубных штампах и по шаблонам, изготовленным по аддитивным технологиям (рисунок 4.15) показал, что точность профиля деталей по всем рассматриваемым технологиям укладывается в заданные допуски. При этом время переналадки технологической оснастки снижается в рассматриваем варианте технологии в 18–20 раз по сравнению со штамповкой и в 2–3 раза относительно изготовления пластин по фотошаблонам.

Как показано в работе [70] нанесение одноразовых диэлектрических шаблонов по аддитивным технологиям на стадии подготовки поверхности деталей при их изготовлении включает технологическую операцию создания на пластинах под покрытие искусственной шероховатости. Для многих прецизионных деталей из листа микронеровности не допустимы, так как они нарушают условия эксплуатации изделия после его сборки. В настоящее время без такой технологической операции не удастся обеспечить требуемую адгезию

наносимых слоев материала на шаблон. Поэтому аддитивные технологии при всех их преимуществах для изготовления шаблонов практически не востребованы в промышленности и требуются серьезные научные исследования для их применения без нарушения качества поверхностного слоя деталей. Очевидно, что это проблема ближайшего будущего и ее решение откроет возможность расширения области использования аддитивных технологий в опытном производстве.

### **Выводы по главе**

1. Сформулированы основные положения 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 малых предприятий

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

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

4. Обоснована и реализована возможность регулирования в управлении 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.



## **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 деталей высокой точности для получения деталей с различным профилем и наклоном поверхностей в зоне разделения листовых материалов и стенок углублений с учетом специфики опытного производства, обеспечивающем ускорение на порядок и более темпы 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.

### Список использованных источников

1. А.с. 1673329 СССР. Способ изготовления диэлектрических деталей с отверстиями / В. П. Смоленцев и др. // Бюл. изобр. – 1991. – № 32.
2. А.с. 526484 СССР. Устройство для электрохимической обработки плоских деталей / В.П. Смоленцев, Р. Г. Яруллин, П.С. Яшин, З.Б. Садыков // Открытия. Изобретения. – 1976. – № 32.
3. А.с. 578178 СССР. Способ электрохимической обработки / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. // Бюл. изобр. – 1977. – № 40.
4. А.с. 599951 СССР. Способ электрохимической. обработки / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. // Открытия. Изобретения. – 1978. – № 12.
5. А.с. 621519 СССР. Способ электрохимического получения углублений / З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев, Д.И. Панина // Открытия. Изобретения. – 1978. – № 32.
6. А.с. 674336 СССР. Электрод-инструмент для электрохимической обработки / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков // Открытия. Изобретения. – 1979. – № 26.
7. А.с. 737186 СССР. Электрод-инструмент / Т.П. Литвин, В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 20.
8. А.с. 755488 СССР. Электрод-инструмент / В.П. Смоленцев, А.А. Габагуев, З.Б. Садыков // Бюл. изобр. – 1980. – № 30.
9. А.с. 778981 СССР. Способ электрохимической обработки / В.П. Смоленцев, Ш.С. Гафиатуллин, З.Б. Садыков А.А. Габагуев // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 42.
10. А.с. 914227 СССР. Способ электрохимической обработки / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков, И.М. Шаршаков, Т.П. Литвин // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 11.
11. Абдукаримов Э.Т. Прошивка сверхглубоких отверстий малого диаметра электроэрозионным способом / Э.Т. Абдукаримов, С.Я. Саилинов // Электронная обработка материалов. – 1989. – № 1. – С. 5-8.

12. Амирханова Н.А. Анодное растворение жаропрочных сплавов на никелевой основе в растворах солей применительно к ЭХРО / Н.А Амирханова, А.К. Журавский, Н.Г. Ускова // Электронная обработка материалов. – 1972. – № 6. – С. 19–23.
13. Атанасянц А.Г. Анодное поведение металлов / А.Г. Атанасянц. – М.: Металлургия, 1989. – 151 с.
14. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 1999. – 624 с.
15. Болдырев А.И. Электрохимикомеханическая обработка / А.И. Болдырев. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. – 243 с.
16. Болдырев А.И. Обеспечение заданного качества поверхностного слоя каналов комбинированной обработкой / А.И. Болдырев // Известия ОрелГТУ. – 2009. – № 2. – С. 26-30.
17. Болдырев А.И. Развитие нетрадиционных технологий / А.И. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки: сб. науч. тр. – М.: Машиностроение, 2006. – Вып. 9. – С. 3-8.
18. Газизуллин К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах / К.М. Газизуллин. – Воронеж: ВГУ, 2002. – 243 с.
19. Газизуллин К.М. Влияние температурного фактора при электрохимической размерной обработке на точность формообразования / К.М. Газизуллин // Металлообработка. – 2002. – № 2. – С. 11-12.
20. Галиева Р.И. Перфорация тонкостенных деталей электрохимическим способом / Р.И. Галиева // Гибкие производственные системы в электротехнологии (ГМС ЭМО 88): тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Уфа: УПИ, 1988. – С. 146–147.
21. Зайцев А.Н. Электроэрозионно-химическая прошивка отверстий малого диаметра в деталях из высокопрочных сталей и сплавов / А.Н. Зайцев // Машиностроит. пр-во. Сер. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Обзор. Информ. – М.: Вниитэмр, 1991. – Вып. 2. – 48 с.

22. Зайцев А.Н. К выбору оптимальных режимов электроэрозионно-химической прошивки отверстий малого диаметра / А.Н. Зайцев, В.Х. Багманов, А.К. Журавский // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1980. – № 11. – С. 10–11.

23. Зайцев А.Н. Расчет параметров системы защиты от коротких замыканий на станках для электрохимической обработки вибрирующим электродом-инструментом / А.Н., Зайцев, В.П. Житников // Электронная обработка материалов. – 1990. – № 3. – С. 13–19.

24. Закирова А.Р. Влияние многослойного покрытия на точность электрохимической размерной обработки / А.Р. Закирова, В.В. Клоков, З.Б. Садыков // Современные электрохимические технологии в машиностроении: материалы IV междунар. науч.-практ. семинара. – Иваново: ИГХТУ, 2003. – С. 60–61.

25. Закирова А.Р. Гидродинамическое воздействие электролита на изоляцию при ЭХО / А.Р. Закирова, В.В. Клоков, З.Б. Садыков // Труды семинара по краевым задачам: сб. науч. тр. – Казань: КГУ. – 1993. – С. 21–36.

26. Закирова А.Р. Повышение точности электрохимического формообразования с покрытием на аноде / А.Р. Закирова, В.В. Клоков, З.Б. Садыков // Труды КГТУ, Казань: КГТУ, 200., – № 1. – С. 3–32.

27. Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров / А.М. Кадырметов // Воронеж: Научная книга, 2013. – 260 с.

28. Каримов А.Х. Методы расчета электрохимического формообразования / А.Х. Каримов, В.В. Клоков, Е.И. Филатов // Казань: Изд-во КГУ, 1990. – 388 с.

29. Киреев П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев // М.: Высш. шк., 1975. – 584 с.

30. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом / О.Н. Кириллов. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2010. – 254 с.

31. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лизуткин // М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

32. Клепиков Р.П. Скоростное электроэрозионное прошивание глубоких отверстий малого диаметра / Р.П. Клепиков, Г.А. Алексеев // Станки и инструмент. – 1989. – № 9. – С. 42.

33. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. – Воронеж: ВГТУ, 1996. – 168 с.

34. Котляров В.П. Методы повышения качества лазерной обработки отверстий / В.П. Котляров // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 2. – С. 5–13.

35. Крохин Д.Е. Аддитивные технологии изготовления электродов-инструментов / Д.Е. Крохин, В.П. Смоленцев, И.Г. Стародубцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 6. – С. 276–282.

36. Крылов В.С. Особенности процессов переноса в условиях электрохимического растворения металлов при высоких плотностях тока / В.С. Крылов, К.Д. Давыдов // Новое в электрохимической размерной обработке металлов: сб. науч. тр. – Кишинев: Штиинца, 1972. – С. 13–15.

37. Кузовкин А.В. Комбинированная обработка несвязанным электродом / А.В. Кузовкин. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. – 180 с.

38. Лаутрелл и Кук. Высокоскоростная электрохимическая обработка / Лаутрелл и Кук // Труды американского общества инженеров-механиков, серия В – 95. 1973. – № 4. – С. 89-94.

