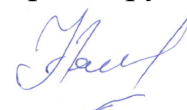


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**НЕНАХОВ Николай Николаевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОГО  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 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  
Смоленцев Владислав Павлович

Воронеж 2024

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	11
1.1 Механизм протекания процесса и область его применения.....	11
1.2 Основные закономерности комбинированного процесса с электромагнитным воздействием .....	13
1.3 Интенсификация магнитоимпульсных воздействий.....	14
1.4 Технологические режимы и техпроцессы.....	15
1.5 Проектирование комбинированного технологического процесса с электроимпульсным воздействием.....	16
1.6 Особенности упрочнения крупногабаритных деталей механическим воздействием.....	18
1.7 Оборудование для импульсно-вибрационной обработки.....	18
Выводы по главе 1.....	20
Глава 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛИ РАБОТЫ.	22
2.1 Высоконагруженные изделия авиакосмического машиностроения .....	22
2.2 Научные гипотезы.....	23
2.3 Научная база для построения теоретических основ процесса.....	23
2.4 Материальная база для решения поставленных задач.....	24
2.5 Последовательность и методология решения поставленных задач и достижения поставленной цели.....	27
Выводы по главе 2.....	32
Глава 3 МЕХАНИЗМ ПРОТЕКАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	34
3.1 Физическая модель процесса ,определяющая возможности управления электромагнитными воздействиями.....	34
3.2 Механизм управления процессом стабилизации внутренних напряжений .....	41

	3.3	Методика расчета параметров магнитоимпульсной установки	44
	3.4	Правомерность установленных в главе закономерностей импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.....	45
		Выводы по главе 3 .....	51
Глава 4		<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАЧЕСТВЕННОЙ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК.....</b>	<b>52</b>
	4.1	Этапы проектирования . технологического процесса.....	52
	4.2	Назначение и расчет технологических режимов комбинированной обработки с механическим воздействием по закономерностям вибрационной импульсной обработки.....	54
	4.3	Обеспечение качественных показателей комбинированной обработки с использованием импульсного электромагнитного поля .....	57
	4.4	Алгоритм расчета параметров комбинированного процесса .....	58
	4.5	Применение разработанных технологий и оборудования при освоении и выпуске изделий в условиях производства .....	61
		Выводы по главе 4 .....	66
Глава 5		<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ.....</b>	<b>67</b>
	5.1	Разработка инструмента и способа управления комбинированным воздействием на примере обработки полузакрытых полостей .....	67
	5.2.	Технология подготовки поверхности деталей под нанесение в электромагнитном поле теплозащитных покрытий.....	73
	5.3.	Перспективные методы и процедуры использования лучевых методов для выравнивания силовых полей и стабилизации качества создаваемых наукоемких изделий машиностроения.....	78
		Выводы по главе 5.....	88
		Заключение .....	89
		Список литературы.....	91
		Приложения.....	105

## **Введение**

### **Актуальность темы работы.**

Регулирование внутренних напряжений высоконагруженных деталей, определяющих качество и надежность изделий в условиях их эксплуатации в основном для перспективных объектов современной техники, осуществляется послойным выравниванием внутренних напряжений и нанесением покрытий, обладающих или создающих требуемые эксплуатационные характеристики у изделий. Работа учитывает запросы авиакосмической и других отраслей машиностроения при выполнении государственных программ. Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась 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.

### **Степень разработанности темы**

Анализ доступных публикаций отечественных и зарубежных ученых и специалистов показывает, что научные достижения и опыт использования результатов научных школ Воронежа, Казани, Москвы, Самары, С-Петербурга, Тулы, Уфы, Перми, Новосибирска и других городов России, ведущих фирм Китая, Японии, США, Болгарии, Швеции, Германии, Франции создают научную базу для развития направления по технологии комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий в направлении совершенствования технологии изготовления перспективной авиакосмической техники.

### **Цель и задачи выполняемой работы**

Целью работы является расширение области использования аддитивных технологий на управление комбинированными процессами с использованием электромагнитных воздействий послойным выравниванием внутренних напряжений высоконагруженных деталей, работающих в условиях импульсных нагрузений.

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

1. Технологические методы восстановления качества изделий путем управления системой остаточных напряжений высоконагруженных деталей.

2. Аддитивное управление величиной и знаком внутренних напряжений импульсными воздействиями электромагнитных полей и комбинированным нанесением покрытий.

3. Разработку комбинированных процессов подготовки поверхности объектов обработки под технологию выравнивания внутренних напряжений высоконагруженных деталей с различной геометрией.

4. Проектирование комбинированных методов обработки с обоснованием выбора воздействий, нивелирующих остаточные напряжения в поверхностном слое материала после предшествующих технологических операций.

5. Разработку путей стабилизации сборных конструкций импульсными электромагнитными полями и комбинированным нанесением покрытий.

#### **Объекты исследований**

Изделия авиакосмической техники с высоким уровнем производственной технологичности высоконагруженных деталей, работающие в условиях импульсных воздействий, а также востребованная отечественная продукция, выделенная в Государственных программах для их импортозамещения с использованием достижений ведущих отраслей машиностроения.

#### **Предмет исследований:**

Аддитивные технологии для управления послойным выравниванием внутренних напряжений с использованием комбинированных методов подготовки базовых слоев заготовок и нанесения покрытий, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики изделий.

**Область исследований.** Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.5.5: п.2;4;7.

## **Способы исследований, обоснованность, достоверность результатов.**

Теоретические и прикладные исследования технологии комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик объектов исследований выполнялись с использованием современной аттестованной научной, в том числе вычислительной, базы оригинальной, в том числе разработанной автором по собственным патентам, экспериментальной и опытно-промышленной техники при многократном (не ниже критерия оценки по Стюденту) дублировании результатов. Оценка достоверности проводилась по степени сходимости с исследованиями других ученых, а также данными о производстве объектов при запуске изделий в серийное производство.

### **Научная новизна** включает:

1. Установление закономерностей взаимного комбинированного импульсного электромагнитного воздействия на крупногабаритные напряженные материалы для выравнивания поверхностных и внутренних напряжений до исключения деформации изделий.

2. Разработку аддитивных методов и средств технологического оснащения для управления динамикой комбинированного импульсного электромагнитного воздействия.

3. Моделирование процессов взаимодействия накладываемых импульсов на распределение внутренних напряжений, вызывающих деформацию и разрушение крупногабаритных деталей.

### **Вклад в технологическую науку.**

В классической литературе понятие «аддитивный метод» определяется как возможность создания цельного объекта, равного сумме величин, соответствующих его частям при всех способах разделения объекта. Применительно к аддитивным технологиям в машиностроении это можно трактовать как получение геометрических размеров и формы детали путем наращивания слоев в единую конструкцию с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Проведенные ранее и реализованные в работе исследования показывают, что принятое понятие «наращивание слоев при изготовлении детали» не способно в полной мере охватить достигнутые технологические возможности аддитивных технологий, ограниченные только послойным увеличением геометрических размеров объекта производства, а должно еще включать процесс послойного взаимосвязанного изменения физических параметров без изменения геометрии объекта путем, например, изменения (и не только наращивания, в частности, покрытий) внутренних напряжений уже сформированного объекта за счет управляемого выравнивания этих параметров электромагнитным или другим лучевым воздействием. На современном этапе развития науки по комбинированным методам обработки требуется расширить термин «аддитивные технологии», где вместо понятия «аддитивное изготовление деталей путем наращивания слоев» использовать словосочетание «изменение размеров и (или) физических свойств изделий, определяющих эксплуатационные свойства объектов», к которым, применительно к машиностроению, можно отнести исследуемые воздействия комбинированных методов обработки с наложением механических, тепловых, химических, лучевых и, возможно, ядерных процессов. Рассматриваемое в работе применение электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий осуществляется без использования термических операций и сложного, энергозатратного оборудования за счет выполнения аналогичных действий путем управляемых электромагнитных воздействий, для чего в рамках решенной задачи 2 в работе создана оригинальная теория управления взаимным влиянием на качество изделий различных воздействий с использованием электромагнитных полей, что позволило снять ограничения по размерам деталей, комплексов и расширить зону эффективного использования комбинированных методов обработки. В приведенных материалах разработаны и научно обоснованы новые закономерности комбинированного воздействия импульсного электромагнитного поля на динамику перераспределения остаточных напряжений и снижение деформаций при управляемых внешних лучевых воздействиях.

## **Практические результаты работы.**

Создание методических материалов по проектированию и применению комбинированных технологических процессов и средств технологического оснащения с управляемым воздействием на объект обработки импульсного электромагнитного поля и обеспечение заданного качества и уровня работоспособности силовых крупногабаритных деталей.

**Личный вклад соискателя в выполнение работы.** Личное участие при решении поставленных задач и для достижения требуемых научных результатов, способствующих развитию технологической науки.

Научное обоснование механизма комбинированного электромагнитного импульсного воздействия для восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.

Создание новых, на уровне изобретений, способов, устройств и технологических методов восстановления качества изделий путем управления системой остаточных напряжений высоконагруженных деталей.

Научное обоснование и проектирование комбинированных методов обработки с обоснованием выбора воздействий, нивелирующих остаточные напряжения в поверхностном слое материала после предшествующих технологических операций для формирования путей стабилизации геометрии сборных конструкций импульсными электромагнитными полями и комбинированным нанесением покрытий.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Материалы 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 и в станкостроении страны. Основные положения теоретических и прикладных разработок переданы для использования с поставляемым оборудованием в КНР.



**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отраслевых научно-технических конференциях: 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); конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021) (Севастополь, 2021); 14 Международной научно-практической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022); International Scientific Conference @Scientific research of the SCO countries: synergy and integration@ (Пекин, Китай? 9 декабря 2023); XIV Международной научно-практической конференции (Кемерово, КузГТУ, 2023); 15-й МНТК «Наукоёмкие технологии в машиностроении» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках конгресса «Русский инженер» 1-3 ноября 2023).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных работ. В их числе :коллективная монография; 4 – публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 3 – в зарубежных научных источниках, рецензируемых в базе «Scopus»; 2 патента РФ; 4 – публикации в научных сборниках и материалах конференций, где соискателю принадлежат: постановка, развитие научной проблемы, механизм протекания процессов импульсного электромагнитного воздействия и реализация результатов в авиакосмической отрасли и в машиностроении. В работах,

изданных в соавторстве, все авторы в равной степени принимали участие в проведении исследований по теме работы.

**Структура и объем работы.** Работа включает введение, 5 глав, заключение, список литературы из 130 наименований, 3 приложения. Материал изложен на 124 страницах с 3 таблицами, 30 рисунками.

# **Глава. 1 Анализ комбинированных электромагнитных воздействий, применяемых для восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий**

## **1.1 Механизм протекания процесса и область его применения**

Электромагнитное импульсное восстановление эксплуатационных свойств деталей относится к лучевым методам обработки, включающем тепловое облучение электронным, ионным или световым источником энергии, составляющем часть комбинированной технологии размерного изменения размеров и свойств материала в процессе аддитивного формообразования новой или восстанавливаемой поверхности детали. При этом требуется получить равномерные внутренние напряжения по глубине поверхностного слоя. Как показано в [120] импульсное регулируемое воздействие в совокупности с вибрацией, ударным механическим и другими видами воздействий создает внутренние напряжения с вектором действия противоположным по направлению остаточным напряжениям от предшествующих операций, выполненных, например, путем неразборной или разъемной сборки элементов конструкции [14]. Выравнивание внутренних напряжений достигается путем регулирования электромагнитных сил, формируемых в материале заготовки. Сила, вызывающая силовой импульс, создается за счет электромагнитных эффектов непосредственно в самой заготовке, выполненной из электропроводного материала. При этом обработка может осуществляться в воздушной среде, что делает такие операции более технологичными и экономически выигрышными.

Типовой механизм осуществления процесса и появления импульса с силой  $F$ , приведен на рис. 1.1.

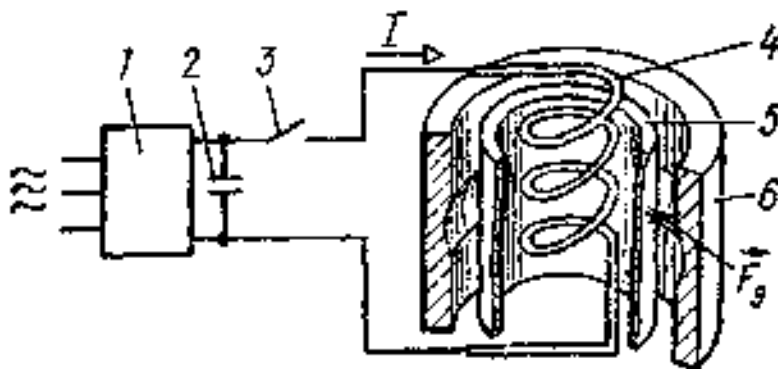


Рис. 1.1 – Схема формирования силового импульса при действии магнитных сил

1. Выпрямитель тока; 2 – Конденсаторы; 3 – Включатель для подачи тока; 4 – Обмотка возбуждителя; 5 – Кольцевая листовая заготовка; 6 – Матрица с внутренним профилем по форме детали

На рис. 1.1 показан механизм накопления энергии для магнитоимпульсной обработки. Расчет энергии выполняется по зависимости из [120].

$$E_c = CUc^2/2,$$

где:  $C$  – емкость батареи, мкФ;

$Uc$  – напряжение, кВ.

Емкость  $C$  измеряется тысячами мкФ, напряжение  $Uc$  - до десятков киловольт емкость батареи ( $C$ ) может достигать тысяч мкФ  
Процесс на рис. 1.1 проходит за счет энергии конденсаторов преобразующейся в энергию магнитного поля возбуждителя и в работу по деформации заготовки, часть которой поступает на нагрев материала.

При назначении области использования процесса магнитоимпульсной обработки следует учитывать, что время импульса составляет около 100 мкс и управление его параметрами затруднительно, но импульсное магнитное силовое воздействие по схеме на рис. 1.1 перераспределяет внутренние напряжения в

заготовках из стали, латуни, алюминия, меди и в других сплавах, в том числе при больших размерах заготовок, что расширяет область использования комбинированных импульсных методов обработки для разгрузки внутренних напряжений по схеме использования аддитивных технологий без изменения геометрии поверхностного слоя детали.

Магнитоимпульсному процессу принадлежит ряд достоинств: возможность изменения направления и силы внутренних напряжений за счет регулирования параметров импульсов, хорошая совместимость в одном (в том числе комбинированном) процессе различных воздействий, простота применяемого оборудования; отсутствие потребности в дорогостоящем и сложном инструменте, что облегчает оценку выбора технологичности для комбинированных методов обработки деталей. Кроме этого обеспечивается возможность наносить и удалять покрытия.

## **1.2 Основные закономерности комбинированного процесса с электромагнитным воздействием**

Силовые воздействия определяют [69, 87] внутренние напряжения в литых, сварных сборных заготовках, поковках, зависят от материалов, геометрии, габаритов, исходных параметров изделий, направлений действия сил и глубины измененного слоя. Это требует управления процессом выравнивания напряжений, т.к. необоснованные предпосылки для расчетов могут привести к появлению внутренних напряжений, вызывающих коробление и разрушение деталей.

Магнитоимпульсные воздействия могут осуществляться [69, 87] несколькими способами, из которых в промышленности нашли использование индукционный и электродинамический способы, где используются возбудители, которых рассмотрены в [120, 94] и материалах этой главы. В способах используют механизмы, часть которых приведена на рис. 1.2,а, где по [69, 94, 120] сила  $F_3$  притяжения прямо пропорциональна произведению сил от действия токов  $I_1$  и  $I_2$  и обратно пропорциональна интервалу между проводниками  $a$  с длиной  $L$  на рис. 1.2,б.

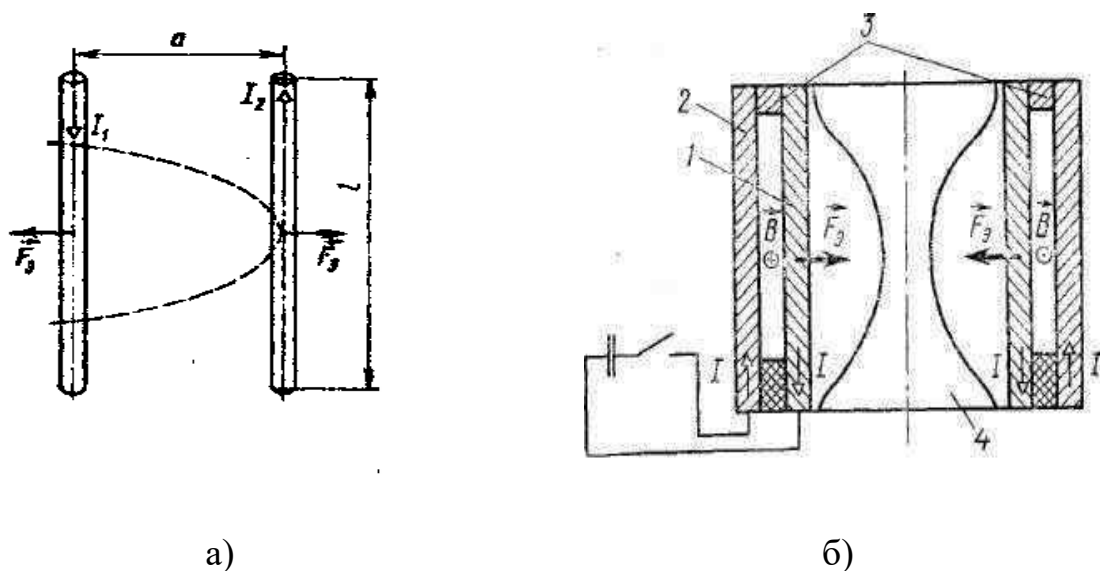


Рис. 1.2 – Механизм процесса образования импульса

1 – заготовка; 2 – размещение возбудителя; 3 – переключка; 4 – матрица

На рис. 1.2 приведена схема импульсного воздействия для цилиндрических заготовок.

### 1.3 Интенсификация магнитоимпульсных воздействий

Для интенсификации воздействия импульса на слой аддитивного слоя покрытия [49, 87, 69] магнитное поле концентрируют насадками из электропроводных материалов, за счет чего возникает поверхностный эффект, ограничивающий проникновение магнитного потока в глубокие слои, формирующиеся в процессе, аналогичном аддитивной обработке с участием электромагнитных воздействий. В случае подготовки заготовок к облучению [87], вызывая перераспределение внутренних напряжений. Для управления такими воздействиями можно использовать механические усилия, передаваемые на заготовку через жидкие среды. Это учитывают при проектировании возбудителя, который должен работать при кавитации жидкой рабочей среды [82] при больших габаритах заготовок.

## 1.4 Технологические режимы и техпроцессы

При разработке технологических процессов импульсной обработки [28, 120] требуется учитывать волновой характер передачи энергии через смежные слои и характер распространения внутренних напряжений. Это активно проявляется при высокоскоростном импульсном деформировании, аналогичном аддитивным технологиям, но без наращивания в процессе облучения наружных слоев. При этом по сравнению с использованием принятых скоростей деформации предел текучести материала может возрастать на 31 – 60 %, а предел прочности на 20–66 %, что может определять эксплуатационные свойства и качество деталей и сборочных единиц.

Расчеты технологических процессов локального электроимпульсного воздействия, применяемые в ранее выполненных работах [69, 120] как и любых других высокоскоростных (в том числе импульсных) процессов, для выравнивания внутренних напряжений осуществляют с учетом глубины воздействия поля. Это изучено применительно к некоторым видам деталей ограниченных габаритов с отдельными фрагментами (см. приложение 3), что не позволяет выравнивать геометрию сложной формы [69, 70], выполнить расчет и оценку величины работы деформации для стабилизации внутренних напряжений в слоях детали.

При обработке деталей сложной формы энергия на деформирование под действием электромагнитных сил всего изделия и его отдельных элементов практически одинакова, что доказывает принятый нами постулат о возможности расширения понятия «аддитивные технологии в машиностроении». Например, при выравнивании внутренних напряжений деталей с элементами жесткости и местными неровностями необходимо рассчитывать силу и место приложения воздействий, как энергию деформирования объекта, так и ребер жесткости, выштамповок и т. д.

## **1.5 Проектирование комбинированного технологического процесса с электроимпульсным воздействием**

### 1.5.1 Алгоритм построения технологического процесса

При построении алгоритма требуется выполнить отработку производственной технологичности по [81] с учетом импульсного использования лучевых методов по предлагаемым аддитивным технологиям.

На базе отработки технологичности и экономических расчетов установить метод наиболее целесообразного формообразования детали, в том числе с импульсным воздействием, необходимым для выравнивания внутренних напряжений, а также обосновывать место в процессе для переходов в операциях. Далее автоматически по методу аналогий проектируется последовательность проведения операций.

### 1.5.2. Режимы обработки

Как показано в [13, 16] механическое воздействие наиболее часто используется в комбинированных процессах, где основное влияние на интенсивность и производительность процесса оказывают сила и энергия соударения гранул среды и обрабатываемых заготовок, где сила ударов зависит от энергии импульсов: амплитуды, частоты и массы гранул, что показано на рис. 1.3. Эти параметры учитываются при проектировании технологических комплексов для повышения показателей качества деталей крупных габаритов.



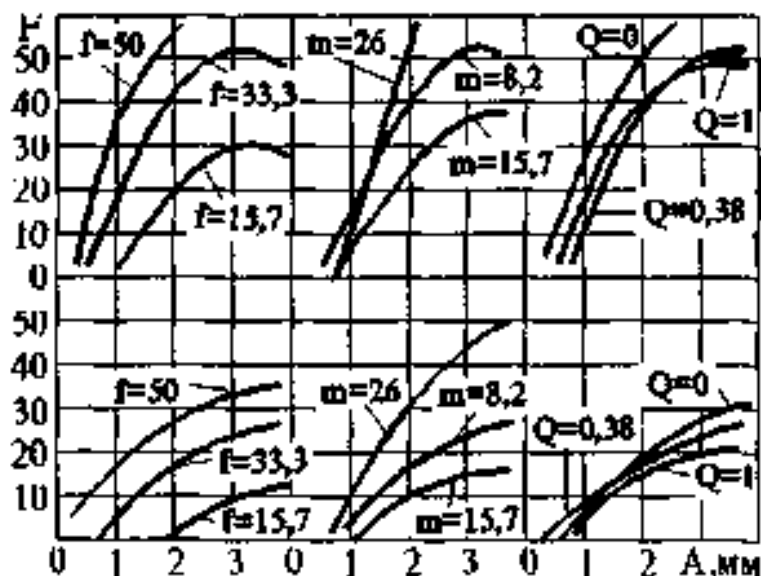


Рис. 1.3 – Величина механических воздействий в комбинированных методах упрочнения в зависимости от параметров колебаний подвижной части установки

В начале обработки имеет место наиболее интенсивное сглаживание микронеровностей (рис. 1.4), что следует учитывать при расчете трудоемкости операции и оценке технологичности операции. Следует учитывать, что без детального обоснования режимов обработки может наблюдаться рост шероховатости, вызванный перенаклепом.

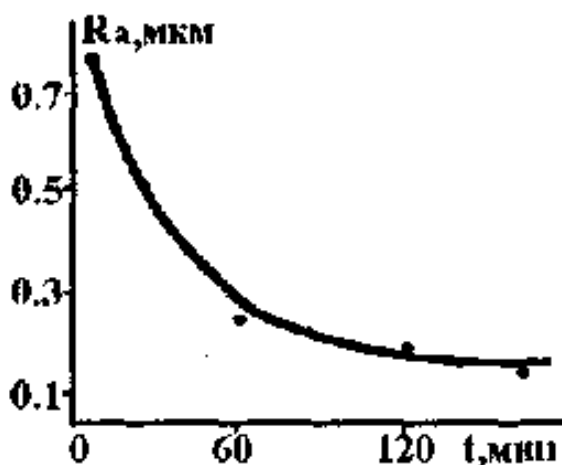


Рис.1.4 – Шероховатость поверхности в зависимости от времени вибродарного механического воздействия

## 1.6 Особенности упрочнения деталей с механическим воздействием

Вибрационная обработка с механическим воздействием деталей больших размеров рассмотрена в [13], где рассмотрены типовые схемы и устройства. Они имеют много общего с конструкциями, применяемыми для стабильного повышения качества объектов различных габаритов при любых сочетаниях воздействий в случае использовании аддитивных технологий.

## 1.7 Оборудование для импульсно-вибрационной обработки

Магнитоимпульсные установки для электромагнитной обработки приведены в [82]. Выполнение технологических операций электромагнитной обработки осуществляется на оборудовании, с помощью которого энергия импульсного поля преобразуется непосредственно в работу сил для деформации заготовки.

Установки имеют модульную конструкцию, включающие технологические и энергетические узлы, показанные на рис. 1.5.

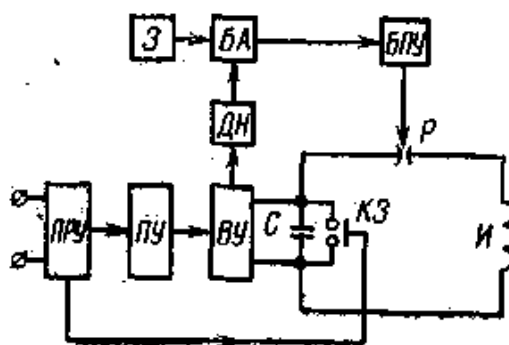


Рис.1.5 – Структура магнитоимпульсного генератора

В созданных установках для управления зарядом используют электронные, вакуумные, воздушные трехэлектродные разрядники и механические двухэлектродные коммутаторы.

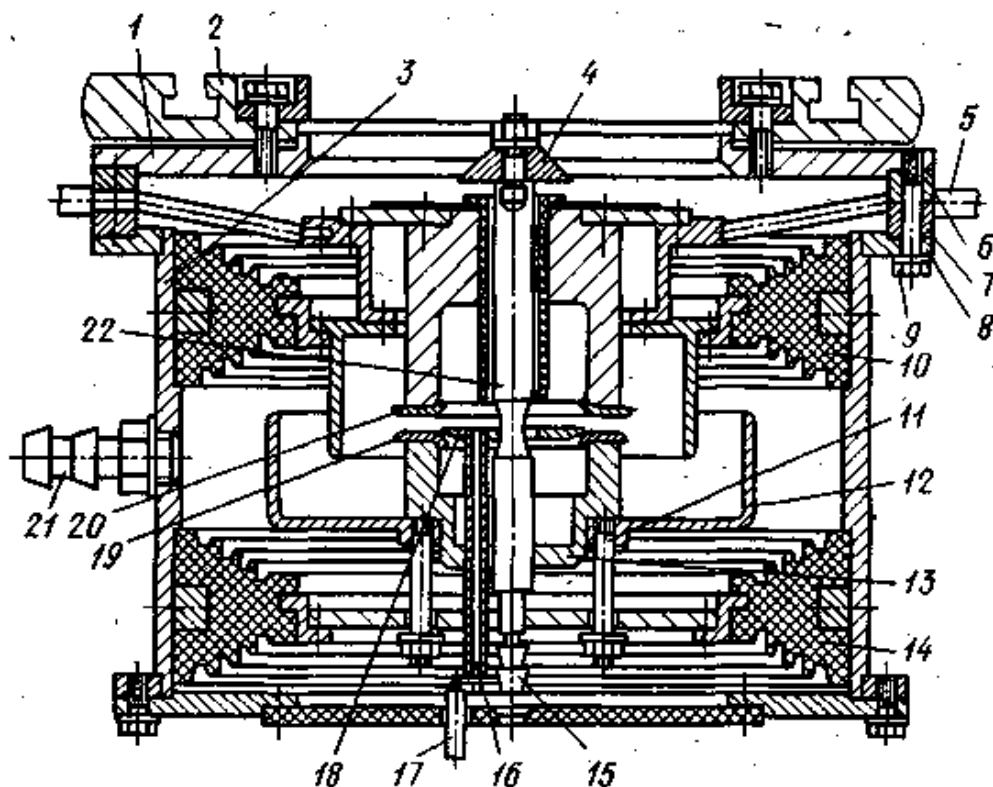


Рис 1.6 – Конструкция типового трехэлектродного разрядника, применяемого в магнитоимпульсных установках

1 – Крышка на технологическом столе 2; 3 – Корпус индуктора; 4 – Вывод разрядника; 5, 17 – Коаксиальный кабель; 6, 7, 8, 9 – Элементы крепежа; 10, 14, 16 – Изоляторы; 11 – Пружины; 12 – Стакан; 13 – Корпус нижнего электрода; 15, 21 – Каналы для охлаждения; 18 – Поджигающий электрод; 19, 20 – Главные электроды разрядников; 22 – Внутренний токопровод

На рис 1.6 приведена конструкция типового трехэлектродного разрядника, применяемого в магнитоимпульсных установках.

Разрядник, приведенный на рис. 1.6 работает в электромагнитных установках при рабочем напряжении 5–20 кВ, в полуавтоматическом режиме.

В экспериментальных работах использовалась установка МИУ20/1, приведенная на рис. 1.7.

Энергоемкость МИУ, типа приведенной на рисунке 1.7, составляет от 2 до 200 кДж., для штамповки легких сплавов имеет энергоемкость до 20 кДж,

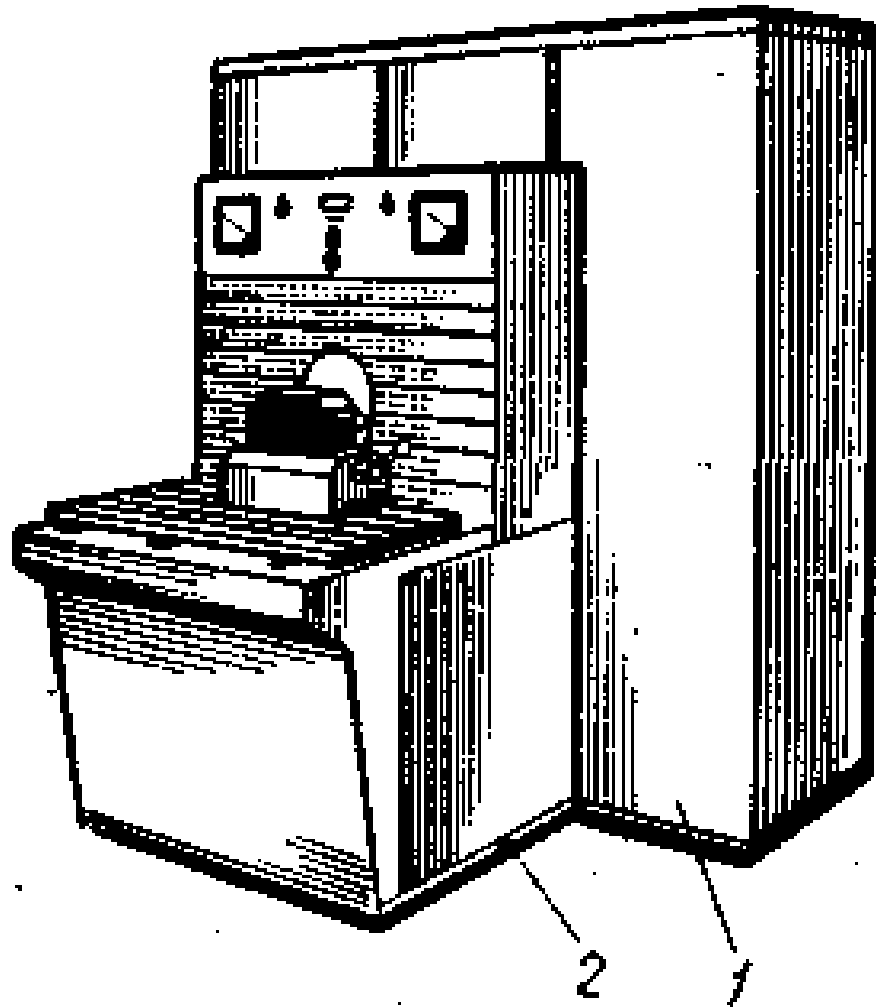


Рис. 1.7 – Внешний вид установки МИУ-20/1

### **Выводы по главе 1**

Анализ материалов главы 1 позволил установить, что использование комбинированных электромагнитных воздействий дает возможность достичь поставленной в работе цели по восстановлению эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий различных габаритов.

При этом требуется решить задачи, базирующиеся на следующих положениях достоверно изученных в рассмотренных теоретических и прикладных исследованиях:

1. Обеспечить достижение поставленной в работе цели за счет перехода на новые виды продукции с различными габаритами требует использования комбинированных методов обработки с возможностью стабилизации внутренних напряжений на заключительной стадии изготовления изделий различной сложности и габаритов с управлением процессом выравнивания внутренних напряжений.

2. Механизм и процесс управления формированием внутренних напряжений в поверхностном слое обработки, применяемые в машиностроении и рассмотренные в состоянии вопроса. Такой материал востребован для проектирования изделий с управляемой стабилизацией характеристик поверхностного слоя, гарантирующей получение заданной стабильности геометрических форм крупногабаритных деталей в течение периода их изготовления и эксплуатации в изделиях различных габаритов и сложности.

3. Требуется изучение процессов формирования и выравнивания внутренних напряжений не только в деталях, но и их сочетаниях, в том числе при использовании различных покрытий, используемых в наукоемком машиностроении.

