

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЗВЕРЕВ ИВАН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПО СХЕМЕ «ОБЖИМ»
ТОНКОСТЕННЫХ ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК
В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

научный руководитель
д.т.н., доцент
Алексей Николаевич Пасько

Тула - 2024

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 5 |
| 1 Современное состояние магнитно-импульсной обработки металлов, задачи исследования | 11 |
| 1.1 Классификация технологических операций, выполняемых методом МИОМ..... | 15 |
| 1.2 Оборудование и индукторные системы, применяемые при выполнении операций МИОМ..... | 18 |
| 1.3 Анализ методов расчета процессов МИОМ..... | 26 |
| 1.4 Моделирование процессов МИОМ с помощью ЭВМ | 31 |
| 1.5 Выводы по разделу | 36 |
| 1.6 Цель и задачи исследования | 37 |
| 2 Совершенствование математической модели расчета параметров МИОМ для цилиндрических заготовок по схеме «обжим» | 38 |
| 2.1 Расчет необходимого давления на заготовку при выполнении операций МИОМ..... | 40 |
| 2.2 Расчет давления электродинамических сил при операциях сборки и калибровки | 44 |
| 2.3 Предварительный расчет электромагнитных параметров системы «индуктор-заготовка» с расчетом индукторной системы..... | 45 |
| 2.4 Расчет индуктивностей индуктора и заготовки..... | 49 |
| 2.5 Расчет активных сопротивлений индукторной системы и заготовки | 51 |
| 2.6 Расчет взаимной индуктивности индуктора и заготовки | 52 |

| | | |
|-----|--|----|
| 2.7 | Расчет суммарных эквивалентных параметров технологической системы МИОМ | 52 |
| 2.8 | Расчет необходимой энергии при выполнении операций МИОМ и параметров разрядного тока..... | 53 |
| 2.9 | Выводы по разделу | 54 |
| 3 | Моделирование и прочностной расчет токопровода индукторных систем на "обжим" с использованием программы ANSYS с обработкой данных методом планирования эксперимента..... | 56 |
| 3.1 | Воздействие электродинамических сил на токопровод индукторных систем на «обжим»..... | 56 |
| 3.2 | Проверка токопровода индуктора на «обжим» с использованием программы ANSYS | 58 |
| 3.3 | Планирование факторного эксперимента расчёта на прочность токопровода индуктора на «обжим»..... | 60 |
| 3.4 | Реализация факторного эксперимента..... | 63 |
| 3.5 | Обработка полученных результатов. Получение вторичной математической модели..... | 64 |
| 3.6 | Исследования влияния на прочность токопровода индукторной системы закрепления и межвитковой изоляции | 67 |
| 3.7 | Выводы по разделу | 70 |
| 4 | Разработка эффективных технологических процессов МИОМ в условиях серийного производства..... | 71 |
| 4.1 | Организация участка МИОМ на ПАО «Императорский Тульский оружейный завод» | 71 |
| 4.2 | Использование компьютерного моделирования для разработки технологических процессов МИОМ | 73 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2.1 | <i>Расчет технологического процесса детали «Корпус»</i> | 73 |
| 4.2.2 | <i>Расчёт технологического процесса детали «Обтюратор»</i> ... | 87 |
| 4.3 | Разработка конструкций индукторных систем на «обжим» с токопроводом сварного типа | 96 |
| 4.4 | Выводы по разделу | 101 |
| | Заключение | 102 |
| | Список литературы | 105 |
| | ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 122 |
| | Приложение 1. Акт о внедрении в производство результатов диссертационной работы в производство ПАО «Императорский тульский оружейный завод» | 122 |
| | Приложение 2. Акт о внедрении в производство научных результатов диссертационной работы в производство АО «Тулаточмаш» | 124 |
| | Приложение 3. Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедры «Механика и процессы пластического формоизменения» (МиППФ) ТулГУ..... | 125 |
| | Приложение 4. Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедры А2 «Технология конструкционных материалов в производстве ракетно-космической техники» БГТУ «ВОЕНМЕХ»..... | 126 |

Введение

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Современное развитие машиностроения в России, в частности развитие военно-промышленного комплекса (ВПК) требует внедрения новых прогрессивных технологий для повышения качества и уменьшения себестоимости изготовления продукции.

Широкое применение в различных областях машиностроения нашли тонкостенные полые осесимметричные детали из различных металлов и сплавов. Эффективным способом изготовления подобных деталей является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ), при которой происходит высокоскоростное воздействие импульсного магнитного поля (ИМП) к заготовкам, предпочтительно изготовленным из высокоэлектропроводящего (медь, алюминий, бронза и т.д.) материала без механического контакта и без рабочей среды. В настоящее время применение данной технологии в России ограничивается единичным и мелкосерийным производством с широкой номенклатурой обрабатываемых деталей. Распространению МИОМ препятствуют известные недостатки (требования по материалу и геометрии заготовки, долговечность инструмента -индуктора, прогнозирование свойств материала при высокоскоростном нагружении и т.п.). Как следствие, изготовлению сложных образцов новых деталей (являющихся ответственными элементами конструкций) предшествуют длительные теоретические и экспериментальные исследования. Стоит отметить, что единая расчетная методика МИОМ, основанная на комплексном междисциплинарном исследовании данного процесса, в настоящий момент отсутствует. Однако существует ряд программных комплексов, позволяющих моделировать процесс МИОМ и проводить оптимизацию системы «установка-индуктор-заготовка».

Индукторные системы, выпускаемые в России, рассчитаны для работы на предприятиях аэрокосмической промышленности, то есть в условиях единичного и мелкосерийного производства. При внедрении МИОМ в серийном производстве возникает ряд проблем, связанных прежде всего с конструированием, повышением прочности и снижением себестоимости данного инструмента, а также разработки

приспособлений для выполнения операций и получении точности обрабатываемых деталей.

Таким образом, теоретическое и экспериментальное обоснование новой конструкции индукторных систем на «обжим», снижающей его себестоимость, а также разработка новых приспособлений для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок методом МИОМ в условиях серийного производства, повышающих геометрическую точность этих изделий является **актуальной научно-технической задачей**.

Целью работы является повышение эффективности технологических процессов магнитно-импульсной обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства путем совершенствования алгоритма расчета параметров данного процесса и исследования прочностных характеристик индукторных систем на «обжим», а также использования технических и технологических решений, снижающих себестоимость и повышающих геометрическую точность изготавливаемых изделий. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Проанализировать современные методики расчета параметров МИОМ с целью адаптации их к условиям серийного производства для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок.
2. Усовершенствовать алгоритм расчета параметров процесса МИОМ с учетом прочностных характеристик индукторных систем на «обжим» и возможности использования полученных данных для последующего компьютерного моделирования.
3. Исследовать воздействие давления электродинамических сил на токопровод и межвитковую изоляцию индукторных систем на «обжим», а также совместное влияние их геометрических и физических параметров на прочность индукторных систем на «обжим» при МИОМ, определить опасную зону токопровода при разряде в которой возможно разрушение витков в следствии максимальных механических напряжений.

4. Разработать конструкцию и технологию изготовления индукторных систем на «обжим», а также технологической оснастки для расширения возможностей МИОМ в условиях серийного производства.

5. Использовать результаты исследования в промышленности и учебном процессе.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованном использованием теоретических зависимостей, использованием современных методов компьютерного моделирования мирового уровня, а также практическим использованием результатов на предприятиях военно-промышленного комплекса.