39. Любимов В.В. Особенности расчета припусков на электрохимическую обработку в две стадии / В.В. Любимов, Л.Б. Дмитриев, А.Б. Облов // Технология машиностроения: сб. науч. тр. – Тула: ТПИ, 1975. – Вып. 39. – С. 25–35.

40. Машиностроение. / под ред. А.Г. Сулова // Энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. III. – 840 с.

41. Мочалова Г.Л. Влияние микроструктуры стали на обрабатываемость ее электрохимическим методом / Г.Л. Мочалова // Вестник машиностроения. – 1970. – № 8. – С. 51–53.

42. Мочалова Г.Л. Изучение процесса электрохимической обработки деформированного металла / Г.Л. Мочалова // Электрохимическая размерная обработка металлов, – Кишинев: Штиинца, 1974. – С. 100–105.

43. Научно-технические технологии в машиностроении. / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

44. Новые электротехнологические процессы в машиностроении / под ред. Б.П. Саушкина. – Кишинев: КПИ им. С. Лазо, 1990. – 127 с.

45. Норман А. В. Оборудование для изготовления отверстий малого диаметра / А.В. Норман // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2005. – Вып. 7. – С. 119 – 125.

46. Организационные и экономические исследования в машиностроении / под ред. В.П. Смоленцева. – Воронеж: Научная книга, 2006. – 181 с.

47. Пат. 1260038 Российская Федерация. Устройство для нанесения покрытий на пластины / Палий О.И., Ловгач В.Н. – № 3887881, заявл. 19.04.86; опубл. 30.09.88, Бюл. № 36.

48. Пат. 2257981 Российская Федерация. Способ электрохимической обработки / Закирова А.Р., Садыков З.Б., Смоленцев В.П., Газизуллин К.М. – № [2004107811/02](#), заявл. 16.03.2004; опубл. 10.08.2005, Бюл. № 22.– 8 с.

49. Пат. RU №2158987 С1 Н01L21/312. Способ получения покрытия из фоторезиста и устройство для его осуществления / Абрамов Г.В., Битюков В.К., Коваленко В.Б., Попов Г.В. – № 99111801, заявл. 27.06.1999, – выдан 10.11.2000. Не публикуется.

50. Пат. № 2217841 Российская Федерация, С1 Н01L21/312. Устройство для нанесения покрытий на пластины / Абрамов Г.В., Котляров М.М., Попов Г.В.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение «Воронежская государственная технологическая академия» –

№ 2002128753/28, 25.10.2002; заявл. 25.10.2002; опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33.  
Не публикуется.

51. Пат. № 2568404 Российская Федерация. Способ изготовления шаблона из эластичного гибкого листового диэлектрического материала для электрохимической размерной обработки / Смоленцев В.П., Мозгалин В.Л., Юхневич С.С., Коптев И.Т.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». – № 2013158250/02, заявл. 26.12.2013; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 7 с.

52. Пат. № 2625378 Российская Федерация. Способ групповой прошивки и устройство для его реализации / Смоленцев В.П., Кузовкин А.В., Шаров Ю.В., Золотарев В.В.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2014108900; заявл. 06.03.2014; опубл. 13.07.2017, Бюл. № 20. – 7 с.

53. Пат. № 2712600 Российская Федерация, D01D 27/06 (2919.05). Способ изготовления металлического многослойного фильтра и устройство для его изготовления / Смоленцев В.П., Широкожухова А.А., Шаров Ю.В.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2018133369; заявл. 20.09.2018; опубл. 29.01.2020, Бюл. № 4. – 11 с.

54. Пат. № 2778809 Российская Федерация, B23H /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.

55. Пат. № 1260038 СССР, С1. Устройство для нанесения покрытий на пластины / Палий О.И., Ловган В.Н.; заявитель и патентообладатель Гомельский



политехнический институт. – № 3887881; заявл. 19.04.1985; опубл. 30.09.1986, Бюл. № 24, –10 с.

56. Пат. № 2275994 Российская Федерация. Способ электрохимической обработки листовой заготовки и устройство для его осуществления / Закирова А.Р., Садыков З.Б., Смоленцев Е.В., Одинцов И.А.; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, – № 2004116708/02; заявл. 01.06.2004; опубл. 10.05.2006, Бюл. № 13. – 7 с.

57. Пат. № 2275279 Российская Федерация. МПКВ23Н 3/00 (2006.01) Способ электрохимического разделения листовых материалов / Смоленцев М.Г., Смоленцев Е.В., Рябова С.А. Коптев И.Т.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2004122325/02; заявл. 20.07.2004; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 12. – 5 с.

58. Румянцев Е.М. Технология электрохимической обработки металлов / Е.М. Румянцев, А.Д. Давыдов. – М.: Высш. шк., 1984. – 159 с.

59. Садыков З.Б. Оснащение оборудования для ЭХО с неподвижными электродами средствами регулирования и управления процессом / З.Б. Садыков // Развитие и совершенствование электрохимических и электрофизических методов обработки. – Казань: НТО Машпром, 1977.

60. Садыков З.Б. Прецизионная резка заготовок / З.Б. Садыков, А.Р. Закирова // Новые процессы получения и обработки металлических материалов: науч. тр. Всерос. конф. АН СССР – Воронеж:, 1990. – С. 8-14.

61. Садыков З.Б. Об эффекте нанесения изоляции на электроды при электрохимической обработке / З.Б. Садыков, В.В. Клоков, В.П. Смоленцев // Вопросы физики формообразования и фазовых превращений. – Калинин: Калинин. ун-т, 1977.

62. Садыков З.Б. Изменение свойств электролита в процессе эксплуатации / З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев // Совершенствование технологии и оборудования для электрохимической размерной обработки крупногабаритных деталей. – Казань: КФ НИАТ, 1977.

63 Садыков З.Б. Основные принципы регулирования и управления процессом электрохимической обработки с неподвижными электродами / З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев // Технология производства и прочность деталей летательных аппаратов и двигателей. – Казань: Казан. авиац. ин-т, 1978. – Вып. 1.

64 Садыков З.Б. Способы воздействия на процесс ЭХО с неподвижными электродами / З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – Саратов: НИТИ, 1976, – № 3.

65. Саушкин Б.П. О динамике анодной поверхности при ЭХРО металлов в нестационарных условиях / Б.П. Саушкин // Электронная обработка материалов. – 1973. – № 5. – С. 11-14.

66. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий / С.В. Сафонов. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. – 232 с.

67. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин / Седыкин Ф.В. – М.: Машиностроение, 1976. – 302 с.

68. Седыкин Ф.В. Системы регулирования в станках для размерной электрохимической обработки / Ф.В. Седыкин, Л.Б. Дмитриев // Электрохимическая размерная обработка металлов: сб. науч. тр. // М.: ГОСИНТИ, 1967. – С. 20–42.

69. Седыкин Ф.В. Интенсификация процесса электрохимической обработки введением ультразвуковых колебаний / Ф.В. Седыкин, Н.И. Иванов // Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов: сб. науч. тр. – Л.: Машиностроение, 1972. – С. 23-25.

70. Смоленцев В.П. Аддитивные технологии изготовления инструментов для комбинированных методов обработки / В.П. Смоленцев, Р.Н. Ненахов, А.А. Извеков, И.Г. Стародубцев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133) – С. 3-8.

71. Смоленцев В.П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов / В.П. Смоленцев // Электрохимическая обработка металлов: сб. науч. тр. – Кишинев: Штиинца, 1972.

72. Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом / В.П. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 1967. – 160 с.

73. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей / В.П. Смоленцев. – М: Машиностроение, 1978 – 176 с.

74. Смоленцев В.П. Технологические методы повышения ресурса наукоемких изделий / В.П. Смоленцев, С.В. Ковалёв, Н.С. Поташникова // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2021. – № 7 – С. 3–11.

75. Смоленцев В.П. Математическая модель гидродинамического процесса при электрохимической размерной обработке труб / В.П. Смоленцев, В.П. Гутиков, Р.М. Латыпова // Вопросы гидродинамики процесса ЭХО: сб. науч. тр. – Тула: ТПИ, 1969.

76. Смоленцев В.П., Поташникова Н.С., Стародубцев И.Г. 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.