4. Анализ имеющегося состояния вопроса позволяет сформулировать цель и задачи исследований, приведенные во введении.

## Глава 2 Технологические методы и пути решения поставленных задач для достижения цели работы

### 2.1 Высоконагруженные изделия авиакосмического машиностроения

Баллоны, приведенные на рис. 2.1 устанавливаются в баках из титановых сплавов для ракетных двигателей в случае создания в жидком топливе давления до 45-50 МПа, обеспечивающим его подачу в зону горения. Были проведены многочисленные испытания таких деталей различной конструкции. Часть результатов этих работ приведена на рис. 2.1.



Рис.2.1 – Разрушение при испытаниях баллонов высокого давления  
а – трещинообразование в направлении перпендикулярном к сварному шву;  
б – разрушение баллона при импульсном воздействии внутреннего давления;  
в – разрыв баллона по месту сварки

В результате выравнивания внутренних напряжений по предложенным в работе технологиям были получены цилиндрические и шаровидные баллоны различных габаритов с ресурсом, обеспечивающим их надежную эксплуатацию в создаваемых изделиях.

## **2.2 Научные гипотезы**

На базе анализа проведенных в главе 1 исследований сформулированы научные гипотезы, включающие следующие положения:

1. Возможность совмещения в едином комбинированном процессе действия электромагнитных полей с механическим, тепловым, химическим и другими воздействиями.

2. Обоснованность создания устойчивых методов и процессов управления силами, изменяющими внутренние напряжения, особенно в сборных конструкциях, до выравнивания их величины в пределах, не вызывающих дополнительную деформацию объектов до границ разрушения конструкции.

3. Целесообразность использования при проектировании комбинированных процессов с наложением полей теоретических положений аддитивных технологий с адаптацией к напряжениям в подповерхностных слоях высоконагруженных изделий в процессе выравнивания и перераспределения внутренних сил.

4. Специфика использования аддитивных технологий для управления электромагнитными полями заключается в выравнивании между слоями по глубине остаточных напряжений без изменения геометрических размеров и формы деталей.

5. Требуется научно обоснованное применение в перспективных конструкциях покрытий, имеющих эксплуатационные показатели не ниже требуемых для силовых деталей изделия, где значительные достоинства имеют гальваномеханические поверхностные слои с высокими критериями оценки технологичности, назначенными с учетом расширения зоны обработки крупногабаритных изделий.

## **2.3 Научная база для построения теоретических основ процесса**

Такая база создана с использованием ранее выполненных исследований, по результатам которых созданы патенты [61, 68, 71], в которых использовались лучевые методы соединения фрагментов деталей.

## 2.4 Материальная база для решения поставленных задач

Экспериментальные исследования выполнялись на имеющихся на предприятии установках со средствами технологического оснащения, приведенными в состоянии вопроса, и на созданном экспериментальном оборудовании, часть которого показана в патентах [68 и др.], выполненных с участием соискателя. Большинство исследований выполнялись на металлических баллонах, собранных из литых или штампованных деталей неразъемной сборкой. В них требуется выполнить чистовую обработку внутренней поверхности при ограниченном доступе внутрь через узкую горловину. Это необходимо для достижения истинной картины концентрации напряжений после чистовой обработки внутренних поверхностей. Изготовление таких сварных баллонов из титановых сплавов освоено на ВМЗ и используется для комплектации пневмосистем, устанавливаемых в топливных баках перспективных жидкостных ракетных двигателей. Некоторые виды жидкого топлива и окислителя обладают повышенной агрессивностью и могут вызывать при эксплуатации разрушение баллонов за счет увеличения местных напряжений, особенно в местах сварки. Здесь требуется принять меры к устранению не только концентраторов напряжений, но и к предохранению от загрязняющих веществ из труднодоступной полости баллона без внесения местных напряжений в места сборки. Для этого предложено специальное приспособление, защищенное патентом РФ. Оно обеспечивает повышение качества и надежности изделий за счет устранения операций очистки полости после сборки и применения защитных покрытий внутри детали, что технологично для наружной поверхности, где также возможно загрязнение частицами, удаление которых изменяет картину перераспределения остаточных напряжений, в том числе в наносимых покрытиях.

Для устранения негативного воздействия на качество изделий в [50] и других источниках информации для изделий типа баллонов с полостями предлагается ряд приспособлений, защищающих полости от загрязнений в период



сборки и не требующих сложных мероприятий для выравнивания внутренних напряжений до требуемого уровня. Известные приспособления используются для применения при сборке наружных поверхностей, например, при присоединении к баллонам фланцев, но не используются для полостей с ограниченным доступом инструмента к месту обработки.

Предложено новое приспособление, пригодное для выполнения сборочных операций через узкую горловину и защищающее внутреннюю поверхность от продуктов обработки, исключаящие последующие операции, которые могут вызывать появление внутренних напряжений, вызывающих разрушение баллонов типа показанных на рис. 2.1.

В предлагаемом приспособлении для сборки (рис. 2.2) для фиксации инструмента используются гибкие эластичные элементы, управление которыми возможно дистанционно.

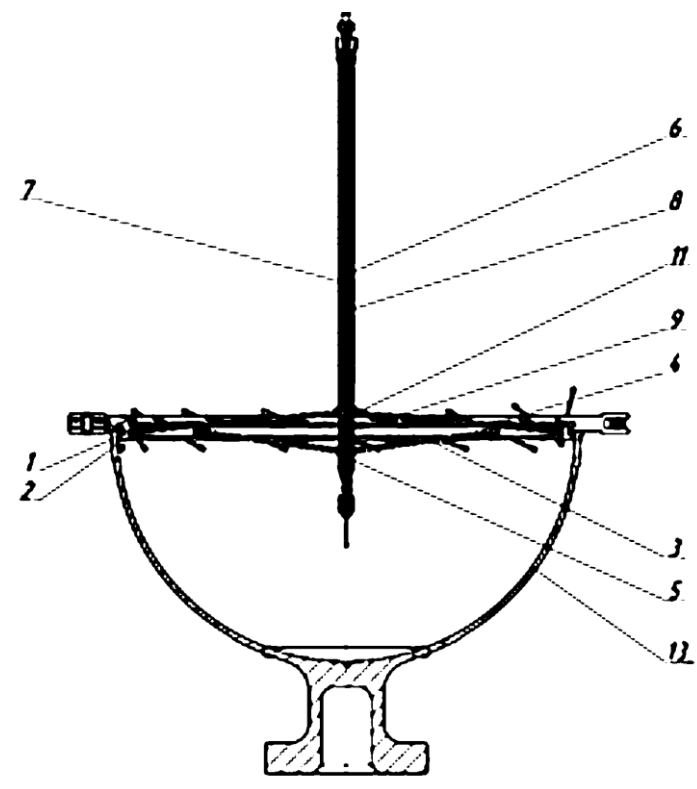


Рис. 2.2 – Конструкция приспособления для сборки шаровых баллонов.  
 1 – Секционный вкладыш; 2, 9 – Пружина; 3, 4 – Упругие элементы; 5 – Настроечный элемент в форме резьбовой втулки; 6 – Защитная втулка; 7, 10, 11, 12 – Крепежные элементы; 8 – Трос; 10 – Замок для фиксации пружины; 11 – Фрагмент баллона.

Приспособление на рис. 2.2 позволяет установить в рабочее положение элементы сборки изделия и обеспечить доступ электронного луча в зону сварки для выполнения операции. После этого получают чистые поверхности полости, которую можно использовать для электромагнитного импульсного облучения и регулирования режимов обработки. Приспособление устанавливается внутри баллона, как показано на рис. 2.3.

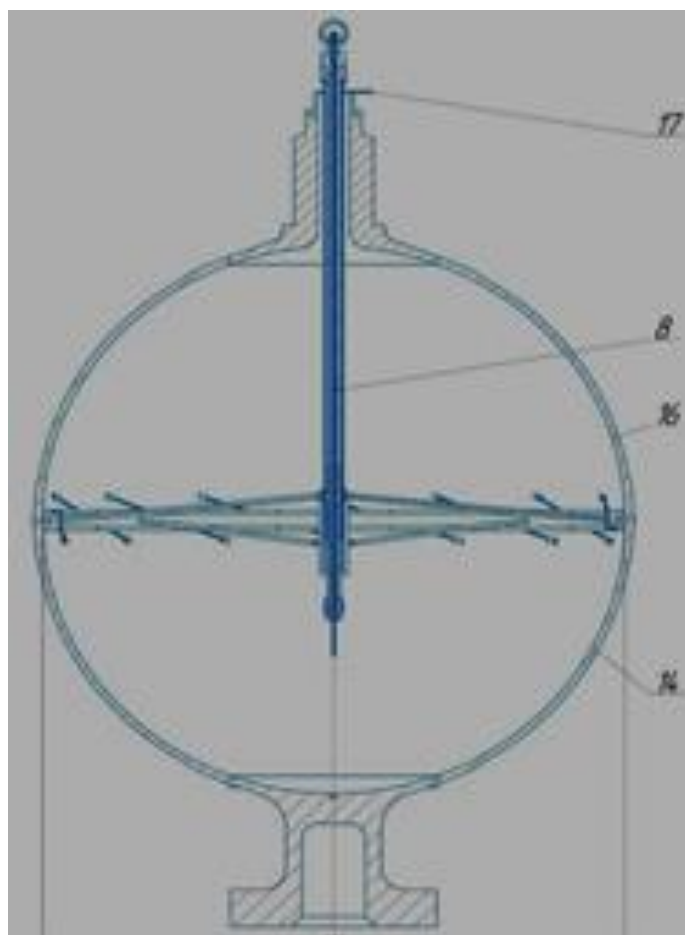


Рис. 2.3 – Схема установки в баллоне приспособления.

14 – Сопрягаемый элемент; 17 – Фиксатор; 25. – Поверхность элемента под покрытие. Остальные обозначения приведены на рис. 2.2

Регулирование положения приспособления в полости выполняют перемещением разжимных элементов с помощью резьбовой втулки на рис. 2.2. Для фиксации приспособления в баллоне (рис. 2.3) используется новая конструкция замка, показанного на рис. 2.4.

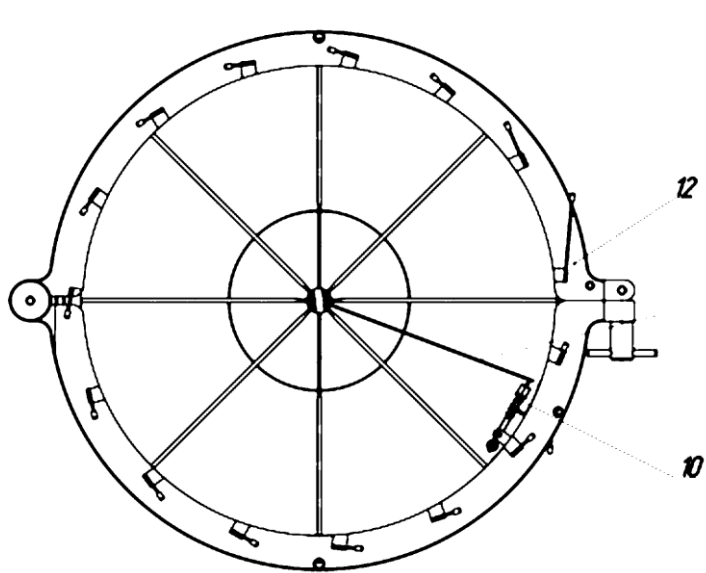


Рис. 4.4 – Конструкция замка для регулирования настройки приспособления  
10 – Замок; 12 – Хомут для фиксации при сборке.

Для удаления сборочного приспособления из полости используют манипулятор, с помощью которого перемещают трос (рис. 2.2) для раскрытия замка (рис. 2.4) и последовательного удаления из полости вкладышей (рис. 2.2) и других деталей.

В процессе использования предложенного приспособления удалось устранить выявленные при экспериментах дефекты внутренней поверхности, возникающие при сборке, и за счет исключения последующих операций выровнять и стабилизировать внутренние напряжения, превышающие предельные величины, вызывающие разрушение баллонов (рис. 2.1).

## **2.5 Последовательность и методология решения поставленных задач и достижения поставленной цели**

Предложен (рис. 2.5) алгоритм, определяющий пути ускоренного решения задач диссертационной работы и достижения поставленной цели.

Для реализации мероприятий по алгоритму требуется осуществить следующие этапы исследований:

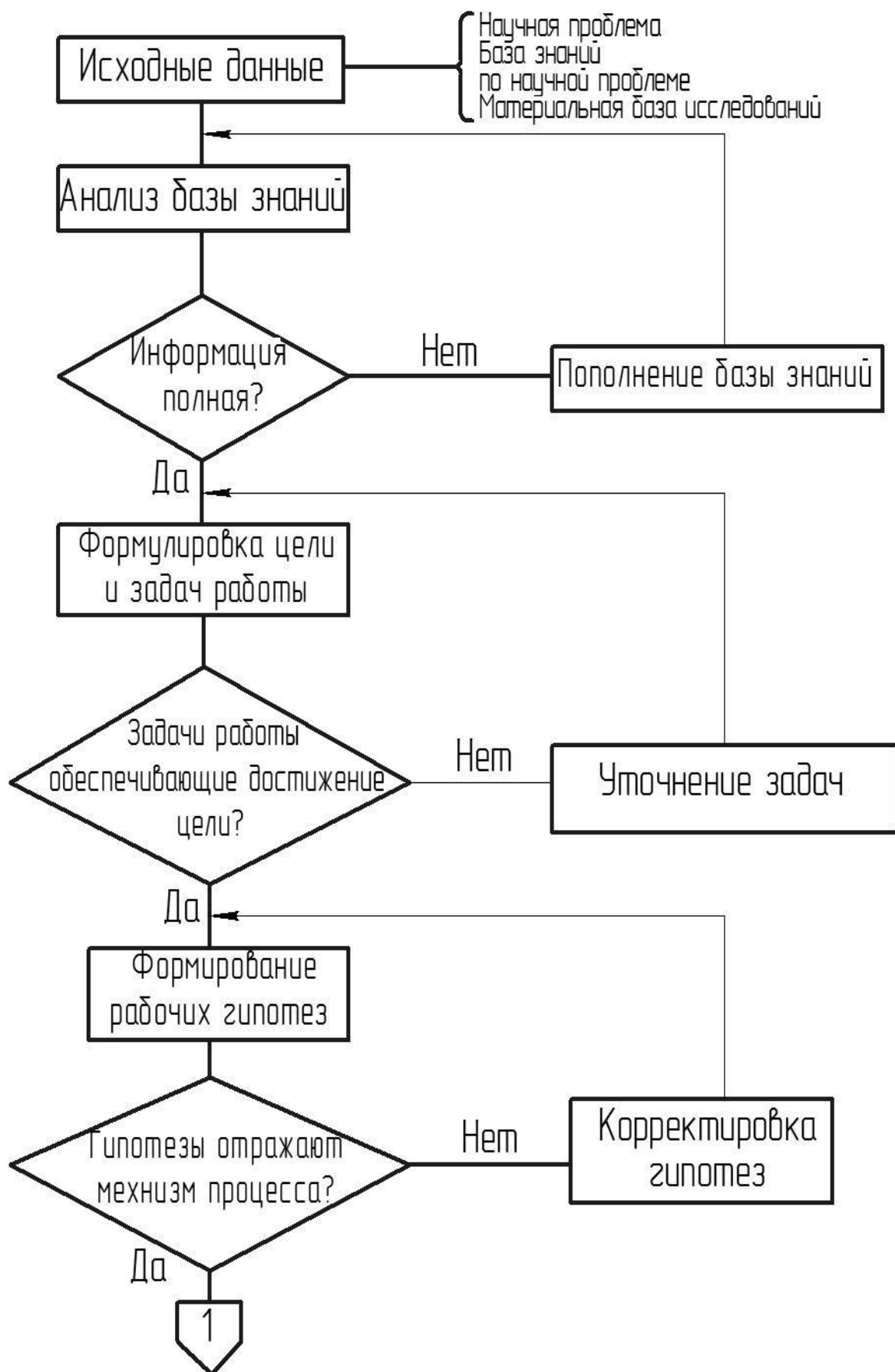
– по материалам, приведенных в состоянии вопроса (глава 1 диссертации), в главе 2 намечены пути решения поставленных задач, обоснованы содержание и объем материальная база, показана необходимость создания новых способов и устройств для комбинированной обработки с использованием лучевых импульсных воздействий для выравнивания внутренних напряжений;

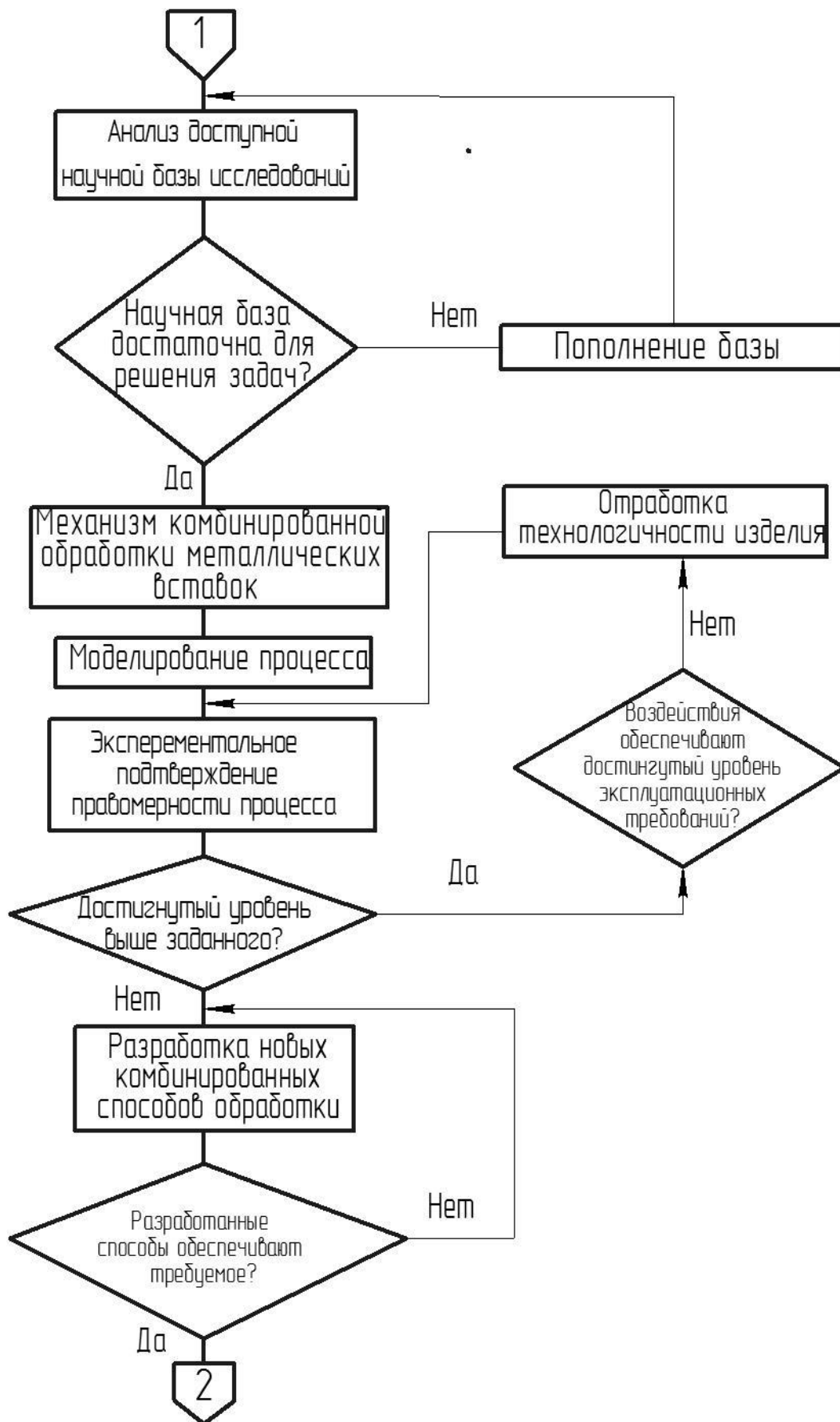
– отработка технологичности конструкции с учетом технических требований к изделиям для создаваемой авиакосмической техники, станкостроения, энергетических тепловых машин и других изделий;

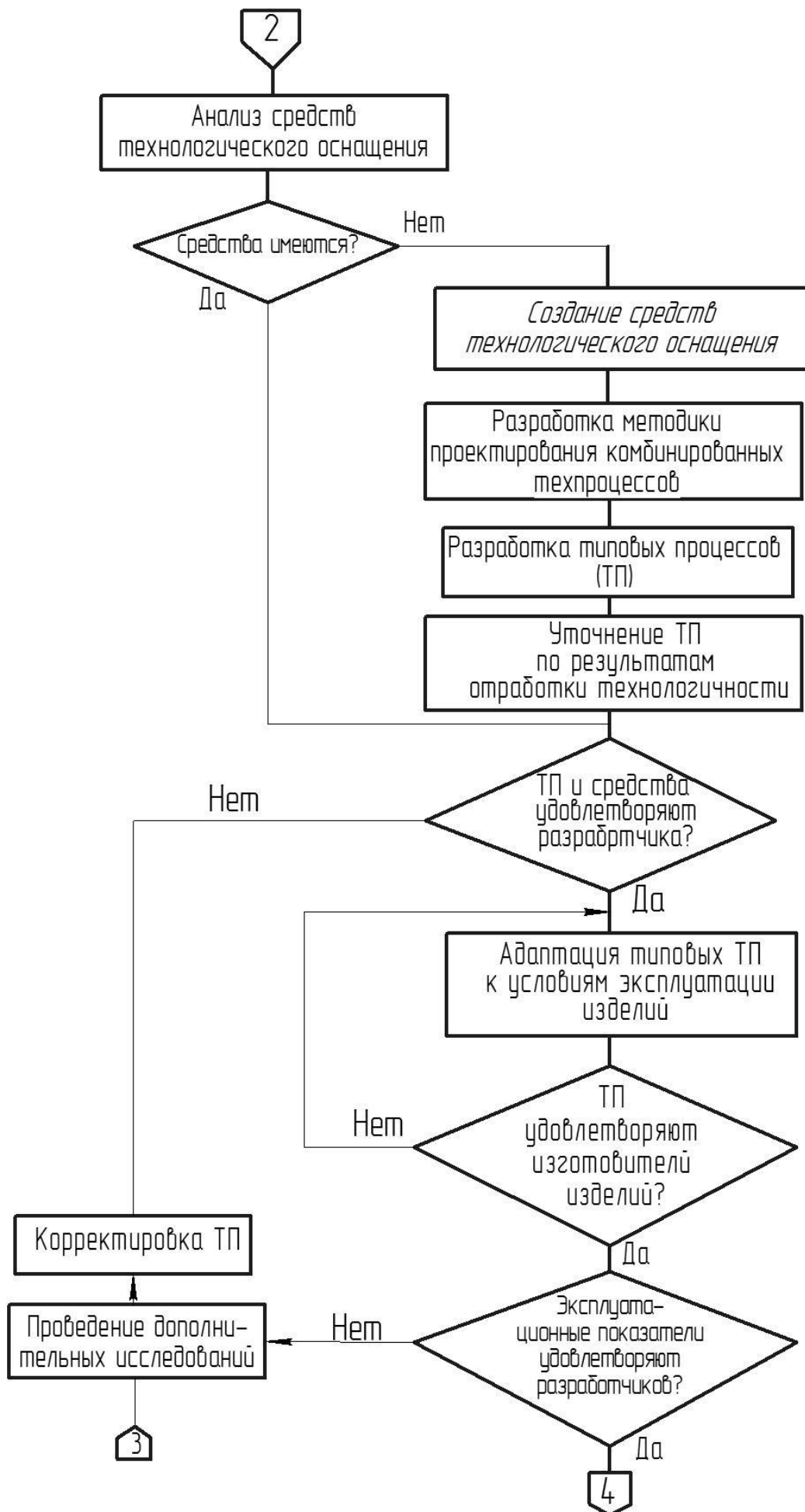
– обоснование выбора эффективных направлений исследований и создание доказательной базы для оценки результатов, полученных в процессе выполнения экспериментальных работ и внедрения их результатов;

– разработка механизма и моделирование процесса, происходящего при комбинированном воздействии с использованием постоянных и импульсных воздействий электромагнитных полей;

– проектирование типовых комбинированных техпроцессов, отвечающих эксплуатационным требованиям по восстановлению характеристик высоконагруженных изделий.







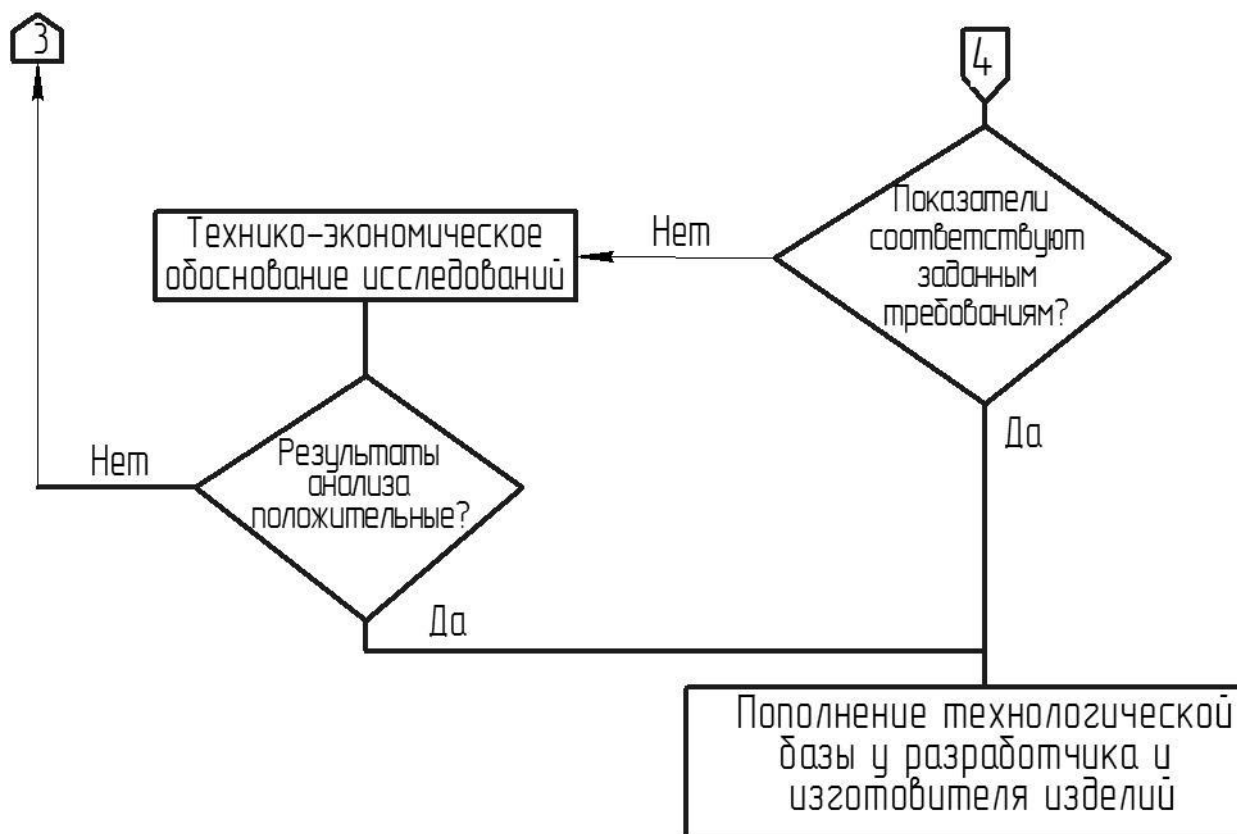


Рис. 2. 5 – Алгоритм проведения научных исследований, необходимых для решения поставленных задач

## Выводы по главе 2

1. Анализ состояния вопроса и опыт применения комбинированных методов обработки с воздействием управляемых электромагнитных полей позволил сформулировать рабочие гипотезы и построить пути решения поставленных задач.

2. Выполнен анализ применяемых в промышленности и использованных в работе видов серийных и созданных соискателем средств для выполнения достоверных экспериментальных исследований комбинированных методов обработки высоконагруженных крупногабаритных деталей и сборочных единиц.

3. Проведен анализ и рассмотрены перспективы применения известных способов комбинированной обработки, что является базой для создания новых



способов и устройств для формирования теоретических основ новых технологических процессов с научно обоснованным использованием гальваномеханических покрытий и лучевых послойных воздействий управляемыми электромагнитными воздействиями.

4. Обоснованы пути и методы проектированию технологических процессов для восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных технологичных изделий различных габаритов .

5. Разработан алгоритм выполнения работы и проведения исследований для достижения поставленной цели, в котором обоснована последовательность выполнения исследований, предложена база и механизм проведения теоретических, экспериментальных работ и показаны возможности использования в промышленности полученных результатов,

# Глава 3 Механизм протекания и управления процессом комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий

## 3.1. Физическая модель процесса, определяющая возможности управления электромагнитными воздействиями

### 3.1.1 Распределение магнитных силовых линий в индукторе

Внутренние напряжения, вызываемые электромагнитными силами, возникающими в процессе импульсных воздействий, зависят [87] от законов распределения магнитных силовых линий [120], расположенных в межэлектродном зазоре разрядника. Их место в зазоре определяется условиями работы индуктора, типовая конструкция которого приведена на рис. 1.6.

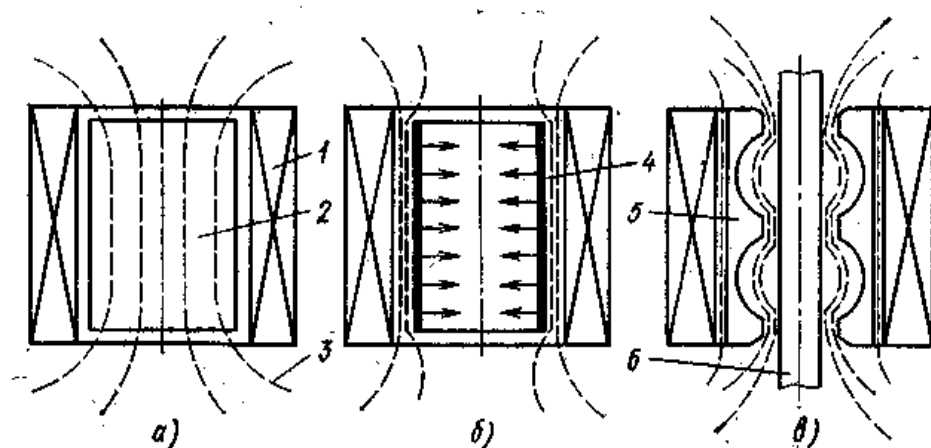


Рис. 3.1 –Закономперность распределения магнитных силовых линий в зависимости от условий работы индуктора

Для описания процесса образования электромагнитных воздействий и их взаимодействия с остаточными напряжениями в слоях заготовки используют схему на рис.3.1, где индуктор 1 содержит (рис,3.1 а) диэлектрический цилиндр 2, в котором образуются силовые линии 3. Они характеризуют плотность распределения в индукторе магнитного потока. От размещения линий зависят силы, определяющие внутренние напряжения в детали или сборном узле.

Рекомендованное в [120] минимально возможное без саморазряда расстояние между электродами обеспечивает высокую плотность распределения силовых линий, определяет построение в цилиндре сильного магнитного поля. Но при большем расстоянии энергия поля ослабевает, поэтому зазор должен иметь минимальную величину. По [120], энергия, запасенная в концентраторах, пропорциональна квадрату интенсивности поля, при этом ее большая часть концентрируется на площади, занимаемой витком. Наличие цилиндра 2 на рис. 3.1 не оказывает влияния на формирование поля распределения силовых линий, поскольку они достаточно равномерно размещены внутри соленоида, а зона действия поля ограничена диэлектриком и накопленная энергия практически полностью возвращается в конденсатор, где вызывает его нагрев, что учитывается при расчете системы охлаждения индуктора.

Если внутрь индуктора установлен металлический цилиндр 4 ( см. рис. 3.1, б), то на его поверхности возникают вихревые токи, которые усиливают поле в пространстве между индуктором и цилиндром, перераспределяют внутренние напряжения с нарастанием локальных воздействий, что может привести к деформации и разрушению детали или, в нашем случае, цилиндра.

Энергия электромагнитных воздействий определяется как сумма механической энергии, энергии магнитного поля и энергии, расходуемой на образование выделяющейся теплоты. При используемых температурах эксплуатации магнитоэлектрических установок (типа приведенных на рис. 1.7) не известны металлы с идеальной проводимостью, поэтому магнитное давление после импульса не способно поддерживаться в течение длительного времени из-за стекания разряда. При регулировании режимов процесса наружное воздействие поля уравнивается внутренним давлением, а перепад внутренних напряжений способен выравниваться. Для достижения наибольшей эффективности процесса в [120] рекомендуют применять короткие импульсы с продолжительностью 10 – 20 мкс, чтобы проникновение магнитного поля в заготовку ограничивалось тонкими поверхностными слоями, где закономерности управления [87], близки к процессам для аддитивных технологий.