Область исследования соответствует п. 2. "Новые методы пластического формоизменения и изменения свойств заготовок сжатием, ударом, магнитно-импульсным и иными воздействиями" паспорта специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Объектом исследования является технологический процесс магнитно-импульсной обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства.

Предметом исследования является установление зависимости прочности индукторной системы от геометрических параметров и свойств материалов токопроводов и межвитковой изоляции в процессе формоизменения методом МИОМ.

Научная новизна:

Установлено влияние на прочность индукторной системы на «обжим» с осевым закреплением без внешнего бандажа его геометрических параметров и механических характеристик материала токопровода и межвитковой изоляции, выявлена зона опасного сечения, в которой возможно разрушение токопровода вследствие максимальных механических напряжений, возникающих при разряде, что позволяет уточнить расчёт сечения витков токопровода.

Практическая ценность:

1. Разработана конструкция индукторных систем с токопроводом сварного типа на «обжим» (внедрены на серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод»).

2. Разработаны конструкции оснастки для выполнения операции «обжим» с использованием сборных оправок для повышения качества изготовления полых осесимметричных деталей в условиях серийного производства.

3. Разработано программное обеспечение для расчета технологических параметров процессов МИОМ (необходимое количество витков индуктора, собственные сопротивления и индуктивности индуктора и заготовки, энергия разряда).

4. Результаты исследований использованы для разработки новых технологических процессов изготовления деталей «Корпус» и «Обтюратор», внедренных на серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». Общий экономический эффект при внедрении составляет более 1,5 млн рублей.

5. Отдельные материалы исследования использованы на предприятии АО «Тулаточмаш», в учебных процессах кафедр «Механика и процессы пластического формоизменения» (МиППФ) ТулГУ и А2 «Технология конструкционных материалов в производстве ракетно-космической техники» БГТУ «Военмех».

Методы исследования. В работе применялось решение аналитических уравнений с целью определения основных параметров МИОМ. Моделирование поведения токопровода индуктора (модуль ANSYS Transient Structural), моделирование техпроцессов деталей «Корпус» и «Обтюратор» (модуль LS-DYNA с электромагнитным решателем) проводилось в программном комплексе ANSYS. Практические работы проводились на магнитно-импульсной установке МИУ-30 (ПАО «Императорский тульский оружейный завод»). Измерение индуктивности индукторных систем, а также измерение индуктивности системы «индуктор-заготовка» проводились с помощью прибора RLC АКПП 6108. Получение токовой кривой процесса (с помощью петли Роговского) производилось на цифровом осциллографе FNIRST 1014D.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованный алгоритм расчета параметров МИОМ с уточнением собственных индуктивностей и сопротивлений индуктора и заготовки с возможностью использования полученных данных для последующего моделирования в программе реализующей МКЭ.
2. Результаты компьютерного моделирования на базе программы ANSYS прочностных расчетов токопровода и изоляции индукторных систем на «обжим».
3. Вторичная математическая модель зависимости прочности индукторной системы от момента сопротивления материала токопровода в диапазоне его внутреннего диаметра от 50 до 153 мм.
4. Конструкция индукторной системы с токопроводом, изготовленным методом сварки витков, а также конструкции сборных оправок для цилиндрических деталей, получаемых методом МИОМ, для расширения возможностей применения данной технологии в условиях серийного производства.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: XIII Международная научно-техническая конференция "Прикладная механика и динамика систем" (г. Омск, 2019 г.); XII общероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); XIII общероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); XXIII всероссийская конференция «Наука Промышленность Оборона» (г. Новосибирск, 2021 г.); Национальная научно-техническая конференция «АПИР-26» (г. Тула, 2021 г.); V Международная научно-техническая конференция "Проблемы машиностроения" «Mechanical Science And Technology» (г. Омск, 2021 г.); II Всероссийская научно-техническая конференция им. Д.В. Коноплева «Перспективы создания и применения систем высокоточного оружия» (г. Тула, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьи по материалам конференций различного уровня, 2 статьи в изданиях, цитируемых *SCOPUS*. Получено 3 патента и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации Диссертационная работа состоит из введения и четырех разделов, заключения, списка литературы из 140 наименований, приложений и включает 121 страниц машинописного текста, содержит 55 рисунков и 10 таблиц. Общий объем – 126 страниц.

1 Современное состояние магнитно-импульсной обработки металлов, задачи исследования

Метод МИОМ сформировался на стыке таких научных направлений, как техника сильных импульсных токов и магнитных полей, технология обработки металлов давлением, электрические машины и аппараты [30, 81, 95, 96, 108, 135], одним из неоспоримых преимуществ которого является отсутствие контакта заготовки с рабочим инструментом – индуктором, что позволяет производить обработку деталей с покрытием без его нарушения. При МИОМ возможно выполнение операций как «притягиванием» заготовки к индуктору, так и «отталкиванием» от него [37, 92]. Данная работа посвящена МИОМ с «отталкиванием» от индуктора, так как эта технология наиболее применима в промышленности на сегодняшний день.

Появление и развитие технологии МИОМ можно разделить на несколько этапов. Первые эксперименты по воздействию электромеханических сил на различные металлы были проведены нашим соотечественником П.Л. Капицей в 1922-1923 годах. В качестве оборудования использовался мотор-генератор с маховиком мощностью 2 МВт при постоянной работе и 200 МВт в режиме короткого замыкания. Учитывая потери в оборудовании, полученная мощность на катушке достигала 50 МВт. Длительность импульса составляла 0,01 с [8]. Следующий необходимый этап для появления МИОМ был непосредственно связан с исследованиями управляемого термоядерного синтеза. Грандиозная программа потребовала существенного совершенствования и увеличения масштабов производства всех элементов высоковольтных конденсаторных установок – наиболее эффективного средства для кратковременного создания предельно больших мощностей выделения энергии. Как полагали физики, электрический разряд гигантской батареи конденсаторов мог «поджечь» мирную термоядерную реакцию вместо обычной атомной бомбы. Представленная установка в 1958 г. фирмой «General Dynamics» (США), по сути, являлась модифицированным модулем систем, предназначенных для подобных испытаний. Поэтому появление МИОМ можно рассматривать как один из побочных результатов этапа программы исследований управляемого термоядерного синтеза.

Первый обжим тонких медных и алюминиевых трубчатых заготовок был произведен в середине 50-х годов прошлого века. В 1962 г. начался выпуск установок «Magneform» для выполнения операций МИОМ [30], в то же самое время новой и перспективной технологией заинтересовались и европейские ученые [3, 4, 5, 12, 14, 17].

В начале 60-х годов в нашей стране стали выходить работы, посвящённые МИОМ, а также стали выпускаться лабораторные установки и оборудование для мелкосерийного производства. Специалистами Харьковского политехнического института (Национальный технический университет "ХПИ", г. Харьков) в 70-х годах 20 века были разработаны и изготавливались несколько типов магнитно-импульсных установок (МИУ) от 6 до 20 кДж [39]. Предприятием ЭНИКМАШ (г. Воронеж) был налажен выпуск МИУ энергоёмкостью 10...80 кДж [92]. Установки различной энергоёмкости выпускались также на Азовском заводе кузнечнопрессового оборудования и других предприятиях. Первые отечественные автоматизированные магнитно-импульсные установки изготовлены и внедрены в серийное производство в восьмидесятых годах на предприятии ТНИТИ (г. Тула) [124, 126]. Огромную роль в создании оборудования для МИОМ и внедрении в промышленность сыграли разработки Самарского университета (бывший КуАИ), Московского энергетического института, Волжского филиала МЭИ (позднее образованного на его основе Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова) и других организаций.