77. Смоленцев В.П. Локализация рабочей зоны при электрохимической обработке деталей / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков, В.В. Клоков // Прогрессивные методы обработки деталей летательных аппаратов и двигателей. – Казань: Казанский авиац. ин-т., 1980.

78. Смоленцев В.П. Организационные и экономические исследования в машиностроении / В.П. Смоленцев, А. В. Бондарь, Г.Н. Климова, Е.В. Смоленцев и др.; под ред. В.П. Смоленцева // Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2006. – 92 с.

79. Смоленцев В.П. Электрохимическое маркирование / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. – М.: Машиностроение, 1983. – 72 с.

80. Смоленцев В.П. Электрохимическое получение отверстий малого диаметра в диэлектриках / В.П. Смоленцев, В.В. Трофимов // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 6. – С. 76–80.

81. Смоленцев Г.П. Математическое моделирование многофункциональных нестационарных процессов / Г.П. Смоленцев // Гибкоструктурные

нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: сб. науч. тр. – Воронеж: АТН РФ, 1996. – С. 29-33.

82. Смоленцев Г.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев // Воронеж: Изд-во ВГТУ, – 2000. – 103 с.

83. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

84. Соболев И.А. Электрохимическая струйная обработка, технологические возможности метода в составе ГПС / И.А Соболев, П.Г. Ерофеев, Р.А. Зарипов // Гибкие производственные системы в электротехнологии (ГПС ЭМО-88): тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Уфа: УПИ, 1988. – С. 121–122.

85. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 944 с.

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

87. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина // М.: «Инновационное машиностроение», 2018. Т. 2. – 818 с.

88. Справочник технолога под ред. А.Г. Сулова // М.: «Инновационное машиностроение», – 2019. – 800 с.

89. 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.

90. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, – 1974.

91. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев. – М.: Машиностроение, 2004. – 287 с.
92. Технология и экономика электрохимической обработки / В.В. Любимов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 192 с.
93. Технология электрохимических методов обработки / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев, В.И. Гунин. – Воронеж: ВГТУ, 2002. – 310 с.
94. Шманев В.А. Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении / В.А. Шманев, В.Г. Филимошин, А.Х. Каримов, Б.Н. Петров, Н.Д. Проничев. – М.: Машиностроение, 1986. – 168 с.
95. Феттер К. Электрохимическая кинетика: пер. с нем. – М.: Химия, 1967. – 856 с.
96. Филин В.И. Некоторые методологические проблемы электрохимической размерной обработки / В.И. Филин, Ф.В. Седыкин // Технология машиностроения: сб. науч. тр. – Тула: ТПИ, 1971. – Вып. 13. – С. 4-12.
97. Хоупенфелд Дж. Расчет и корреляция переменных процесса электрохимической обработки металлов / Дж Хоупенфелд, Р. Коул // Конструирование и технология машиностроения: труды американского общества инженеров-механиков. Серия В. 1966. – № 4. – С. 130–136.
98. Черепанов Ю.П. Электрохимическая обработка в машиностроении / Ю.П. Черепанов, Б.И. Самецкий. – М.: Машиностроение, 1972. – 113 с.
99. Щеднов А.В. Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам / А.В. Щеднов, В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 1. – С. 89 – 96.
100. Щербаков Л.М. Физико-химические основы теории формообразования поверхностей при размерной электрохимической обработке / Л.М. Щербаков // Физика и химия обработки материалов. – 1968.– № 5. – С. 36–39.

101. Электродные процессы и технология электрохимического формообразования / под ред. Ю.Н. Петрова // Кишинев: Штиинца, 1987. – 204 с.
102. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983.
103. Электрохимическая обработка металлов / под ред. И.И. Мороза. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.
104. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы / В.А. Головачев и др. – М.: Машиностроение, 1969. – 198 с.
105. Электрохимическая размерная обработка металлов / под ред. Ю.Н. Петрова. – Кишинев: Штиинца, 1974. – 145 с.
106. Bellows Guy. Effect of ECM on surface integrity. – "The Tool and Manufacturing Engineer". 1968, V. 61, No. 13. P. 66-69.
107. Bellows Guy. Surface integrity of electrochemical machining. – "Paper Amer. Soc. Mech. Eng.", 1970, NGT – 111. P. 16.
108. Christiansen K.A. e. A. Anodic dissolution of iron. – "Acta Chemica Scandinavica", 1961, V. 15.
109. Der-Tau Chin and Wallace A.J.Jr. Anodic Current Efficiency and Dimensional Control in Electrochemical Machining. – J. Electrochem. Soc., 120. N 11. 1973. P. 1487-1493.
110. Norman 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 Online: 2022.
111. Izvekov.A.The field of use of additive technologies/ Alexandr Izvekov,Vladislav Smjlentse,Nikolai Nenakhov, Igori Starodubtsev// Journal of Clinical Review J.Clin Cast Rep 2022,Vol.7,Issue .8,P.103.
112. Sadikov Z.B. Finishing-stripping treatment of high-precision parts / 3.Б. Садыков, А.Р. Закирова, К.З. Садыков // Spstu-2000, USA. 2002.- P. 333-337.
113. Shirokozuhova A. Study of the strength characteristics of filtering elements made by electron-beam and electroerosion perforation methods/ A. Shirokozuhova,

Vasily Gritsyuk, A. Ryazantsev/// Materials Today: Proceedings (2020),  
doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.097 – P.1952-1955.

# Приложения

## А. Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель исполнительного  
директора по качеству



В. Г. Грицюк  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### Акт внедрения

результатов научно-исследовательской работы по комбинированной чистовой обработке металлокерамических покрытий на переходных участках камер сгорания ракетных двигателей

Комиссия в составе заместителя исполнительного директора АО КБХА по качеству, к.т.н. Грицюка В. Г. и главного металлурга АО КБХА к.т.н. Портных А. И., установила, что в результате проведения научно-исследовательских и прикладных исследований разработан, доведен до стадии промышленного внедрения технологический процесс комбинированной чистовой обработки переходных участков камер сгорания ракетных двигателей.

Работа выполнена с участием аспирантов кафедры технологии машиностроения ВГТУ Паничева Е. В., Поташниковой Н. С., Смоленцевой Я. С.

Результаты исследований применяются в процессе обработки и сборки комплексов ракетных двигателей в КБХА, а так же в учебном процессе ВГТУ.

По материалам исследований получено 4 патента РФ и опубликовано 8 научных статей.

Начало внедрения – 2017 г.

В результате внедрения решена актуальная проблема повышения эрозионной и термической стойкости проточного тракта двигателей с возможностью обеспечения многократного пуска и увеличение ресурса изделий.

Годовой экономический эффект от внедрения составляет 218 тыс. руб.

Комиссия:

Главный металлург

 А. И. Портных

Аспиранты:

 Е. В. Паничев

 Н. С. Поташникова

 Я. С. Смоленцева



Утверждаю:

Главный инженер  
(кандидат технических наук)

С.С. Юхневич

«\_\_\_» марта 2021 года

**АКТ  
внедрения результатов НИР**

Мы, представители Акционерного общества «Конструкторское бюро химавтоматики» (АО КБХА) настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Технология локальной групповой обработки каналов для газожидкостных потоков по многослойным шаблонам с дополнительным анодом», выполненной в рамках федеральной космической программы России на 2016-2025 годы под шифром «Феникс», утвержденной в уточненном варианте постановлением Правительства РФ от 09.12.2017 года № 1513., приняты к внедрению и внедрены на АО КБХА.

**1. Вид внедрения результатов:** Технология и средства технологического оснащения для изготовления локальных охладителей в форме профильных углублений с геометрией, обеспечивающей плавное течение на выходе потока газожидкостной среды для повышения теплоотдачи от стенки камеры сгорания и реактивного сопла.

**2. Область и форма внедрения:** Промышленное производство.

**3. Технический уровень НИР:**

- патент № 26699471 2019 г., патент № 2716387 2020 г. и др.

**4. Публикации по материалам НИР:**

Статьи в журналах: «Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам» // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. т.1.№17. С.89-96.; «Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов» // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. т.15.№8. С.369-374. и др.

**5. Эффект от внедрения (фактический):**

а) Социальный: улучшение условий труда, расширение области использования комбинированной обработки, высвобождение средств на социальные нужды.