Энергию импульсного магнитного поля для деталей увеличенных размеров можно распределить и выравнять по площади заготовки  $b$  (рис. 3.1,в), концентрируя поле по слоям на одном участке заготовки и ослабляя его на другом. Для этого используют специальные металлические концентраторы 5, которые могут иметь разнообразную форму и в сочетании с различными по форме индукторами способны обеспечивать управление внутренними напряжениями для большого числа технологических операций с электромагнитным воздействием, используемым для выравнивания внутреннего состояния объекта обработки.

### 3.1.2..Физические процессы, протекающие при разрядах

Разрядная цепь электроимпульсной установки обладает емкостью  $C$ , индуктивностью  $L_{экв}$  и сопротивлением  $R_{экв}$ . Индуктивность разрядной цепи  $L_{экв}$  зависит от магнитного потока рассеяния, который имеет повышенную величину и детально исследован в [120], где ранее использовался для очистки тары. Однако эта индуктивность зависит от конфигурации места обработки детали, формы рабочих участков возбuditеля, длины соединительных проводов, от электромагнитных свойств материала детали. При перераспределении внутренних напряжений в процессе выравнивания сил деформации заготовки эквивалентная индуктивность  $B_{экв}$  может незначительно изменяться, Однако этим в расчетах можно пренебречь, т.к. колебание величины эквивалентной индуктивности  $L_{экв}$  даже для крупных заготовок не превышает 1 мкГн.

Эквивалентное сопротивление  $R_{экв}$  содержит величину необратимых потерь энергии в разрядной цепи: учитывает расход энергии на нагрев зоны обработки при деформации и другие потери. Расчет эквивалентных сопротивлений выполняется весьма приближенно, и при назначении режимов обработки и управления процессом используют его приближенные средние или экспериментальные значения. В разрядной цепи величины  $C$ ,  $L_{экв}$ ,  $R_{экв}$  назначают при условии, что ток  $I$  периодически затухает, как это показано на рис. 3.3, Тогда скорость его изменения в начале разряда конденсаторов становится наибольшей. Величина режимного параметра  $R_{экв} = \sqrt{L_{экв}/C}$  может быть рассчитана через

период собственных колебаний разрядного тока. Здесь . наибольший ток  $I_{\max}$  будет наблюдаться в конце первой четверти  $T_1$  периода  $T$  ( $T_1=0,25T$ ).

Для заготовок из ферромагнетика индуктивность  $B_{\text{экв}}$  растет, а частота снижается до  $f_0 = 10$  кГц ( $T_1 = 100$  мкс).

Электромагнитные силы  $F_3$  способны увеличивать напряженность магнитного поля  $H_1$  на внешней стороне заготовки и уменьшать напряженность  $H_2$  на внутренней (см. рис 3.1). Управление процессом проводится путем изменения силы тока разряда и его интенсивности и высокой скоростью его изменения. Электромагнитные силы имеют экстремальные значения в первой четверти периода разряда в течение  $\leq 0,25T$ . Это время используется для описания процесса протекания импульса. Физика процесса магнитоимпульсного формообразования подробно исследовалась в [87] на примерах обжатия цилиндрической заготовки индукционным способом, что дает возможность создать теоретические основы управления электромагнитными силами на различных слоях заготовки при аддитивных процессах выравнивания внутренних сил.

Установлено, что сила тока в начале разряда увеличивается по линейному закону, тогда скорость нарастания тока в первой четверти периода

$$dI/d\tau = I_{\max}/0,25T = 0,3U_C/L_{\text{экв}}, \quad (3.1)$$

Из (3.1) для напряжения на конденсаторе  $U_C$

$$I = (0,3U_C/L_{\text{экв}}) \tau. \quad (3.2)$$

Напряженность магнитного поля на внешней стороне заготовки приведена для контура на рис. 3.1.

$$H_1 = K_{n1}NI, \quad (3.3)$$

где  $K_{n1}$  - постоянная процесса. выбирается по справочникам или по [77]. Величины числа  $N$  (витки обмотки возбуждителя) и  $I$  выбираются по справочникам или по [77] и используется при проектировании индукторов магнитоимпульсного оборудования.

Напряженность магнитного поля  $H_2$  внутри заготовки изменяется значительно медленнее, чем снаружи. Для контура  $L_2$  напряженность поля  $H_2$  рассчитывают по [120] через силу разрядного тока  $I$  в обмотке возбуждителя и заготовке, где ток  $I_n$ , противодействует полю, проходящему через заготовку

$$H_2 = K_{H2}NI - K_{H2}I_n, \quad (3.4)$$

где  $K_{H2}$  — постоянная, численные значения которой выбираются из справочников или по [77].

В цепь заготовки включены активное сопротивление  $R_H$  и индуктивность  $L_H$ . Наведенный ток оценивается по зависимости (3.5) через постоянную времени  $\tau_H$ , требуемую для определения параметров импульса при расчете технологических режимов комбинированной обработки с учетом аддитивных процессов и при выборе параметров создаваемых установок для магнитоимпульсной обработки.

$$\tau_H = L_H/R_H. \quad (3.5)$$

По мере увеличения силы разрядного тока ЭДС и ток в заготовке стабилизируются. Как было показано ранее, напряженность магнитного поля  $H_2$ , полученная на внутренней стороне заготовки в начале разряда, стабильно возрастает и возникает «магнитная подушка», которая уменьшает величину электромагнитной силы  $F_d$ , рассчитываемой через постоянную времени  $\tau_H$ .

Для принятой в экспериментах цилиндрической заготовки (рис. 3.2) длина кольцевой цепи наведенного тока  $2\pi r_3$ , где  $r_3$  – радиус заготовки. Тогда площадь токопроводящей части заготовки равна  $I_3\delta_3$ , где  $I_3$  – высота заготовки;  $\delta_3$  – толщина поверхностного слоя или слоя покрытия, по которому проходит наведенный ток. Здесь активное сопротивление кольцевой цепи наведенного тока  $R_n$ , необходимого для моделирования процедуры формирования импульса, параметры которого рассчитывают по зависимости

$$R_n = 2\pi r_3 / (\gamma_3 \delta_3 l_3), \quad (3.6)$$

где  $\gamma_3$  – удельная проводимость материала заготовки.

Толщина слоя  $\delta_3$ , определяемая поверхностным эффектом, зависит от удельной проводимости  $\gamma_3$ , магнитной проницаемости  $\mu_3$  заготовки и частоты  $f$  разрядного тока. Переменный ток протекает в тонком слое ( $\delta_3$ ) поверхностной зоны заготовки или защитного покрытия

$$\delta_3 = 1/\sqrt{\pi^2 \gamma_3 \mu_3 f}. \quad (3.7)$$

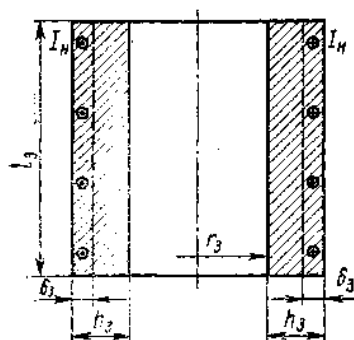


Рис. 3.2 – Схема действия электромагнитных сил

На частоту разряда у заготовок из электропроводных и ферромагнитных материалов влияет установленный выше «поверхностный эффект». С учетом этого установлено, что чем меньше толщина  $\delta_3$  поверхностного слоя, тем больше

сопротивление  $R_H$  и меньше величина постоянной времени  $\tau_H$ . Это требуется учитывать при построении математических моделей проектирования режимов обработки для создаваемых комбинированных технологических процессов с электромагнитным воздействием на процесс.

Индуктивность  $L_H$  цепи наведенного тока можно подсчитать по соотношениям в [77] и по величинам, принятым при расчете соленоидов в [120].

$$L_H = K_L r_3^2 / l_3, \quad (3.8)$$

где  $r_3$  и  $l_3$  — радиус и высота заготовки (рис. 3.2);  $K_L$  — постоянная, зависящая от соотношения  $l_3 / r_3$  (выбираются по справочникам или по [77]).

С учетом поверхностного эффекта получена зависимость (3.9) для расчета постоянной времени, величина которой влияет на выбор параметров создаваемых установок для магнитоимпульсной обработки.

$$\tau_H = K_L r_3 \sqrt{\gamma_3 / \mu_3 f} \quad (3.9)$$

Постоянная времени в (3.9) зависит от поверхностного эффекта в цепи наведенного тока и быстро снижается с ростом величины магнитной проницаемости и частоты разряда при уменьшении радиуса круглой заготовки и удельной проводимости ее материала.

Показатели технологических режимов в комбинированных методах обработки определяются параметрами магнитоимпульсного воздействия и определяются через соотношения между постоянной времени  $\tau_H$  и периодом разрядного тока  $T$ . Если постоянная времени значительно меньше периода ( $\tau_H < 0,25T$ ), то в течение первой четверти периода формируется наибольший наведенный ток. Для заготовок из материалов с низкой удельной проводимостью или с высокой магнитной проницаемостью наблюдается процесс, где при минимальных радиусах скругления участка детали возможно использование магнитоимпульсных установок с учетом выполнения операции на деталях больших габаритов. Минимальный радиус тем больше, чем выше магнитная



проницаемость и чем меньше удельная проводимость материала заготовки. При обработке, например, стальных заготовок их радиус  $r_{3\min} \geq 10\text{мм}$ .

Научно обоснованное использование установленных для магнитоимпульсного процесса физических закономерностей (раздел 3.1) позволяет разработать механизм управления процессом стабилизации внутренних напряжений, назначить достоверные технологические режимы и создать надежную методику расчета параметров создаваемого оборудования с магнитоимпульсным воздействием.

### **3.2 Механизм управления процессом стабилизации внутренних напряжений**

По.[120, 87] необходимым условием магнитоимпульсного воздействия является выполнение критерия (3.10) для постоянной времени  $\tau_n$

$$\bar{\tau}_n > 0,25T = 0,25/f. \quad (3.10)$$

Если в (3.10)  $\tau_n$  превышает четверть периода, то необходимо установить допустимые текущие значения напряженности на внутренней поверхности заготовки при условии что за время разряда колебания заготовки незначительны, не могут вызывать остаточных деформаций и не нарушают качественные показатели поверхностных слоев зоны обработки.

Для эффективного управления процессом магнитоимпульсных воздействий для управления состоянием внутренних напряжений первичный магнитный поток  $\Phi(\tau)$  внутри заготовки должен быть пропорционален силе разрядного тока, что особенно следует учитывать при проектировании или выборе параметров магнитоимпульсной установки и для расчета технологических режимов магнитоимпульсного воздействия.

Общий магнитный поток  $\Phi_2(\tau)$  внутри заготовки

$$\Phi_2(\tau) = \Phi(\tau) - \Phi_n(\tau), \quad (3.11)$$

где  $\Phi_n(\tau)$ -магнитный поток, созданный наведенным током  $I_n$ . ( $\Phi_n(\tau)=L_n I_n$ )

Силу тока  $I_n$ , используемого в импульсе определяют по закону электромагнитной индукции и закону Ома:

$$-\frac{d\Phi_2(\tau)}{dt} = e_n = R_n I_n, \quad (3.12)$$

где  $e_n$  – ЭДС в цепи наведенного тока. Из соотношений (3.12) получают дифференциальное уравнение, решая которое для линейно нарастающей силы разрядного тока, находят силу наведенного тока и магнитный поток  $\Phi_2(\tau)$  внутри заготовки. В начале разряда  $\Phi_2(0) = 0$ . Затем компенсирующее действие наведенного тока ослабевает, и магнитный поток внутри заготовки увеличивается. При  $\tau \rightarrow \infty$  этот поток, как и разрядный ток, начинает расти линейно, что упрощает процесс управления механизмом формирования импульса.

Внутри заготовки создается искомая напряженность поля, что открывает возможность изменять параметры внутренних напряжений и достигать выравнивания поля.

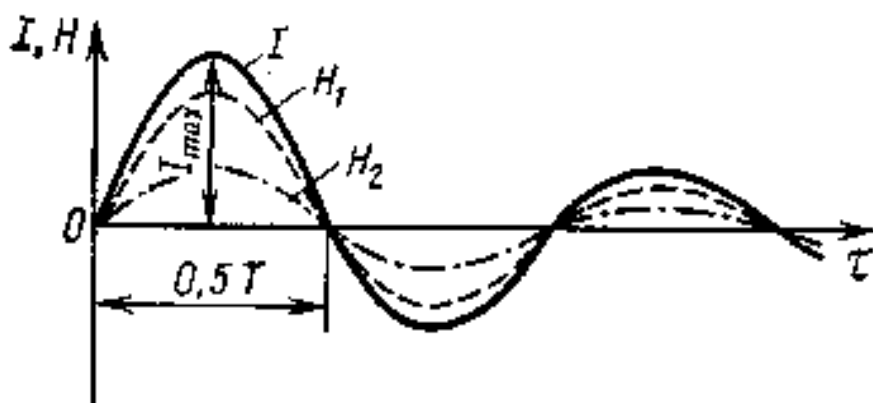
$$H_2 = \Phi_2(\tau) / (\mu_0 \mu r_2^2). \quad (3.13)$$

При малой величине постоянной времени  $\tau_n$  в цепи наведенного тока напряженности магнитного поля по обе стороны заготовки быстро выравниваются, а плотность  $f_s$  поверхностных сил после кратковременного переходного процесса падает. В этом случае магнитоимпульсное воздействие для комбинированного процесса, особенно для выравнивания свойств крупных изделий, в большинстве случаев не эффективно. Поэтому нерационально, как это установлено по результатам оценки производственной технологичности, применение здесь комбинированного процесса с электромагнитным импульсным воздействием. В остальных случаях постоянная времени  $\tau_n$ , а, следовательно, и электромагнитная сила, возрастают с увеличением радиуса заготовки. Показатели качества обработки наиболее выигрышные, если радиус заготовки приближается к размеру обмотки возбуждателя и зазор между заготовкой и обмоткой минимальный. Это следует учитывать при проектировании оборудования и

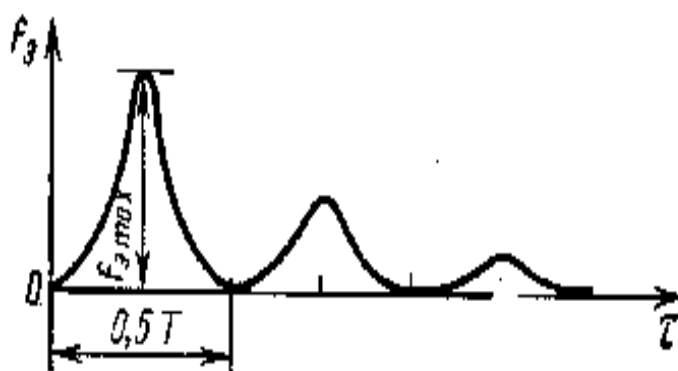
режимов. При таких условиях индуктивность разрядной цепи наименьшая. В этом случае  $H_2$  стремится к 0, а плотность электромагнитных сил рассчитывают по (3.14)

$$f_{\text{в}} = 0,5\mu_0 (K_{H_1} N)^2 I^2. \quad (3/14)$$

Плотность сил, определяющая режимы управления лучевым воздействием в комбинированном процессе с использованием аддитивной процедуры, растет с увеличением начального напряжения  $U_c$  конденсаторов, числа витков  $N$  обмотки возбуждителя, уменьшением ее высоты и индуктивности. Если принять плотность электромагнитных сил равной в начале разряда нулю, то изменение плотности электромагнитных сил в течение импульса на рис. 3.3 можно считать обоснованным.



а



б

Рис. 3.3 – Законы управления плотностью электромагнитных сил во время импульса

а – сила тока; б – плотность электромагнитных сил

Для закона изменения сил, приведенного на рис. 3.3, их расчет может быть выполнен по (3.15)

$$f_{\text{э max}} = 0,12 \mu_0 (K_{H1} N)^2 U_C^2 C / L_{\text{экв}}. \quad (3.15)$$

В первом полупериоде разряда (рис. 3.3) выделяется основная часть энергии, накопленной конденсаторной батареей. Во втором полупериоде могут меняться направления магнитных полей по обе стороны заготовки, хотя направление электромагнитной силы сохраняется. Следовательно, расчет параметров следует проводить с использованием сведений первого полупериода.

Приведенный анализ, полученный для цилиндрической заготовки, правомерен и для изделий других конфигураций различных размеров.

### 3.3 Методика расчета параметров магнитоимпульсной установки

Для расчета параметров магнитоимпульсной установки, включая характер действия сил и управление магнитоимпульсным процессом комбинированного метода обработки следует установить закономерности распределения плотности электромагнитных сил по толщине, особенно крупных заготовок (рис. 3.4), что влияет на свойства поверхностного слоя и распределение сил с учетом действия закономерностей для аддитивных технологий. Ранее проведенные исследования в [31,69] подтверждают качественные изменения, приведенные на рис. 3.4, в частности доказывают, что заявленные нами изменения магнитной индукции в поверхностном слое заготовки вызывают появление значимых электромагнитных сил от наведенного тока плотностью  $J_H$ , стабилизирующего процесс за счет противодействия изменению магнитной индукции в заготовке.

Показанная на рис.3.4 объемная плотность электромагнитных сил может быть рассчитана по (3.16)

$$\vec{f}_{\text{эV}} = \vec{J}_H \times \vec{B}_1 \quad (3.16)$$

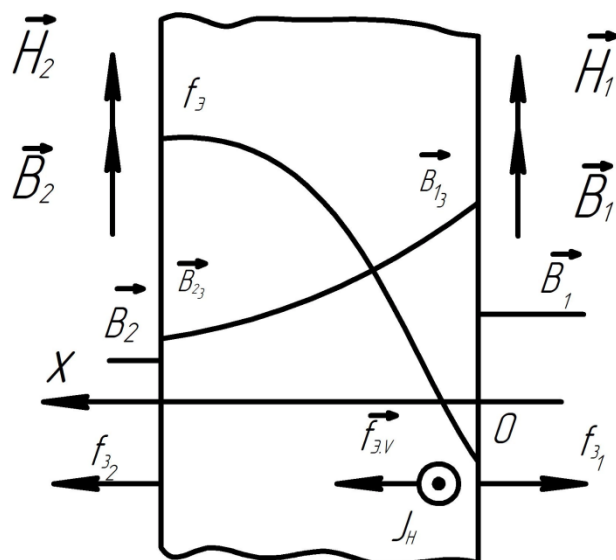


Рис. 3.4 – Закон распределение плотности электромагнитных сил по толщине слоев, полученных по аддитивным технологиям или защитными покрытиями

$B_1$  – индукция магнитного поля снаружи заготовки в поверхностном слое;  
 $B_{13}, B_{23}$  – текущие значения индукции на наружной и внутренней поверхности заготовки,  $B_2$  – индукция магнитного поля за пределами заготовки

На внешней границе заготовки плотность поверхностных сил:

$$f_{31} = 0,5B_1H_1 - 0,5H_{13}B_{13} = 0,5H_1^2(\mu_0 - \mu_3), \quad (17)$$

где  $H_1, B_{13}$  - соответственно напряженность поля и магнитная индукция на внешней поверхности заготовки.

### 3.4 – Правомерность установленных в главе закономерностей импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий

Правомерность установленных в главе закономерностей импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий подтверждена опытом практического применения установленных теоретических зависимостей и приведенными в работе экспериментальными результатами.

Основным показателем является хорошая (в пределах 5 %) сходимость, приведенная на рис. 3.5.

В [103] рассмотрено влияние изучаемых параметров на эксплуатационные характеристики деталей, полученных на примерах изготовления типовых металлических деталей, в том числе с покрытием, отвечающим требованиям обеспечения качества при эксплуатации изделий.

На рис. 3.5 показано изменение величины и характера остаточных напряжений в слоях с гальваническим покрытием слоем хрома, который наносился на шток толкателя гидравлического агрегата из стали с режимом: плотность тока  $20 \text{ кА/м}^2$ , температура рабочей среды  $60 - 65^\circ\text{C}$

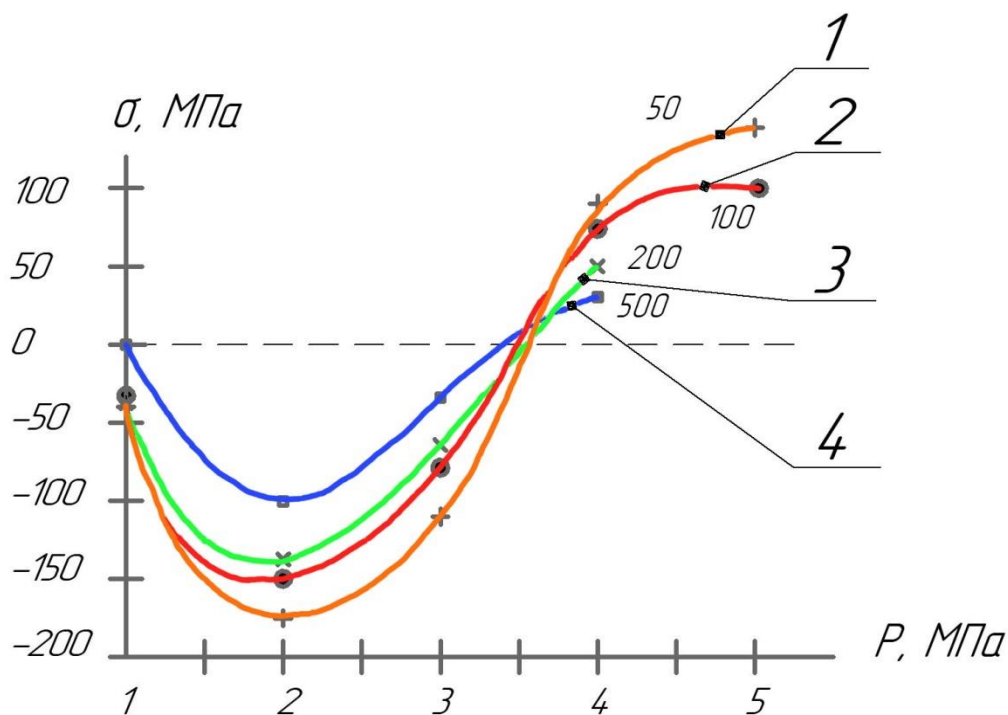


Рис. 3.5 – Остаточные напряжения ( $\sigma$ ) в слоях поверхностного слоя, полученных при различных силах давлениях ( $P$ ) инструмента.

Толщина покрытия, мкм: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 500.

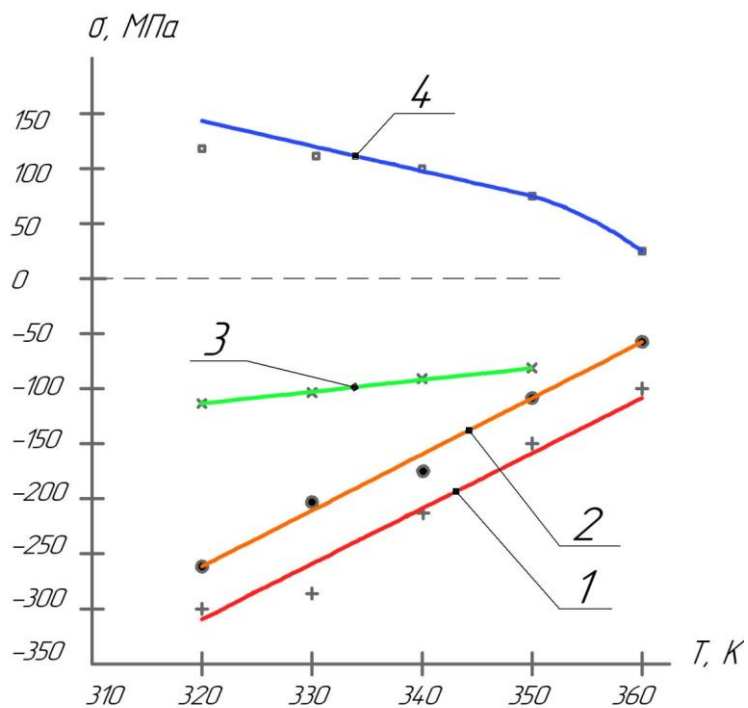
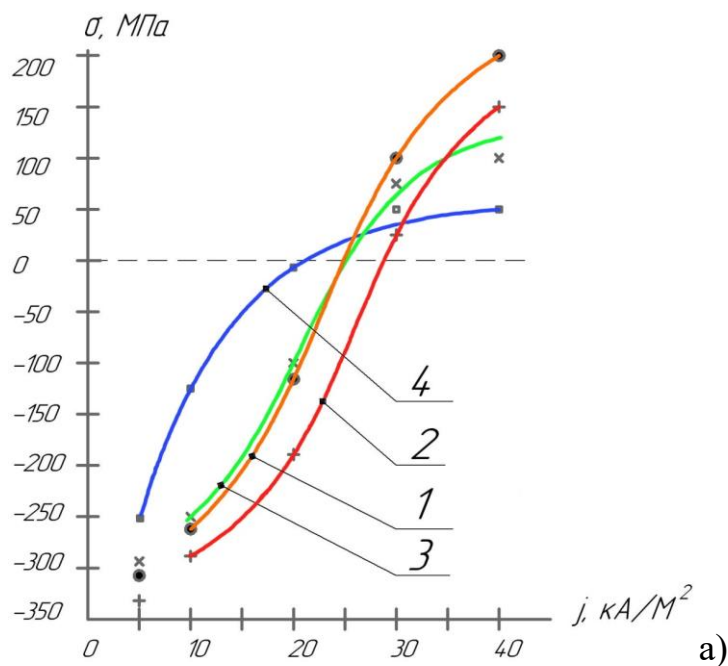
Толщина каждого слоя 0,02 мм

На рис. 3.5 точками показаны результаты экспериментов на деталях, где предельная глубина исследованных слоев находится в пределах толщин нанесенных покрытий. Изучение материалов для широкого диапазона внешних

силовых воздействий, полученных действием внутренних напряжений, а в экспериментах- механическим эквивалентным воздействием, показало, что при расчете параметров электромагнитного воздействия выравнивание внутренних напряжений не следует обнулять, а требуется их формировать в зависимости от условий эксплуатации изделия и соблюдения показателей качества.

На рис. 3.5 у деталей с хрупким толстослойным покрытием (например, однородных слоев из химически чистого хрома) после восстановления детали и обработки их несколькими магнитными воздействиями по расчетной комбинированной технологии были получены желаемые сжимающие остаточные напряжения без концентрации напряжений относительно основного подслоного материала. Анализ рис. 3.5 показывает, что для этого давление инструмента следует назначать в диапазоне 1,5-3 МПа. Экспериментально установлено, что после импульсных воздействий величина сжимающих напряжений снижается по мере возрастания толщины наносимого покрытия до опасной величины, снижающей силы сцепления покрытия, поэтому превышение этого показателя сверх 500 мкм нежелательно, т.к. возникает вероятность растрескивания слоя и его осыпание. Это эквивалентно действию сил внутри детали, приведенной на рис.2.1 до магнитоимпульсного воздействия ,вызвавших ее разрушение при испытаниях.

Кроме давления инструмента на остаточные напряжения значительное влияние оказывает применяемая при импульсах средняя плотность тока (рис. 3.6.а) и температура в зоне воздействия импульса (рис. 3.6,б)



б)

Рис. 3.6 – Влияние режимов обработки на величину статочных напряжений

а) в зависимости от средней плотности тока.

Средняя толщина покрытия, мкм: 1 – 50; 2 – 100; 3— 350; 4 –500

Среднее давление инструмента - 2,0 МПа.

Температура рабочей среды – 250-270°С

б) при различной температуре в зоне обработки.

Средняя толщина покрытия, мкм: 1-50; 2-100; 3-200; 4-400

Среднее давление инструмента - 2,0 МПа.

Плотность тока - 12 кА/м<sup>2</sup>.



Было установлено, что сжимающие напряжения (рис. 3.6.а), требуемые для получения качественных гальванических покрытий с толщиной до 500 мкм, обеспечиваются, если средняя плотность тока на последнем этапе нанесения хромового покрытия не превышает  $30 \text{ кА/м}^2$ , что требуется учитывать при назначении режимов проведения процесса.

Влияние температуры электролита на величину остаточных напряжений рассмотрено на рис. 3.6.б, из которого следует необходимость в снижении рабочего диапазона температуры до 330-350 К.

Управляемые электромагнитные воздействия с расчетными параметрами позволяют снизить высоту микронеровностей деталей, в том числе для рассматриваемого случая нанесения хромовых покрытий, наносимых на сталь, с исходной шероховатостью  $R_a = 5 \text{ мкм}$  при ее снижении до 0,03-0,06 мкм. Шероховатость поверхности существенно зависит [103] от воздействия силовых факторов на покрытие (рис. 3.7.а) и температуры рабочей среды (рис. 3.7.б).

Анализ рис. 3.6 – 3.7 позволяет подтвердить положительное влияние расчетных технологических параметров комбинированного процесса с выравниванием внутренних напряжений импульсными воздействиями через покрытие на показатели качества детали с покрытием и назначать режимы обработки с учетом эксплуатационных условий работы восстанавливаемой детали, часть которых обосновывается данными экспериментов на рисунках. Так гальваноконтанное восстановление с использованием импульсного магнитного воздействия обеспечивает получение деталей с покрытием с точностью получения профиля по 7-8 качеству, что соответствует или превышает требуемые показатели качества новой детали и доказывает перспективность использования комбинированных процессов с управляемым выравниванием внутренних напряжений по установленным закономерностям для электромагнитных воздействий. Однородный слой, получаемый покрытиями, дает основания утверждать, что установленные количественные зависимости справедливы для проектирования технологических режимов и средств технологического оснащения в машиностроении.

Микротвердость участков с покрытием после выравнивания внутренних напряжений электромагнитными импульсными воздействиями достигает 11000-11500 МПа [25] с узким диапазоном рассеивания, что на 15-20 % выше, чем при стандартном хромировании [24].

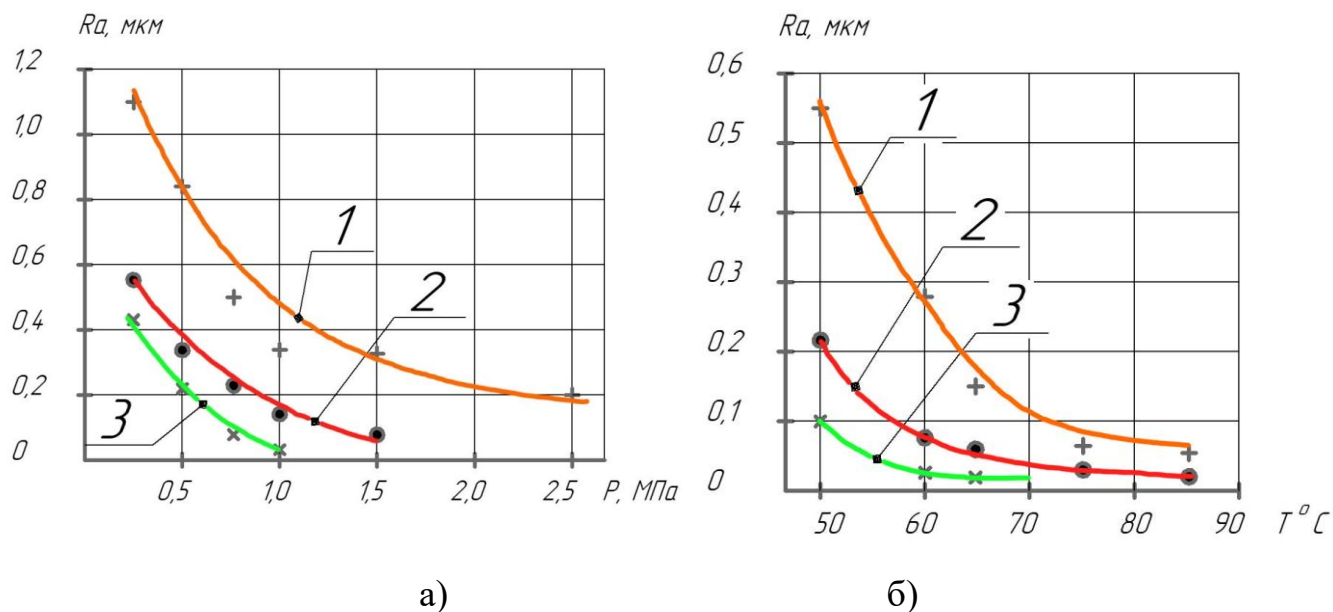


Рис. 3.7 – Зависимость шероховатости поверхности от режимных параметров после послойного выравнивания внутренних напряжений в покрытии импульсными воздействиями

а) от давления инструмента при использовании расчетных режимов гальванического нанесения хромового покрытия

Средняя температура рабочей среды- 250-260°C

Средняя плотность тока  $\text{кА/м}^2$ : 1-15-16; 2-9,5-10; 3-5-6.

б) от температуры жидкой рабочей среды (электролита)

Контактное импульсное давление инструмента - 1,5 МПа

Средняя плотность тока  $\text{кА/м}^2$ : 1-22; 2-16; 3-6.

Новый процесс в несколько раз повышает износостойкость узлов трения [25]. Там же указывается, что хромированные детали устойчивы к действию агрессивных сред и температурным перепадам при эксплуатации.