К сожалению, экономический кризис 90-х – начала 2000 годов фактически остановил развитие данной отрасли. В настоящее время в России единственным производителем МИУ является НИЛ-41 Самарского университета, которая разрабатывает, производит и экспортирует за рубеж установки энергоёмкостью от 5 до 50 кДж, в том числе и многопостовые [138, 139, 140]. В 2020 году данной организацией, по заказу ПАО «Новосибирский авиационный завод им. Чкалова» была изготовлена установка суммарной запасаемой мощностью 80 кДж [113]. За рубежом огромных результатов по выпуску промышленных установок для МИОМ достигли такие фирмы: «Progress Industrial System SA» Швейцария (при научно-техническом

сотрудничестве с НПЦ «Нефте-Газ» г. Саров, Россия) [18], «PST Products» Германия [22] и другие. При этом следует заметить, что большое внимание к изучению импульсных магнитных полей (ИМП) и развитию МИОМ проявляют в настоящее время ученые из Китая [6, 26, 27].

Современные разработки теории, технологии и оборудования МИОМ базируются на результатах работ следующих научных школ:

- Московский энергетический институт г. Москва (Д.В. Разевиг, Г.М. Гончаренко);
- Институт машиноведения им. А. А. Благонравова г. Москва (Б.А. Щеглов);
- Тульский государственный университет г. Тула (С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь, А.К. Талалаев, Н.Е. Проскураков, А.Н. Пасько);
- Самарский университет им. С.П. Королева г. Самара (В.А. Глущенко, В.Ф. Карпунин, С.И. Козий, А.Д. Комаров, Д.Н. Лысенко, В.Н. Самохвалов, С.А. Стукалов, Д.Г. Черников, В.Б. Хардин);
- Новосибирский государственный технический институт г. Новосибирск (Н.В. Курлаев, К.Н. Бобин, А.И. Гулидов);
- Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова г. Чебоксары (Е.Г. Иванов, М.В. Петров, Ю.А. Попов, И.А. Галкин);
- Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана г. Москва (О.Д. Антоненков, М.А. Анучин, С.Ф. Головащенко, С.Н. Колесников, В.П. Ступников);
- Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого г. Санкт-Петербург (В.С. Мамутов, А.Б. Новгородцев, Г.А. Шнеерсон);
- Омский государственный технический университет г. Омск (В.М. Хаустов);
- Московский авиационный институт г. Москва (В.Б. Юдаев);
- Донской государственный технический Университет г. Ростов-на-Дону (Е.Л. Стрижаков);
- Национальный технический университет "ХПИ", г. Харьков (бывший Харьковский политехнический институт) (Ю.Н. Алексеев, Ю.В. Батыгин, И.В.

Белый, Л.Д. Горкин, В.Н. Михайлов, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко).

Из зарубежных ученых можно отметить работы Н. Dietz, S. Glenn, Н.Р. Furth, J. Jablonski, V. Psyk, Н. Lippman, R.H. Post, Н.Р. Waniek, R. Winkler, А.Е. Теккая и др.

Развитию МИОМ в России способствуют его неоспоримые преимущества, а именно [1, 2, 7, 9, 10, 16, 22, 23, 25, 30, 32, 33, 36, 61, 83, 84, 93, 97, 110, 124]:

1. Отсутствие поверхностного контакта заготовки с формирующим элементом, что позволяет в ряде случаев изготавливать детали, которые экономически невыгодно или практически невозможно получить другими способами.

2. Универсальность МИУ. За счет замены оснастки и индуктора можно производить самые разнообразные операции над листовыми и трубчатыми заготовками различных размеров.

3. Высокая производительность процесса. Фактически скорость производства деталей зависит от времени подготовительных работ.

4. Простота обслуживания оборудования.

5. Отсутствие сопряженных трущихся поверхностей между заготовкой и магнитным полем, что исключает необходимость применения смазочных материалов, обязательно используемых в обычных процессах штамповки.

6. Возможность проведения опытно-экспериментальных работ с помощью простейшей оснастки (использование одноразовых индукторов, выполненных из медного изолированного провода), а также уже имеющихся индукторов подходящего типа и диаметра.

7. Снижение металлоемкости за счет использования при операциях МИОМ одной матрицы или одной оправки, что существенно снижает время для подготовки производства.

К недостаткам технологии можно отнести [61]:

1. Ограничение деталей по форме и размеру. Минимальный диаметр заготовки ~ 3 мм, а максимальный до 1,5 м, при толщине (в зависимости от его электропроводности) до 10 мм - для легких металлов и сплавов (сплавы алюминия) и не более 3-5 мм для тяжелых металлов (меди, латуни, стали). Заготовки большего

или меньшего размера экономически целесообразнее обрабатывать с помощью других технологий обработки металлов давлением (ОМД).

2. В следствие поверхностного нагрева заготовки и последующего охлаждения трудновыполнимо выполнение операций сборки по схеме «раздача». При этом данный эффект способствует улучшению качества сборочных соединений по схеме «обжим».

3. Трудность выполнения формоизменений заготовок из металлов с низкой электропроводностью. Эти материалы возможно обрабатывать при помощи материалов-спутников (обрабатываемая заготовка обматывается тонким высокопроводным металлом, например медью). При этом следует учесть, что материал спутника является одноразовым, что может сказаться на повышении стоимости детали и увеличении подготовительного времени. Данный способ применим для единичного и мелкосерийного производства и трудно применим для крупносерийного и массового.

4. Возможность эффективной обработки заготовок только при отсутствии прорезей и пазов, прерывающих линии вихревого тока, наводимого в заготовке полем индуктора.

5. Сложность при выполнении глубокой вытяжки деталей из-за кратковременного воздействия электродинамических сил на заготовку.

Появляющиеся в последнее время новые разработки, расширяющие возможность применения МИОМ, также способствуют развитию и распространению данного метода в промышленности [33, 35, 42, 57, 65, 103, 104, 105, 109].

1.1 Классификация технологических операций, выполняемых методом МИОМ

Детали, изготавливаемые методом МИОМ, в зависимости от нахождения заготовки относительно индукторной системы в работах [61, 92] классифицируются по трем классам в зависимости от варианта формообразования (Рисунок 1.1).