б) Годовой экономический эффект 291 тыс. руб. (двести девяносто одна тысяча рублей).

Разработчик

  
А.В. Щеднов

Начальник финансово-экономического  
управления АО КБХА

  
Е.А. Киселев

Разработчик

  
В.П. Смоленцев

Заместитель главного инженера -  
главный технолог АО КБХА

  
С.М. Петренко

Б. Программа для автоматизированного изготовления шаблона с покрытием  
фоторезистом

M107

M140 S55

M104 S190

M117 Preheating

M190 S55

G28

G92 E0

G1 X10 Y204.5 Z5 F15240

G1 Z0.3 F15240

M109 S190

M117 Purge Printhead

G1 X127 Y204.5 Z0.3 E15 F1500

G92 E0

M117 FELIXprinting...

M106 S255

G1 E-1.5 F2400

G1 Z0.3

G0 X94.671 Y67.267 Z0.25 F9000

G1 Z0.25

G1 E0 F2400

G1 X96.071 Y65.46 E0.08532 F1200

G1 X97.557 Y63.689 E0.17161

G1 X99.095 Y61.995 E0.257

G1 X100.484 Y60.577 E0.33109

G1 X102.023 Y59.112 E0.4104

G1 X104.072 Y57.302 E0.51244

G1 X105.854 Y55.864 E0.59791

G1 X107.692 Y54.495 E0.68345

G1 X109.578 Y53.202 E0.76879  
G1 X111.511 Y51.983 E0.85409  
G1 X113.414 Y50.884 E0.93611  
G1 X115.531 Y49.767 E1.02545  
G1 X117.581 Y48.786 E1.11027  
G1 X119.678 Y47.881 E1.19552  
G1 X121.821 Y47.054 E1.28126  
G1 X123.982 Y46.315 E1.3665  
G1 X126.146 Y45.666 E1.45082  
G1 X128.188 Y45.138 E1.52954  
G1 X130.632 Y44.602 E1.62293  
G1 X132.881 Y44.206 E1.70817  
G1 X135.164 Y43.894 E1.79417  
G1 X137.426 Y43.674 E1.87899  
G1 X139.698 Y43.542 E1.96394  
G1 X141.856 Y43.498 E2.0445  
G1 X143.967 Y43.533 E2.1233  
G1 X146.593 Y43.676 E2.22146  
G1 X148.835 Y43.894 E2.30554  
G1 X151.117 Y44.206 E2.3915  
G1 X153.383 Y44.605 E2.47738  
G1 X155.594 Y45.084 E2.56182  
G1 X157.574 Y45.591 E2.6381  
G1 X159.618 Y46.195 E2.71765  
G1 X162.177 Y47.054 E2.8184  
G1 X164.32 Y47.881 E2.90414  
G1 X166.417 Y48.786 E2.98939  
G1 X168.478 Y49.772 E3.07466  
G1 X170.502 Y50.837 E3.16002  
G1 X172.15 Y51.786 E3.231

G1 X174.431 Y53.209 E3.33135  
G1 X176.293 Y54.486 E3.41562  
G1 X178.159 Y55.876 E3.50247  
G1 X179.94 Y57.313 E3.58788  
G1 X181.646 Y58.801 E3.67237  
G1 X183.298 Y60.36 E3.75715  
G1 X184.805 Y61.893 E3.83739  
G1 X186.441 Y63.689 E3.92807  
G1 X187.927 Y65.46 E4.01435  
G1 X189.328 Y67.267 E4.09969  
G1 X190.657 Y69.126 E4.18499  
G1 X191.917 Y71.043 E4.27061  
G1 X193.024 Y72.873 E4.35044  
G1 X194.071 Y74.761 E4.43101  
G1 X195.228 Y77.043 E4.52651  
G1 X196.177 Y79.132 E4.61215  
G1 X197.041 Y81.246 E4.69739  
G1 X197.831 Y83.416 E4.78358  
G1 X198.525 Y85.58 E4.8684  
G1 X199.07 Y87.531 E4.94401  
G1 X199.572 Y89.612 E5.02391  
G1 X200.106 Y92.255 E5.12455  
G1 X200.46 Y94.52 E5.21012  
G1 X200.723 Y96.769 E5.29463  
G1 X200.903 Y99.077 E5.38103  
G1 X200.991 Y101.337 E5.46545  
G1 X200.993 Y103.294 E5.53849  
G1 X200.99 Y103.682 E5.55298  
G1 X200.903 Y105.922 E5.63665  
G1 X200.725 Y108.207 E5.72219

G1 X200.46 Y110.479 E5.80757  
G1 X200.105 Y112.752 E5.89343  
G1 X199.666 Y114.985 E5.97837  
G1 X199.144 Y117.192 E6.06302  
G1 X198.572 Y119.255 E6.14292  
G1 X197.824 Y121.603 E6.2349  
G1 X197.041 Y123.753 E6.3203  
G1 X196.177 Y125.867 E6.40554  
G1 X195.226 Y127.959 E6.49131  
G1 X194.201 Y130 E6.57656  
G1 X193.169 Y131.876 E6.65647  
G1 X192.067 Y133.712 E6.7364  
G1 X190.656 Y135.875 E6.83279  
G1 X189.328 Y137.732 E6.918  
G1 X187.927 Y139.539 E7.00334  
G1 X186.445 Y141.305 E7.08939  
G1 X184.922 Y142.984 E7.174  
G1 X183.478 Y144.459 E7.25104  
G1 X181.953 Y145.91 E7.32961  
G1 X179.925 Y147.698 E7.43052  
G1 X178.159 Y149.123 E7.51521  
G1 X176.294 Y150.512 E7.60201  
G1 X174.421 Y151.797 E7.68679  
G1 X172.487 Y153.016 E7.77211  
G1 X170.828 Y153.975 E7.84364  
G1 X168.464 Y155.234 E7.9436  
G1 X166.417 Y156.213 E8.02829  
G1 X164.32 Y157.118 E8.11354  
G1 X162.177 Y157.945 E8.19928  
G1 X160.017 Y158.684 E8.28448

G1 X157.841 Y159.336 E8.36927  
G1 X155.791 Y159.866 E8.4483  
G1 X153.371 Y160.396 E8.54076  
G1 X151.117 Y160.793 E8.62619  
G1 X148.835 Y161.105 E8.71215  
G1 X146.573 Y161.325 E8.79698  
G1 X144.301 Y161.457 E8.88192  
G1 X142.139 Y161.502 E8.96263  
G1 X140.026 Y161.465 E9.04151  
G1 X137.406 Y161.323 E9.13944  
G1 X135.164 Y161.105 E9.22352  
G1 X132.881 Y160.793 E9.30952  
G1 X130.615 Y160.394 E9.3954  
G1 X128.404 Y159.915 E9.47984  
G1 X126.428 Y159.409 E9.55597  
G1 X124.375 Y158.802 E9.63588  
G1 X121.821 Y157.945 E9.73642  
G1 X119.678 Y157.118 E9.82216  
G1 X117.581 Y156.213 E9.90741  
G1 X115.52 Y155.227 E9.99268  
G1 X113.508 Y154.168 E10.07754  
G1 X111.584 Y153.059 E10.16043  
G1 X109.562 Y151.786 E10.24961  
G1 X107.692 Y150.504 E10.33423  
G1 X105.854 Y149.135 E10.41977  
G1 X104.076 Y147.7 E10.50505  
G1 X102.335 Y146.181 E10.59129  
G1 X100.72 Y144.658 E10.67415  
G1 X99.231 Y143.144 E10.7534  
G1 X97.542 Y141.293 E10.84693