### **Выводы по главе 3**

1. Рассмотрен механизм протекания процесса комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий, позволивший создать физическую модель, определяющую возможности управления электромагнитными воздействиями.

2. На базе физической модели установлены закономерности построения механизма и выполнено математическое описание комбинированного электромагнитного импульсного процесса для деталей различных габаритов

3. Раскрыт механизм импульсных взаимодействий, требуемый для решения задачи 4 работы.

4. Сформированы доказательства правомерности установленных в главе закономерностей для их использования при восстановлении эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий.

5. Раскрыты возможности комбинированного электромагнитного импульсного восстановления эксплуатационных характеристик высоконагруженных изделий, в том числе при проектировании перспективных комбинированных технологических процессов для заготовок с покрытиями.

## **Глава 4 Проектирование технологического процесса качественной магнитоимпульсной обработки заготовок**

Режимы магнитоимпульсной обработки, применяемые для повышения качества поверхностного слоя изделий различного назначения, достаточно полно исследованы в работах [69, 70], что послужило базой для создания методов проектирования комбинированных технологических процессов, структура которых включает основные этапы.

### **4.1 Этапы проектирования технологического процесса**

#### **4.1.1. Исходные данные**

Исходные данные для проектирования технологического процесса магнитоимпульсной обработки, обеспечивающей стабилизацию внутренних напряжений деталей различной формы, в том числе крупногабаритных конструкций, включают типовую информацию о геометрии, свойствах материала заготовок, методах их получения, режимах обработки. Эффективность разработанного технологического процесса оценивают по стабильности получения требуемой точности и эксплуатационных характеристик, главной из которых для изделий авиакосмической техники является ресурс и безотказность работы изделий. Требуется также обосновать назначение и расчет режимов, учитывающих физические положения механизма комбинированной обработки с магнитоимпульсным воздействием. При выборе или проектировании установки необходимо обосновать схему возбудителя импульсов, места расположения участков заготовки, где следует обеспечить стабилизацию внутренних напряжений. Кроме того необходимо наметить виды и объем испытаний, охватывающий основные узлы и детали создаваемого, восстанавливаемого или модернизируемого изделия. Это должно учитываться при разработке технической документации.

#### 4.1.2.Отработка технологичности

Следующим этапом является отработка технологичности, прежде всего производственной, где следует учитывать:

- возможность непосредственного силового воздействия на заготовку возбудителя вибраций. Нарушение этого условия может вызвать излишние ударные нагрузки на инструмент и его разрушение;

- учитывать ограничения, обеспечивающие сохранность заготовки в процессе обработки, для чего использовать сведения о жесткости заготовки под действием импульсов ,полученные на стадии освоения нового процесса, и периодически контролировать состояние технологической дисциплины при серийном выпуске изделий;

- использовать режимы адаптированные к конечным показателям по заданной точности заготовок. Так опыт вибрационной стабилизации сборных конструкций показал, что процесс целесообразно выполнять в несколько переходов: на первом, занимающем около половины времени обработки применять наибольшую расчетную амплитуду вибраций обрабатываемого участка. На следующих переходах режим смягчают. Здесь контроль выполняется по времени обработки и величине амплитуды колебаний участка заготовки.

#### 4.1.3. Этап работы на оборудовании

Этап включает подготовку установочных баз, где для этой цели используют стандартные упругие станочные опоры, подбираемые с учетом массы, геометрии обрабатываемых деталей. Опыт освоения магнитоимпульсной стабилизации показал, что здесь предпочтительнее применять резиновые амортизаторы, обеспечивающие получение амплитуды колебаний под возбудителем до 1,5-2,0 мм, что укладывается в рабочий диапазон изменения этого параметра.

Количество опор (не менее 3) зависит от размеров и формы опорной поверхности обрабатываемой заготовки. Для этого рассчитывают интервал между опорами, который берут в диапазоне 0,25-0,3 от длины опорной поверхности. Если геометрия опорной поверхности не позволяет установить

опоры в расчетных местах, то их размещают симметрично относительно границ опорных поверхностей детали.

Изменение зазоров между возбудителем и заготовкой следует регулировать в диапазоне  $\pm 0,3$  мм. Для обеспечения такого требования предлагается устанавливать на базовые поверхности токопроводящие профильные вставки, изменяющие геометрию опорной поверхности заготовки и обеспечивающие стабилизацию зазоров.

#### **4.2 – Назначение и расчет технологических режимов комбинированной обработки с механическим воздействием по закономерностям вибрационной импульсной обработки**

При отработке импульсных режимов обработки настраивают частоту вибраций, желательно до появления стабильной резонансной величины амплитуды. В качестве базы для настройки используют диапазон от 50 до 100 Гц, что не вызывает технологических сложностей.

Контроль режима обработки может выполняться по изменению силы тока, подаваемого на вибратор. Однако с увеличением габаритов детали этот показатель становится нестабильным и при изменении менее 12-15 % становится ненадежным показателем для контроля. Поэтому управление процессом выполняют по времени обработки, которое устанавливают при настройке, принимая для крупных заготовок за начальное значение 60 минут и снижая этот показатель в процессе отладки режима с интервалом 5-10 минут.

В разделе 3.1 показано, что для магнитоимпульсного формообразования качественных металлических деталей требуется обеспечить постоянство зазора между обмотками возбудителя и поверхностью заготовки. Это экономически обосновано при одноразовых возбудителях, используемых при штамповке, но не приемлемо в случае применения многоразовых инструментов, требуемых для стабилизации свойств, в частности выравнивания внутренних напряжений, таким методом. Для рассматриваемого случая обработки управляющей функцией

процесса, характеризующей граничные условия импульсной обработки, является критерий

$$F_{эм} < \sigma_{\tau}, \quad (4.1)$$

где  $F_{эм}$  -поверхностная плотность электромагнитных сил (кг/м.сек<sup>2</sup>);  $\sigma_{\tau}$  -предел текучести материала заготовки (кг/м.сек<sup>2</sup>).

По [120]

$$F_{эм\max} = \frac{0,12\mu_0 (K_{H1} \cdot N)^2 U_c^2 \cdot C}{L_{экв}}, \quad (4.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная среды, в которой происходит процесс обработки (Гн/м). Для воздушной среды  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$K_{H1}$  – коэффициент, учитывающий интенсивность нарастания тока в импульсе по направлению действия магнитного поля (1/м);

$N$  – количество витков обмотки многофазового возбуждителя. По рекомендациям [77, 87, 120]  $N = 3-5$ ;

$U_c$  – напряжение (В) на конденсаторах. Для рассматриваемого случая  $U_c = 1-2$ кВ;

$C$  – емкость конденсаторной батареи (мкФ). Здесь «С»-расчетный параметр режима управляемой магнитоимпульсной обработки;

$L_{экв}$  – эквивалентная индуктивность (Гн) разрядной цепи установки (обычно указывается в паспорте оборудования).

$$L_{экв} = \frac{K_1 U_c T}{J_{\max}}, \quad (4.3)$$

где  $T$  – длительность протекания разрядов, которая может быть регулируемой величиной или рассчитываться по [119] через частоту следования рабочих разрядов с учетом коэффициента полезного использования разрядов  $K_{H1}$  (по [119]  $K_{H1} = 0,05-0,1$ ). Для большинства установок по [77]  $T$  в формуле (4.3) должна быть менее 100 мкс.

Сопротивление  $R$  находят через  $L_{экв}$

$$R = \sqrt{L_{\text{экв.}}/C}. \quad (4.4)$$

В (4.3)  $K_1$  – коэффициент, характеризующий максимальный ток в разряде, который формируется в период  $1/4$  от начала импульса и в воздушной среде равен  $K_1 = 0,075$ .

Для некоторых видов сварных заготовок контроль режима обработки выполняют по наибольшему току в импульсе ( $I_{\text{max}}$ ), который по [120] составляет

$$J_{\text{max}} = 0,35U_c \sqrt{\frac{L_{\text{экв.}}}{C}}. \quad (4.5)$$

Расчет по представленной методологии (зависимости (4.4)–(4.5) позволяет найти требуемую емкость конденсаторной батареи

$$C = \frac{\sigma T}{K_2 \mu_o K_{H_1}^2 N^2 U_c J_{\text{max}}}, \quad (4.6)$$

где  $K_2$  – коэффициент, учитывающий взаимное влияние параметров импульсов магнитоимпульсной обработки. Для рассматриваемого случая  $K_2 = 1,6$ .

Выбор напряжения на конденсаторах выполняют по. [120, 77] с учетом получения максимального ресурса многократного возбудителя, на котором наблюдается активная эрозия в период действия импульсов. Диапазон напряжений в применяемых установках составляет от 1 до 50 кВ. В [77] предложены предельные значения энергии импульса  $W < 10$  кДж для формообразования различных материалов на одноблочных установках. В этом случае для выравнивания внутренних напряжений сборных конструкций, полученных, например, сваркой, расчетную энергию снижают на 20–25 % и находят  $U_c$  по упрощенной зависимости

$$U_c = \sqrt{\frac{2K_3 W}{C}}, \quad (4.7)$$

где  $K_3$  – коэффициент снижения энергии импульса относительно показателя, приведенного в [77, 119] применительно к объемному деформированию и



отвечающего критерию (4.1) ( $K_3 = 0,75-0,8$ ). Его величина зависит от уровня технологичности [81] при обработке, включая качество подготовки поверхности аналогично [49].

### **4.3 Обеспечение качественных показателей комбинированной обработки с использованием импульсного электромагнитного поля**

После стабилизации остаточных напряжений в готовой детали контроль качества обработки выполняют по результатам измерения размеров детали в базовых точках. Операция обычно выполняется в начале процесса на одной или нескольких обработанных деталях или на готовом сборном узле. Результаты измерения остаточных напряжений после комбинированной обработки с магнитоимпульсным и механическим воздействием достаточно полно показаны в [87], где оценка стабильности их величины выполняется по осредненной величине неравномерности остаточных напряжений при сборке (в том числе заготовок больших габаритов со сложной конфигурацией) от времени магнитоимпульсной обработки. На примере сварной конструкции стойки фрезерного станка показана неравномерность остаточных напряжений узлов из стали 3 с габаритами 100 X 600 X 950 мм при расчетном размещении возбудителей вибрации. Основным режимным параметром при моделировании процесса назначения режимов для формирования импульсов является время действия и управление процессом магнитоимпульсной обработки. Результаты расчетов следует отрабатывать на натуральных образцах и по результатам комплексных измерений уточнять время обработки, которое возрастает по мере увеличения габаритов детали. В случае обработки меньшей детали достигнута минимальная трудоемкость, которая составляет около 20 минут, а для более крупной станины этот оценочный показатель превышает 40 минут, т.е. трудоемкость возрастает минимум в 2 раза, что необходимо учитывать при отработке технологичности.

Конечные рабочие режимы стабилизации стойки: время обработки 20 мин, частота вибраций в диапазоне 55–65 Гц, процесс выполняется в резонансном

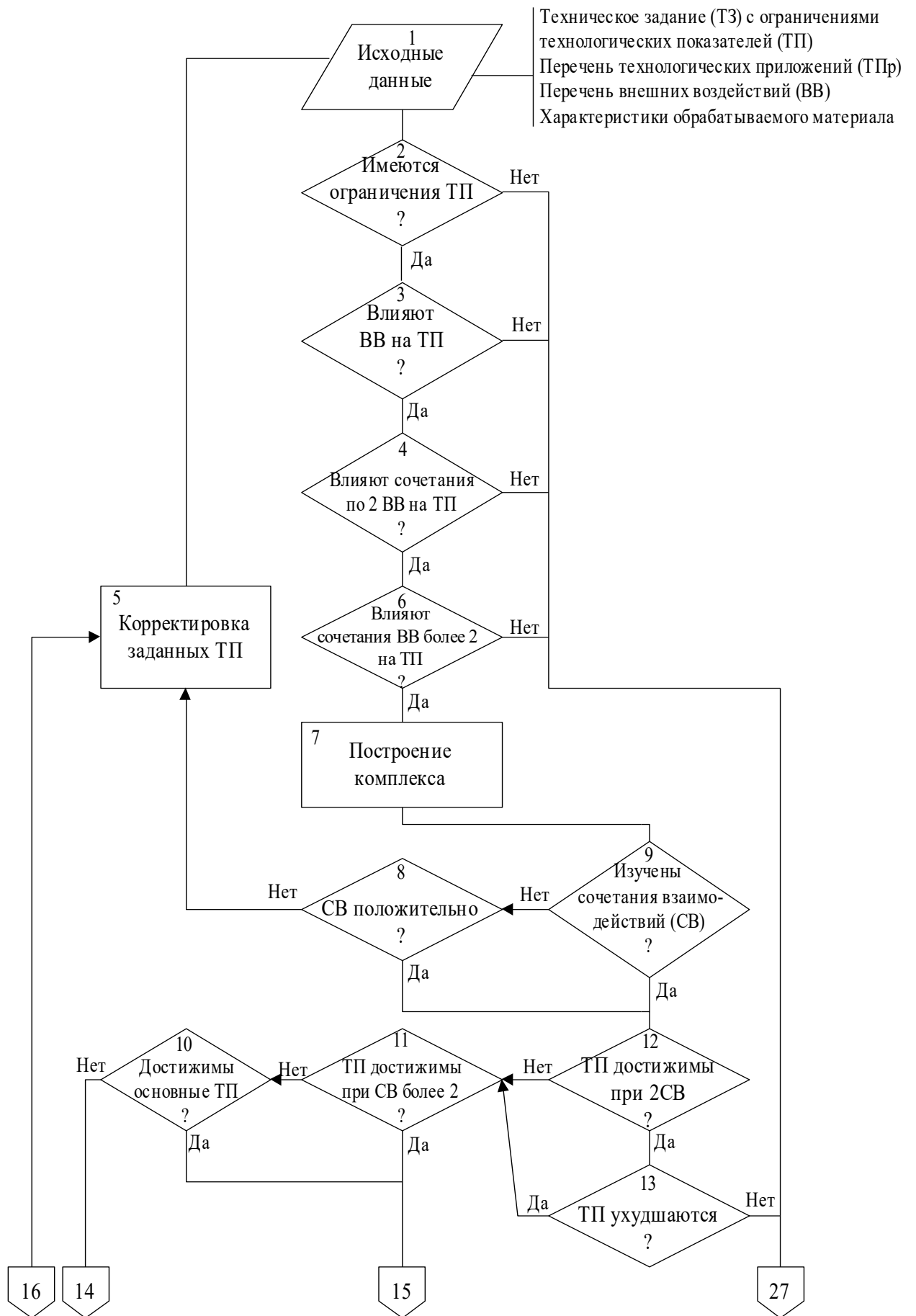
режиме. Измерения обработанных деталей с магнитоимпульсным воздействием показали, что для металлорежущих станков со сварной стойкой достигается стабилизация и выравнивание остаточных напряжений, а точные размеры конструкции могут быть получены при оптимальной (желательно резонансной) частоте импульсов и амплитуде колебаний 0,5–0,7 мм.

Если резонансная частота выходит за рекомендуемый диапазон, то устанавливают требуемую для этого частоту и уточняют режимы по расчетным зависимостям (например, по [69, 28]). Результаты испытаний дают основания утверждать, что предлагаемые комбинированные методы с использованием электромагнитных импульсов эффективны для послойного аддитивного процесса обработки и позволяют успешно заменять без утраты качества и эксплуатационных показателей взамен ресурсозатратных термических процессов и методов литья, что позволяет расширить возможности обработки технологичности наукоемких изделий.

#### **4.4 Алгоритм расчета параметров комбинированного процесса**

##### 4.4.1. Выбор структуры взаимных воздействий составляющих комбинированного процесса

Воздействия исследуются с учетом сочетания различных факторов, формирующих структуру системы качества изделий, учитывающую взаимные требования, наиболее полно удовлетворяющие запросы заказчика. При поиске нужного решения применяют положения теории делового конфликта, сложившийся подход к проектированию процесса и положениям научных гипотез в работе (раздел 2.2). При этом опираются на показанные в разделе 4.1 требования по использованию в качестве исходных данных комбинации в комбинированном технологическом процессе воздействий, выполняемых ранее известными методами, или включение в процесс ранее считающихся неосуществимыми новых видов технологических операций, желательно на уровне изобретений, с их технологическими показателями или желаемыми условиями реализациями, как это показано в алгоритме на рис. 4.1.



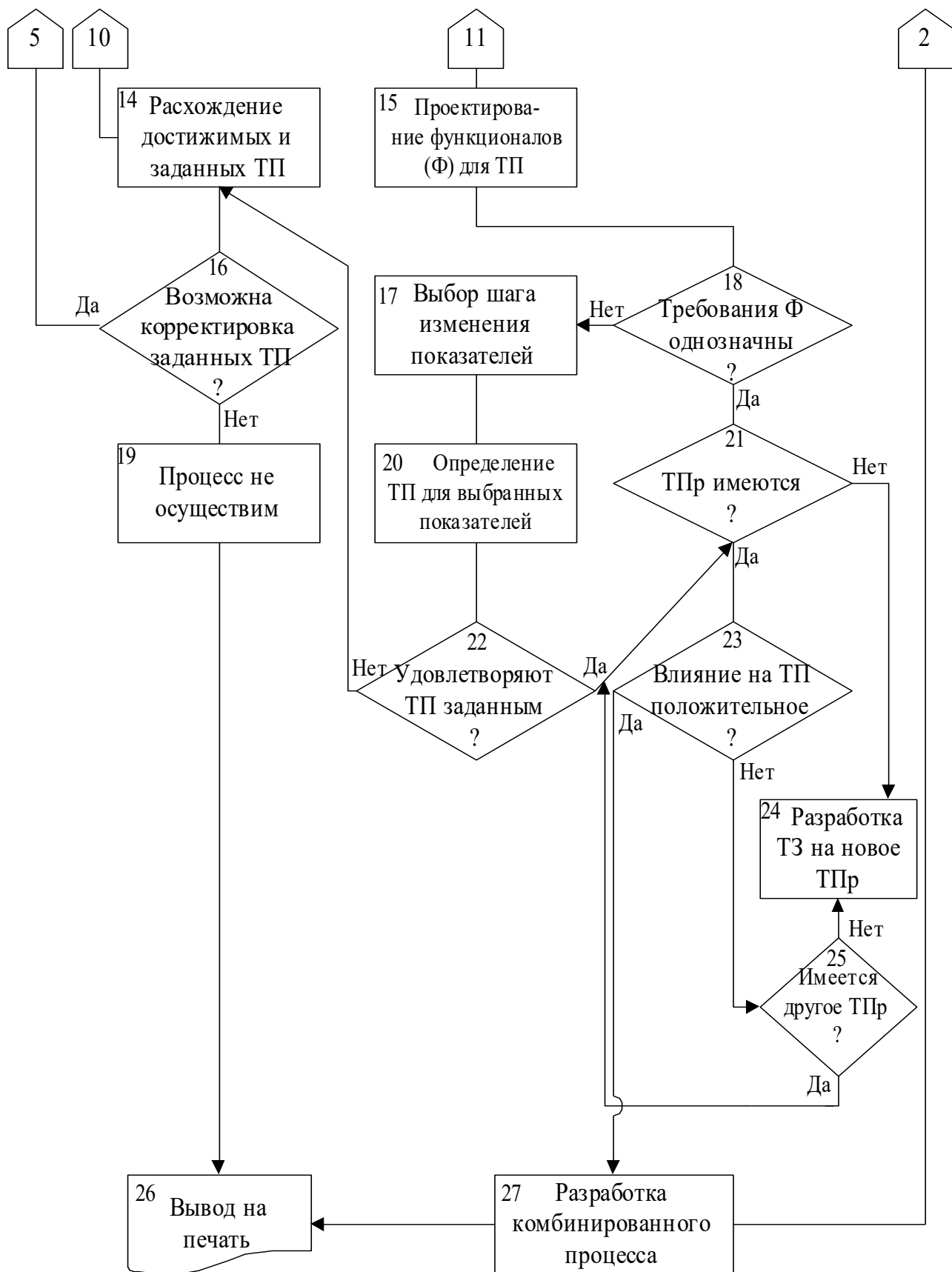


Рис. 4.1 – Алгоритм проектирования комбинированных процессов с импульсными воздействиями

#### 4.4.2 Процедура проектирования комбинированных процессов с электромагнитным воздействием

В алгоритме по рис 4.1 показаны условия выбора возможных воздействий, обеспечивающих получение заданных показателей качества изделий, для чего устанавливают пути усиления желаемых воздействий и подавления негативных явлений. При этом учитывают:

1. Электромагнитные воздействия используют в процессе моделирования процессов, сформированных на базе физической модели и с учетом положений аддитивных технологий, за счет чего в проектируемом методе комбинированной обработки могут проявиться полезные свойства каждого вида воздействия, требуемого в новом процессе.

2. Воздействия включают в комбинированный процесс после обоснованного выбора исходных материалов (раздел 4.1) и влияния других воздействий, сочетание которых способно создать желаемый результат, перспективный для управления регулируемыми воздействиями для достижения нужного суммарного эффекта на технологические показатели. Это позволяет повысить технологичность изделий за счет замены, особенно в опытном производстве, принятых термических операций, исключив из использования термическое оборудование и сложную, дорогую оснастку, применяемую для этих операций.

3. Предельно достижимый положительный эффект от совместного воздействия должен превышать алгебраическую сумму, характеризующую общий технологический показатель уровня совершенства используемого процесса, реализуемом в выбираемом или создаваемом оборудовании.

#### **4.5 Применение разработанных технологий и оборудования при освоении и выпуске изделий в условиях производства**

На рис.4.2 показан узел подачи топлива в горячую зону перспективного жидкостного ракетного двигателя большой тяги. Изделие работает в условиях вибрации, больших (свыше 570К) перепадах температур. Топливо может

содержать агрессивные компоненты, негативно воздействующие на материалы. Узел на рис. 4.2 выполнен из металлов с различными физико-механическими характеристиками (в том числе из жаропрочных сплавов) методами неподвижной сборки (запрессовкой, сваркой элементов и др.) неподвижной сборки (запрессовкой, сваркой элементов и др.).



Рис. 4.2 – Узел подачи рабочей среды, включающий форсунки и каналы для подвода топлива

Внутренние напряжения в узле на рис 4.2 изменяются в широких пределах за счет местных термических воздействий (например, при сварке), натяга деталей при сборке (в частности при запрессовке форсунок), механической правки смесителя и других факторов. Перед сборкой изделия требуется выравнивание внутренних напряжений. Такие операции выполняют комбинированной механической виброударной обработкой (например, виброударным методом,

параметры которого приведены в рассматриваемой работе) с многократным облучением импульсными магнитными воздействиями с режимами, приведенными в разделе 4.3.

Узел на рис. 4.2 определяет ресурс изделия и проходит многоуровневый контроль после изготовления и получения сложной геометрии высокоточного изделия. Результаты испытаний показали, что выравнивание напряжений позволяет повысить качество узла и обеспечить увеличение количества безаварийных пусков изделий до 3–5 раз. Большой выигрыш дала замена термических операций на использование электромагнитных импульсов с управляемой системой выравнивания внутренних напряжений.

Эффективность использования импульсных комбинированных изделий доказана на примерах деталей с покрытием хромом, приведенных на рис. 4.3

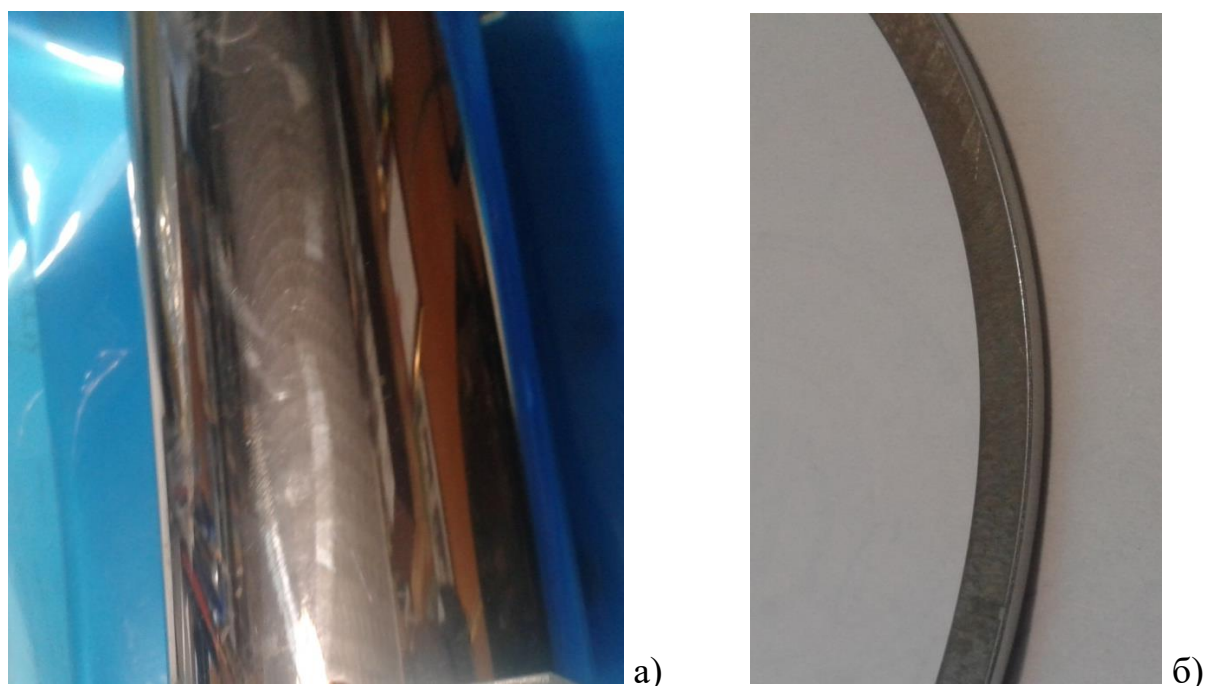


Рис. 4.3 – Образцы металлических деталей, восстанавливаемые при ремонте с хромированием гальваноконтактным методом

- а) шток после восстановления участка с износом от 0,06 до 0,12 мм на длине 8 мм;
- б) маслосборное кольцо поршневого компрессора с восстановленной наружной поверхностью пористым хромированием

Одним из режимных параметров гальваноконтактного [24] и гальваномеханического [25] покрытия является толщина единичного слоя перед его раскаткой с использованием поверхностного пластического деформирования. Трудоемкость нанесения слоев с толщиной каждого до 0,5–1,5 мкм составила 1,5–2 мкм/мин при площади обработки, определяемой величиной контактной поверхности и назначаемым наибольшим припуском на обработку поверхностных слоев.

При соблюдении всех режимных параметров комбинированных процессов, приведенных в работах [24] и [25], отмечается нарастание в наносимом хромовом покрытии высоких внутренних напряжений, вызывающих шелушение и разрушение покрытия, что недопустимо в деталях транспортной и другой наукоемкой техники. Воздействие импульсного магнитного облучения, в основном слоя хрома, позволило выровнять внутренние напряжения и снять одно из основных ограничений для применения таких покрытий. Это экспериментально доказано в источниках [24] и [25]

Выравнивание внутренних напряжений, в том числе в покрытиях, выполняемое для повышения ресурса ракетных двигателей, способствовало возрастанию допустимого количества пусков космических аппаратов. Динамика изменения ресурса по количеству пусков изделий приведена на рис. 4.4. Это проблема международного уровня. Она стала еще более актуальной при создании перспективных космических летательных аппаратов многоразового использования.



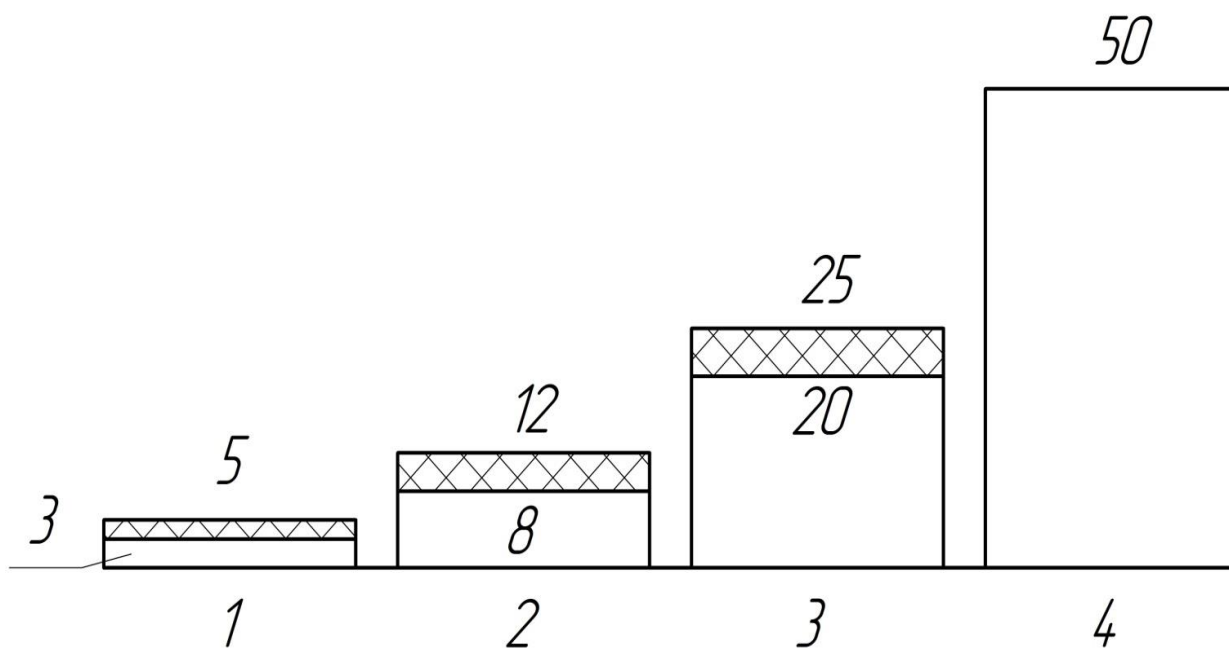


Рис. 4.4 – Динамика увеличения ресурса ракетных двигателей, оцениваемого по количеству безаварийных пусков

На рисунке 4.4 показана динамика увеличения числа пусков при многолетнем совершенствовании изделий за периоды развития мировой науки по созданию космической техники (выделены диапазоны изменения показателей в пределах каждого периода): 1 – начальный период создания и освоения жидкостных ракетных двигателей (ЖРД); 2 – начало эффективного использования ЖРД для освоения космического пространства; 3 – состояние на текущий период; 4 – количество пусков при использовании ЖРД в системах многоразового применения, развиваемого в настоящее время.

Как следует из материалов на рисунке 4.4, в настоящее время удалось достичь возрастания количества качественных пусков до 4-5 раз, что значительно снизило затраты на испытание, отладку, модернизацию, использование ЖРД, повысило их конкурентоспособность на мировом рынке.

В перспективе планируется получить за счет комплекса рассматриваемых в работе и других конструкторских и технологических мероприятий повышение ресурса, обеспечивающего увеличение количества пусков до 10 раз (рис. 4.4), что требуется для многократного использования перспективных ракетных систем.

## **Выводы по главе 4**

В главе разработаны пути получения качественных показателей комбинированной обработки с использованием импульсного электромагнитного поля и создан алгоритм расчета параметров комбинированных процессов, которые проверены при обработке крупногабаритных сборочных узлов двигателей ракетной техники и деталей летательных аппаратов. Параметры расчетов использованы при выборе и проектировании оборудования для электромагнитной обработки..

Опыт показал, что магнитоимпульсная стабилизация сварных и литых деталей прецизионного оборудования удешевляет и ускоряет период его изготовления и восстановления, т.к. может успешно заменять обычно применяемый двойной стабилизирующий отжиг на ординарный или использовать более короткий по времени отпуск вместо отжига.

## **Глава 5 Перспективы применения результатов исследования по комбинированным воздействиям с использованием электромагнитных полей для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделий**

### **5.1 Разработка инструмента и способа управления комбинированным воздействием на примере обработки полужакрытых полостей**

#### 5.1.1.Обоснование разработки нового способа и устройства на уровне изобретения

Созданный с участием автора по патенту [67] инструмент и способ его использования относятся к комбинированным воздействиям с использованием электромагнитных полей для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделий в области машиностроения. Он может использоваться для чистовой избирательной обработки труднодоступных поверхностей (например, полостей баллонов) по защищенному патентом автора способу с односторонним подводом инструмента через ограниченное по сечению отверстие в детали с большим перепадом размеров горловины и сечения полости.

Для этих целей ранее использовался электрод-инструмент для электрохимической обработки каналов по авторскому свидетельству 265334 (Бюллетень изобретений № 10, 1970), в форме цепи с звеньями, соединенными через овальные отверстия, обеспечивающие прижим изоляторов к месту обработки поверхностей, с плавно изменяющимся периметром и поддержанием стабильности межэлектродного зазора за счет давления внутри применяемой эластичной камеры. К недостаткам такого инструмента следует отнести ограничения по изменению периметров обрабатываемой детали за счет овальных отверстий и исключения возможности поддержания межэлектродного зазора на локальных участках с углублениями в поперечном направлении относительно подачи электрода-инструмента, что нарушает стабильность технологического

режима. Здесь проявляется отсутствие возможности перемещения нежесткого электрода-инструмента в обратном направлении относительно подачи без нарушения режима обработки.