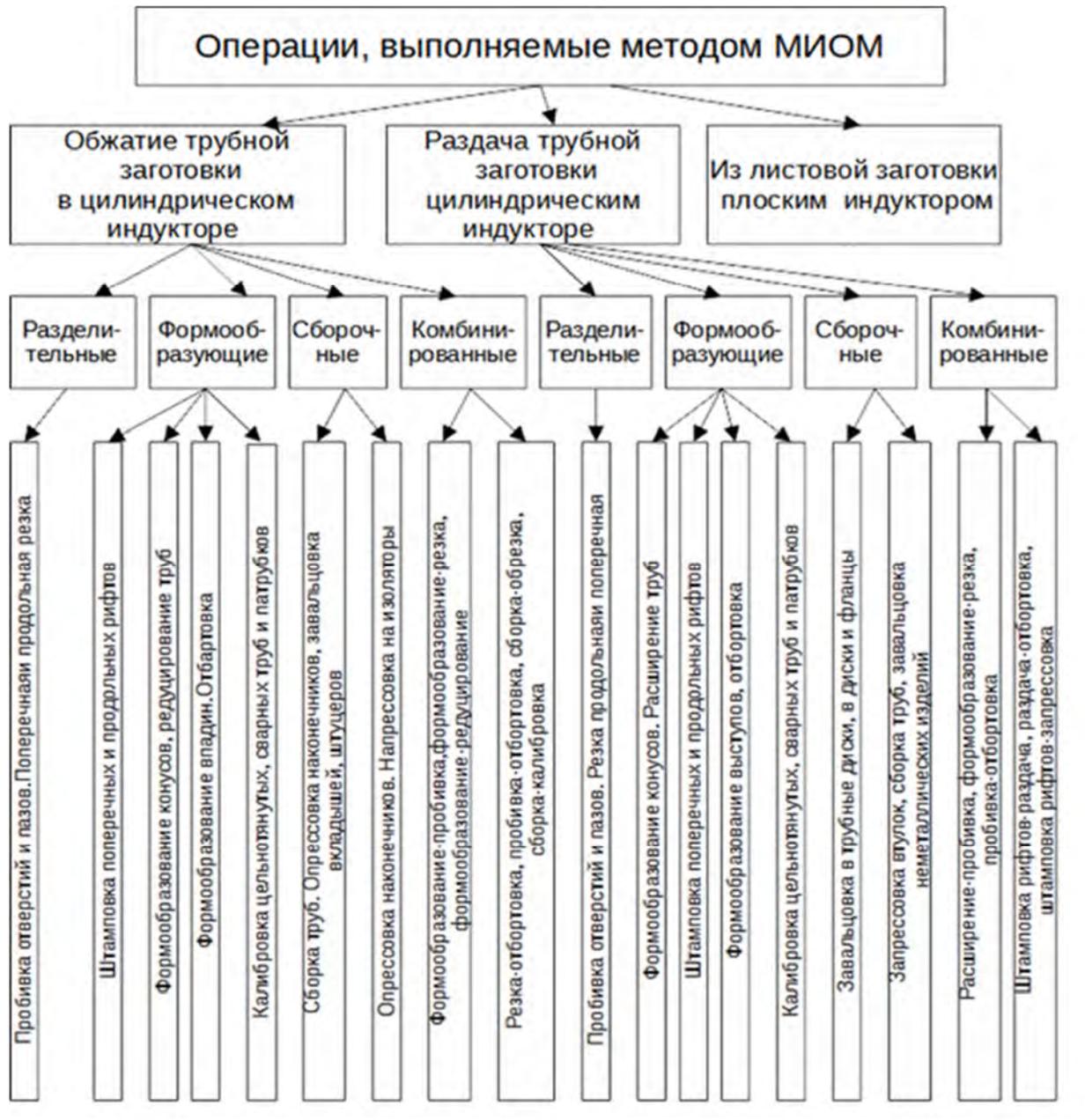


Рисунок 1.1 – Операции, выполняемые методом МИОМ

В первом варианте обрабатываемая трубчатая заготовка расположена внутри цилиндрического индуктора. Этот вид технологических операций, принято называть «обжимом» (1 класс).

Во втором варианте (2 класс) используемый цилиндрический индуктор расположен внутри трубчатой заготовки («раздача»).

При третьем варианте (3 класс) обработка осуществляется с помощью спирального плоского индуктора или концентратора, расположенного над плоской обрабатываемой заготовкой («листовая формовка»). В представленной работе эта

схема не рассматривается.

Технологические операции в зависимости от выполняемой работы разбиваются на группы и подгруппы:

- 1 группа (разделительные).
- 2 группа (формообразующие);
- 3 группа (сборочные);
- 4 группа (комбинированные).

К первой группе относится: пробивка отверстий, резка и т.д., ко второй группе: гибка, вытяжка, правка, рельефная штамповка, рихтовка и т.д., к третьей группе: сборка трубных узлов, наконечников, штуцеров и т.д. Посредством МИОМ можно выполнять комбинированные операции, составленные из разного сочетания простых технологических операций (4 группа), применение которых существенно увеличивают возможность использования МИОМ для решения технологических задач при производстве цилиндрических деталей [32, 59, 122, 132, 137]. Кроме этого, на основе МИОМ возникла новая перспективная технология – магнитно-импульсная сварка [2, 55].



Рисунок 1.2 – Осесимметричные детали, получаемые методом МИОМ

Наиболее востребованы процессы (формообразование, калибровка, сборка) получения осесимметричных деталей из сплавов цветных металлов технологией МИОМ в серийном производстве, в следствии их распространения в машиностроении (Рисунок 1.2), особенно на предприятиях ВПК.

Учитывая имеющийся опыт внедрения МИОМ на предприятиях ВПК можно отметить, что данный способ может применяться и как «самостоятельный» (т.е. при выполнении операций изготовления деталей), так и «вспомогательный», например, служить «инструментом» для повышения качества и снижения себестоимости производимой продукции.

1.2 Оборудование и индукторные системы, применяемые при выполнении операций МИОМ

Технологическая система МИОМ состоит из трех составляющих: установка, индуктор, заготовка.

Магнитно-импульсная установка (МИУ) представляет собой генератор импульсов тока, который содержит накопитель энергии. В качестве емкостного накопителя энергии используется батарея конденсаторов. Запасаемая в МИУ энергия выделяется в системе «индуктор – заготовка» в виде магнитного поля и тепла, которые используются для совершения работы [133]. Для коммутации разрядных токов обычно используются трех электродные управляемые разрядники (вакуумные, воздушные или газонаполненные), которые по сравнению с механическими ключами имеют большую пропускную способность (до нескольких МА), малое собственное индуктивное и активное сопротивление, сравнительную легкость осуществления синхронизации срабатывания при параллельной работе нескольких коммутаторов на общую нагрузку [61, 110, 111].

Известны технологии МИОМ в которых индуктор имеет гальваническую связь с заготовкой. При этом через индуктор и заготовку протекает общий ток [39,

92]. Трудности, связанные с обеспечением высоковольтного сильноточного контакта на поверхности заготовки, не позволили широко внедрить данную методику в производство. Технологические операции, в которых ток в заготовке наводится под действием магнитного поля, получили наибольшее применение.

Индукторные системы, применяемые для МИОМ, подразделяются на следующие виды: внешние индукторы для трубных заготовок («обжим»), внутренние индукторы для трубных заготовок («раздача»), индукторы для плоской штамповки [35, 36, 39, 43, 61, 73, 88].

В зависимости от выполняемой программы изготовления деталей, применяют индукторы разового действия, разрушающиеся после одного-двух разрядов, индукторы для единичного и мелко серийного производства, имеющие срок службы до тысячи разрядов, но при этом не пригодные для интенсивного использования по причине быстрого перегрева и выхода из строя, а также индукторы для крупносерийного и массового производства [61].

Индукторные системы, разработанные для единичных и мелкосерийных производств, имеют ряд недостатков при применении их в серийном производстве, а именно:

1. Невозможность ремонта и обслуживания индукторов.
2. Отсутствие возможности отвода тепла от токопровода индуктора из-за внешнего силового банджа и, как следствие, быстрый перегрев индукторов при интенсивном использовании.