G1 X96.071 Y139.539 E10.93237  
G1 X94.671 Y137.732 E11.01769  
G1 X93.342 Y135.873 E11.10298  
G1 X92.081 Y133.956 E11.18863  
G1 X90.988 Y132.149 E11.26745  
G1 X89.942 Y130.266 E11.34785  
G1 X88.77 Y127.956 E11.44453  
G1 X87.821 Y125.867 E11.53016  
G1 X86.957 Y123.753 E11.6154  
G1 X86.167 Y121.583 E11.7016  
G1 X85.476 Y119.427 E11.7861  
G1 X84.936 Y117.491 E11.86112  
G1 X84.435 Y115.422 E11.94057  
G1 X83.893 Y112.744 E12.04255  
G1 X83.538 Y110.479 E12.12812  
G1 X83.273 Y108.207 E12.2135  
G1 X83.096 Y105.924 E12.29897  
G1 X83.007 Y103.649 E12.38394  
G1 X83.005 Y101.432 E12.46669  
G1 X83.096 Y99.075 E12.55473  
G1 X83.275 Y96.769 E12.64106  
G1 X83.538 Y94.52 E12.72557  
G1 X83.896 Y92.235 E12.8119  
G1 X84.332 Y90.014 E12.89638  
G1 X84.845 Y87.845 E12.97957  
G1 X85.421 Y85.763 E13.06019  
G1 X86.172 Y83.403 E13.15263  
G1 X86.957 Y81.246 E13.23831  
G1 X87.821 Y79.132 E13.32354  
G1 X88.772 Y77.04 E13.40932

G1 X89.796 Y74.999 E13.49454  
G1 X90.812 Y73.155 E13.57313  
G1 X91.912 Y71.319 E13.65301  
G1 X93.343 Y69.124 E13.75081  
G1 X94.671 Y67.267 E13.83602  
G1 E12.33602 F2400  
G1 Z0.55  
G0 X132.582 Y94.908 F9000  
G1 Z0.25  
G1 E13.83602 F2400  
G1 X131.92 Y95.811 E13.87781 F1200  
G1 X131.373 Y96.722 E13.91747  
G1 X130.893 Y97.706 E13.95833  
G1 X130.506 Y98.729 E13.99916  
G1 X130.213 Y99.779 E14.03985  
G1 X130.02 Y100.829 E14.07969  
G1 X129.917 Y101.916 E14.12045  
G1 X129.913 Y103.005 E14.16109  
G1 X130.008 Y104.098 E14.20204  
G1 X130.195 Y105.146 E14.24177  
G1 X130.481 Y106.196 E14.28239  
G1 X130.863 Y107.225 E14.32336  
G1 X131.333 Y108.207 E14.36399  
G1 X131.876 Y109.121 E14.40367  
G1 X132.518 Y110.011 E14.44463  
G1 X133.232 Y110.834 E14.4853  
G1 X134.018 Y111.59 E14.526  
G1 X134.853 Y112.258 E14.56592  
G1 X135.757 Y112.861 E14.60647  
G1 X136.717 Y113.382 E14.64724



G1 X137.724 Y113.815 E14.68816  
G1 X138.732 Y114.146 E14.72775  
G1 X139.794 Y114.392 E14.76844  
G1 X140.88 Y114.544 E14.80937  
G1 X141.936 Y114.595 E14.84883  
G1 X142.036 Y114.596 E14.85256  
G1 X143.031 Y114.551 E14.88974  
G1 X144.12 Y114.409 E14.93073  
G1 X145.179 Y114.171 E14.97124  
G1 X146.22 Y113.836 E15.01206  
G1 X147.224 Y113.41 E15.05277  
G1 X148.161 Y112.909 E15.09242  
G1 X149.076 Y112.309 E15.13326  
G1 X149.932 Y111.632 E15.174  
G1 X150.723 Y110.881 E15.21471  
G1 X151.427 Y110.078 E15.25457  
G1 X152.038 Y109.243 E15.29318  
G1 X152.084 Y109.182 E15.29604  
G1 X152.634 Y108.264 E15.33598  
G1 X153.112 Y107.279 E15.37684  
G1 X153.488 Y106.282 E15.41661  
G1 X153.781 Y105.235 E15.45719  
G1 X153.982 Y104.156 E15.49816  
G1 X154.082 Y103.072 E15.53879  
G1 X154.085 Y102.009 E15.57846  
G1 X153.992 Y100.916 E15.61941  
G1 X153.801 Y99.843 E15.66009  
G1 X153.513 Y98.789 E15.70087  
G1 X153.139 Y97.786 E15.74082  
G1 X152.679 Y96.819 E15.78079

G1 X152.617 Y96.707 E15.78557  
G1 X152.113 Y95.863 E15.82226  
G1 X151.487 Y94.997 E15.86214  
G1 X150.775 Y94.174 E15.90276  
G1 X149.988 Y93.417 E15.94352  
G1 X149.146 Y92.741 E15.98382  
G1 X148.247 Y92.142 E16.02414  
G1 X147.287 Y91.62 E16.06492  
G1 X146.279 Y91.186 E16.10589  
G1 X145.245 Y90.847 E16.1465  
G1 X144.206 Y90.608 E16.18629  
G1 X143.119 Y90.455 E16.22726  
G1 X142.063 Y90.404 E16.26672  
G1 X141.961 Y90.403 E16.27053  
G1 X140.965 Y90.448 E16.30774  
G1 X139.878 Y90.59 E16.34866  
G1 X138.818 Y90.828 E16.38921  
G1 X137.797 Y91.156 E16.42924  
G1 X136.788 Y91.583 E16.47013  
G1 X135.831 Y92.092 E16.51059  
G1 X134.941 Y92.677 E16.55034  
G1 X134.88 Y92.719 E16.5531  
G1 X134.059 Y93.374 E16.5923  
G1 X133.289 Y94.106 E16.63196  
G1 X132.582 Y94.908 E16.67186  
G0 X132.887 Y95.166 F9000  
G1 X132.253 Y96.032 E16.71192 F1200  
G1 X131.724 Y96.912 E16.75024  
G1 X131.259 Y97.865 E16.78982  
G1 X130.885 Y98.853 E16.82925

G1 X130.602 Y99.869 E16.86862  
G1 X130.415 Y100.884 E16.90714  
G1 X130.316 Y101.936 E16.94658  
G1 X130.312 Y102.989 E16.98588  
G1 X130.404 Y104.046 E17.02548  
G1 X130.585 Y105.058 E17.06385  
G1 X130.861 Y106.074 E17.10315  
G1 X131.231 Y107.069 E17.14277  
G1 X131.685 Y108.018 E17.18203  
G1 X132.21 Y108.902 E17.22041  
G1 X132.831 Y109.764 E17.26006  
G1 X133.521 Y110.558 E17.29932  
G1 X134.282 Y111.29 E17.33873  
G1 X135.089 Y111.936 E17.37732  
G1 X135.963 Y112.519 E17.41653  
G1 X136.892 Y113.023 E17.45598  
G1 X137.865 Y113.442 E17.49552  
G1 X138.839 Y113.762 E17.53378  
G1 X139.867 Y114 E17.57317  
G1 X140.917 Y114.146 E17.61273  
G1 X141.949 Y114.196 E17.6513  
G1 X142.031 Y114.197 E17.65436  
G1 X142.996 Y114.153 E17.69041  
G1 X144.05 Y114.015 E17.73009  
G1 X145.074 Y113.786 E17.76925  
G1 X146.081 Y113.462 E17.80874  
G1 X147.051 Y113.05 E17.84807  
G1 X147.958 Y112.566 E17.88644  
G1 X148.842 Y111.985 E17.92593  
G1 X149.67 Y111.33 E17.96533

G1 X150.435 Y110.604 E18.00469  
G1 X151.115 Y109.829 E18.04318  
G1 X151.723 Y108.998 E18.08161  
G1 X152.283 Y108.074 E18.12194  
G1 X152.745 Y107.121 E18.16146  
G1 X153.109 Y106.158 E18.19989  
G1 X153.392 Y105.144 E18.23918  
G1 X153.586 Y104.101 E18.27878  
G1 X153.683 Y103.053 E18.31806  
G1 X153.686 Y102.025 E18.35643  
G1 X153.596 Y100.968 E18.39603  
G1 X153.411 Y99.931 E18.43534  
G1 X153.133 Y98.911 E18.4748  
G1 X152.771 Y97.942 E18.51341  
G1 X152.323 Y97.001 E18.55231  
G1 X151.779 Y96.082 E18.59217  
G1 X151.174 Y95.244 E18.63075  
G1 X150.485 Y94.449 E18.67001  
G1 X149.724 Y93.717 E18.70942  
G1 X148.905 Y93.059 E18.74863  
G1 X148.041 Y92.484 E18.78737  
G1 X147.113 Y91.98 E18.82679  
G1 X146.138 Y91.559 E18.86643  
G1 X145.137 Y91.231 E18.90574  
G1 X144.134 Y91 E18.94416  
G1 X143.082 Y90.853 E18.9838  
G1 X142.05 Y90.803 E19.02237  
G1 X141.967 Y90.802 E19.02547  
G1 X141.001 Y90.846 E19.06156  
G1 X139.948 Y90.984 E19.1012