Известен способ электрохимической размерной обработки наружной и внутренней поверхности труб по авторскому свидетельству 297699 (Бюллетень изобретений №10,1971), где используют гибкий инструмент, который деформируют и протягивают вдоль внутренней поверхности полости в детали с прижимом за счет давления газа внутри эластичного корпуса. К недостаткам способа относится отсутствие возможности выполнения обратного перемещения инструмента, что не позволяет обеспечить стабильность чистовой обработки, особенно труднодоступных участков, ограничивает возможность установки внутри детали при использовании в горловине токопроводящей штанги, обеспечивающей управление процессом обработки.

Наиболее близким к предлагаемому электроду – инструменту и способу обработки является используемый в промышленности гибкий инструмент, выполненный в форме тонкой металлической ленты с нанесенным на нее абразивом, используемый в условиях импульсных воздействий, а для чистовой обработки использован комбинированный способ размерного анодного растворения с механическим прижимом к поверхности металлической детали с помощью прижимного элемента в форме камеры при комбинированной обработке. При этом сила прижима инструмента к зоне обработки детали для удаления припуска и продуктов обработки обеспечивается давлением воздуха, подаваемым внутрь камеры, а способ осуществляют путем послойного удаления припуска с выравниванием внутренних напряжений под поверхностью при перемещении камеры металлической лентой гибкими натяжными элементами. Недостатками известного инструмента являются: ограниченные возможности введения перед выполнением операции инструмента в полость через узкую горловину из-за его сечения в сложенном, относительно развернутого, положения. При этом не всегда удается стабильно обеспечивать выполнение

требуемых режимы обработки при изменении изгиба профиля обрабатываемого участка детали и возможна утрата связи между инструментом и внутренней частью полости при возвратно-поступательном перемещении инструмента с односторонней связью для его движения, что ограничивает возможности обработки локальных участков полости.

### 5.1.2. Предмет новизны объекта изобретения

Предлагаемый способ позволяет осуществить локальную чистовую комбинированную обработку с использованием импульсных механических и электромагнитных воздействий (электроабразивный способ) при возвратно-поступательных перемещениях электрода-инструмента по внутренним поверхностям полостей деталей с узкой горловиной (например, баллонов различной формы и габаритов) для ввода инструмента внутрь широкой части полости объемной детали и вывода его после окончания операции. Для этого токоведущая основа электрода-инструмента имеет эластичную форму плетеной сетки из проволочных упругих элементов в виде витков спирали, а боковая часть основы со стороны горловины полости соединена с гибким токоведущим натяжным элементом с нанесенным диэлектрическим покрытием. В инструменте противолежащий конец основы связан с внутренней поверхностью полости детали гибкой диэлектрической тягой через упругий элемент типа спиральной пружины и ползун из ферромагнитного сплава. Его поверхность со стороны полости имеет форму зеркального отражения внутренней поверхности детали, на которой установлен электромагнит.

В новом способе перед началом обработки электромагнит устанавливают с наружной стороны детали, электромагнитным полем фиксируют его положение напротив места обработки детали, затем в свернутом сжатом виде вводят внутрь полости детали, после чего присоединяют ползун к стенке полости детали напротив электромагнита и регулируют за счет изменения положения и длины диэлектрической тяги расположение основы электрода-инструмента по границе участка обработки со стороны ползуна.

Новизна устройства инструмента и сущность способа раскрыты на рис.5.1..

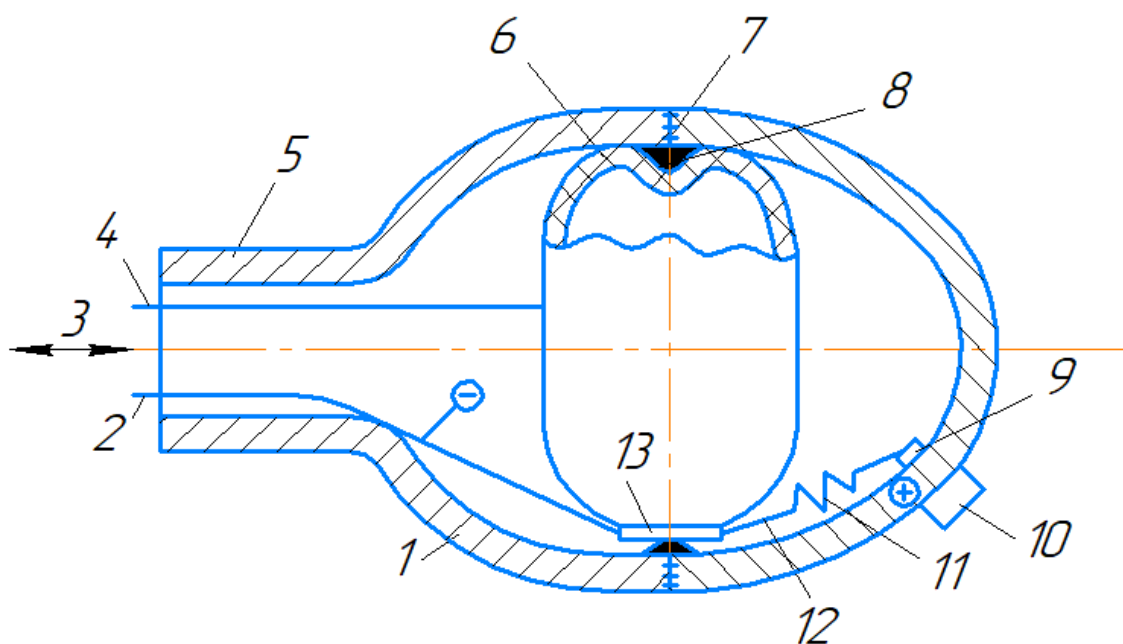


Рис. 5.1 – Схема инструмента и механизм осуществления способа  
1 – токопроводящая деталь с полостью; 2 – гибкий токоведущий натяжной элемент; 3 – направления возвратно-поступательного перемещения гибкой токопроводящей основы электрода-инструмента; 4 – шланг; 5 – горловина детали; 6 – эластичная герметичная камера; 7 – сварной шов; 8 – валик с гратом в месте сварки; 9 – ползун из ферромагнитного сплава; 10 – электромагнит; 11 – упругий элемент; 12 – гибкая диэлектрическая тяга

На рисунке 5.1 представлены схема инструмента и механизм осуществления способа обработки полужакрытых полостей, где обрабатываемая деталь 1 имеет внутреннюю полость с горловиной 5. Внутри детали 1 установлен электрод-инструмент, включающий токопроводящую основу 13, выполненную эластичной в форме токопроводящей сетки плетением из поперечной 14 (рис. 5.2,а) и продольной 15 упругой металлической проволоки в виде витков спирали (рис. 5.2,б)

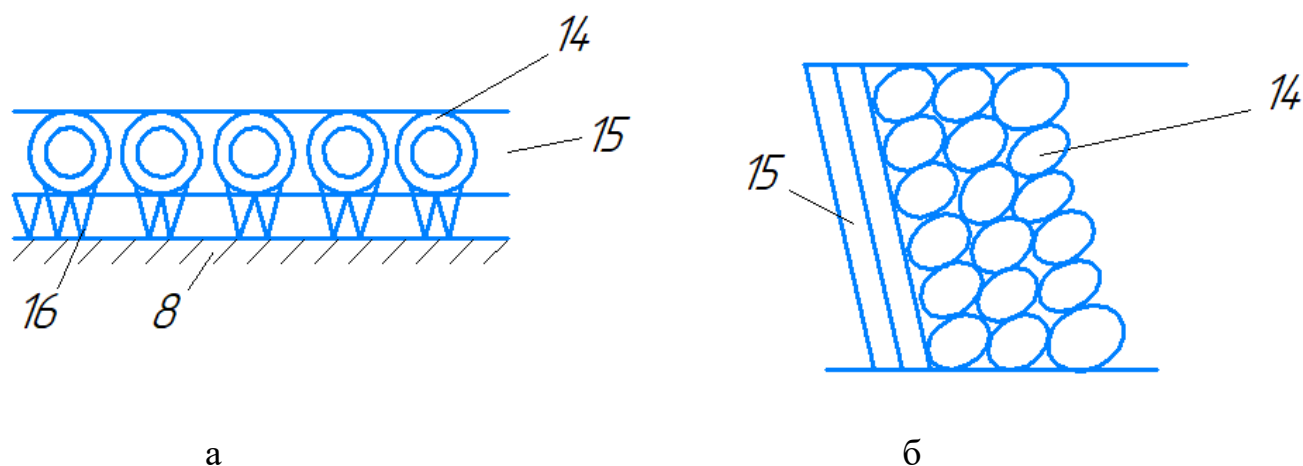


Рис .5.2 – Структура инструмента

а – основы; б – расположение витков проволочных элементов в основе электрода-инструмента

13 – основа электрода-инструмента; 14 – поперечные витки; 15 – продольные витки; 16 – абразивные зерна

На проволоку 14;15 (рис. 5.2,а) со стороны обрабатываемой поверхности валика с гратом 8 (рис. 5.1) сварного шва 7 нанесены абразивные зерна 16, которые прижаты к валику с гратом 8 обрабатываемой детали 1 камерой 6 на основе 13 инструмента из витков спиралей 14; 15 (рис. 5.2,б). Торец основы со стороны горловины 5 полости соединен с источником постоянного тока токоподводом в гибким токоведущем натяжном элементе, имеющем диэлектрическое покрытие. Противолежащий торец основы соединен с внутренней поверхностью полости детали гибкой диэлектрической тягой 12, которая через упругий элемент 11 типа спиральной пружины связана с ползуном 9 из ферромагнитного сплава с внутренней поверхностью детали со стороны полости, имеющей форму зеркального отражения внутренней поверхности детали со стороны, противолежащей горловине 5 и электромагниту 10, на наружной поверхности детали.

Способ комбинированной чистовой обработки осуществляют по алгоритму: перед началом обработки электромагнит 10 (рис. 5.1) устанавливают с наружной

стороны детали 1. На горловине 5, противоположной детали 1, напротив места обработки полости детали 1 закрепляют магнитным полем электромагнит 10. В свернутом сжатом виде вводят внутрь полости детали 1 электрод-инструмент, присоединяют ползун 9 к стенке полости детали напротив электромагнита, закрепляют его положение электромагнитным полем до удержания положения под действием гибкого токоведущего натяжного элемента 2, который регулируют длиной диэлектрической тяги 12 до достижения требуемого положения основы электрода-инструмента по границе участка обработки со стороны ползуна. Далее устанавливают камеру 6 на поверхность полости, через шланг 4 подают сжатый газ, например, воздух, до формирования в камере давления на основу до обеспечения полного соприкосновения абразивных зерен 16 (рис. 5.2,а) с обрабатываемой поверхностью валика и гратом в месте сварки. В полость детали подают слабый электролит до заполнения полости с покрытием основы, гибким токоведущим натяжным элементом 2 придают гибкой основе возвратно-поступательные перемещения 3 электрода-инструмента вдоль основы детали.

Поддают на деталь импульсы высоковольтного и постоянного низковольтного тока. При этом на детали устанавливают положительный полюс. Токотводом в гибком токоведущем натяжном элементе 2 подают ток на основу, измеряют силу технологического тока, поступающего на электроды и проводят под действием технологического и импульсного высоковольтного тока в условиях колебаний системы чистовую обработку электроабразивным методом валика с гратом в месте сварки в полости детали. Контроль операции проводят по силе технологического тока до его стабилизации, времени обработки или визуально по состоянию валика с гратом. Далее ток выключают, давление в камере 6 снижают до образования зазоров между абразивными зернами 16 (рис. 5.2,а) и валиком с гратом, перемещают электрод-инструмент на смежную часть зоны обработки и повторяют процесс до выполнения процесса чистовой обработки валика с гратом. После этого отключают ток, снимают давление в камере, свертывают и сжимают основу и через горловину 5 удаляют электрод-инструмент из полости детали.



### 5.1.2. Реализация изобретения.

В полости сваренного баллона для хранения сжатого газа под высоким (до 45-50 МПа) давлением требуется удалить сварной валик, зачистить место сварки и выровнять внутренние напряжения в детали. Процесс осуществляют при импульсном воздействии тока и вибрациях системы в околорезонансном режиме.. Размер отверстия в горловине 15 мм, внутренний периметр детали с полостью 240 мм, материал детали нержавеющая сталь или титановый сплав. Размеры сварного валика 0,8–1,2 мм. Амплитуда возвратно-поступательных перемещений при вибрации основы инструмента 0,5–1,0 мм. Длительность накладываемых импульсов электромагнитного воздействия 100 мкс. Закрепляют в полости электромагнитом ползун, регулируют в полости положение основы электрода-инструмента. В эластичную камеру подают под давлением сжатый воздух и повышают давление до касания абразивными зернами инструмента всей зоны обработки. Рабочее давление в камере составляло 0,18 МПа. В полость заливают 6% водный раствор нитрата натрия. Через гибкий токопроводящий натяжной элемент подают напряжение, включают возвратно-поступательные перемещения основы инструмента. Время обработки участка составило около 1 минуты. Сварной валик был удален полностью. Было использование 2 циклов импульсных воздействий для выравнивания внутренних напряжений. Качество обработки отвечало требованиям чертежа. Испытания баллона показали его работоспособность в условиях эксплуатации.

## **5.2 Технология подготовки поверхности деталей под нанесение в электромагнитном поле теплозащитных покрытий**

### 5.2.1.Обоснование научной проблемы.

Подготовка поверхностей заготовок из металлов к нанесению высокотемпературных защитных покрытий из минералокерамических гранул с

токопроводящей связкой оказывает влияние на качество изделия с покрытием. Для получения качественных изделий требуется обосновать пути устранения причин, способных снижать эксплуатационные показатели нанесенного слоя с учетом сложных условий эксплуатации двигателей летательных аппаратов, главным из которых является воздействие горячих продуктов горения топлива.

Для обеспечения качества теплостойких покрытий необходимо обеспечить высокую адгезию слоя к основе, для чего в техпроцесс вводится операция подготовки поверхности заготовки, где основным требованием является достижение стабильной шероховатости заданного профиля неровностей и их величины.

Кроме того в работах [71; 72] установлено, что любые включения на заготовке и в наносимом материале способны влиять на изменение адгезионных свойств покрытий, поэтому в некоторых случаях их следует избегать или устранять, например, доступным и широко используемым опескоструиванием. Для его применения на материалах под покрытие требуется обосновать выбор режимов, свойств и состава средств для выполнения этой операции.

Для обоснования эффективности создаваемых технологических процессов проведены испытания изделий с теплозащитными покрытиями, в которых при их нанесении выявлены вкрапления частиц загрязнений и гранул после пескоструйной обработки применительно к теплозащитным поверхностным слоям использовались рабочие режимы, освоенные при подготовке к нанесению жаростойких покрытий горячей зоны ракетных двигателей: давление струи 0,6 МПа., расстояние до обрабатываемой поверхности 90-100 мм, угол атаки  $\approx 55-60^\circ$ .

#### 5.2.2 Влияние опескоструивания на поверхностный слой, предназначенный под покрытие, обеспечивающее требуемое качества изделия и эксплуатационные свойства деталей

В процессе испытаний выяснилось, что у некоторых видов покрытий после опескоструивания изменяется картина образования в них внутренних напряжений

и требуется корректировка материалов и режимов при проведении операций, а также последующее выравнивание внутренних напряжений, где успешно используются аддитивные технологии с импульсными электромагнитными воздействиями, перераспределяющими внутренние напряжения в детали и покрытия для реализации требований к качеству изделий, приведенные в работе (см, например, раздел 4.5).

Для назначения режимов опескоструивания и получения поверхности с требуемым качеством под покрытие типа представленного на рис. 5.3, они выполнялись экспериментально при обработке одним из применяемых ранее материалов: электрокорундом белым зернистостью F-22 и таким же материалом зернистостью F-30. На рис. 5.3 приведен микрошлиф стального образца после обработки гранулами F-30. Площадь образца  $60 \times 40 = 2400\text{мм}^2$ .

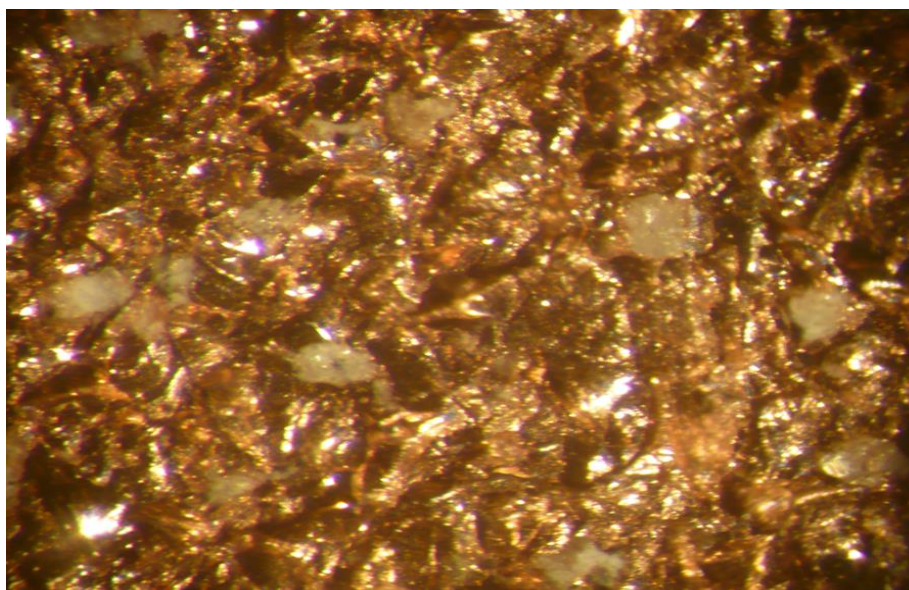


Рис. 5.3 – Образец после опескоструивания электрокорундом белым

Ранее было установлено, что при подготовке поверхности заготовки под покрытие нежелательно наличие частиц материала, используемого для опескоструивания и требуется подобрать состав используемых компонентов инструмента .

#### 5.2.4. Выбор порошков для обеспечения адгезионной прочности покрытий.

Для назначения режимов обдувки был выбран порошок электрокорунда белого с гранулами зернистостью F-30. Испытания режимов обработки на образцах, типа приведенных на рисунке 5.3, показали, что имеются включения диаметром 0,15–0,2 мм, количество которых на площади 100 мм<sup>2</sup> около 80. Общая площадь включений на образце составила 16 %, что допустимо для получения качественных покрытий.

На образце, типа приведенного на рисунке 5.3, после обдувки электрокорундом белым зернистостью F-22 площадь, занятая включениями при их максимальном размере – 0,3 мм, равна 18 %.

При уменьшении зернистости фракции площадь включений возрастает, что влияет на шероховатость поверхности под покрытие и должна учитываться при построении технологии, а также при оценке внутренних напряжений.

В рассматриваемом случае можно успешно применять электрокорунд белый обеих фракций.

Для обоснования эффективности использования фракций после выравнивания внутренних напряжений при предлагаемых в работе импульсных воздействиях в электромагнитном поле проведены испытания адгезии на образцах с теплозащитным покрытием из минералокерамических гранул с токопроводящей связкой [72], предварительно опескоструенных электрокорундом белым фракций F-22 и F-30, для которых в таблице 5.1 приведена адгезионная прочность нанесённого покрытия.

Результаты исследований по партиям испытанных покрытий представлены в табл. 5.1

Таблица 5.1 – Адгезионные свойства покрытий после подготовки поверхности обдувкой

Группы образцов	Никеле-хромовый порошок	Режимы обдувки	Прочность сцепления, кгс/см <sup>2</sup>	Термостойкость, количество циклов воздействия импульсов
1	ПХ20Н80 56-26	340 А; 50 В	84,9	8; 9; 11
2	ГОСТ 13084-88	380 – 400 А, 30 – 35 В	103,2	12; 12; 12

Проведенные испытания по стандартной методике доказали, что адгезионная прочность покрытия F-22 превышает те же показатели электрокорунда белого фракции F-30. Поэтому предпочтительнее использование фракций первого типа

### 5.2.3 Особенности построения технологии подготовки поверхности под покрытие

Обоснование разработанной технологии подготовки поверхности под термостойкое покрытие с образованием тугоплавких оксидов типа  $ZrO_2$  включает их испытания на износостойкость и термическую стойкость.

Для получения качественных результатов очистку образцов перед покрытием выполняли обдувкой на режимах с давлением 0,4; 0,5 и 0,6 МПа при расстоянии от сопла до обрабатываемой поверхности 90-95 мм. Операцию выполняли в два прохода гранулами из карбида кремния черного с использованием в таблице 5.2 на первом режиме фракции F-20 и в таблице 5.3 на втором – при использовании F-46

Таблица 5.2 – Шероховатость поверхности после использования первого режима

Критерии оценки показателей									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина микронеровностей, мкм	16÷21	100÷120	240÷320	16,8÷18,8	100÷110	220÷290	19 ÷21	105÷120	250÷350

Таблица 5.3 – Шероховатость поверхности после использования для обдужки порошков с зернистостью F-46

Критерии оценки показателей									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина	9,8÷	65÷	150÷	10÷	67÷	170÷	9,8÷	64÷	170÷
микронеровностей, мкм	10,8	75	170	11	73	190	10	75	190

Из анализа результатов в таблицах 5.2 и 5.3 следует, что использование порошка с гранулами крупной фракции предпочтительнее, т.к. в этом случае можно увеличить шероховатость детали, что повышает адгезионные характеристики покрытия, хотя в ряде случаев необходимо в основу оценки положить другие критерии.

Количество гранул карбида кремния, закрепившееся на поверхности, очищенной карбидом кремния фракции F-20, включения занимают 12,5–19,2 % от площади, для фракции F-46 – 2,5- 3,6 %. Это позволяет рекомендовать для очистки фракции гранул больших номеров.

### **5.3 Перспективные методы и процедуры использования лучевых методов для выравнивания силовых полей и стабилизации качества создаваемых наукоемких изделий машиностроения**

#### 5.3.1.Обоснование цели и научной новизны создания способа восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания слоев покрытия

Для развития перспективных технологий создан и запатентован способ восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания слоев

гальванического покрытия [66], который расширяет область использования лучевых методов на технологии выравнивания силовых полей и стабилизации качества создаваемых наукоемких изделий машиностроения.

Способ и инструмент могут быть использованы для восстановления геометрических размеров и качества изделий в процессе их ремонта и восстановления без нагрева металлических деталей тепловым воздействием а также устраняют неравномерный износ геометрических размеров и нарушение эксплуатационных характеристик изделий.

Наиболее близким к предлагаемому способу является способ по патенту [54], в котором для снижения трудоемкости, себестоимости восстановления без механической обработки совмещены операции гальванического нанесения покрытия с пластической деформацией, а при восстановлении последовательно по аддитивным технологиям на участки с послойным износом наносится металлический материал с переменными внутренними напряжениями, которые регулируют контактным давлением и временем обработки.

Недостатком известного способа является возможность нарушения точности по геометрической форме в местах сопряжения локальных участков наносимого покрытия с восстанавливаемой деталью и нарушение качества поверхностного слоя из-за растягивающих остаточных напряжений в покрытии.

Наиболее близким к предлагаемому инструменту является приведенный в книге метод [25], где показан инструмент из керамики с регулятором давления, изменяемого в процессе раскатки наносимых по аддитивным технологиям слоев с целью выравнивания внутренних напряжений при создании стойкого покрытия в процессе ремонта изделий.

К недостатку известного инструмента относится различное контактное давление инструмента на участках поверхности, вызванное запозданием сигналов обратной связи, что вызывает нарушение точности управления процессом и снижение качества восстанавливаемой детали.

### 5.3.2 Новизна способа и предлагаемого инструмента

Целью изобретения является повышение точности геометрических размеров и качества поверхностного слоя путем выравнивания внутренних напряжений при нанесении покрытий из хрома, снижение себестоимости восстановления деталей с неравномерным износом геометрических размеров и нарушением качества изделий и эксплуатационных свойств поверхностного слоя. Это достигается тем, что способ осуществляют в несколько этапов. При этом на начальном этапе на участки восстанавливаемой детали с повышенным износом гальваническим методом под током послойно наносят пластичный металл с толщиной, обеспечивающей заращивание участков повышенного износа детали до размера с минимальным износом, после чего подачу тока прекращают и выглаживают механическим воздействием раскатника поверхность восстанавливаемого участка детали до выравнивания профиля относительно профиля наружной поверхности восстанавливаемой детали, затем на заключительном этапе гальваноконтактным методом под током на всю восстанавливаемую поверхность послойно наносят равномерный слой покрытия из металлического материала, имеющего эксплуатационные характеристики не ниже таких же показателей, которые требуются для материала восстанавливаемой детали. Инструмент для гальваноконтактного восстановления металлических деталей с твердой контактной рабочей поверхностью, отличается тем, что его поверхность выполнена в форме зеркального отражения от геометрии восстанавливаемого участка детали после выравнивания профиля и на него со стороны контактной рабочей поверхности установлен датчик положения инструмента с регулятором управления положением контактной поверхности инструмента относительно выровненного профиля восстанавливаемого участка детали, а также датчик давления с адаптивным регулятором давления инструмента.



На рисунке 5.4 показан продольный профиль изношенного участка восстанавливаемой детали.

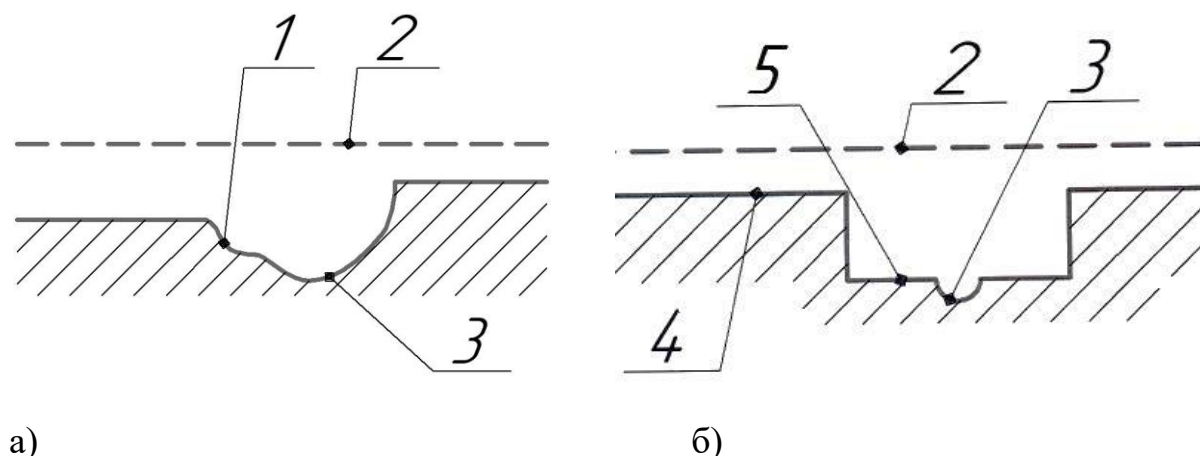


Рис. 5.4 – Профиль изношенного участка детали

а) – вдоль движения выглаживающего инструмента; б) – поперечное сечение участка изношенной детали

На рисунке 5.1: 1 – продольный профиль изношенного участка детали; 2 – геометрия изношенного участка детали после ее восстановления; 3 – местная неровность изношенного участка; 4 – выглаживаемая поверхность с нанесенным пластичным металлом; 5 – местная выработка за счет износа детали.

**Способ** осуществляют следующим образом: у восстанавливаемой детали вдоль оси (рис. 5.4) измеряют геометрические размеры изношенных участков детали, показанных на рис. 5.4,а и строят продольный профиль изношенного участка 1 детали, требующего восстановления до границы 2. Далее измеряют на изношенном участке местные неровности 3. Аналогичные измерения выполняют для поперечного сечении участка 5 детали, приведенного на рис. 5,б для точки 5 с наименьшим износом.

По результатам измерений создают профиль места износа детали, где выделяют участки с близким износом для которых назначают технологические режимы гальванического нанесения покрытия. схема выполнения которого приведена на рисунке 5.5.

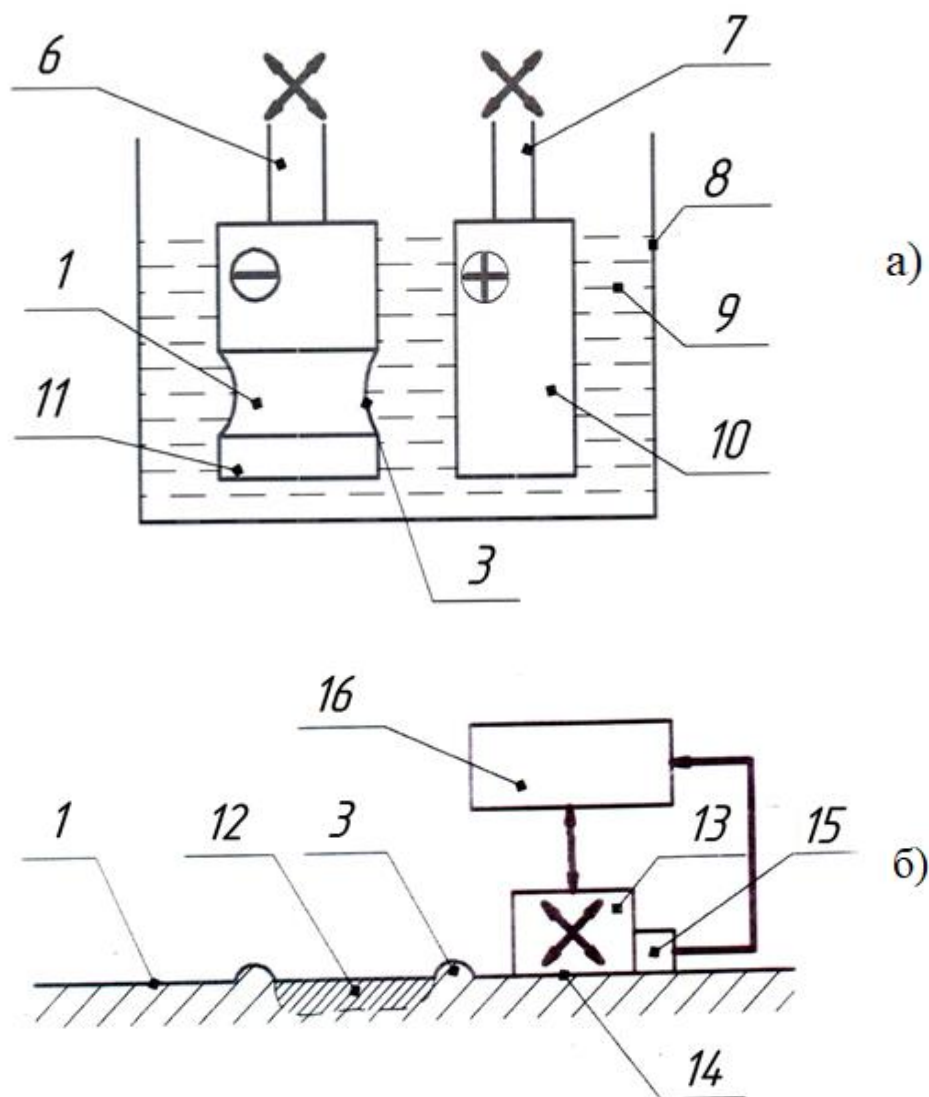


Рис. 5.5 – Процесс нанесения гальванического покрытия (а) и выглаживания поверхности с нанесенным пластичным металлом (б)

На рисунке 5.5: 6 и 7 – штанги для линейного и кругового перемещения анода и катода; 8 – ванна с электролитом 9; 10 – анод из пластичного металла 12; 11 – поверхность детали, не требующая восстановления и покрытая слоем диэлектрика; 13 – твердый керамический инструмент с контактной рабочей поверхностью 14; 15 – датчик положения контактной поверхности; 16 – регулятор равномерного припуска.

Деталь на рис. 5.5,а с изношенным участком является катодом и расположена в ванне 8 с электролитом 9, где установлена с зазором относительно анода 10 из пластичного металла, на который через штанги 6, 7 для линейного и

кругового перемещения анода и катода производится управление плотностью тока и толщиной наносимого слоя покрытия на участки детали, подлежащие восстановлению геометрии и качества поверхностного слоя, для чего подается ток от низковольтного источника тока. Здесь 11 – поверхность детали, не требующая восстановления и покрытая слоем диэлектрика. На рисунке 5.5,б приведена схема выглаживания профиля детали после нанесения пластичного металла 12 для устранения местных неровностей 3, в основном на границах восстанавливаемых участков, за счет концентрации тока при гальваническом нанесении пластичного металла. Твердый керамический инструмент 13 с контактной рабочей поверхностью 14 совершает перемещения вдоль и поперек участка износа (показано стрелками). На инструменте со стороны профиля 1 закреплен датчик 15 положения контактной поверхности 14 относительно выглаженной поверхности детали и регулятор 16 для поддержания равномерного припуска на гальваноконтактное покрытие детали.

На рис. 5.6 показан процесс нанесения гальваноконтактным способом поверхностного слоя на восстанавливаемый участок детали после выравнивания профиля.