Особенно вышперечисленные недостатки индукторных систем проявляются при операции «обжим», как наиболее распространённой при МИОМ.

Первые работы по повышению стойкости индукторных систем в нашей стране начали появляться с конца 60-х годов прошлого века. В отдельных работах [31, 34, 43, 47, 49, 50, 54, 63, 79, 82, 84, 87, 101] рассматриваются вопросы прочности, выбора материала, температурных режимов, формы сечения витков индуктора, применения концентраторов. Для операции «обжим» разработана индукторная система без осевого банджа для охлаждения с взаимодействием с окружающей сре-

дой [124, 126], однако в данных работах отсутствуют рекомендации по размеру радиальной ширины витка для сохранения прочности конструкции индукторной системы при разряде.

Максимальная заявленная стойкость индукторных систем (фирма «PST Products» (Германия)) на сегодняшний день до 2×10^6 выстрелов [22]. К сожалению, из-за отсутствия открытой информации о продукции данного предприятия, невозможно ознакомиться с конструктивными особенностями этих устройств. В Россию данные изделия не поставляются.

Согласно работам [39, 47, 54, 61, 92, 123, 124] сформулированы основные требования к индукторным системам:

- прочность конструкции при воздействии механических напряжений, возникающих в процессе формообразования деталей;
- простое конструктивное исполнение;
- требуемая концентрация или распределение магнитного поля на заданном участке обработки заготовки;
- высокий коэффициент преобразования энергии конденсаторного блока в механическую работу деформации заготовки;
- оптимальная частота рабочего тока;
- стойкость основной и межвитковой изоляций к электрическим перенапряжениям;
- надежное присоединение к выводам оборудования МИОМ;
- экономически целесообразная стойкость индуктора.

В зависимости от зоны обработки применяют одновитковые и многовитковые индукторы. Из-за низкого сопротивления и индуктивности одновитковые индукторы используются, как правило, с дополнительным согласующим трансформатором. Описаны конструкции применения одновременно нескольких одновитковых индукторов, подключенных к отдельным вторичным обмоткам одного трансформатора [50, 51]. Основным недостатком применения одновитковых индукторов является наличие зоны разреза, в которой действия магнитного поля не происхо-

дит, что может служить причиной снижения качества детали. Для отдельных операций нашло применение концентраторов магнитного поля [39], что усложняет конструкцию индукторной системы, уменьшая его КПД и повышая стоимость.

Многовитковый индуктор (Рисунок 1.3) является основным типом инструмента для МИОМ в серийном производстве. Данное устройство состоит из токопровода, витки которого изолированы друг от друга, изоляции для предотвращения контакта с заготовкой, а также силовых элементов, повышающих его механические свойства. Концы индуктора подключены к установке напрямую или через дополнительные кабельные удлинители. Возможны следующие способы изготовления токопроводов: навивка, точение, литье [54], а также сварка [74, 105]. Для компенсации электродинамических сил при разряде применяются различные бандажи и скрепляющие элементы, предотвращающие деформацию и поломку токопровода.

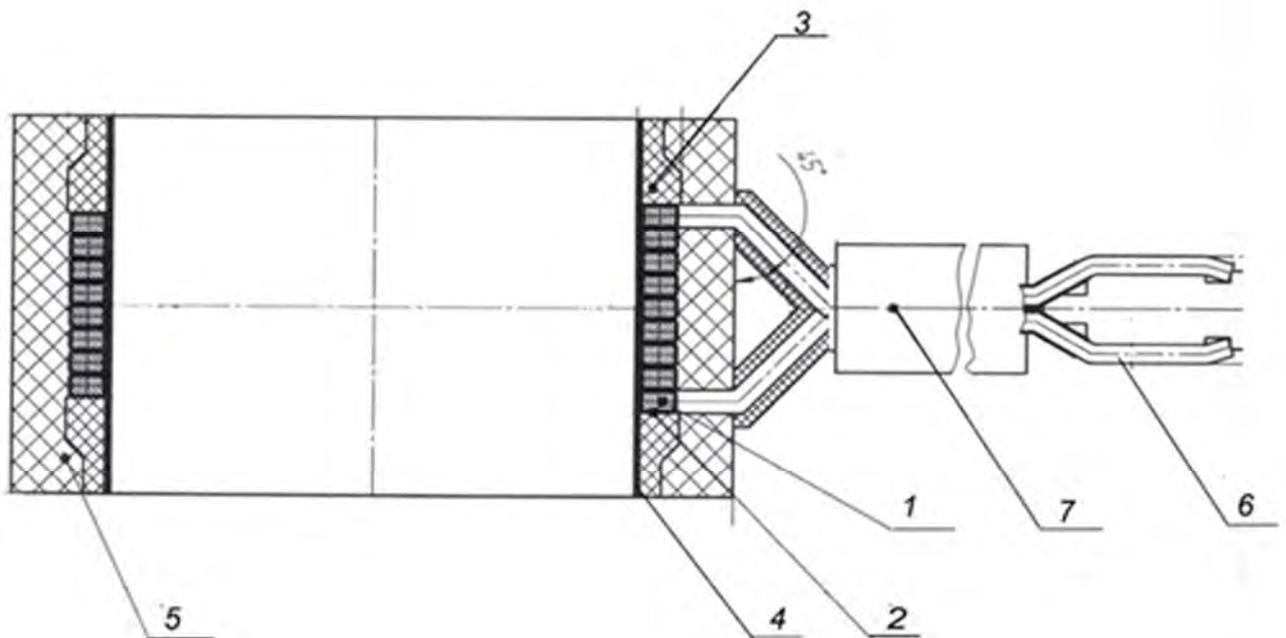


Рисунок 1.3 – Индуктор на «обжим»: 1 – токопровод, 2 – межвитковая изоляция, 3 – скрепляющие элементы, 4 – основная изоляция, 5 – внешний бандаж токопровода, 6 – токовыводы, 7 – бандаж токовыводов

На рисунке 1.3 представлен индуктор на «обжим», описанный в работах [39, 43, 47, 54, 88, 98], токопровод которого, как правило, изготавливается из медной шины методом навивки. В качестве силового элемента используется бандаж из

эпоксидной смолы. Для межвитковой изоляции применяются эластичные материалы (например лавсан).

«Классический» расчет индукторных систем включает в себя определение геометрических размеров, количества витков, расчет рабочего размера между токопроводом и заготовкой, определение собственной индуктивности и активного сопротивления. Во многих работах [29, 47, 50, 55, 59, 83, 130] расчет данного инструмента производится с точки зрения получения максимального КПД процесса, игнорируя его прочностные характеристики.

В исследованиях [39, 45, 46, 48, 98, 114] рассмотрено влияние различных параметров многовиткового индуктора на величину создаваемого давления. Установлено, что увеличение зазора между витками и обрабатываемой заготовкой ведет к значительному снижению воздействия электродинамических сил на заготовку.

В работах [62, 63, 67] проведен анализ прочности токопровода цилиндрического многовиткового индуктора на «обжим». Проведенное исследование показывает распределение нагрузки на токопровод индуктора при воздействии электродинамических сил во время импульса. Приведенные авторами аналитические расчеты указывают на то, что максимальная осевая нагрузка воздействует на крайние витки индуктора и уменьшается к его центру до нуля, при этом нагрузка на изоляцию суммируется и возрастает от края к центру. В качестве меры по снижению нагрузки на межвитковую изоляцию авторы предлагают утяжеление крайних витков и использование осевого бандажа для компенсации осевых (раздающих) электромагнитных сил. Данные расчеты проводились для индуктора, токопровод которого выполнен из сплава алюминия, а также применимы для токопроводов из цветных металлов (медь, бронза и прочих).