G1 X138.923 Y91.213 E19.1404  
G1 X137.928 Y91.534 E19.17942  
G1 X136.96 Y91.943 E19.21864  
G1 X136.035 Y92.436 E19.25776  
G1 X135.164 Y93.007 E19.29664  
G1 X135.118 Y93.039 E19.29873  
G1 X134.322 Y93.675 E19.33676  
G1 X133.577 Y94.383 E19.37512  
G1 X132.887 Y95.166 E19.41407  
G1 E17.91407 F2400  
G1 Z0.55  
G0 X95.77 Y65.197 F9000  
G1 Z0.25  
G1 E19.41407 F2400  
G1 X97.236 Y63.45 E19.49919 F1200  
G1 X98.8 Y61.727 E19.58604  
G1 X100.201 Y60.295 E19.66082  
G1 X101.749 Y58.822 E19.74057  
G1 X103.828 Y56.985 E19.84412  
G1 X105.6 Y55.556 E19.92909  
G1 X107.467 Y54.166 E20.01596  
G1 X109.348 Y52.876 E20.10109  
G1 X111.308 Y51.64 E20.18758  
G1 X113.226 Y50.532 E20.27025  
G1 X115.35 Y49.411 E20.35989  
G1 X117.407 Y48.427 E20.445  
G1 X119.533 Y47.51 E20.53142  
G1 X121.682 Y46.68 E20.6174  
G1 X123.856 Y45.937 E20.70315  
G1 X126.041 Y45.281 E20.7883

G1 X128.112 Y44.746 E20.86814  
G1 X130.546 Y44.212 E20.96115  
G1 X132.832 Y43.809 E21.04778  
G1 X135.096 Y43.5 E21.13307  
G1 X137.391 Y43.277 E21.21913  
G1 X139.694 Y43.143 E21.30524  
G1 X141.854 Y43.099 E21.38587  
G1 X143.994 Y43.134 E21.46576  
G1 X146.606 Y43.276 E21.56339  
G1 X148.903 Y43.5 E21.64953  
G1 X151.166 Y43.809 E21.73478  
G1 X153.458 Y44.213 E21.82164  
G1 X155.699 Y44.699 E21.90723  
G1 X157.684 Y45.207 E21.98371  
G1 X159.734 Y45.813 E22.0635  
G1 X162.326 Y46.684 E22.16556  
G1 X164.465 Y47.51 E22.25114  
G1 X166.591 Y48.427 E22.33756  
G1 X168.648 Y49.411 E22.42266  
G1 X170.707 Y50.495 E22.50951  
G1 X172.361 Y51.447 E22.58074  
G1 X174.647 Y52.873 E22.68131  
G1 X176.532 Y54.166 E22.76662  
G1 X178.398 Y55.556 E22.85347  
G1 X180.173 Y56.988 E22.93859  
G1 X181.927 Y58.518 E23.02546  
G1 X183.592 Y60.089 E23.11091  
G1 X185.074 Y61.597 E23.18982  
G1 X186.763 Y63.451 E23.28343  
G1 X188.228 Y65.197 E23.3685

G1 X189.64 Y67.018 E23.4545  
G1 X190.987 Y68.902 E23.54095  
G1 X192.258 Y70.836 E23.62733  
G1 X193.373 Y72.679 E23.70772  
G1 X194.42 Y74.567 E23.7883  
G1 X195.591 Y76.876 E23.88493  
G1 X196.538 Y78.961 E23.9704  
G1 X197.418 Y81.115 E24.05725  
G1 X198.206 Y83.28 E24.14324  
G1 X198.903 Y85.452 E24.22838  
G1 X199.463 Y87.458 E24.30612  
G1 X199.959 Y89.516 E24.38513  
G1 X200.497 Y92.173 E24.48631  
G1 X200.856 Y94.472 E24.57316  
G1 X201.123 Y96.76 E24.65914  
G1 X201.3 Y99.034 E24.74427  
G1 X201.39 Y101.359 E24.83111  
G1 X201.392 Y103.297 E24.90345  
G1 X201.389 Y103.674 E24.91752  
G1 X201.3 Y105.965 E25.00309  
G1 X201.123 Y108.239 E25.08822  
G1 X200.856 Y110.527 E25.1742  
G1 X200.501 Y112.803 E25.26018  
G1 X200.057 Y115.064 E25.34618  
G1 X199.524 Y117.318 E25.43263  
G1 X198.958 Y119.358 E25.51165  
G1 X198.201 Y121.734 E25.60472  
G1 X197.418 Y123.884 E25.69012  
G1 X196.538 Y126.038 E25.77697  
G1 X195.595 Y128.115 E25.86211

G1 X194.561 Y130.174 E25.9481  
G1 X193.511 Y132.081 E26.02936  
G1 X192.404 Y133.926 E26.10966  
G1 X190.993 Y136.088 E26.20602  
G1 X189.64 Y137.981 E26.29287  
G1 X188.229 Y139.8 E26.37879  
G1 X186.762 Y141.549 E26.464  
G1 X185.199 Y143.272 E26.55082  
G1 X183.775 Y144.727 E26.62681  
G1 X182.226 Y146.201 E26.70662  
G1 X180.171 Y148.013 E26.80888  
G1 X178.398 Y149.443 E26.8939  
G1 X176.531 Y150.833 E26.98077  
G1 X174.651 Y152.123 E27.06587  
G1 X172.69 Y153.359 E27.15239  
G1 X171.015 Y154.328 E27.22462  
G1 X168.648 Y155.588 E27.3247  
G1 X166.591 Y156.572 E27.40981  
G1 X164.465 Y157.489 E27.49623  
G1 X162.326 Y158.315 E27.58181  
G1 X160.135 Y159.065 E27.66824  
G1 X157.946 Y159.721 E27.75354  
G1 X155.873 Y160.257 E27.83345  
G1 X153.452 Y160.787 E27.92595  
G1 X151.166 Y161.19 E28.01259  
G1 X148.903 Y161.499 E28.09784  
G1 X146.608 Y161.722 E28.1839  
G1 X144.305 Y161.856 E28.27001  
G1 X142.141 Y161.901 E28.35079  
G1 X139.997 Y161.864 E28.43083



G1 X137.394 Y161.723 E28.52813  
G1 X135.096 Y161.499 E28.6143  
G1 X132.832 Y161.19 E28.69959  
G1 X130.54 Y160.786 E28.78645  
G1 X128.299 Y160.3 E28.87204  
G1 X126.326 Y159.795 E28.94806  
G1 X124.266 Y159.186 E29.02823  
G1 X123.841 Y159.057 E29.04481  
G1 X121.672 Y158.315 E29.13037  
G1 X119.533 Y157.489 E29.21595  
G1 X117.407 Y156.572 E29.30237  
G1 X115.351 Y155.588 E29.38745  
G1 X113.291 Y154.504 E29.47433  
G1 X111.39 Y153.409 E29.55621  
G1 X109.348 Y152.123 E29.64628  
G1 X107.468 Y150.833 E29.73138  
G1 X105.6 Y149.443 E29.81829  
G1 X103.825 Y148.011 E29.90341  
G1 X102.072 Y146.481 E29.99026  
G1 X100.426 Y144.929 E30.07469  
G1 X98.943 Y143.421 E30.15364  
G1 X97.235 Y141.548 E30.24825  
G1 X95.769 Y139.8 E30.3334  
G1 X94.359 Y137.981 E30.4193  
G1 X93.006 Y136.088 E30.50614  
G1 X91.74 Y134.163 E30.59214  
G1 X90.632 Y132.331 E30.67205  
G1 X89.593 Y130.46 E30.75193  
G1 X88.402 Y128.112 E30.85019  
G1 X87.46 Y126.038 E30.93521