После выравнивания профиля поверхности под покрытие (рис. 5.6) на деталь наносят наружное равномерное покрытие 18 с выравниванием внутренних напряжений в слоях путем раскатки или импульсной электромагнитной обработки с механическим воздействием на каждый слой поверхности 14 керамическим инструментом 13 по аддитивной технологии. Одновременно с из электролита 9 под действием тока, протекающего через катод и металлические аноды 10, наносят металлические слои с управляемыми внутренними напряжениями. Механическое контактное воздействие керамического инструмента на наносимые равномерные слои покрытия выполняют при давлении инструмента, перемещаемого в направлении 19, до получения геометрии и эксплуатационных свойств восстановленной детали с требуемой геометрией и качеством поверхности 20. На инструменте 13 со стороны восстановленной

детали закреплен датчик 21 давления контактной поверхности 14 на наносимые слои покрытия, электрически связанный с адаптивным регулятором 22 давления на наносимые слои покрытия 18.

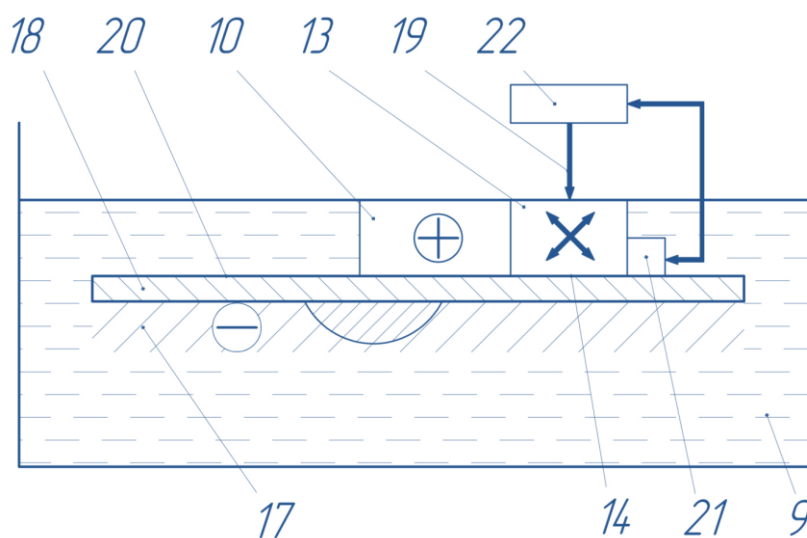


Рис. 5.6 – Нанесения поверхностного слоя на восстанавливаемый участок детали после выравнивания профиля

18 – наружный профиль покрытия после выравнивания; 19 – направления перемещения инструмента; 20 – восстановленная поверхность детали; 21 – датчик; 22 – регулятор

Рассчитывают положение анода 10 относительно катода (рис.5.6) и время обработки в ванне 8 с электролитом, рекомендованным для наносимого пластичного материала покрытия изношенного участка профиля детали. По результатам расчета разрабатывают программы для линейного и кругового перемещения штанг 6 и 7 с целью управления положением анода и катода для обеспечения расчетной плотности тока и толщины наносимого слоя покрытия по карте дефектации на участки, подлежащие восстановлению геометрии и качества поверхностного слоя детали. Участки 11, не требующие восстановления, изолируют от прохождения технологического тока. Для автоматизации и удешевления процесса изоляции при подготовке детали к восстановлению наиболее эффективным является метод нанесения фоторезистов, которые имеют

высокие диэлектрические характеристики, малую толщину, практически не изменяющую размеры детали, обеспечивают получение точных границ контура участков, выполняются по имеющимся картам дефектации с использованием доступного программного обеспечения, которые одновременно становятся параметрами управления оборудованием при нанесении гальванических покрытий в автоматическом режиме. При этом происходит заращивание участков с местным повышенным износом детали до размера с минимальным изменением размера, после чего подачу тока прекращают и восстановление геометрии детали и выравнивание внутренних напряжений выполняют выглаживанием по схеме на рис. 5.5,б, захватывая восстанавливаемый участок детали до выравнивания профиля и удаления местных неровностей на границах наносимого пластичного металла керамическим инструментом. Положение инструмента определяется датчиком 15 и по его сигналам поддерживается регулятором 16 равномерного припуска на гальваноконтактное покрытие детали.

Далее (рис. 5.6) в ванне заменяют электролит на состав, который рекомендуют для материала, наносимого на заключительном этапе равномерного слоя покрытия 18. Это могут быть рабочие среды в различном агрегатном состоянии. Далее включают технологический ток на деталь 17 (катод) и анод 10 и по режимам гальваноконтактного процесса наносят равномерное покрытие 18 с одновременной раскаткой каждого слоя контактной поверхностью керамического инструмента. Давление измеряют датчиком 21 и регулируют адаптивным регулятором 22 давления контактной поверхности на наносимые слои покрытия. Процесс регулируют давлением инструмента до получения геометрии и свойств восстановленной детали с поверхностью 20. При этом в поверхностных слоях покрытия формируются сжимающие остаточные напряжения и выравнивается их величина, что устраняет трещинообразование, повышает отражательную способность и механические характеристики восстановленной детали.

Инструмент на рисунке 5.6. для гальваноконтактного нанесения на деталь наружного равномерного покрытия 18 и раскатки каждого слоя твердой

контактной поверхностью 14 керамического инструмента 13 в электролите 9 через который между деталью 17 (катод) и анодом 10 обеспечивает протекающий электрический ток.. Давление инструмента 13 действует в направлении 19 до получения геометрии и свойств восстановленной детали 17 с поверхностью 20. Контактная рабочая поверхность 14 инструмента 13 имеет форму, зеркально отражающую геометрию поверхности восстанавливаемого участка детали после выравнивания профиля 1 и 5 (фиг. 1 и 2). На инструменте 13 (фиг. 5) со стороны детали 17 закреплен датчик 21 давления контактной поверхности 14 на наносимые слои покрытия 18, электрически связанный с адаптивным регулятором 22 давления контактной поверхности 14 инструмента 13 на наносимые гальваноконтактным методом слои равномерного покрытия 18.

Такой же инструмент используется для выглаживания профилей 1 на детали 17 до получения поверхности 2 после восстановления с нанесением пластичного металла 12 с целью удаления местных неровностей 3 и выравнивания ее относительно места 4. На инструмент 13 (фиг. 4) со стороны твердой контактной рабочей поверхности 14 установлен датчик 15 положения инструмента, связанный электрической цепью с регулятором 16 положения контактной поверхности 14 инструмента 13 относительно выровненного профиля 1 восстанавливаемого участка детали.

### 5.3.3. Реализация изобретения после выравнивания внутренних напряжений

Требуется восстановить износ вала привода насоса из материала 30ХГСНА с диаметром  $22^{+0,02}$  с  $R_a$  0,63 мкм мм, где в процессе эксплуатации под подшипником скольжения образовалась выработка глубиной от 0,08 до 0,13 мм с эллипсом по диаметру 0,05 мм шириной 6 мм. на расстоянии от конца вала 36 мм. Построена карта дефектации и составлена программа для нанесения слоя фоторезиста на промытую и обезжиренную восстанавливаемую деталь. Выбран для покрытия пластичный материал никель, электролит на базе сульфатов и фторидов. Материал анода никель НПА-2. Режимы нанесения локальных покрытий гальваническим методом плотность тока 12-13 КА/м<sup>2</sup>, температура

электролита 325-330 К, давление инструмента 3,5 МПа, время обработки 22-25 минут.

Покрытие на заключительном этапе гальваноконтактного восстановления участков детали хромом выполняется в электролите состава  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -200-250 г/л;; $\text{H}_2\text{SO}_4$ -2,0-2,5 г/л при температуре 330К, плотности тока 20  $\text{KA}/\text{m}^2$ , давлении инструмента 2 МПа. Время обработки 14-15 минут.

После восстановления и облучения электромагнитными импульсами по разработанной технологии размеры восстанавливаемой поверхности составили: диаметр  $22^{+0,01}$  мм, шероховатость поверхности  $R_a$  0,4 мкм, внутренние напряжения выровнялись с расхождением результатов в пределах  $\pm 5\%$ . Время восстановления детали сократилось в 2-3 раза по сравнению с традиционной технологией, включающей чистовую механическую обработку и последующие термические операции.

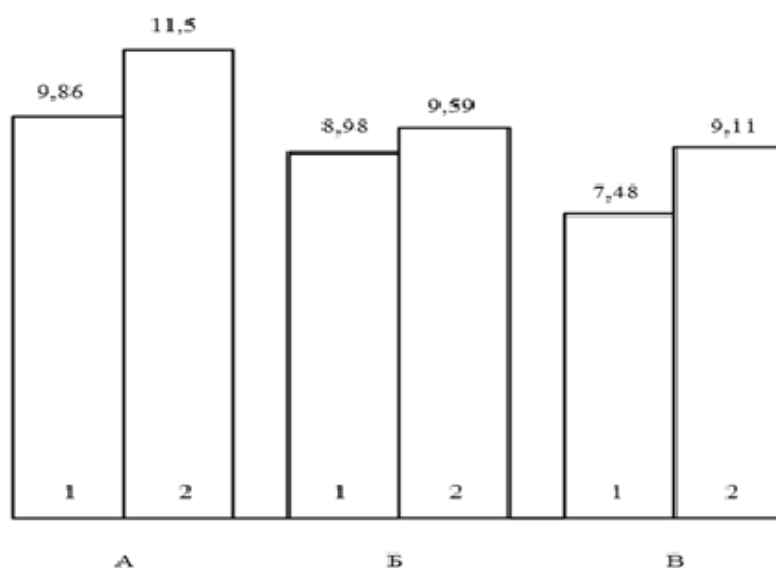


Рис.5.7 – Прочность на отрыв (МПа) между слоями покрытия

А – между подложкой и подслоем из ПТ-Ю10Н; Б – подслоем и покрытием состава: 75 – 80 % порошка диоксида циркония, стабилизированного 10 – 12% оксида иттрия, и 20 % порошка ПТ-Ю10Н; В-там же при составе: 78 – 80 % порошка диоксида циркония, стабилизированного 7-8 % оксида иттрия, и 20 % порошка ПТ-Ю10Н

Были установлены взаимосвязи между подготовкой поверхности и свойствами промежуточных слоев на адгезионную прочность (см. рис. 5.7), за счет чего получена высокая износостойкость и термическая стойкость получаемых покрытий на основе тугоплавких оксидов.

## **Выводы по главе 5**

1. Обоснованы перспективы применения результатов исследования по комбинированным воздействиям с использованием электромагнитных полей для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделий, для чего созданы новые, на уровне изобретений, инструменты и способы управления комбинированным воздействием, изучен и реализован опыт эксплуатации модернизированных и созданных установок по предлагаемой технологии эксплуатации, который показал целесообразность использования процесса в аддитивных технологиях.

2. Разработаны способы и устройства для реализации новых видов комбинированной обработки, в том числе с применением покрытий, на которые были получены охранные документы. Применение новых технологий, особенно в опытном производстве, обеспечило замену длительных дорогостоящих термических операций, выполняемых в основном на зарубежном оборудовании, на отечественные станки с блоками электромагнитных импульсных воздействий, что позволило получить большой технико-экономический эффект

3. Раскрыты пути интенсификации процессов за счет применения импульсных резонансных воздействий, рекомендованных к использованию в комбинированных методах обработки на текущий и последующие периоды развития различных отраслей машиностроения.

4. Предложены новые процессы для подготовки поверхностей крупногабаритных деталей под покрытия, что позволило расширить область использования комбинированных методов обработки на различные отрасли машиностроения.



## Заключение

Выполненный комплекс теоретических и прикладных исследований по обоснованию возможностей и расширению области использования комбинированных методов обработки с аддитивными технологиями доказал что в наукоемком машиностроении одним из эффективных воздействий в перспективных комбинированных процессах является управляемое электромагнитное поле, использование которого практически сняло большинство ограничений по повышению качества деталей и сборных конструкций с любыми габаритами и распределением начальных внутренних напряжений, снизило зависимость страны от крупного термического оборудования, значительная часть которого приобреталась за рубежом и стала недоступной в условиях действия внешних акций.

По материалам работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Доказана возможность ускорения на порядок и более цикла проведения технологических операций, выполняемых с использованием аддитивных технологий с электромагнитным импульсным воздействием, длительность каждого из которых может быть в пределах 100 мкм, взамен многочасовых термических операций, что снижает показатели производственной технологичности, особенно на стадии запуска в производство наукоемких изделий новых поколений техники, требуемых в авиакосмической промышленности с оборонным и другим назначением.

2. Использование предложенных технологий повышает ресурс изделий авиакосмической техники в 4-5 раз, а в ближайшей перспективе до 10 раз, что оценивается по количеству осуществленных пусков при испытаниях изделий, предназначенных для создаваемых двигателей ракетных двигателей с большой тягой и габаритами.

3. Достигнуто многократное снижение затрат на приобретение, установку, эксплуатацию, обслуживание высвобождаемого термического оборудования, особенно для обработки крупногабаритных объектов, межоперационная

транспортировка которых к месту выполнения термических операций не всегда осуществима, затратна, что ограничивает возможности разработчиков новой техники на стадии отработки технологичности.

4. Раскрыта возможность ускорения в несколько раз темпов совершенствования комбинированных методов обработки за счет использования проверенных временем научных положений по применению электромагнитных воздействий в комбинированных методах обработки для выравнивания внутренних напряжений в крупногабаритных изделиях.

5. Обоснована возможность выполнения операций с использованием электромагнитных воздействий без использования для охлаждения жидкостей, что исключает герметизацию магистралей особенно при крупных габаритах изделий.

6. Для расширения области использования и повышения качества изделий показана возможность использования покрытий, выполнения операций в закрытых герметичных контейнерах с их заполнением газовыми средами, требуемыми для защиты от внешних помех и изоляции от нежелательных воздействий.

7. Устранена основная часть помех, ограничивающих использование в комбинированных процессах электромагнитных импульсных воздействий, часть которых выполнена с участием соискателя на уровне изобретений и внедрена в производство на предприятиях авиакосмического машиностроения и в станкостроении.

## Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика // М: «Наука», 1976. – 886 с.
2. Аверченков В.И. Автоматизация проектирования технологических процессов // Брянск: БИТМ, 1984 – 83 с.
3. А. с. № 513823. Устройство для подачи электролита / В.П. Смоленцев, И.М. Краснов, В.М. Борисов, В.М. Шишкин // 1976, Бюл. изобр. № 18.
4. А. с. № 663518. Способ электромеханической обработки / В.С. Примак // 1979, Бюл. изобр. № 19.
5. А. с. № 755488. Электрод-инструмент / В.П. Смоленцев, А.А. Габагуев, З.Б. Садыков // 1980, Бюл. изобр. № 30.
6. А. с. № 1016129. Способ электроабразивной обработки в среде электролита / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков, Ш.С. Гафиатуллин // 1983, Бюл. изобр. № 17.
7. А. с. № 1657303. Способ электрохимикомеханической обработки / А.И. Болдырев, В.П. Смоленцев // 1984, Бюл. изобр. № 14.
8. Антипов Е.Л. Исследование и разработка комбинированного электроабразивного шлифования деталей авиадвигателя с циклическим восстановлением геометрии рабочей поверхности инструмента. Автореферат диссертации кандидата технических наук \ А.В. Рыбалко.– М: НИАТ, 1986. – 26 с.
9. Антипов Е.Л. Электрохимическая обработка пазов профилированным токопроводящим кругом. / Е.Л. Антипов // «Авиационная промышленность». 1972, – № 11. – С. 46-48.
10. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ. / Сост. М. Ван-Дейк // М.: Мир, 1986. – 184 с.
11. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. // М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с. (Серия «Проектирование»).
12. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев // СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

13. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И. А. Бабичев. // Ростов на Дону: Изд.центр ДГТУ, 1998. – 624 с.
14. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения / В.Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
15. Бердник В.В. Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля // Киев: «Виша школа», 1984. – 124 с.
16. Братухин А.Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / А.Г. Братухин, Г.К. Язов, Б.Е. Карасев и др. // М.: Машиностроение, 1977.
17. Вайнер Л.Г. Технологическое управление абразивной обработкой на основе моделирования процессов формообразования // Известия ВолгГТУ. – № 2. – 2018 – С. 7 – 20.
18. Воробей В.В. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: Учебник / В.В. Воробей, В.Е. Логинов // М.: Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.
19. Высокоскоростное анодное растворение в условиях нестационарности электродных потенциалов / Зайцев А.Н., Житников В.П., Идрисов Т.Р. и др.; под ред. А.Н. Зайцева // Уфа: Гилем, 2005. – 220 с.
20. Газизуллин К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах: Научное издание // Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. – 243 с.
21. Гончаров А.И. Справочник по химии / А.И. Гончаров, М.Ю. Кириллов // Киев: Издательство «Вища.шк.». 1978. – 208 с.
22. Гостев В.В. Алмазно-электролитическое и шлифование твердых сплавов / Гостев В.В. // Харьков: «Виша школа», 1974. – 127 с.
23. Долгих А.М. Основы абразивной обработки деталей в электрическом поле с биполярным электродом. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук – Саратов: СГТУ, 2000 – 31 с.
24. Чижов М.И. Гальваномеханическое хромирование деталей машин / М.И. Чижов, В.П. Смоленцев. – Воронеж : ВГТУ, 1998 – 162 с.

25. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей / С.Ю. Жачкин. – Воронеж : ВГТУ, 2002. – 138 с.
26. Каримов А.Х. Методы расчета электрохимического формообразования / А.Х. Каримов, В.В. Клоков, Е.И. Филатов // Казань: Из-во Казанского университета. 1990 - 388 с.
27. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом / Воронеж: ВГТУ, 2010 - 254 с
28. Киричек А.В. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Научные технологии в машиностроении. – №8. – 2017. – С.30-35.
29. Коденцев С.Н. Технологические аспекты электроэрозионного формообразования каналов сложного профиля / С. Н. Коденцев // Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Липецк, ЛГТУ, 2006. Часть I. – С. 128 - 131.
30. Коденцев С.Н. Технологический контроль качества комбинированной обработки деталей транспортных машин / С.Н. Коденцев, Е.Г. Сухочева // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: межвуз. сб. науч. тр., Воронеж: ВГЛТА, 2006. – Вып. 1. – С. 97 – 100.
31. Комбинированные импульсные термомеханические воздействия с применением электромагнитного поля и деформирующего инструмента / В.И. Бородавко и др.// Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: материалы междунар. научного симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов на Дону: ДГТУ, 2017. – 240 с.
32. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских // Воронеж: ВГТУ, 1996. – 168 с.
33. Коровин А.А. Изготовление теплообменных профилей для изделий, работающих с газожидкостными рабочими средами Диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук Коровин А.А. Воронеж: ВГТУ. 2012. – 123 с.

34. Коровин А.А. Эффективные методы получения каналов охлаждения на поверхностях деталей жидкостных ракетных двигателей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011.– Т. 7. – № 11.2, С. – 29 - 32.

35. Маннапов А.Р., Зайцев А.Н. Технологические показатели электрохимического формирования вставок щёточных уплотнений / А.Р. Маннапов, А.Н. Зайцев // Вестник УГАТУ. Уфа, 2008. – Т. 11. – № 2 (29). – С. 131-138.

36. Мелькумов Т.М. Ракетные двигатели / Т.М. Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков, А.Г. Шуиков // М: Машиностроение, 1976. – 400 с.

37. Мельничук А.Ф. Формирование пористой структуры в изделиях на основе железа и титана с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук А.Ф. Мельничук. – Комсомольск на Амуре: КНАГТУ, 2009. – 24 с.

38. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования // Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 263 с.

39. Моделирование распределения тока при электрохимической обработке и нанесении покрытий с использованием подвесочной оснастки: Учебное пособие / И.Н. Андреев, Ж.В. Межевич, К.А. Зотеев // Казань: Казан. гос. технол. ун-т. 2006.

40. Назаров Ю.Ф. Нанотехнология в производстве РКТ / Ю.Ф. Назаров, В.В. Булавкин, В.В. Курченко // Аэрокосмическая техника и технология. 1988. – № 4.

41. Нгуен Мань Тием Повышение качества плоского шлифования деталей из высокопрочных коррозионно-стойких сталей высокопористыми нитридборовыми кругами // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Нгуен Мань Тием – Иркутск: ИрННТУ, 2017. – 20 с.

42. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А.Г. Сулова // М: Машиностроение, 2012.- 528 с.43. Норман А.В. Конструкции форсунок и технологии их комбинированной обработки / А.В. Норман, В.П. Смоленцев, Е.А. Салтанаева, М.Г. Поташников // Современные технологии производства в машиностроении. межвуз. сб. научн. тр. Воронеж: Научная книга, 2021. – С. 105 – 112.

44. Норман А.В. Методика проектирования комбинированного электрода-инструмента аддитивными методами // А.В. Норман, А.В. Кузовкин, А.П. Суворов, М.Г. Поташников // Современные технологии производства в машиностроении: межвуз. сб. научн. тр. – Воронеж: Научная книга, 2021. – Вып. 14. – С. 135 – 142.

45. Носенко В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко С.В. Носенко // Ст. Оскол: ТНТ, 2017 – 613 с.

46. Носов Н.В. Новый метод шлифования сквозных отверстий в условиях ограниченной жесткости технологической системы / Н.В Носов, А.Ф. Денисенко // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: м-лы IV межд. науч.-техн. конф. – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2019. – С. 388 - 393.

47. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, Б.П. Саушкин // Кишинев: Из-во «Штиинца»,1977. – 152 с.

48. Паничев Е.В. Комбинированная чистовая обработка переходных участков металлокерамических покрытий с диэлектрическими гранулами // Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Е.В. Паничев. – Воронеж. ВГТУ. – 2020. – 145 с.

49. Паничев Е.В. Подготовка поверхности под нанесение жаростойкого покрытия // Е.В. Паничев, В.П. Смоленцев //Упрочняющие технологии и покрытия, 2019. –Т.15.– №11. – С 517-522.

50. Паничев Е.В. Способы и технологические приемы для создания системы охлаждения горячей зоны тепловых двигателей / Е.В. Паничев, В.П. Смоленцев, А.В. Щеднов // Справочник. Инженерный журнал. – 2000.– №10.

51. Патент №119663 РФ. Имитатор для определения оптимальных технологических режимов при получении турбулизаторов в каналах охлаждения электрохимическим методом / В.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, А.А. Коровин, Г.Н. Климова // 2012 Бюл. изобр. № 24.

52. Патент №135561 РФ. Высоконапорное устройство для подачи рабочей среды / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Г.П. Смоленцев // 2012. Бюл. изобр. № 35.

53. Патент №1797533 РФ Способ электрообработки вращающимся электродом-инструментом / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, С.В. Кретинин, Б.А. Голоденко // 1993 Бюл. изобр. № 7.

54. Патент № 2224827 РФ Способ гальваномеханического восстановления токопроводящих деталей// Заявка 2002102130/02 от 23.01.2002.Опуб 27.02.2004.Бюл.№6

55. Патент №2257981 РФ. Способ электрохимической обработки / А.Р. Закирова, З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев, К.М. Газизуллин // 2005. Бюл. изобр. № 22.

56. Патент №2261164 РФ. Способ очистки абразивной ленты на металлической основе и устройство для его реализации // В.П.Смоленцев, Г.П. Смоленцев, Г.М. Климова // 2005. Бюл. изобр. № 27.

57. Патент №2277163 РФ. Способ электрохимической обработки / В.Г. Грицюк, В.П. Смоленцев, А.Н. Некрасов, А.С. Ревин // 2006. Бюл. изобр. № 15.

58. Патент №2333821 РФ. Способ электрохимической размерной обработки и устройство для его реализации // В.П. Смоленцев, А.М. Гренькова, Е.В. Смоленцев, А.В. Перова // 2008.Бюл. изобр. № 26.

59. Патент №2470749 РФ. Способ электрохимической обработки локальных участков и устройство для его использования / И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев, А.А. Коровин и др. // 2012. Бюл. изобр. № 36.



60. Патент №2466835 РФ . Способ эрозионно-технической обработки / С.Н. Коленцев, В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, М.А. Уваров // Оpub. 20.11.2012. Бюл. №32.

61. Патент № 2615101.Способ электроннолучевой сварки разнородных металлов ./ А.И. Портных и др. // 2017.Бюл. изобр. № 10.

62. Патент №2621511 РФ. Электрод для изготовления конфузорного участка в отверстии форсунки. / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Б.И. Омигов // 2017. Бюл. изобр. № 16.

63. Патент № 2625378 РФ. Способ групповой прошивки отверстий и устройство для его реализации / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, Ю.В. Шаров, В.В. Золотарев // 2017. Бюл. изобр. №20.

64. Патент №2656628 РФ. Способ подачи рабочей среды / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, А.Ю. Рязанцев // 1018. Бюл. изобр. №16.

65. Патент № 2693283 РФ, С23С 4/04, С23С 30/00, С23С 4/134. Способ получения эрозионно-стойких теплозащитных покрытий / А. И., Портных, Е. В Паничев. // 2019, Бюл. изобр. № 19.

66. Патент №2778809 РФ В23Н Способ гальваноконтактного восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания слоев гальванического покрытия / В. П. Смоленцев, Н. Н Ненахов, И.Г. Стародубцев Заявка 2021116268 Приоритет 03 июня 2021. Оpub. 25.08.22. Бюл. изобр. №24.

67. Патент 2809681, Р Ф МПК В23Н. Электрод-инструмент и способ электроабразивной обработки полужакрытой полости детали / Н. Н. Ненахов. В. П. Смоленцев О Н, Кириллов, Д. Е. Крохин // Заявлен 11.07.2022 № 2022119062 Оpubл. 14.12.23. Бюл. №35.

68. Патент 2778809. РФ МПК В23Н. Способ гальваноконтактного восстановления металлических деталей и инструмент для выглаживания и раскатки слоев гальванического покрытия ./В.П. Смоленцев, , Н.Н. Ненахов, И.Г.ю Стародубцев // Заявлен 03.06.2021. № 2021115268. Оpubл. 25.08.22. Бюл. № 24.

69. Печагин А.П. Разработка технологического процесса иагнитно-импульсной стабилизации размеров корпусных деталей / Gtxfuby F/G/Петров Ю.Н. / А.П. Печагин, В.П. Смоленцев, В.М. Питолин // Известия Орел ГТУ. – 2008. – № 4. – С. 39-47.

70. Печагин А.П. Повышение точности сборных корпусных деталей путем искусственного старения методом магнитно-импульсной обработки / А.П. Печагин, В.П. Смоленцев, А.И. Найденов // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2009. – №6. – С.41-46.

71. Портных А.И. Технологические режимы плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий / А.И. Портных, В.П. Смоленцев, Е.В. Паничев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т.15. – № 1 – С.112-115.

72. Портных А.И. Технология плазменного нанесения эрозионностойких термозащитных покрытий, обеспечивающих многократную эксплуатацию изделий. Диссертация на соискание степени к.т.н. А.И. Портных. – Воронеж. ВГТУ. 2019. – 155 с.

73. Поташникова Н.С. Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки / Н.С. Поташникова, В.П. Смоленцев, М.Г. Поташников // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. –Т.17. –.№ 3 (195). – С. 138-144.

74. Принцип действия электрохимического станка SFE [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.stankofinexpo.ru>.

75. Проблемы гидродинамики и их математические модели / Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. // Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973 г.

76. Пронин Е.К. Исследование методов электроабразивного шлифования деталей авиационных двигателей. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук Е.К. Пронин. –Казань:КАИ, 1970. – 19 с.

77. Ракошиц Г.С. Электроимпульсная штамповка // М: Высш.шк., 1984. – 192 с

78. Рабинович Е.З. Гидравлика // М: Гос.издат. физ-мат л-ры, 1961. – 408 с.
79. Ребиндер П. А. Электрокинетические свойства капиллярных систем // М.: Машиностроение, 1956. – 264 с.
80. Редкозубова О.О. Импульсное анодное растворение макроскопически неоднородной поверхности с искусственной изоляцией // Диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук О.О. Редкозубова – Кишинев, 2004.
81. Сафонов С.В.. Методология отработки технологичности при запуске в производство наукоемких изделий авиакосмической техники / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, А.В.Мандрыкин // Наукоемкие технологии в машиностроении. –2019. – №7 (97). – С.30-34.
- 82.Скрыгин О.В. Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов / О.В. Скрыгин , В.П. Смоленцев, А.В Щеднов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019.– Т.15. – .№ 8. – С. 369 – 374.
- 83.Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом //М: Машиностроение, 1967. – 180 с.
84. Смоленцев В.П. Комбинированная прошивка глубоких каналов переменного сечения / В.П. Смоленцев, А.А. Широкожухова, Н.С. Поташникова // Справочник. Инженерный журнал. –2020. – №8 (281). – С. 10 – 13
85. Смоленцев В.П., Ненахов Н.Н., Извеков А.А., Стародубцев И.Г. Аддитивные технологии изготовления – инструментов для комбинированных методов обработки. // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С.3-8.
86. Смоленцев В.П. Нетрадиционные методы обработки в точном машиностроении. / В.П. Смоленцев, И.Т. Коптев // Студент, специалист, профессионал «ССП-2012»: материалы V-й Международной научно-практической конференции.– Воронеж: ВГКПТЭС, 2012. – С.114-124.
87. Смоленцев В.П. Повышение качества поверхностного слоя сварных конструкций управляемым магнитоимпульсным воздействием / В.П. Смоленцев,

Н.Н. Ненахов, Я.С. Смоленцева // «Инновации в машиностроении»: сб. научн.тр., – Бийск: АГТУ, 2020.

88. Смоленцев В.П. Технологические возможности и перспективы развития электроэрозионной и электрохимической размерной обработки / В.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, К.М. Газизуллин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2012. – №2-5 (292). – С. 7 – 12.

89. Смоленцев В.П. Управление системами и процессами / В.П., Смоленцев, В.П. Мельников, А.Г. Схиртладзе // М: Академия, 2010. – 336 с.

90. Смоленцев В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч.: Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. // Воронеж: ВГТУ, 2008. – Ч. I. – 208 с.

91. Смоленцев В.П. Эффективные методы удаления недорезов фрезерования при изготовлении перекрещивающихся пазов/ В.П. Смоленцев, А.А. Коровин // Студент, специалист, профессионал: сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. // Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 122 с.

92. Смоленцев В.П. Обеспечение точности сопрягаемых поверхностей / В.П. Смоленцев, В.Н. Сухоруков // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. – Вып. 3. – С. 94 – 98.

93. Смоленцев В.П. Процесс обработки сопрягаемых пазов / Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении / В.П. Смоленцев, В.Н. Сухоруков // межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. – Вып. 3. – С. 91-94.

94. Смоленцев В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч. Учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. // Воронеж: ВГТУ, 2008. – Ч. 2: – 223 с.

95. 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.
96. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей // М., «Машиностроение», 1978. – 176 с.
97. Смоленцев В.П. Управление качеством наукоемких изделий по результатам испытаний / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, Б.И. Омигов // Вестник Брянского Государственного технического университета. – 2019. – №1. – С. 20-28.
98. В.П. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков // М.: Машиностроение, 1983. – 72 с.
99. Смоленцев Г.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев. // Воронеж. гос. техн. ун-т, 2000. – 104 с.
100. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М: Машиностроение, 2005. – 511 с.
101. Современная электротехнология в машиностроении: сб. тр. международной науч. техн. конференции. – Тула: ТГУ. 2002. – 471 с.
102. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Под ред. А.С. Юрьева // С.-Пб, АНО НПО «Мир и семья», 2001. – 154 с.
103. Гальваноконтактное восстановление геометрии деталей с использованием поверхностного пластического деформирования: монография: в 2-х т. / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, И.Г. Стародубцев, Н.Н. Ненахов; под ред. С.А. Зайдеса // Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования. – Иркутск: Из-во ИРНТУ, 2022. – Т. 2 – 584 с.
104. Справочник металлиста. В 5 т. / Под ред. С.А. Чернавского, В.Ф. Рещикова // М: Машиностроение, 1976. – Т.1. – 768 с.
105. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т.. / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина // М: «Инновационное машиностроение» 2018 - 818 с.
106. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Суслова // М: «Инновационное машиностроение», 2019. – Т.2. – 800 с.

107. 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.

108. Сурьев А.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования // Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук / А.А. Сурьев. – Брянск: БГТУ, 2008. – 20 с.

109. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др // М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

110. Технология комбинированной импульсной обработки в кавитационной жидкой среде / В.П. Смоленцев, О.В. Скрыгин, Н.Н. Ненахов, С.В. Сафонов // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий/ Под ред. В.А. Лебедева: сб. тр. семинара технологов-машиностроителей. – Ростов на Дону: ДГТУ, 2021. – С. 342-345.

111. Усов С.В. Оценка эффективности при внедрении высоких наукоемких технологий / С.В. Усов, Д.С. Свириденко, А.А. Болдырев, С.В. Ковалев, А.В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Том 8. – №7.1. – 2012. – С.87 – 91.

112. Усов С.В. Исследование влияния комбинированных методов обработки на трибологические характеристики поверхностного слоя деталей машин / С.В. Усов, Д.С. Свириденко, Е.В. Смоленцев, А.С. Белякин // Вестник Воронежского государственного технического университета, том 8, №5, 2012. – С.138 – 141

113. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа, 2002. – 656 с.