Приведенная в работах [77, 82] методика расчета инструмента МИОМ для создания полей высокой напряженности основана на теории упругости с учетом механических свойств материала индуктора. За характеристику прочности материала токопровода принят условный предел текучести при статическом нагружении.

Следует отметить, что перечисленные выше работы расчета усилий в мате-

риале токопровода на «обжим» либо предназначены для индукторов для единичного производства (Рисунок 1.2), то есть с наличием бандажа для компенсации радиальных усилий, либо основаны на статическом нагружении, игнорируя динамический характер воздействия при МИОМ.

Подробный анализ применения одновитковых, многовитковых с концентраторами, разъемных индукторов для операций калибровки, «раздачи» и «обжима» трубчатых заготовок в работах [34, 49, 63, 64, 85, 93, 125, 126, 128, 129] показал, что, нагрев витков в процессе эксплуатации требует разработки системы их охлаждения. Определено, что на стойкость индуктора до разрушения влияет величина рабочего напряжения, качество изоляции, энергия разряда, технология изготовления, интенсивность эксплуатации, а проведенные экспериментальные исследования с применением осциллографа, усилителя и хромель-алюмелевой термопары не имеют достаточной точности из-за большой инерционности термопар.

Профессором Тульского государственного университета Талалаевым А.К. [124] был предложен принципиально другой метод определения температуры рабочей поверхности индуктора, а также определения оптимальной формы витка. В приведенной модели отсутствует внешний бандаж, жесткость индуктора обеспечивается формой и размером токопровода, межвитковая изоляция выполнена из пластин плоского электроизоляционного материала, что позволяет внешнюю часть витков оставлять открытой для естественного охлаждения. Подобная конструкция индукторной системы на «обжим» наиболее приемлема для использования в серийном производстве.

При использовании охлаждения, при прохождении электрического тока через индуктор происходит импульсный нагрев токопровода, а при прохождении охлаждающей жидкости – его быстрое охлаждение. Такой режим термоциклирования с большим градиентом температур неблагоприятно сказывается на термической усталости материала.

Для проведения исследования [124, 127] индукторные системы с различной формой витка (Рисунок 1.4) изготавливались из латуни, бериллиевой бронзы и стали. Образцы покрывались легкоплавкими металлами (спутниками) с разными

температурами плавления в гальванической ванне, затем испытывались при эксплуатации до оплавления поверхностного слоя. При изучении поверхности исследуемых витков было выявлено максимальное нагружение плоскости, примыкающей к острым внутренним кромкам витка, и минимальное нагружение средней поверхности.

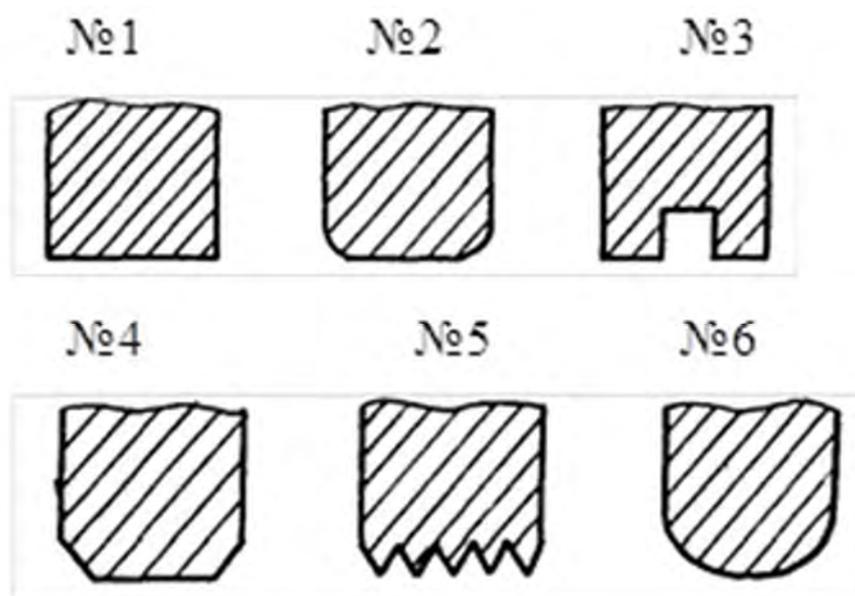


Рисунок 1.4 – Варианты форм сечения витка индуктора

В результате произведенного анализа состояния поверхностей испытанных индукторов было установлено следующее [124]:

1. Температура на поверхности витка, обращенной к заготовке, достигает $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более. Нагрев зависит от запасаемой энергии и собственной частоты разрядного контура.
2. Максимальную плотность тока желательно ограничить величиной $30\text{...}40\text{ кА/мм}^2$, (при условии допустимого нагрева до $200\text{...}300\text{ }^{\circ}\text{C}$), при выполнении не более 4 операций в минуту.
3. Формы сечения 2 и 4 (Рисунок 1.4), являются оптимальными для изготовления токопроводов как для индуктора на «обжим», так и индуктора на «раздачу».
4. Оптимальным условием работы индукторных систем является остывание естественным путем при взаимодействии с окружающей средой.

5. Максимальная температура фиксировалась короткое время (порядка 100 мкс) у острых кромок витков, особенно проявляется на образцах сечения 1, 3, 5, 6 (Рисунок 1.4), после чего следовало охлаждение вследствие распределения тепла по поверхности токопровода и рассеивания в окружающую среду.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что отсутствие острых кромок и оптимальная форма витка ведут к равномерному нагреву поверхности индуктора, что значительно упрощает тепловой расчет при выборе изоляционных материалов и оптимизации параметров работы для предотвращения перегрева индуктора.

Индукторы на «раздачу», так же, как и на «обжим» рассчитываются исходя из геометрических размеров и формы заготовки (Рисунок 1.4). Основная конструктивная составляющая данных индукторов – это основание-бандаж, который выполняет функцию и основного силового элемента данной индукторной системы, и дополнительной изоляции. Наличие такого элемента, а также наличие внешней изоляции делает невозможным наличие участков токопровода без изоляции, что препятствует естественному охлаждению индуктора. Увеличение радиального размера витка для повышения прочности токопровода влечет за собой увеличение плотности тока, протекающего внутри индуктора, уменьшение плотности тока с внешней стороны токопровода, и, как следствие, уменьшение величины магнитного потока, влияющего на деформацию заготовки, а, значит, и КПД индуктора. Согласно исследованию [92], радиальная высота токопровода на «раздачу» должна быть меньше пятикратной величины глубины проникновения тока в металл витка. Внешний диаметр индукторов на «обжим» в расчетных формулах не определяется [29, 43, 50, 51, 60, 81] и, по сути, зависит лишь от технологии их изготовления.

Учитывая, что индукторные системы разрабатываются под конкретную продукцию, предприятие должно быть готово к выпуску, а также проведению ремонтных работ индукторов на собственных мощностях или в сторонних организациях, имеющих соответствующее оборудование. Так, например, применение индукторов, описанных в работе [54], влечет за собой создание специализированного

участка для их производства, а применение индукторов сложной формы, изготовленных методом точения, приводит к изготовлению токопроводов на точных обрабатывающих центрах с ЧПУ, что может привести к увеличению себестоимости выпускаемой продукции или отказе от МИОМ в целом. Поэтому снижение себестоимости, упрощение изготовления, повышение ремонтпригодности индукторных систем, а также оптимизация временных промежутков между разрядами, является одной из первостепеннейших задач, которую необходимо решать для развития МИОМ и внедрения в серийном и крупносерийном производстве.