G1 X86.58 Y123.884 E31.02206  
G1 X85.792 Y121.719 E31.10805  
G1 X85.096 Y119.547 E31.19318  
G1 X84.546 Y117.577 E31.26952  
G1 X84.046 Y115.511 E31.34886  
G1 X83.501 Y112.819 E31.45138  
G1 X83.142 Y110.526 E31.538  
G1 X82.875 Y108.239 E31.62394  
G1 X82.699 Y105.965 E31.70907  
G1 X82.608 Y103.64 E31.79592  
G1 X82.606 Y101.456 E31.87743  
G1 X82.699 Y99.034 E31.9679  
G1 X82.875 Y96.76 E32.05303  
G1 X83.142 Y94.473 E32.13897  
G1 X83.502 Y92.174 E32.22582  
G1 X83.941 Y89.935 E32.31098  
G1 X84.466 Y87.717 E32.39605  
G1 X85.03 Y85.678 E32.47501  
G1 X85.792 Y83.28 E32.56893  
G1 X86.58 Y81.115 E32.65492  
G1 X87.46 Y78.961 E32.74177  
G1 X88.403 Y76.884 E32.8269  
G1 X89.437 Y74.826 E32.91287  
G1 X90.481 Y72.931 E32.99362  
G1 X91.568 Y71.117 E33.07255  
G1 X93.006 Y68.911 E33.17084  
G1 X94.359 Y67.018 E33.25768  
G1 X95.77 Y65.197 E33.34367  
G0 X95.449 Y64.959 F9000  
G1 X96.94 Y63.182 E33.43025 F1200

G1 X98.499 Y61.464 E33.51683  
G1 X99.926 Y60.006 E33.59298  
G1 X101.485 Y58.523 E33.67329  
G1 X103.557 Y56.692 E33.77649  
G1 X105.362 Y55.236 E33.86305  
G1 X107.229 Y53.846 E33.94993  
G1 X109.142 Y52.534 E34.03651  
G1 X111.097 Y51.301 E34.12278  
G1 X113.029 Y50.185 E34.20605  
G1 X115.157 Y49.062 E34.29586  
G1 X117.256 Y48.058 E34.3827  
G1 X119.379 Y47.142 E34.469  
G1 X121.55 Y46.304 E34.55586  
G1 X123.737 Y45.555 E34.64214  
G1 X125.927 Y44.899 E34.72747  
G1 X128.016 Y44.359 E34.808  
G1 X130.471 Y43.82 E34.90182  
G1 X132.763 Y43.416 E34.98868  
G1 X135.055 Y43.103 E35.07502  
G1 X137.362 Y42.879 E35.16154  
G1 X139.685 Y42.744 E35.24839  
G1 X141.853 Y42.7 E35.32932  
G1 X144 Y42.735 E35.40947  
G1 X146.638 Y42.879 E35.50807  
G1 X148.944 Y43.103 E35.59455  
G1 X151.235 Y43.416 E35.68085  
G1 X153.527 Y43.82 E35.76772  
G1 X155.787 Y44.31 E35.85403  
G1 X157.788 Y44.822 E35.93112  
G1 X159.852 Y45.432 E36.01145

G1 X162.448 Y46.303 E36.11366  
G1 X164.619 Y47.142 E36.20053  
G1 X166.742 Y48.058 E36.28683  
G1 X168.841 Y49.062 E36.37367  
G1 X170.893 Y50.142 E36.46022  
G1 X172.573 Y51.109 E36.53257  
G1 X174.857 Y52.534 E36.63305  
G1 X176.77 Y53.846 E36.71963  
G1 X178.636 Y55.236 E36.80648  
G1 X180.435 Y56.687 E36.89274  
G1 X182.183 Y58.212 E36.97932  
G1 X183.86 Y59.794 E37.06537  
G1 X185.374 Y61.334 E37.14597  
G1 X187.053 Y63.176 E37.239  
G1 X188.544 Y64.953 E37.32558  
G1 X189.965 Y66.786 E37.41215  
G1 X191.318 Y68.679 E37.49899  
G1 X192.588 Y70.61 E37.58526  
G1 X193.722 Y72.486 E37.66707  
G1 X194.769 Y74.374 E37.74765  
G1 X195.948 Y76.698 E37.84492  
G1 X196.908 Y78.81 E37.93151  
G1 X197.785 Y80.957 E38.01807  
G1 X198.581 Y83.143 E38.1049  
G1 X199.288 Y85.345 E38.19122  
G1 X199.847 Y87.351 E38.26895  
G1 X200.35 Y89.436 E38.349  
G1 X200.891 Y92.112 E38.4509  
G1 X201.249 Y94.403 E38.53745  
G1 X201.519 Y96.714 E38.62429

G1 X201.699 Y99.019 E38.71058  
G1 X201.789 Y101.336 E38.79713  
G1 X201.791 Y103.3 E38.87043  
G1 X201.788 Y103.689 E38.88495  
G1 X201.699 Y105.98 E38.97053  
G1 X201.52 Y108.285 E39.05682  
G1 X201.25 Y110.588 E39.14336  
G1 X200.891 Y112.887 E39.23021  
G1 X200.446 Y115.156 E39.31651  
G1 X199.913 Y117.405 E39.40278  
G1 X199.338 Y119.48 E39.48315  
G1 X198.581 Y121.856 E39.57622  
G1 X197.788 Y124.035 E39.66277  
G1 X196.911 Y126.182 E39.74933  
G1 X195.951 Y128.294 E39.83592  
G1 X194.911 Y130.366 E39.92245  
G1 X193.853 Y132.287 E40.00431  
G1 X192.745 Y134.133 E40.08466  
G1 X191.318 Y136.32 E40.18213  
G1 X189.965 Y138.213 E40.26898  
G1 X188.549 Y140.04 E40.35525  
G1 X187.058 Y141.817 E40.44183  
G1 X185.5 Y143.535 E40.5284  
G1 X184.05 Y145.016 E40.60576  
G1 X182.489 Y146.501 E40.68617  
G1 X180.441 Y148.307 E40.78809  
G1 X178.636 Y149.763 E40.87464  
G1 X176.77 Y151.153 E40.96149  
G1 X174.857 Y152.465 E41.04807  
G1 X172.901 Y153.698 E41.13437

G1 X171.211 Y154.675 E41.20723  
G1 X168.841 Y155.937 E41.30745  
G1 X166.742 Y156.941 E41.39429  
G1 X164.619 Y157.857 E41.48059  
G1 X162.448 Y158.695 E41.56745  
G1 X160.262 Y159.444 E41.6537  
G1 X158.06 Y160.103 E41.73948  
G1 X155.968 Y160.644 E41.82014  
G1 X153.527 Y161.179 E41.91341  
G1 X151.235 Y161.583 E42.00027  
G1 X148.944 Y161.896 E42.08658  
G1 X146.637 Y162.12 E42.17309  
G1 X144.314 Y162.255 E42.25994  
G1 X142.142 Y162.3 E42.34102  
G1 X139.993 Y162.263 E42.42124  
G1 X137.361 Y162.12 E42.51963  
G1 X135.055 Y161.896 E42.6061  
G1 X132.763 Y161.583 E42.69244  
G1 X130.471 Y161.179 E42.77931  
G1 X128.211 Y160.689 E42.86562  
G1 X126.214 Y160.178 E42.94256  
G1 X124.148 Y159.567 E43.02297  
G1 X121.55 Y158.696 E43.12524  
G1 X119.379 Y157.857 E43.21211  
G1 X117.256 Y156.941 E43.29841  
G1 X115.157 Y155.937 E43.38526  
G1 X113.105 Y154.857 E43.47181  
G1 X111.178 Y153.747 E43.55481  
G1 X109.142 Y152.465 E43.64461  
G1 X107.229 Y151.153 E43.73119