114. Цветков Б.В. Повышение производительности алмазного глубинного шлифования монолитного твердосплавного инструмента // Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Б.В. Цветков – Рыбинск: РГАТУ им, П.А. Соловьева - 16 с.

115. Чернин И.М. Расчеты деталей машин / И.М. Чернин, А.В. Кузьмин, Г.М. Ицкович // Минск: «Вышэйшая школа». 1974. - 592 с.

116. Шкарбан А.Ю. Разработка методов расчета электрохимического формообразования и гидродинамики течения электролита в зазоре // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ-мат. наук А.Ю. Шкарбан – Казань: КГУ. 2000. – 24 с.

117.Шумячер В.М. Определение объемно-размерных параметров пористости шлифовальных кругов // В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова // Машиностроительные и компьютерные технологии. – 2018. – №5. – С.1-8.

118.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.

119. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке материалов /А.И. Дикусар, Г.Р. Энгельгардт, В.И. Петренко, Ю.Н. Петров // Кишинев; «Штиица». 1983. – 208 с.

120. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т.Т.2 / Под ред В.П. Смоленцева // М:Высш.шк., – 1983. – 208 с.

121. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы / В.А. Головачов, Б.И. Петров, В.Г. Филимошин, В.А. Шманев // М: Машиностроение. 1969. – 198 с.

122. Ямпольский В.В. Электроалмазное шлифование быстрорежущей стали Р6М5 с применением асимметричных биполярных импульсов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук В.В. Ямпольский – Новосибирск: НГТУ. 2006. – 18 с.

123. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов // Братск: БрГУ. 2009. – 228 с.

124. Яньюшкин А.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании / А.С. Яньюшкин, В.С. Шоркин // М: Машиностроение, 2004 – 230 с.

125. Protection of Medical Instruments from Infection with Protective Nanocoating's / Vladislav Smolentsev, Andrei Mandrykin and Natalia Potashnikova // Determinations Nanomed Nanotechnol.1(2). DNN.000509. 2019. Copyright©

126. Skrygin Oleg Vladislav Smolentsev and Anton Schednov [The Mass Transfer Intensification of Combined Treatment Products](#) / Oleg ( Skrygin ,Vladislav Smolentsev and Anton Schednov // MATEC Web of ConferencesVolume 1 (2019) X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019) Kemerovo, Russia, November 26-29, 2019 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929701002>

127. Smolentsev V.P. Technology of combined treatment of engine cooling elements / V.P. Smolentsev, Shchednov A.V., Smolenseva J.S // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) Volume 1

128. Wege zur Leistungssteigerung bei den elektrischadtragenden Bearbeitungsverfahren. Diskussionsbeiträge // Industrie-Anzeiger, 1971, Jg. 93, Nr. 60. S. 1574.

129. Willson J.F. Practice and Theory of Electrochemical Machining. New York, 1971. 171 p.

130. Alexandr Izvekov, Vladislav Smolentsev, Nikolai Nenakhov, Igori Starodubtsev The field of use of additive technologies. Journal of Clinical Review J. Clin Cast Rep 2022, Vol.7, Issue. 8,P.1



1. Акты внедрения

Утверждаю

Генеральный директор ВСЗ «Холдинг»

к.т.н. доц. Бородкин Н.М.  
«           »  
«           »



Акт внедрения

результатов научно-исследовательской работы по электромагнитной импульсной стабилизации геометрии сварных конструкций корпусных деталей оборудования и технологической оснастки.

Комиссия в составе исполнительного директора ВСЗ «Холдинг» к.т.н. доц. Склокина В.Ю., научного руководителя ВСЗ «Холдинг», д.т.н. профессора ВГТУ Смоленцева В.П., аспиранта кафедры технологии машиностроения ВГТУ Ненахова Н.Н., к.т.н., доцента кафедры «Технология машиностроения» Липецкого ГТУ Козлова А.А установила, что в результате исследований проведенных под научным руководством профессора Смоленцева В.П. создан защищенный патентами РФ технологический процесс электромагнитной импульсной стабилизации геометрии корпусных деталей, позволяющий:

-- заменить точное чугунное литье крупногабаритных корпусных деталей на сварные конструкции из стандартных стальных профилей, что позволило исключить из технологического процесса потребность в дорогостоящих внешних заказах, сократить технологический цикл изготовления оборудования и оснастки;

- снизить до 3 раз массу оборудования и технологической оснастки за счет использования облегченных профилей стандартного проката;

- уменьшить на 20-30% трудоемкость механической обработки базовых элементов деталей, что позволило повысить загрузку точного металлообрабатывающего оборудования и снизить затраты на его приобретение;

повысить стабильность геометрии корпусных деталей и технологической оснастки в процессе их эксплуатации, что позволило освоить выпуск прецизионного оборудования для современного гибкоструктурного производства без организации литейного производства чугунных изделий;


- снизить на 10-20% энергопотребление завода на стадии производства крупногабаритных деталей;

Результаты работы опубликованы в печати, используются на станкостроительных заводах России, в учебном процессе ВГУ, ЛГУ и в других технических университетах.

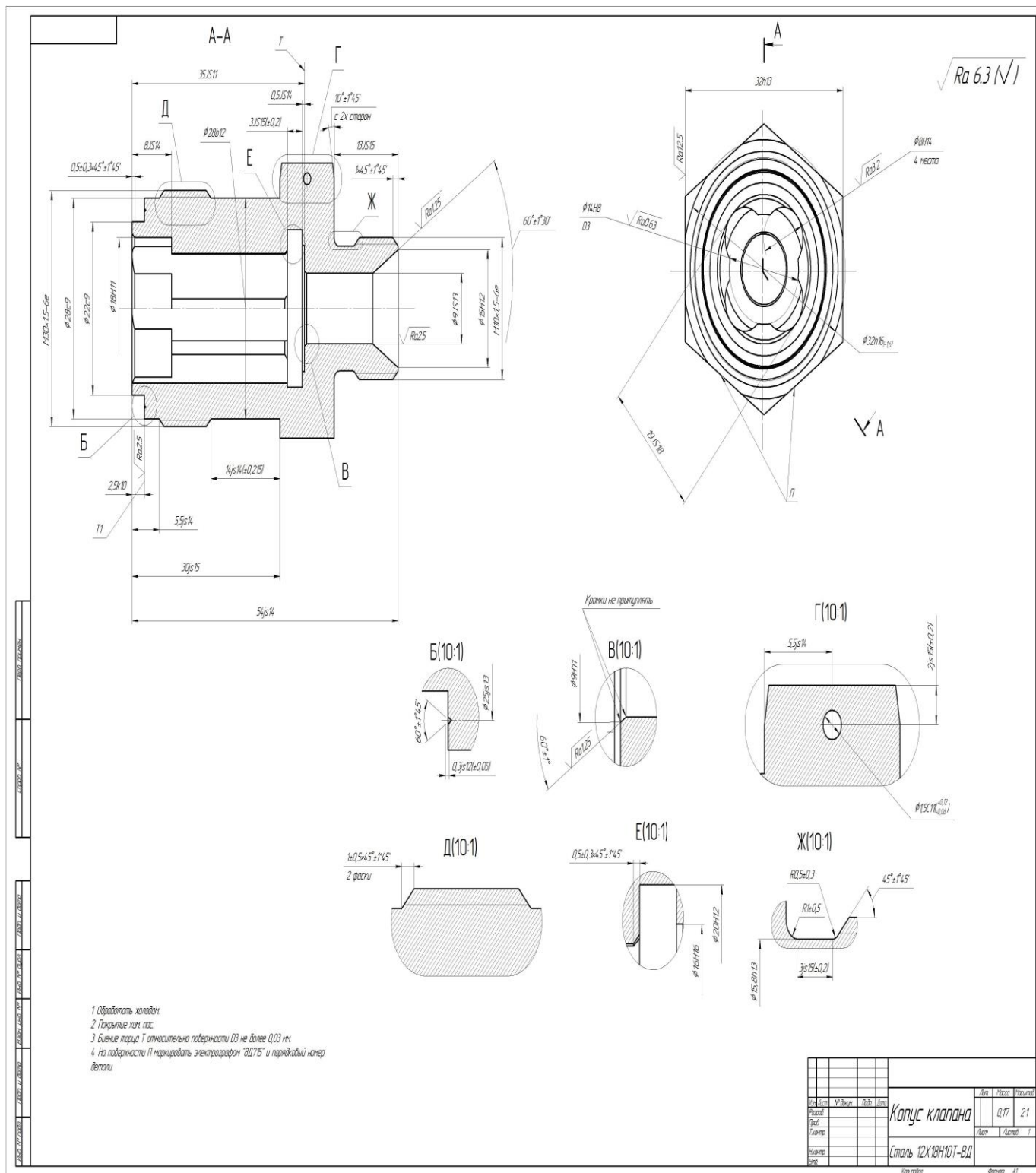
За период использования разработанной технологии стабилизации при выпуске и ремонте технологического оборудования ежегодно достигается экономический эффект в современных ценах не менее 820 тыс. рублей.

Подписали:

к.т.н. доцент	Склокин В.Ю.
д.т.н. профессор	Смоленцев В.П.
	Ненахов Н.Н.
к.т.н. доцент	Козлов А.А.



Деталь корпус клапана.  
Нержавеющая сталь. Крупногабаритная деталь



Фрагмент управляющей программы для послойного изменения параметров корпусной детали из нержавеющей стали с покрытием или без него с размером 350 мм

```
G28 ; Home extruder
G1 Z15 F600
M107 ; Turn off fan
G90 ; Absolute positioning
M82 ; Extruder in absolute mode
M190 S50
; Activate all used extruder
M104 T0 S210
G92 E0 ; Reset extruder position
; Wait for all used extruders to reach temperature
M109 T0 S210
;Layer count: 270
:LAYER:0
M107
G0 F9000 X77.300 Y85.613 Z0.300
;TYPE:SKIRT
G1 F1800 X81.488 Y83.520 E0.23358
G1 X81.691 Y83.317 E0.24790
G1 X82.093 Y83.116 E0.27033
G1 X82.295 Y82.915 E0.28454
G1 X82.690 Y82.718 E0.30656
G1 X83.092 Y82.317 E0.33489
G1 X85.491 Y81.118 E0.46869
G1 X85.694 Y80.916 E0.48298
G1 X87.691 Y79.918 E0.59436
G1 X87.894 Y79.716 E0.60865
G1 X89.891 Y78.718 E0.72003
G1 X90.095 Y78.515 E0.73439
G1 X90.493 Y78.316 E0.75659
G1 X90.695 Y78.115 E0.77080
G1 X91.093 Y77.916 E0.79300
G1 X91.295 Y77.715 E0.80722
G1 X91.690 Y77.518 E0.82924
G1 X92.092 Y77.117 E0.85757
G1 X95.480 Y75.424 E1.04653
G1 X98.620 Y75.424 E1.20318
G1 X102.006 Y77.116 E1.39203
G1 X102.207 Y77.316 E1.40617
G1 X102.605 Y77.515 E1.42837
G1 X102.807 Y77.716 E1.44259
G1 X103.209 Y77.917 E1.46501
G1 X103.613 Y78.321 E1.49352
G1 X106.005 Y79.516 E1.62692
G1 X106.208 Y79.718 E1.64121
G1 X108.206 Y80.716 E1.75263
G1 X108.409 Y80.918 E1.76692
G1 X110.406 Y81.916 E1.87830
G1 X110.607 Y82.116 E1.89244
G1 X111.005 Y82.315 E1.91464
G1 X111.207 Y82.516 E1.92886
G1 X111.605 Y82.715 E1.95106
G1 X111.807 Y82.916 E1.96528
G1 X112.209 Y83.117 E1.98770
G1 X112.612 Y83.520 E2.01613
G1 X116.800 Y85.613 E2.24971
G1 X116.800 Y109.235 E3.42822
G1 X112.612 Y111.328 E3.66180
G1 X112.409 Y111.531 E3.67612
G1 X111.610 Y111.930 E3.72068
G1 X111.409 Y112.131 E3.73486
G1 X110.609 Y112.530 E3.77946
G1 X110.409 Y112.730 E3.79357
G1 X109.208 Y113.330 E3.86055
G1 X109.006 Y113.532 E3.87481
G1 X107.808 Y114.131 E3.94163
G1 X107.606 Y114.332 E3.95585
G1 X106.408 Y114.931 E4.02267
G1 X106.206 Y115.132 E4.03689
```

G1 X105.008 Y115.731 E4.10371  
G1 X104.806 Y115.932 E4.11793  
G1 X103.607 Y116.531 E4.18479  
G1 X103.405 Y116.732 E4.19901  
G1 X102.611 Y117.129 E4.24330  
G1 X102.409 Y117.331 E4.25755  
G1 X101.610 Y117.730 E4.30211  
G1 X101.410 Y117.930 E4.31622  
G1 X100.611 Y118.329 E4.36077  
G1 X100.408 Y118.532 E4.37510  
G1 X98.218 Y119.624 E4.49719  
G1 X96.364 Y119.624 E4.58968  
G1 X94.302 Y118.935 E4.69815  
G1 X93.897 Y118.533 E4.72662  
G1 X93.090 Y118.129 E4.77164  
G1 X92.891 Y117.930 E4.78568  
G1 X92.091 Y117.531 E4.83028  
G1 X91.890 Y117.330 E4.84446  
G1 X91.091 Y116.931 E4.88902  
G1 X90.889 Y116.729 E4.90327  
G1 X90.095 Y116.332 E4.94756  
G1 X89.893 Y116.131 E4.96178  
G1 X88.694 Y115.532 E5.02865  
G1 X88.492 Y115.331 E5.04286  
G1 X87.294 Y114.732 E5.10969  
G1 X87.092 Y114.531 E5.12390  
G1 X85.894 Y113.932 E5.19073  
G1 X85.692 Y113.731 E5.20494  
G1 X84.494 Y113.132 E5.27177  
G1 X84.292 Y112.930 E5.28602  
G1 X83.091 Y112.330 E5.35300  
G1 X82.891 Y112.130 E5.36711  
G1 X82.091 Y111.731 E5.41171  
G1 X81.888 Y111.528 E5.42603  
G1 X77.300 Y109.235 E5.68192  
G1 X77.300 Y85.613 E6.86043  
G0 F9000 X81.200 Y115.775  
G1 F1800 X81.200 Y130.835 E7.61178  
G1 X66.140 Y130.835 E8.36312  
G1 X66.140 Y115.775 E9.11447  
G1 X81.200 Y115.775 E9.86582  
G1 F2400 E5.86582  
G0 F9000 X92.551 Y104.026  
;TYPE:WALL-OUTER  
G1 F2400 E9.86582  
G1 F1800 X90.823 Y102.423 E9.98341  
G1 X89.647 Y100.386 E10.10076  
G1 X89.123 Y98.089 E10.21830  
G1 X89.299 Y95.743 E10.33567  
G1 X90.159 Y93.550 E10.45319  
G1 X91.626 Y91.709 E10.57063  
G1 X93.573 Y90.383 E10.68816  
G1 X95.822 Y89.690 E10.80557  
G1 X98.177 Y89.690 E10.92306  
G1 X100.426 Y90.383 E11.04047  
G1 X102.373 Y91.709 E11.15799  
G1 X103.840 Y93.550 E11.27543  
G1 X104.700 Y95.743 E11.39295  
G1 X104.876 Y98.089 E11.51032  
G1 X104.352 Y100.386 E11.62787  
G1 X103.176 Y102.423 E11.74521  
G1 X101.448 Y104.026 E11.86281  
G1 X99.328 Y105.047 E11.98020  
G1 X97.000 Y105.398 E12.09766  
G1 X94.671 Y105.047 E12.21516  
G1 X92.551 Y104.026 E12.33256  
G0 F9000 X92.339 Y103.486  
G1 F1800 X94.536 Y104.675 E12.45719  
G1 X97.000 Y105.087 E12.58182  
G1 X99.463 Y104.675 E12.70641  
G1 X101.660 Y103.486 E12.83104  
G1 X103.351 Y101.649 E12.95561  
G1 X104.355 Y99.362 E13.08022  
G1 X104.560 Y96.873 E13.20481  
G1 X103.948 Y94.453 E13.32935  
G1 X102.581 Y92.362 E13.45399  
G1 X100.611 Y90.827 E13.57858  
G1 X98.249 Y90.017 E13.70316

G1 X98.160 Y90.015 E13.70760  
G1 X95.752 Y90.016 E13.82774  
G1 X93.388 Y90.827 E13.95242  
G1 X91.418 Y92.362 E14.07702  
G1 X90.051 Y94.453 E14.20166  
G1 X89.439 Y96.873 E14.32619  
G1 X89.644 Y99.362 E14.45079  
G1 X90.648 Y101.649 E14.57540  
G1 X92.339 Y103.486 E14.69996  
G1 F2400 E10.69996  
G0 F9000 X89.589 Y95.711  
;TYPE:FILL  
G1 F2400 E14.69996  
G1 F1800 X89.522 Y95.644 E14.70469  
G0 F9000 X89.430 Y95.688  
G0 X90.256 Y93.591  
G0 X90.386 Y93.683  
G1 F1800 X90.299 Y93.596 E14.71083  
G0 F9000 X89.371 Y93.094  
;TYPE:SUPPORT  
G1 F1800 X88.413 Y95.538 E14.84179  
G1 X88.216 Y98.159 E14.97293  
G1 X88.800 Y100.720 E15.10397  
G1 X90.112 Y102.991 E15.23482  
G1 X92.037 Y104.778 E15.36587  
G1 X94.401 Y105.917 E15.49678  
G1 X97.000 Y106.309 E15.62791  
G1 X99.598 Y105.917 E15.75899  
G1 X101.962 Y104.778 E15.88991  
G1 X103.887 Y102.991 E16.02095  
G1 X105.199 Y100.720 E16.15180  
G1 X105.783 Y98.159 E16.28285  
G1 X105.586 Y95.538 E16.41398  
G1 X104.628 Y93.094 E16.54494  
G1 X102.992 Y91.043 E16.67584  
G1 X100.820 Y89.562 E16.80699  
G1 X98.311 Y88.790 E16.93796  
G1 X96.281 Y88.791 E17.03923  
G1 X95.687 Y88.790 E17.06887  
G1 X93.179 Y89.562 E17.19979  
G1 X91.007 Y91.043 E17.33094  
G1 X89.371 Y93.094 E17.46183  
G0 F9000 X84.662 Y85.411  
G0 X84.585 Y85.348  
G1 F1800 X84.986 Y84.948 E17.49009  
G1 X87.383 Y83.750 E17.62378  
G1 X87.586 Y83.548 E17.63807  
G1 X89.583 Y82.550 E17.74945  
G1 X89.786 Y82.348 E17.76373  
G1 X91.783 Y81.350 E17.87511  
G1 X91.987 Y81.147 E17.88947  
G1 X92.385 Y80.948 E17.91167  
G1 X92.587 Y80.747 E17.92589  
G1 X92.985 Y80.548 E17.94809  
G1 X93.187 Y80.347 E17.96231  
G1 X93.585 Y80.148 E17.98451  
G1 X93.986 Y79.748 E18.01276  
G1 X96.235 Y78.624 E18.13820  
G1 X97.865 Y78.624 E18.21952  
G1 X100.114 Y79.748 E18.34496  
G1 X100.315 Y79.948 E18.35910  
G1 X100.713 Y80.147 E18.38130  
G1 X100.915 Y80.348 E18.39552  
G1 X101.313 Y80.547 E18.41772  
G1 X101.717 Y80.951 E18.44622  
G1 X104.114 Y82.148 E18.57989  
G1 X104.317 Y82.350 E18.59418  
G1 X106.314 Y83.348 E18.70556  
G1 X106.517 Y83.550 E18.71985  
G1 X108.514 Y84.548 E18.83123  
G1 X108.715 Y84.748 E18.84537  
G1 X109.113 Y84.947 E18.86757  
G1 X109.315 Y85.148 E18.88179  
G1 X109.713 Y85.347 E18.90399  
G1 X109.915 Y85.548 E18.91821  
G1 X110.313 Y85.747 E18.94041  
G1 X110.716 Y86.150 E18.96884  
G1 X113.600 Y87.591 E19.12968

G1 X113.600 Y107.257 E20.11082  
G1 X110.716 Y108.698 E20.27167  
G1 X110.514 Y108.900 E20.28592  
G1 X109.715 Y109.299 E20.33048  
G1 X109.514 Y109.500 E20.34466  
G1 X108.715 Y109.899 E20.38922  
G1 X108.514 Y110.100 E20.40340  
G1 X107.317 Y110.698 E20.47015  
G1 X107.114 Y110.900 E20.48444  
G1 X105.917 Y111.498 E20.55120  
G1 X105.714 Y111.700 E20.56548  
G1 X104.517 Y112.298 E20.63224  
G1 X104.314 Y112.500 E20.64653  
G1 X103.117 Y113.098 E20.71328  
G1 X102.914 Y113.300 E20.72757  
G1 X101.717 Y113.898 E20.79433  
G1 X101.514 Y114.100 E20.80862  
G1 X100.715 Y114.499 E20.85317  
G1 X100.514 Y114.700 E20.86735  
G1 X99.715 Y115.099 E20.91191  
G1 X99.514 Y115.300 E20.92609  
G1 X98.716 Y115.699 E20.97060  
G1 X98.514 Y115.901 E20.98485  
G1 X97.465 Y116.424 E21.04333  
G1 X96.884 Y116.424 E21.07232  
G1 X96.025 Y116.137 E21.11750  
G1 X95.787 Y115.901 E21.13423  
G1 X94.986 Y115.500 E21.17892  
G1 X94.785 Y115.299 E21.19310  
G1 X93.986 Y114.900 E21.23765  
G1 X93.785 Y114.699 E21.25184  
G1 X92.986 Y114.300 E21.29639  
G1 X92.785 Y114.099 E21.31057  
G1 X91.986 Y113.700 E21.35513  
G1 X91.783 Y113.498 E21.36942  
G1 X90.586 Y112.900 E21.43617  
G1 X90.383 Y112.698 E21.45046  
G1 X89.186 Y112.100 E21.51722  
G1 X88.983 Y111.898 E21.53150  
G1 X87.786 Y111.300 E21.59826  
G1 X87.583 Y111.098 E21.61255  
G1 X86.386 Y110.500 E21.67930  
G1 X86.183 Y110.298 E21.69359  
G1 X84.986 Y109.700 E21.76035  
G1 X84.785 Y109.499 E21.77453  
G1 X83.986 Y109.100 E21.81909  
G1 X83.784 Y108.898 E21.83334  
G1 X80.500 Y107.257 E22.01649  
G1 X80.500 Y87.591 E22.99763  
G1 X83.384 Y86.150 E23.15848  
G1 X83.587 Y85.947 E23.17280  
G1 X83.985 Y85.748 E23.19500  
G1 X84.187 Y85.547 E23.20922  
G1 X84.585 Y85.348 E23.23142  
G0 F9000 X84.662 Y85.411  
G0 X82.717 Y86.594  
G0 X82.646 Y86.451  
G1 F1800 X82.646 Y108.396 E24.32626  
G0 F9000 X82.717 Y108.254  
G0 X84.336 Y109.164  
G0 X84.265 Y109.306  
G1 F1800 X109.833 Y109.306 E25.60185  
G0 F9000 X109.306 Y109.671  
G1 F1800 X109.306 Y85.055 E26.82995  
G0 F9000 X109.194 Y85.168  
G0 X104.973 Y82.789  
G0 X105.045 Y82.646  
G1 F1800 X89.254 Y82.646 E27.61777  
G0 F9000 X87.978 Y83.285  
G1 F1800 X87.978 Y111.462 E29.02352  
G0 F9000 X88.050 Y111.321  
G0 X93.382 Y114.387  
G0 X93.310 Y114.529  
G1 F1800 X93.310 Y105.325 E29.48271  
G0 F9000 X93.240 Y105.468  
G0 X91.925 Y104.943  
G0 X91.150 Y104.091  
G0 X91.260 Y103.974

G1 F1800 X80.439 Y103.974 E30.02257  
G0 F9000 X80.600 Y103.974  
G0 X93.600 Y114.496  
G0 X93.529 Y114.638  
G1 F1800 X100.658 Y114.638 E30.37824  
G0 F9000 X100.548 Y114.526  
G0 X103.904 Y112.594  
G0 X103.974 Y112.737  
G1 F1800 X103.974 Y102.720 E30.87799  
G0 F9000 X104.112 Y102.801  
G0 X102.847 Y104.093  
G0 X102.738 Y103.974  
G1 F1800 X113.659 Y103.974 E31.42284  
G0 F9000 X113.500 Y103.974  
G0 X113.500 Y98.642  
G0 X113.659 Y98.642  
G1 F1800 X105.611 Y98.642 E31.82436  
G0 F9000 X105.767 Y98.677  
G0 X105.982 Y98.173  
G0 X105.781 Y95.494  
G0 X104.797 Y93.252  
G0 X104.647 Y93.310  
G1 F1800 X113.659 Y93.310 E32.27397  
G0 F9000 X113.500 Y93.310  
G0 X113.500 Y87.978  
G0 X113.659 Y87.978  
G1 F1800 X80.439 Y87.978 E33.93132  
G0 F9000 X80.600 Y87.978  
G0 X80.600 Y93.310  
G0 X80.439 Y93.310  
G1 F1800 X89.349 Y93.310 E34.37584  
G0 F9000 X89.202 Y93.252  
G0 X88.218 Y95.494  
G0 X88.017 Y98.173  
G0 X88.232 Y98.677  
G0 X88.387 Y98.642  
G1 F1800 X80.439 Y98.642 E34.77237  
G0 F9000 X80.600 Y98.642  
G0 X90.871 Y90.897  
G0 X93.264 Y89.431  
G0 X93.310 Y89.585  
G1 F1800 X93.310 Y80.218 E35.23969  
G0 F9000 X93.381 Y80.361  
G0 X98.571 Y79.088  
G0 X98.642 Y78.946  
G1 F1800 X98.642 Y88.954 E35.73899  
G0 F9000 X98.689 Y88.803  
G0 X100.906 Y89.382  
G0 X103.128 Y90.897  
G0 X104.099 Y92.271  
G0 X103.974 Y92.369  
G1 F1800 X103.974 Y82.012 E36.25571  
G0 F9000 X103.903 Y82.153  
G0 X105.982 Y98.173  
G0 X105.385 Y100.793  
G0 X104.043 Y103.115  
G0 X102.074 Y104.943  
G0 X99.657 Y106.108  
G0 X98.664 Y106.158  
G0 X98.642 Y106.000  
G1 F1800 X98.642 Y115.858 E36.74752  
;LAYER:1  
M106 S63  
G1 F2400 E32.74752  
G0 F9000 X97.000 Y105.598 Z0.500  
;TYPE:WALL-OUTER  
G1 F2400 E36.74752  
G1 F1740 X94.612 Y105.238 E36.82785  
G1 X92.438 Y104.191 E36.90810  
G1 X90.666 Y102.548 E36.98847  
G1 X89.461 Y100.459 E37.06869  
G1 X88.923 Y98.104 E37.14903  
G1 X89.104 Y95.698 E37.22928  
G1 X89.986 Y93.450 E37.30960  
G1 X91.492 Y91.561 E37.38995  
G1 X93.484 Y90.204 E37.47012  
G1 X95.792 Y89.492 E37.55045  
G1 X98.207 Y89.492 E37.63077



G1 X100.513 Y90.203 E37.71104  
G1 X102.509 Y91.562 E37.79135  
G1 X104.013 Y93.450 E37.87163  
G1 X104.895 Y95.698 E37.95195  
G1 X105.076 Y98.103 E38.03217  
G1 X104.537 Y100.460 E38.11259  
G1 X103.333 Y102.548 E38.19275  
G1 X101.561 Y104.191 E38.27312  
G1 X99.387 Y105.238 E38.35338  
G1 X97.000 Y105.598 E38.43367  
G0 F9000 X97.000 Y104.972  
G1 F1740 X99.426 Y104.566 E38.51548  
G1 X101.589 Y103.395 E38.59729  
G1 X103.254 Y101.586 E38.67906  
G1 X104.243 Y99.334 E38.76087  
G1 X104.445 Y96.883 E38.84267  
G1 X103.842 Y94.499 E38.92446  
G1 X102.496 Y92.440 E39.00627  
G1 X100.556 Y90.929 E39.08806  
G1 X98.229 Y90.130 E39.16989  
G1 X98.083 Y90.129 E39.17475  
G1 X95.771 Y90.130 E39.25164  
G1 X93.443 Y90.929 E39.33351  
G1 X91.503 Y92.440 E39.41529  
G1 X90.157 Y94.499 E39.49711  
G1 X89.554 Y96.883 E39.57890  
G1 X89.756 Y99.334 E39.66070  
G1 X90.745 Y101.586 E39.74250  
G1 X92.410 Y103.395 E39.82428  
G1 X94.573 Y104.566 E39.90609  
G1 X97.000 Y104.972 E39.98793  
G0 F9000 X97.143 Y105.089  
;TYPE:SKIN  
G1 F1740 X96.711 Y105.237 E40.00380  
G1 X96.223 Y105.160 E40.01802  
G1 X95.735 Y105.082 E40.03256  
G1 X95.247 Y105.005 E40.04743  
G1 X94.758 Y104.927 E40.06263  
G1 X94.225 Y104.895 E40.07492  
G1 X94.091 Y104.463 E40.08621  
G1 X93.461 Y104.527 E40.09821  
G1 X93.357 Y104.065 E40.11093  
G1 X92.699 Y104.158 E40.12430  
G1 X92.623 Y103.668 E40.13828  
G1 X92.069 Y103.657 E40.14879  
G1 X92.002 Y103.159 E40.15890  
G1 X91.482 Y103.113 E40.17001  
G1 X91.459 Y102.569 E40.18219  
G1 X90.898 Y102.565 E40.19548  
G1 X90.917 Y101.980 E40.20945  
G1 X90.446 Y101.885 E40.22036  
G1 X90.466 Y101.300 E40.23014  
G1 X90.032 Y101.168 E40.24161  
G1 X90.120 Y100.514 E40.25461  
G1 X89.638 Y100.431 E40.26921  
G1 X89.775 Y99.728 E40.28362  
G1 X89.396 Y99.542 E40.29489  
G1 X89.414 Y98.957 E40.30657  
G1 X89.340 Y98.466 E40.32123  
G1 X89.292 Y97.948 E40.33879  
G1 X89.294 Y97.381 E40.35685  
G1 X89.295 Y96.813 E40.37069  
G1 X89.392 Y96.152 E40.38919  
G1 X89.588 Y95.389 E40.41453  
G1 X89.949 Y94.746 E40.43906  
G0 F9000 X89.784 Y94.346  
G1 F1740 X90.664 Y93.466 E40.48045  
G0 F9000 X90.359 Y93.205  
G1 F1740 X92.569 Y90.995 E40.58441  
G0 F9000 X93.155 Y90.974  
G1 F1740 X93.913 Y90.216 E40.62006  
G0 F9000 X94.161 Y90.535  
G1 F1740 X94.731 Y89.965 E40.64687  
G0 F9000 X95.023 Y90.238  
G1 F1740 X95.693 Y89.850 E40.67153  
G1 X96.299 Y89.810 E40.68829  
G1 X96.865 Y89.810 E40.70505  
G1 X97.430 Y89.810 E40.72177