1.3 Анализ методов расчета процессов МИОМ

Технология МИОМ основывается на использовании электродинамических (пондеромоторных) сил, возникающих в материале заготовки при взаимодействии магнитного поля токопровода индукторной системы с индуцированными им в материале заготовки вихревыми токами. При этом воздействие данных сил носит объемный характер [24, 25, 32, 40, 55, 58, 64, 78, 80, 89, 91, 102, 115]. Анализ литературных источников показывает, что данная технология отличается сложностью физических процессов и большим количеством одновременно участвующих факторов, среди которых невозможно выделить второстепенные, чтобы ими можно было пренебречь. На процесс преобразования энергии при МИОМ влияют механические свойства материалов, джоулево тепло, импульсный характер силового воздействия, магнитные и электрические свойства материалов, размеры индуктора и заготовки и т.д. Сложность задачи привела к тому, что в литературе рассматриваются различные методы решения отдельных вопросов, связанных с этим процессом. Можно выделить задачу определения электромагнитного давления (ЭД) на поверхности и в теле заготовки и индуктора [45, 46, 48, 63, 106] и задачу расчета деформирования заготовки при импульсном нагружении [2, 19, 21, 22, 53, 89, 93, 100, 102, 121]. Влиянием перемещения заготовки на характер процесса в ряде работ пренебрегают или оценивают приближенно.

Основные методики расчета параметров МИОМ в настоящее время связаны с получением изделий при минимальной энергии без учета прочности инструмента (индукторной системы), что является одним из сдерживающих факторов применения данной технологии в условиях серийного производства.

В работах [39, 119] при создании математической модели для определения значения электромагнитных полей используется решение уравнений Максвелла при заданных граничных и начальных условиях. Уравнения Максвелла для квазистационарного электромагнитного поля с учетом движения заготовки имеют вид:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu [\vec{V} \vec{H}]; \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \vec{\sigma}; \quad (1.2)$$

$$\vec{\sigma} = \gamma \vec{E}. \quad (1.3)$$

При этом

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0, \quad (1.4)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad (1.5)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{H} – напряженность магнитного поля; μ – магнитная проницаемость металла; γ – электропроводность материала; v – скорость перемещения проводника; $\vec{\sigma}$ – плотность тока.

Сила, действующая на единицу объема заготовки, находящейся в магнитном поле с напряженностью H :

$$\vec{F} = \mu [\vec{\sigma} \times \vec{H}]. \quad (1.6)$$

С учетом (1.2) уравнение (1.6) принимает вид

$$\vec{F} = \left[\vec{H} \Delta \vec{H} - \frac{1}{2} \Delta H^2 \right] \mu. \quad (1.7)$$

Для получения полной картины электромеханического процесса МИОМ, приведенные ранее уравнения дополняются зависимостями, характеризующими пластическое деформирование материала заготовки:

$$D_1(\vec{S}) + \rho_m \frac{\partial^2 \vec{S}}{\partial t^2} - \vec{F}_c = 0, \quad (1.8)$$

где \vec{F}_c – суммарная сила, действующая на элементы заготовки; \vec{S} – вектор перемещения элементов заготовки; $D_1(\vec{S})$ – оператор, вид которого зависит от формы заготовки и характера используемой теории упругих деформаций; ρ_M – давление в металле. В общем случае для упругого тела уравнение (1.8) имеет вид:

$$D_1(\vec{S}) = (\lambda + G_L) \text{grad div } \vec{S} + G_L \nabla^2 \vec{S}, \quad (1.9)$$

где (λ_L, G_L) – постоянные Ляме, ∇ – толщина заготовки.

В качестве условия текучести могут быть использованы условия Треска и Мизеса [90, 97].

Одной из особенностей МИОМ, отличающей данный метод от других импульсных методов обработки металла, является значительное тепло, выделяемое в процессе протекания импульсных токов. Нагрев происходит не только в самой заготовке, но и в рабочем инструменте - индукторе. С одной стороны, дополнительный нагрев заготовки повышает пластичность материала и улучшает его свойства, с другой, нагрев токопровода индуктора ухудшает свойства его изоляции и может привести к ее разрушению [123, 124, 127, 128]. Кроме этого, выделяемое тепло ограничивает применение МИОМ. Так при формоизменении заготовок из медных и алюминиевых сплавов толщиной менее 0,1 мм или заготовок из малоуглеродистых сталей, имеющих толщину меньше 0,2 мм, возможно полное расплавление деформируемой заготовки индуцированными в ней вихревыми токами, а при деформировании толстостенных заготовок возможно оплавление поверхности заготовки, обращенной к индуктору [39]. Тепловые процессы при МИОМ описываются уравнением:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{\gamma} + \lambda_T \theta, \quad (1.10)$$

где Q – тепло, выделенное в проводнике; λ_T – удельная теплопроводность проводника; θ – температура проводника.

С учетом краевых условий на поверхности заготовки, условие конвекции тепла через свободную поверхность:

$$\lambda_T \frac{\partial \theta}{\partial n} = \kappa_0 [\theta_0 - \theta], \quad (1.11)$$

где n – нормаль к поверхности; θ_0 – температура окружающей среды; κ_0 – коэффициент теплообмена.

При исследовании электромагнитных процессов используют как методы теории электромагнитного поля [130, 131, 132, 136], так и методы теории электрических цепей [92, 98]. При расчете и проектировании технологических операций МИОМ на основе методов цепей разрядный контур МИУ представляют одноконтурной или двухконтурной эквивалентными схемами замещения [61]. Данный способ определения параметров системы «установка-индуктор-заготовка» при МИОМ является математически более сложным по сравнению с методиками [44, 50, 51, 55, 108], однако позволяет более подробно рассмотреть элементы процесса МИОМ, например: «движение» заготовки в поле индуктора, протекание тока отдельно в заготовке и в индукторе и т.д. Однако аналитические расчеты, основанные на данном методе актуальны только при свободной «раздаче» или «обжиме», без учета столкновения с оправкой и последующим отскоком заготовки.

В работе [92] токи в заготовке и токопроводе определяют решением уравнений, описывающих распределение данных значений в индукторе и заготовке при их изменении во времени с учетом электропроводности, изменения рабочего зазора и скорости деформации заготовки. Приведенные уравнения также могут применяться при свободном «обжиме» или «раздаче». Однако формулы для нахождения собственной индуктивности и активных сопротивлений для индуктора и заготовки, используемые в данной работе, наиболее точные (расхождение с практическими измерениями не превышают 5%), что позволяет применять их в инженерных расчетах параметров МИОМ.

В работах Ю.А. Попова [50, 51, 108], на основе результатов, полученных в исследованиях различных авторов, удалось решить задачу выделения основных факторов, влияющих на преобразование энергии накопителя в работу деформации заготовки при малых ее перемещениях. В них силы, действующие на заготовку при электромеханическом процессе МИОМ, заменяют ЭД на заготовку P_m . Как отмечается в работе Голенкова В.А.: «данный подход позволяет свести расчет операций

МИОМ к решению уравнений механики деформируемого твердого тела при заданной внешней нагрузке, параметры которой должны определяться из электрических характеристик технологической системы МИОМ, что упрощает процесс расчета» [61].