G1 X105.362 Y149.763 E43.81807  
G1 X103.557 Y148.307 E43.90462  
G1 X101.816 Y146.787 E43.99089  
G1 X100.153 Y145.219 E44.0762  
G1 X98.643 Y143.684 E44.15656  
G1 X96.94 Y141.817 E44.25088  
G1 X95.449 Y140.04 E44.33746  
G1 X94.034 Y138.213 E44.42371  
G1 X92.681 Y136.32 E44.51056  
G1 X91.406 Y134.383 E44.59711  
G1 X90.294 Y132.543 E44.67736  
G1 X89.244 Y130.653 E44.75805  
G1 X88.046 Y128.293 E44.85684  
G1 X87.087 Y126.182 E44.94338  
G1 X86.21 Y124.035 E45.02994  
G1 X85.42 Y121.863 E45.1162  
G1 X84.71 Y119.647 E45.20306  
G1 X84.162 Y117.684 E45.27913  
G1 X83.657 Y115.598 E45.35923  
.....  
.....  
G1 X123.312 Y100.986 E253.2718 F1200  
G0 X123.37 Y100.363 F9000  
G1 X139.858 Y83.875 E253.968 F1200  
G0 X139.21 Y83.959 F9000  
G1 X123.457 Y99.712 E254.6332 F1200  
G0 X123.573 Y99.032 F9000  
G1 X138.532 Y84.073 E255.2649 F1200  
G0 X137.815 Y84.225 F9000  
G1 X123.717 Y98.323 E255.8602 F1200

G0 X123.915 Y97.561 F9000  
G1 X137.074 Y84.403 E256.4159 F1200  
G0 X136.261 Y84.651 F9000  
G1 X124.144 Y96.768 E256.9276 F1200  
G0 X124.443 Y95.905 F9000  
G1 X135.393 Y84.955 E257.3899 F1200  
G0 X134.445 Y85.339 F9000  
G1 X124.841 Y94.943 E257.7955 F1200  
G0 X125.36 Y93.859 F9000  
G1 X133.363 Y85.856 E258.1334 F1200  
G0 X132.038 Y86.617 F9000  
G1 X126.101 Y92.554 E258.3841 F1200  
G1 E256.8841 F2400  
G1 Z20.35  
G0 X127.565 Y90.525 F9000  
G1 Z20.05  
G1 E258.3841 F2400  
G1 X129.975 Y88.116 E258.4859 F1200  
G1 E256.9859 F2400  
G1 Z20.35  
G0 X149.533 Y92.821 F9000  
G1 Z20.05  
G1 E258.4859 F2400  
G1 X154.14 Y88.215 E258.6804 F1200  
G0 X154.446 Y88.473 F9000  
G1 X149.847 Y93.072 E258.8746 F1200  
G0 X150.154 Y93.329 F9000  
G1 X154.741 Y88.742 E259.0683 F1200  
G0 X155.028 Y89.019 F9000  
G1 X150.442 Y93.605 E259.262 F1200



G0 X150.731 Y93.88 F9000  
G1 X155.315 Y89.296 E259.4555 F1200  
G0 X155.593 Y89.583 F9000  
G1 X151.008 Y94.168 E259.6491 F1200  
G0 X151.271 Y94.469 F9000  
G1 X155.86 Y89.88 E259.8429 F1200  
G0 X156.128 Y90.176 F9000  
G1 X151.534 Y94.77 E260.0369 F1200  
G0 X151.778 Y95.091 F9000  
G1 X156.391 Y90.477 E260.2317 F1200  
G0 X156.64 Y90.793 F9000  
G1 X152.015 Y95.418 E260.427 F1200  
G0 X152.251 Y95.746 F9000  
G1 X156.889 Y91.108 E260.6229 F1200  
G0 X157.133 Y91.428 F9000  
G1 X152.462 Y96.1 E260.8201 F1200  
G0 X152.673 Y96.452 F9000  
G1 X157.363 Y91.762 E261.0182 F1200  
G0 X157.593 Y92.097 F9000  
G1 X152.874 Y96.816 E261.2175 F1200  
G0 X153.058 Y97.196 F9000  
G1 X157.822 Y92.432 E261.4186 F1200  
G0 X158.032 Y92.786 F9000  
G1 X153.241 Y97.577 E261.6209 F1200  
G0 X153.402 Y97.98 F9000  
G1 X158.242 Y93.14 E261.8253 F1200  
G0 X158.452 Y93.495 F9000  
G1 X153.556 Y98.391 E262.0321 F1200  
G0 X153.703 Y98.808 F9000  
G1 X158.64 Y93.871 E262.2405 F1200

G0 X158.83 Y94.246 F9000  
G1 X153.825 Y99.25 E262.4519 F1200  
G0 X153.947 Y99.692 F9000  
G1 X159.018 Y94.622 E262.666 F1200  
G0 X159.185 Y95.018 F9000  
G1 X154.04 Y100.164 E262.8833 F1200  
G0 X154.127 Y100.641 F9000  
G1 X159.354 Y95.414 E263.104 F1200  
G0 X159.52 Y95.812 F9000  
G1 X154.191 Y101.141 E263.329 F1200  
G0 X154.238 Y101.659 F9000  
G1 X159.666 Y96.231 E263.5582 F1200  
G0 X159.811 Y96.65 F9000  
G1 X154.263 Y102.198 E263.7925 F1200  
G0 X154.263 Y102.763 F9000  
G1 X159.949 Y97.076 E264.0327 F1200  
G0 X160.07 Y97.519 F9000  
G1 X154.234 Y103.355 E264.2791 F1200  
G0 X154.178 Y103.975 F9000  
G1 X160.192 Y97.962 E264.533 F1200  
G0 X160.298 Y98.42 F9000  
G1 X154.072 Y104.646 E264.7959 F1200  
G0 X153.935 Y105.348 F9000  
G1 X160.393 Y98.89 E265.0686 F1200  
G0 X160.488 Y99.359 F9000  
G1 X153.72 Y106.127 E265.3544 F1200  
G0 X153.407 Y107.004 F9000  
G1 X160.557 Y99.854 E265.6563 F1200  
G0 X160.624 Y100.351 F9000  
G1 X152.95 Y108.026 E265.9804 F1200

G0 X152.157 Y109.383 F9000  
G1 X160.675 Y100.864 E266.3401 F1200  
G0 X160.71 Y101.394 F9000  
G1 X140.885 Y121.219 E267.1773 F1200  
G0 X140.364 Y121.176 F9000  
G1 X148.9 Y112.639 E267.5378 F1200  
G0 X147.518 Y113.457 F9000  
G1 X139.85 Y121.125 E267.8616 F1200  
G0 X139.347 Y121.064 F9000  
G1 X146.494 Y113.917 E268.1634 F1200  
G0 X145.632 Y114.214 F9000  
G1 X138.863 Y120.983 E268.4492 F1200  
G0 X138.38 Y120.902 F9000  
G1 X144.855 Y114.427 E268.7226 F1200  
G0 X144.132 Y114.586 F9000  
G1 X137.919 Y120.8 E268.985 F1200  
G0 X137.463 Y120.691 F9000  
G1 X143.479 Y114.675 E269.239 F1200  
G0 X142.851 Y114.738 F9000  
G1 X137.009 Y120.58 E269.4857 F1200  
G0 X136.579 Y120.447 F9000  
G1 X142.262 Y114.764 E269.7257 F1200  
G0 X141.699 Y114.762 F9000  
G1 X136.148 Y120.313 E269.9601 F1200  
G0 X135.725 Y120.172 F9000  
G1 X141.159 Y114.737 E270.1896 F1200  
G0 X140.642 Y114.691 F9000  
G1 X135.318 Y120.015 E270.4144 F1200  
G1 E268.9144 F2400  
G1 Z20.35

G0 X141.431 Y121.237 F9000  
G1 Z20.05  
G1 E270.4144 F2400  
G1 X160.743 Y101.925 E271.2299 F1200  
G0 X160.743 Y102.49 F9000  
G1 X141.977 Y121.255 E272.0223 F1200  
G0 X142.56 Y121.236 F9000  
G1 X160.743 Y103.053 E272.7902 F1200  
G0 X160.708 Y103.653 F9000  
G1 X143.144 Y121.217 E273.5318 F1200  
G0 X143.764 Y121.162 F9000  
G1 X160.668 Y104.257 E274.2457 F1200  
G0 X160.591 Y104.899 F9000  
G1 X144.391 Y121.098 E274.9297 F1200  
G0 X145.06 Y120.993 F9000  
G1 X160.503 Y105.551 E275.5818 F1200  
G0 X160.365 Y106.253 F9000  
G1 X145.741 Y120.877 E276.1994 F1200  
G0 X146.481 Y120.701 F9000  
G1 X160.209 Y106.973 E276.7791 F1200  
G0 X159.997 Y107.75 F9000  
G1 X147.248 Y120.498 E277.3174 F1200  
G0 X148.067 Y120.244 F9000