G1 X97.996 Y89.810 E40.73853  
G1 X98.477 Y89.895 E40.75234  
G1 X98.903 Y90.034 E40.76482  
G1 X99.330 Y90.173 E40.77789  
G1 X99.907 Y90.162 E40.79147  
G1 X100.032 Y90.602 E40.80565  
G1 X100.700 Y90.500 E40.81925  
G1 X100.813 Y90.953 E40.82934  
G1 X101.374 Y90.958 E40.84031  
G1 X101.449 Y91.448 E40.85210  
G1 X102.047 Y91.416 E40.86474  
G1 X102.085 Y91.944 E40.87830  
G1 X102.641 Y91.953 E40.89106  
G1 X102.680 Y92.480 E40.90060  
G1 X103.142 Y92.583 E40.91095  
G1 X103.133 Y93.159 E40.92254  
G1 X103.644 Y93.213 E40.93540  
G1 X103.580 Y93.843 E40.94956  
G1 X104.052 Y93.936 E40.96269  
G1 X104.103 Y94.451 E40.97288  
G1 X104.253 Y94.867 E40.98388  
G1 X104.390 Y95.295 E40.99699  
G1 X104.342 Y95.909 E41.01225  
G1 X104.779 Y96.038 E41.02911  
G1 X104.676 Y96.706 E41.04249  
G1 X104.722 Y97.226 E41.05530  
G1 X104.717 Y97.797 E41.07229  
G1 X104.649 Y98.430 E41.09363  
G1 X104.539 Y99.105 E41.11336  
G1 X104.239 Y99.690 E41.13523  
G0 F9000 X104.496 Y99.998  
G1 F1740 X103.796 Y100.699 E41.16818  
G0 F9000 X104.064 Y100.996  
G1 F1740 X103.079 Y101.981 E41.21451  
G0 F9000 X103.296 Y102.329  
G1 F1740 X102.475 Y103.151 E41.25315  
G0 F9000 X101.411 Y103.649  
G1 F1740 X100.529 Y104.531 E41.29463  
G0 F9000 X100.177 Y104.317  
G1 F1740 X99.438 Y105.056 E41.32939  
G0 F9000 X99.180 Y104.748  
G1 F1740 X98.618 Y105.028 E41.35033  
G1 X97.945 Y105.134 E41.37061  
G1 X97.403 Y105.394 E41.39061  
G0 F9000 X96.997 Y106.509  
;TYPE:SUPPORT  
G1 F1920 X99.655 Y106.109 E41.48001  
G1 X102.075 Y104.943 E41.56935  
G1 X104.044 Y103.116 E41.65869  
G1 X105.385 Y100.793 E41.74790  
G1 X105.808 Y98.929 E41.81148  
G1 X105.981 Y98.182 E41.83698  
G1 X105.980 Y98.173 E41.83728  
G1 X105.982 Y98.164 E41.83759  
G1 X105.782 Y95.495 E41.92661  
G1 X104.800 Y92.995 E42.01594  
G1 X103.128 Y90.894 E42.10525  
G1 X100.909 Y89.383 E42.19454  
G1 X98.341 Y88.592 E42.28391  
G1 X96.739 Y88.593 E42.33719  
G1 X95.657 Y88.592 E42.37318  
G1 X93.092 Y89.382 E42.46245  
G1 X90.870 Y90.897 E42.55190  
G1 X89.873 Y92.149 E42.60513  
G1 X89.210 Y92.980 E42.64049  
G1 X88.217 Y95.493 E42.73036  
G1 X88.016 Y98.173 E42.81974  
G1 X88.258 Y99.229 E42.85578  
G1 X88.614 Y100.792 E42.90909  
G1 X89.956 Y103.117 E42.99838  
G1 X91.922 Y104.942 E43.08760  
G1 X94.344 Y106.109 E43.17702  
G1 X95.932 Y106.346 E43.23042  
G1 X96.997 Y106.509 E43.26626  
G0 F9000 X97.020 Y106.606  
G0 X92.821 Y114.006  
G0 X92.785 Y114.099  
G1 F1920 X91.986 Y113.700 E43.29596

G1 X91.783 Y113.498 E43.30549  
G1 X90.586 Y112.900 E43.34999  
G1 X90.383 Y112.698 E43.35952  
G1 X89.186 Y112.100 E43.40402  
G1 X88.983 Y111.898 E43.41355  
G1 X87.786 Y111.300 E43.45805  
G1 X87.583 Y111.098 E43.46757  
G1 X86.386 Y110.500 E43.51208  
G1 X86.183 Y110.298 E43.52160  
G1 X84.986 Y109.700 E43.56611  
G1 X84.785 Y109.499 E43.57556  
G1 X83.986 Y109.100 E43.60527  
G1 X83.784 Y108.898 E43.61477  
G1 X80.500 Y107.257 E43.73687  
G1 X80.500 Y87.591 E44.39097  
G1 X83.384 Y86.150 E44.49820  
G1 X83.587 Y85.947 E44.50774  
G1 X83.985 Y85.748 E44.52254  
G1 X84.187 Y85.547 E44.53202  
G1 X84.585 Y85.348 E44.54682  
G1 X84.986 Y84.948 E44.56566  
G1 X87.383 Y83.750 E44.65479  
G1 X87.586 Y83.548 E44.66431  
G1 X89.583 Y82.550 E44.73857  
G1 X89.786 Y82.348 E44.74809  
G1 X91.783 Y81.350 E44.82234  
G1 X91.987 Y81.147 E44.83192  
G1 X92.385 Y80.948 E44.84672  
G1 X92.587 Y80.747 E44.85619  
G1 X92.985 Y80.548 E44.87099  
G1 X93.187 Y80.347 E44.88047  
G1 X93.585 Y80.148 E44.89527  
G1 X93.986 Y79.748 E44.91411  
G1 X96.235 Y78.624 E44.99773  
G1 X97.865 Y78.624 E45.05195  
G1 X100.114 Y79.748 E45.13557  
G1 X100.315 Y79.948 E45.14500  
G1 X100.713 Y80.147 E45.15980  
G1 X100.915 Y80.348 E45.16928  
G1 X101.313 Y80.547 E45.18408  
G1 X101.717 Y80.951 E45.20308  
G1 X104.114 Y82.148 E45.29220  
G1 X104.317 Y82.350 E45.30172  
G1 X106.314 Y83.348 E45.37597  
G1 X106.517 Y83.550 E45.38550  
G1 X108.514 Y84.548 E45.45975  
G1 X108.715 Y84.748 E45.46918  
G1 X109.113 Y84.947 E45.48398  
G1 X109.315 Y85.148 E45.49346  
G1 X109.713 Y85.347 E45.50826  
G1 X109.915 Y85.548 E45.51774  
G1 X110.313 Y85.747 E45.53254  
G1 X110.716 Y86.150 E45.55149  
G1 X113.600 Y87.591 E45.65872  
G1 X113.600 Y107.257 E46.31282  
G1 X110.716 Y108.698 E46.42005  
G1 X110.514 Y108.900 E46.42955  
G1 X109.715 Y109.299 E46.45925  
G1 X109.514 Y109.500 E46.46871  
G1 X108.715 Y109.899 E46.49841  
G1 X108.514 Y110.100 E46.50787  
G1 X107.317 Y110.698 E46.55237  
G1 X107.114 Y110.900 E46.56189  
G1 X105.917 Y111.498 E46.60640  
G1 X105.714 Y111.700 E46.61592  
G1 X104.517 Y112.298 E46.66043  
G1 X104.314 Y112.500 E46.66995  
G1 X103.117 Y113.098 E46.71446  
G1 X102.914 Y113.300 E46.72398  
G1 X101.717 Y113.898 E46.76849  
G1 X101.514 Y114.100 E46.77801  
G1 X100.715 Y114.499 E46.80772  
G1 X100.514 Y114.700 E46.81717  
G1 X99.715 Y115.099 E46.84687  
G1 X99.514 Y115.300 E46.85633  
G1 X98.716 Y115.699 E46.88600  
G1 X98.514 Y115.901 E46.89550  
G1 X97.465 Y116.424 E46.93449

G1 X96.884 Y116.424 E46.95381  
G1 X96.025 Y116.137 E46.98394  
G1 X95.787 Y115.901 E46.99509  
G1 X94.986 Y115.500 E47.02488  
G1 X94.785 Y115.299 E47.03433  
G1 X93.986 Y114.900 E47.06404  
G1 X93.785 Y114.699 E47.07349  
G1 X92.986 Y114.300 E47.10320  
G1 X92.785 Y114.099 E47.11265  
G0 F9000 X93.310 Y114.529  
G1 F1920 X93.310 Y105.544 E47.41149  
G0 F9000 X93.241 Y105.688  
G0 X91.810 Y105.107  
G0 X90.858 Y104.090  
G0 X90.968 Y103.974  
G1 F1920 X80.439 Y103.974 E47.76169  
G0 F9000 X80.600 Y103.974  
G0 X82.717 Y108.254  
G0 X82.646 Y108.396  
G1 F1920 X82.646 Y86.451 E48.49158  
G0 F9000 X82.717 Y86.594  
G0 X80.600 Y87.978  
G0 X80.439 Y87.978  
G1 F1920 X113.659 Y87.978 E49.59648  
G0 F9000 X113.500 Y87.978  
G0 X109.194 Y85.168  
G0 X109.306 Y85.055  
G1 F1920 X109.306 Y109.671 E50.41522  
G0 F9000 X109.833 Y109.306  
G1 F1920 X84.265 Y109.306 E51.26561  
G0 F9000 X84.336 Y109.164  
G0 X88.050 Y111.321  
G0 X87.978 Y111.462  
G1 F1920 X87.978 Y83.285 E52.20278  
G0 F9000 X89.254 Y82.646  
G1 F1920 X105.045 Y82.646 E52.72799  
G0 F9000 X103.974 Y82.012  
G1 F1920 X103.974 Y92.052 E53.06192  
G0 F9000 X104.099 Y91.954  
G0 X105.008 Y93.251  
G0 X104.858 Y93.310  
G1 F1920 X113.659 Y93.310 E53.35465  
G0 F9000 X113.500 Y93.310  
G0 X113.500 Y98.642  
G0 X113.659 Y98.642  
G1 F1920 X105.813 Y98.642 E53.61561  
G0 F9000 X105.968 Y98.677  
G0 X105.571 Y100.865  
G0 X104.082 Y103.217  
G0 X103.974 Y103.099  
G1 F1920 X103.974 Y112.737 E53.93617  
G0 F9000 X103.904 Y112.594  
G0 X100.548 Y114.526  
G0 X100.658 Y114.638  
G1 F1920 X93.529 Y114.638 E54.17328  
G0 F9000 X93.600 Y114.496  
G0 X98.530 Y115.745  
G0 X98.642 Y115.858  
G1 F1920 X98.642 Y106.200 E54.49450  
G0 F9000 X98.665 Y106.358  
G0 X99.713 Y106.300  
G0 X102.187 Y105.108  
G0 X103.138 Y104.093  
G0 X103.029 Y103.974  
G1 F1920 X113.659 Y103.974 E54.84806  
G0 F9000 X113.500 Y103.974  
G0 X103.264 Y90.748  
G0 X100.995 Y89.203  
G0 X98.690 Y88.596  
G0 X98.642 Y88.747  
G1 F1920 X98.642 Y78.946 E55.17404  
G0 F9000 X98.571 Y79.088  
G0 X93.381 Y80.361  
G0 X93.310 Y80.218  
G1 F1920 X93.310 Y89.378 E55.47870  
G0 F9000 X93.262 Y89.225  
G0 X90.734 Y90.751  
G0 X88.996 Y93.251

G0 X89.142 Y93.310  
G1 F1920 X80.439 Y93.310 E55.76817  
G0 F9000 X80.600 Y93.310  
G0 X80.600 Y98.642  
G0 X80.439 Y98.642  
G1 F1920 X88.183 Y98.642 E56.02573  
:LAYER:2  
M106 S127  
G0 F9000 X89.347 Y99.045 Z0.700  
:TYPE:WALL-INNER  
G1 F2100 X89.128 Y98.088 E56.05839  
G1 X89.303 Y95.744 E56.13657  
G1 X89.807 Y94.465 E56.18229  
G1 X90.162 Y93.553 E56.21484  
G1 X91.020 Y92.479 E56.26056  
G1 X91.631 Y91.711 E56.29320  
G1 X92.766 Y90.940 E56.33884  
G1 X93.573 Y90.387 E56.37138  
G1 X94.887 Y89.983 E56.41710  
G1 X95.822 Y89.694 E56.44965  
G1 X98.177 Y89.694 E56.52798  
G1 X99.488 Y90.099 E56.57361  
G1 X100.425 Y90.387 E56.60622  
G1 X102.370 Y91.713 E56.68451  
G1 X103.225 Y92.787 E56.73017  
G1 X103.836 Y93.553 E56.76276  
G1 X104.696 Y95.745 E56.84108  
G1 X104.797 Y97.113 E56.88670  
G1 X104.871 Y98.088 E56.91922  
G1 X104.564 Y99.429 E56.96498  
G1 X104.348 Y100.385 E56.99758  
G1 X103.660 Y101.573 E57.04324  
G1 X103.172 Y102.421 E57.07578  
G1 X102.164 Y103.355 E57.12148  
G1 X101.446 Y104.022 E57.15408  
G1 X99.324 Y105.044 E57.23242  
G1 X97.000 Y105.394 E57.31058  
G1 X94.674 Y105.044 E57.38882  
G1 X92.552 Y104.022 E57.46716  
G1 X90.828 Y102.422 E57.54539  
G1 X90.142 Y101.232 E57.59107  
G1 X89.651 Y100.384 E57.62366  
G1 X89.347 Y99.045 E57.66933  
G0 F9000 X89.475 Y99.404  
G1 F2100 X90.502 Y101.745 E57.75436  
G1 X92.232 Y103.624 E57.83931  
G1 X94.479 Y104.840 E57.92428  
G1 X97.000 Y105.261 E58.00929  
G1 X99.520 Y104.840 E58.09427  
G1 X101.767 Y103.624 E58.17925  
G1 X103.497 Y101.745 E58.26420  
G1 X104.524 Y99.404 E58.34922  
G1 X104.734 Y96.859 E58.43416  
G1 X104.107 Y94.383 E58.51911  
G1 X102.710 Y92.243 E58.60411  
G1 X100.694 Y90.673 E58.68910  
G1 X98.278 Y89.845 E58.77404  
G1 X98.008 Y89.843 E58.78302  
G1 X95.723 Y89.844 E58.85902  
G1 X93.305 Y90.673 E58.94404  
G1 X91.289 Y92.243 E59.02903  
G1 X89.892 Y94.383 E59.11403  
G1 X89.265 Y96.859 E59.19898  
G1 X89.475 Y99.404 E59.28391  
G0 F9000 X89.868 Y99.305  
:TYPE:WALL-OUTER  
G1 F1800 X90.841 Y101.523 E59.36447  
G1 X92.481 Y103.304 E59.44500  
G1 X94.611 Y104.457 E59.52555  
G1 X97.000 Y104.856 E59.60611  
G1 X99.388 Y104.457 E59.68664  
G1 X101.518 Y103.304 E59.76720  
G1 X103.158 Y101.523 E59.84772  
G1 X104.131 Y99.305 E59.92828  
G1 X104.330 Y96.892 E60.00881  
G1 X103.736 Y94.546 E60.08930  
G1 X102.411 Y92.518 E60.16987  
G1 X100.501 Y91.030 E60.25040

G1 X98.210 Y90.244 E60.33096  
G1 X98.007 Y90.243 E60.33771  
G1 X95.790 Y90.244 E60.41145  
G1 X93.498 Y91.030 E60.49204  
G1 X91.588 Y92.518 E60.57257  
G1 X90.263 Y94.546 E60.65314  
G1 X89.669 Y96.892 E60.73363  
G1 X89.868 Y99.305 E60.81416  
G0 F9000 X89.274 Y100.532  
G1 F1800 X88.724 Y98.119 E60.89647  
G1 X88.909 Y95.654 E60.97869  
G1 X89.812 Y93.350 E61.06100  
G1 X91.356 Y91.414 E61.14336  
G1 X93.397 Y90.023 E61.22551  
G1 X95.762 Y89.294 E61.30782  
G1 X98.237 Y89.294 E61.39014  
G1 X100.600 Y90.022 E61.47238  
G1 X102.645 Y91.415 E61.55468  
G1 X104.187 Y93.350 E61.63697  
G1 X105.090 Y95.654 E61.71928  
G1 X105.275 Y98.118 E61.80146  
G1 X104.724 Y100.533 E61.88385  
G1 X103.489 Y102.673 E61.96603  
G1 X101.673 Y104.357 E62.04840  
G1 X99.446 Y105.429 E62.13061  
G1 X97.000 Y105.798 E62.21288  
G1 X94.553 Y105.429 E62.29519  
G1 X92.326 Y104.357 E62.37740  
G1 X90.510 Y102.673 E62.45977  
G1 X89.274 Y100.532 E62.54199  
G0 F9000 X88.426 Y100.863  
:TYPE:SUPPORT  
G1 F2100 X89.016 Y101.884 E62.58121  
G1 X89.799 Y103.241 E62.63332  
G1 X90.950 Y104.308 E62.68552  
G1 X91.813 Y105.111 E62.72473  
G1 X94.282 Y106.299 E62.81586  
G1 X97.000 Y106.709 E62.90729  
G1 X99.715 Y106.300 E62.99861  
G1 X102.187 Y105.110 E63.08986  
G1 X103.048 Y104.309 E63.12897  
G1 X104.200 Y103.242 E63.18119  
G1 X104.786 Y102.224 E63.22026  
G1 X105.573 Y100.863 E63.27255  
G1 X105.831 Y99.719 E63.31156  
G1 X106.181 Y98.188 E63.36379  
G1 X105.976 Y95.450 E63.45511  
G1 X104.976 Y92.896 E63.54634  
G1 X104.241 Y91.975 E63.58553  
G1 X103.265 Y90.748 E63.63768  
G1 X102.291 Y90.086 E63.67685  
G1 X100.995 Y89.202 E63.72902  
G1 X100.257 Y88.976 E63.75470  
G1 X98.370 Y88.394 E63.82038  
G1 X97.196 Y88.395 E63.85942  
G1 X95.627 Y88.394 E63.91161  
G1 X93.004 Y89.203 E64.00290  
G1 X92.035 Y89.865 E64.04194  
G1 X90.735 Y90.748 E64.09421  
G1 X90.005 Y91.667 E64.13324  
G1 X89.023 Y92.896 E64.18556  
G1 X88.597 Y93.988 E64.22455  
G1 X88.023 Y95.449 E64.27676  
G1 X87.818 Y98.181 E64.36788  
G1 X87.825 Y98.210 E64.36887  
G1 X87.824 Y98.218 E64.36914  
G1 X88.080 Y99.335 E64.40726  
G1 X88.426 Y100.863 E64.45936  
G0 F9000 X83.820 Y108.805  
G0 X83.784 Y108.898  
G1 F2100 X80.500 Y107.257 E64.58147  
G1 X80.500 Y87.591 E65.23556  
G1 X83.384 Y86.150 E65.34279  
G1 X83.587 Y85.947 E65.35234  
G1 X83.985 Y85.748 E65.36714  
G1 X84.187 Y85.547 E65.37662  
G1 X84.585 Y85.348 E65.39142  
G1 X84.986 Y84.948 E65.41026

G1 X87.383 Y83.750 E65.49938  
G1 X87.586 Y83.548 E65.50891  
G1 X89.583 Y82.550 E65.58316  
G1 X89.786 Y82.348 E65.59269  
G1 X91.783 Y81.350 E65.66694  
G1 X91.987 Y81.147 E65.67651  
G1 X92.385 Y80.948 E65.69131  
G1 X92.587 Y80.747 E65.70079  
G1 X92.985 Y80.548 E65.71559  
G1 X93.187 Y80.347 E65.72507  
G1 X93.585 Y80.148 E65.73987  
G1 X93.986 Y79.748 E65.75871  
G1 X96.235 Y78.624 E65.84233  
G1 X97.865 Y78.624 E65.89654  
G1 X100.114 Y79.748 E65.98017  
G1 X100.315 Y79.948 E65.98960  
G1 X100.713 Y80.147 E66.00440  
G1 X100.915 Y80.348 E66.01388  
G1 X101.313 Y80.547 E66.02868  
G1 X101.717 Y80.951 E66.04768  
G1 X104.114 Y82.148 E66.13679  
G1 X104.317 Y82.350 E66.14632  
G1 X106.314 Y83.348 E66.22057  
G1 X106.517 Y83.550 E66.23009  
G1 X108.514 Y84.548 E66.30435  
G1 X108.715 Y84.748 E66.31378  
G1 X109.113 Y84.947 E66.32858  
G1 X109.315 Y85.148 E66.33806  
G1 X109.713 Y85.347 E66.35286  
G1 X109.915 Y85.548 E66.36233  
G1 X110.313 Y85.747 E66.37713  
G1 X110.716 Y86.150 E66.39609  
G1 X113.600 Y87.591 E66.50332  
G1 X113.600 Y107.257 E67.15741  
G1 X110.716 Y108.698 E67.26464  
G1 X110.514 Y108.900 E67.27414  
G1 X109.715 Y109.299 E67.30385  
G1 X109.514 Y109.500 E67.31330  
G1 X108.715 Y109.899 E67.34301  
G1 X108.514 Y110.100 E67.35246  
G1 X107.317 Y110.698 E67.39697  
G1 X107.114 Y110.900 E67.40649  
G1 X105.917 Y111.498 E67.45100  
G1 X105.714 Y111.700 E67.46052  
G1 X104.517 Y112.298 E67.50502  
G1 X104.314 Y112.500 E67.51455  
G1 X103.117 Y113.098 E67.55905  
G1 X102.914 Y113.300 E67.56858  
G1 X101.717 Y113.898 E67.61308  
G1 X101.514 Y114.100 E67.62261  
G1 X100.715 Y114.499 E67.65231  
G1 X100.514 Y114.700 E67.66177  
G1 X99.715 Y115.099 E67.69147  
G1 X99.514 Y115.300 E67.70092  
G1 X98.716 Y115.699 E67.73060  
G1 X98.514 Y115.901 E67.74010  
G1 X97.465 Y116.424 E67.77909  
G1 X96.884 Y116.424 E67.79841  
G1 X96.025 Y116.137 E67.82853  
G1 X95.787 Y115.901 E67.83968  
G1 X94.986 Y115.500 E67.86947  
G1 X94.785 Y115.299 E67.87893  
G1 X93.986 Y114.900 E67.90863  
G1 X93.785 Y114.699 E67.91809  
G1 X92.986 Y114.300 E67.94779  
G1 X92.785 Y114.099 E67.95725  
G1 X91.986 Y113.700 E67.98695  
G1 X91.783 Y113.498 E67.99648  
G1 X90.586 Y112.900 E68.04098  
G1 X90.383 Y112.698 E68.05050  
G1 X89.186 Y112.100 E68.09501  
G1 X88.983 Y111.898 E68.10453  
G1 X87.786 Y111.300 E68.14904  
G1 X87.583 Y111.098 E68.15856  
G1 X86.386 Y110.500 E68.20307  
G1 X86.183 Y110.298 E68.21259  
G1 X84.986 Y109.700 E68.25710  
G1 X84.785 Y109.499 E68.26655

G1 X83.986 Y109.100 E68.29625  
G1 X83.784 Y108.898 E68.30576  
G0 F9000 X84.265 Y109.306  
G1 F2100 X109.833 Y109.306 E69.15615  
G0 F9000 X109.306 Y109.671  
G1 F2100 X109.306 Y85.055 E69.97488  
G0 F9000 X109.194 Y85.168  
G0 X104.973 Y82.789  
G0 X105.045 Y82.646  
G1 F2100 X89.254 Y82.646 E70.50009  
G0 F9000 X87.978 Y83.285  
G1 F2100 X87.978 Y96.854 E70.95140  
G0 F9000 X87.819 Y96.842  
G0 X87.619 Y98.197  
G0 X87.823 Y98.661  
G0 X87.978 Y98.626  
G1 F2100 X87.978 Y111.462 E71.37833  
G0 F9000 X88.050 Y111.321  
G0 X82.717 Y108.254  
G0 X82.646 Y108.396  
G1 F2100 X82.646 Y86.451 E72.10822  
G0 F9000 X82.717 Y86.594  
G0 X80.600 Y87.978  
G0 X80.439 Y87.978  
G1 F2100 X113.659 Y87.978 E73.21312  
G0 F9000 X113.500 Y87.978  
G0 X113.500 Y93.310  
G0 X113.659 Y93.310  
G1 F2100 X105.073 Y93.310 E73.49869  
G0 F9000 X105.223 Y93.252  
G0 X104.098 Y91.636  
G0 X103.974 Y91.733  
G1 F2100 X103.974 Y82.012 E73.82202  
G0 F9000 X103.903 Y82.153  
G0 X106.171 Y95.406  
G0 X106.380 Y98.202  
G0 X106.171 Y98.678  
G0 X106.015 Y98.642  
G1 F2100 X113.659 Y98.642 E74.07626  
G0 F9000 X113.500 Y98.642  
G0 X113.500 Y103.974  
G0 X113.659 Y103.974  
G1 F2100 X103.321 Y103.974 E74.42010  
G0 F9000 X103.974 Y103.370  
G1 F2100 X103.974 Y112.737 E74.73165  
G0 F9000 X103.904 Y112.594  
G0 X100.548 Y114.526  
G0 X100.658 Y114.638  
G1 F2100 X93.529 Y114.638 E74.96876  
G0 F9000 X93.310 Y114.529  
G1 F2100 X93.310 Y105.765 E75.26025  
G0 F9000 X93.242 Y105.909  
G0 X91.701 Y105.276  
G0 X90.568 Y104.090  
G0 X90.677 Y103.974  
G1 F2100 X80.439 Y103.974 E75.60077  
G0 F9000 X80.600 Y103.974  
G0 X97.000 Y106.909  
G0 X98.664 Y106.559  
G0 X98.642 Y106.401  
G1 F2100 X98.642 Y115.858 E75.91531  
G0 F9000 X98.530 Y115.745  
G0 X88.843 Y101.984  
G0 X88.240 Y100.935  
G0 X87.827 Y98.677  
G0 X87.981 Y98.642  
G1 F2100 X80.439 Y98.642 E76.16616  
G0 F9000 X80.600 Y98.642  
G0 X80.600 Y93.310  
G0 X80.439 Y93.310  
G1 F2100 X88.923 Y93.310 E76.44834  
G0 F9000 X88.777 Y93.253  
G0 X90.599 Y90.602  
G0 X93.262 Y89.019  
G0 X93.310 Y89.172  
G1 F2100 X93.310 Y80.218 E76.74615  
G0 F9000 X93.381 Y80.361  
G0 X98.571 Y79.088



G0 X98.642 Y78.946  
G1 F2100 X98.642 Y88.540 E77.06525  
:LAYER:3  
G0 F9000 X97.655 Y89.497 Z0.900  
:TYPE:WALL-INNER  
G1 F2220 X98.208 Y89.496 E77.08364  
G1 X99.986 Y90.045 E77.14553  
G1 X100.512 Y90.207 E77.16384  
G1 X102.506 Y91.567 E77.24411  
G1 X104.009 Y93.451 E77.32427  
G1 X104.690 Y95.187 E77.38630  
G1 X104.892 Y95.699 E77.40460  
G1 X105.029 Y97.555 E77.46650  
G1 X105.071 Y98.104 E77.48481  
G1 X104.655 Y99.920 E77.54678  
G1 X104.534 Y100.456 E77.56506  
G1 X103.328 Y102.547 E77.64534  
G1 X101.963 Y103.812 E77.70724  
G1 X101.559 Y104.187 E77.72557  
G1 X99.383 Y105.236 E77.80592  
G1 X97.001 Y105.594 E77.88603  
G1 X95.158 Y105.316 E77.94802  
G1 X94.611 Y105.234 E77.96642  
G1 X92.441 Y104.188 E78.04654  
G1 X90.671 Y102.547 E78.12682  
G1 X89.465 Y100.456 E78.20711  
G1 X89.052 Y98.641 E78.26902  
G1 X88.928 Y98.102 E78.28741  
G1 X89.068 Y96.247 E78.34929  
G1 X89.107 Y95.698 E78.36759  
G1 X89.790 Y93.966 E78.42952  
G1 X89.990 Y93.451 E78.44789  
G1 X91.151 Y91.997 E78.50978  
G1 X91.494 Y91.566 E78.52810  
G1 X93.033 Y90.518 E78.59003  
G1 X93.489 Y90.206 E78.60840  
G1 X95.791 Y89.496 E78.68853  
G1 X97.655 Y89.497 E78.75052  
G0 F9000 X97.931 Y89.957  
G1 F2220 X95.742 Y89.958 E78.82333  
G1 X93.361 Y90.775 E78.90705  
G1 X91.374 Y92.321 E78.99079  
G1 X89.998 Y94.429 E79.07452  
G1 X89.380 Y96.869 E79.15823  
G1 X89.587 Y99.376 E79.24190  
G1 X90.599 Y101.682 E79.32566  
G1 X92.303 Y103.533 E79.40934  
G1 X94.516 Y104.731 E79.49304  
G1 X97.000 Y105.146 E79.57680  
G1 X99.483 Y104.731 E79.66053  
G1 X101.696 Y103.533 E79.74423  
G1 X103.400 Y101.682 E79.82791  
G1 X104.412 Y99.376 E79.91167  
G1 X104.619 Y96.869 E79.99533  
G1 X104.001 Y94.429 E80.07905  
G1 X102.625 Y92.321 E80.16278  
G1 X100.638 Y90.775 E80.24651  
G1 X98.258 Y89.958 E80.33021  
G1 X97.931 Y89.957 E80.34108  
G0 F9000 X98.191 Y90.358  
:TYPE:WALL-OUTER  
G1 F1740 X95.809 Y90.358 E80.42031  
G1 X93.554 Y91.132 E80.49961  
G1 X91.673 Y92.596 E80.57888  
G1 X90.369 Y94.592 E80.65818  
G1 X89.784 Y96.902 E80.73744  
G1 X89.980 Y99.277 E80.81670  
G1 X90.938 Y101.460 E80.89599  
G1 X92.552 Y103.213 E80.97525  
G1 X94.648 Y104.348 E81.05452  
G1 X97.000 Y104.741 E81.13384  
G1 X99.351 Y104.348 E81.21312  
G1 X101.447 Y103.213 E81.29239  
G1 X103.061 Y101.460 E81.37165  
G1 X104.019 Y99.277 E81.45094  
G1 X104.215 Y96.902 E81.53020  
G1 X103.630 Y94.592 E81.60946  
G1 X102.326 Y92.596 E81.68876

G1 X100.445 Y91.132 E81.76803  
G1 X98.191 Y90.358 E81.84730  
G0 F9000 X98.267 Y89.096  
G1 F1740 X100.687 Y89.842 E81.93153  
G1 X102.781 Y91.269 E82.01581  
G1 X104.360 Y93.250 E82.10007  
G1 X105.286 Y95.609 E82.18435  
G1 X105.475 Y98.133 E82.26854  
G1 X104.910 Y100.606 E82.35291  
G1 X103.646 Y102.798 E82.43707  
G1 X101.786 Y104.522 E82.52142  
G1 X99.505 Y105.621 E82.60563  
G1 X97.000 Y105.998 E82.68989  
G1 X94.494 Y105.621 E82.77418  
G1 X92.213 Y104.522 E82.85839  
G1 X90.353 Y102.798 E82.94274  
G1 X89.088 Y100.605 E83.02694  
G1 X88.524 Y98.134 E83.11124  
G1 X88.713 Y95.609 E83.19546  
G1 X89.639 Y93.250 E83.27975  
G1 X91.218 Y91.269 E83.36401  
G1 X93.312 Y89.842 E83.44829  
G1 X95.732 Y89.096 E83.53252  
G1 X98.267 Y89.096 E83.61683  
G0 F9000 X98.248 Y89.654  
;TYPE:FILL  
G1 F3120 X98.459 Y89.913 E83.62450  
G1 X99.251 Y90.063 E83.63073  
G1 X99.687 Y90.098 E83.64528  
G0 F9000 X97.324 Y89.635  
G1 F3120 X96.762 Y89.726 E83.65385  
G1 X96.200 Y89.818 E83.67279  
G0 F9000 X95.276 Y89.800  
G1 F3120 X95.018 Y90.058 E83.68492  
G0 F9000 X93.914 Y90.220  
G1 F3120 X93.584 Y90.550 E83.70044  
G0 F9000 X91.377 Y92.323  
G0 X90.064 Y94.070  
G1 F3120 X89.895 Y94.239 E83.70839  
G0 F9000 X89.583 Y95.493  
G1 F3120 X89.237 Y95.839 E83.72467  
G0 F9000 X89.304 Y97.656  
G1 F3120 X89.230 Y98.201 E83.73500  
G1 X89.207 Y98.695 E83.75145  
G0 F9000 X89.731 Y100.054  
G1 F3120 X89.787 Y100.468 E83.75962  
G1 X90.084 Y101.113 E83.76688  
G1 X90.432 Y101.707 E83.77152  
G1 X90.748 Y102.333 E83.77647  
G1 X91.335 Y102.689 E83.78418  
G1 X91.677 Y103.288 E83.79020  
G1 X92.282 Y103.625 E83.79440  
G1 X92.711 Y104.138 E83.80102  
G1 X93.405 Y104.385 E83.80806  
G1 X94.029 Y104.703 E83.81400  
G1 X94.691 Y104.983 E83.81879  
G1 X95.490 Y105.126 E83.82668  
G1 X96.302 Y105.255 E83.83407  
G1 X96.780 Y105.250 E83.84997  
G0 F9000 X97.612 Y105.359  
G1 F3120 X97.822 Y105.149 E83.85984  
G0 F9000 X98.721 Y105.192  
G1 F3120 X98.953 Y104.960 E83.87076  
G0 F9000 X100.141 Y104.714  
G1 F3120 X100.536 Y104.319 E83.88934  
G0 F9000 X101.693 Y103.530  
G0 X103.848 Y101.007  
G1 F3120 X104.330 Y100.525 E83.91201  
G0 F9000 X104.638 Y98.333  
G1 F3120 X104.824 Y97.676 E83.92552  
G1 X104.756 Y96.801 E83.93194  
G1 X104.629 Y95.988 E83.93858  
G1 X104.465 Y95.209 E83.94771  
G1 X104.213 Y94.519 E83.95327  
G1 X103.895 Y93.896 E83.95752  
G1 X103.638 Y93.211 E83.96616  
G1 X103.105 Y92.802 E83.97258  
G1 X102.801 Y92.163 E83.97682

G1 X102.205 Y91.818 E83.98254  
G1 X101.816 Y91.266 E83.98979  
G1 X101.193 Y90.947 E83.99566  
G1 X100.643 Y90.554 E84.00016  
G1 X100.237 Y90.490 E84.01383  
G1 F2400 E80.01383  
G0 F9000 X100.829 Y88.945  
;TYPE:SUPPORT