Формула расчета давления электродинамических сил из работы [107] имеет вид:

$$P_m = \frac{W \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}{\Delta \cdot \Omega}, \quad (1.12)$$

где W – энергия разряда; Ω – площадь рабочей поверхности индуктора; Δ – зазор между индуктором и заготовкой; K_1 – коэффициент согласования параметров индуктора и установки; K_2 – коэффициент, учитывающий потери в разрядном контуре, K_3 – коэффициент, учитывающий, уменьшение давления на заготовку в рабочем зазоре индукторной системы; K_4 – коэффициент, учитывающий просачивание магнитного поля через стенку заготовки.

Для определения силовых коэффициентов K_2 и K_4 в данном исследовании использовалась сложная методика приведения параметров многовиткового индуктора к одновитковому и обратно, что усложняет практические расчеты. В работе [92] данные величины рассчитывались с использованием упрощенных эмпирических формул при этом не снижая точность их определения.

На основании Ю.А. Попова [50, 51, 108], а также собственных исследований В.А. Глушечковым и В.Ф. Карпухиным [53, 56, 58, 59], была разработана инженерная методика расчета [55, 59], позволяющая в первом приближении получить параметры обработки МИОМ, такие как энергию, напряжение и частоту разряда конденсаторов, индуктивность системы «индуктор-заготовка», геометрические параметры индуктора, величину деформации, необходимого давления и другие. Кроме того, при расчете энергии для операции «раздача» введен дополнительный безразмерный коэффициент k_e . Однако при расчете энергии W использовались среднеарифметические значения коэффициентов K_2, K_3, K_4 .

Исходя из вышеизложенного можно сказать, что для создания новой инженерной методики для серийного производства необходимо уточнить существующую [55, 59] с помощью формул расчета собственных индуктивностей, активных сопротивлений, силовых коэффициентов из работы [92], а также ввести компьютерное моделирование расчета токопровода индуктора на прочность и уточнение параметров обработки с помощью ЭВМ.

1.4 Моделирование процессов МИОМ с помощью ЭВМ

Проектирование новых технологических процессов МИОМ требует оптимальный выбор параметров индукторных систем (размеры, материал, количество витков и т.д.), расчет оснастки, определения температуры нагрева системы, необходимой энергии для выполнения операций, оценку вероятности возникновения брака при выполнении операции [10, 15, 20, 24]. Решение подобных задач только аналитическими методами возможно лишь при расчете простых деталей или подобных (уже внедренных в производство ранее).

При расчете новых технологических процессов МИОМ целесообразно производить компьютерное моделирование на основе численных методов. При этом компьютерное моделирование процессов МИОМ, в зависимости от решаемых задач, можно производить комбинированно с аналитическими расчетами. Например, произвести аналитический расчет электрических параметров обработки для задачи определения первоначальных условий, анализа деформации заготовки и изучения данного процесса с помощью программ численных методов математической физики. Данный подход позволяет сократить время исследования процессов, что особенно важно при инженерных расчетах технологии МИОМ для их внедрения в производство. Кроме этого, компьютерное моделирование позволяет разработать меры по интенсификации данного процесса.

К основным проблемам проведения полномасштабного вычислительного эксперимента можно отнести:

- выбор численной формулировки задачи математической физики с обеспечением приемлемого уровня точности решения и контролем сходимости и устойчивости применяемых численных методов и алгоритмов;
- выбор системы инженерного анализа, позволяющей на основе выбранной численной формулировки в единой среде осуществлять исследования в требуемых областях анализа, с проведением оптимизации и связанного междисциплинарного моделирования [61];
- выбор моделей прогнозирования поведения материалов.

Проанализируем обозначенные проблемы применительно к сформулированному вычислительному эксперименту.

Из широкой группы численных методов математической физики (к которым можно отнести методы конечных разностей, конечных элементов, граничных элементов, спектральных элементов, дискретных элементов, контрольных объемов и др.) наибольшее распространение и количество реализаций в рамках пакетов прикладных программ прочностного анализа в настоящее время получили: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР). Кратко проанализируем эти методы [38, 52, 76, 86].

МКР основан на аппроксимации входящих в дифференциальные уравнения производных их дискретными (разностными) аналогами. В качестве основных достоинств метода можно отметить следующие: простота реализации, высокая эффективность, точность процедуры дискретизации, которая дает возможность построения вычислительных схем высокого порядка точности. Однако, указанные достоинства имеют место лишь при наличии регулярной структурированной сетки (почти ортогональной, с плавно меняющимися размерами ячеек). В связи с вышесказанным, применение приложений, реализующих МКР, ограничено задачами анализа областей простой формы.

МКЭ является в настоящее время одним из основных методов инженерного анализа. Методы, основанные на МКЭ, на данный момент уже хорошо изучены и

обширно представлены в научно-технической литературе. Основным достоинством МКЭ является возможность решения задач для области любой формы, в то время как аналитические решения могут быть получены для задач с достаточно простой геометрией. Однако методы не лишены и недостатков, в первую очередь связанных с устойчивостью и сходимостью численного решения (наиболее актуально для нелинейных динамических задач).

Выбор системы инженерного анализа необходимо производить с учетом возможности реализации в ней рассмотренных групп численных методов математической физики.

Программные продукты, позволяющие проводить расчет, анализ и моделирование физических процессов, относятся к САЕ (*Computer-aided engineering*) системам. В настоящее время существует широкая линейка расчетно-аналитических программ. Перечислим лишь некоторые из них: ANSYS, LS-DYNA, Comsol Multiphysics, Abaqus, Samsef, Фидесис, SINF, NX CAE, MSC Nastran с графическим пре/постпроцессором MSC Patran, STAR-CD, CFD-ACE, SolidWorks Simulations, APM WinMachine, APM Civil Engineering, NeiNastran, SimulationX, MARC, Flux, PLM Siemens Femap и множество других отечественных и зарубежных программных продуктов. Подробное описание возможностей программных продуктов приведено в руководствах пользователя на вышеуказанные расчетно-аналитические системы.

Основными вопросами выбора САЕ-системы является перечень физических дисциплин, доступных для анализа, интеграция с САД-системами автоматизированного проектирования, возможность проведения связанного междисциплинарного моделирования в единой программной оболочке.

В результате анализа рассматриваемых САЕ-технологии был сделан выбор в пользу ПО ANSYS. Основными достоинствами данной программной среды являются: обширная область доступных для анализа физических дисциплин, возможность проведения междисциплинарного анализа в единой среде моделирования, обширный пакет решателей динамических высоко нелинейных задач в явной,

так и в неявной формулировке МКЭ. Удобный графический интерфейс, интеграция (разного уровня) с системами автоматизированного проектирования АСКОН КОМПАС, SolidWorks, ProEngineer (Creo Elements), AutoCad, Catia, Unigraphics, наличие специализированных модулей для работы с геометрией, генерации расчетной сетки, решения задач оптимизации конструкций (модули ANSYS DesignModeler/Space Claim, ANSYS Meshing и ANSYS DesignXplorer) – все перечисленное делает данную систему удобной для пользователя универсальной расчетно-аналитической программой.

Использование единой интегрирующей среды и платформы ANSYS Workbench [99] значительно ускоряет процесс подготовки данных и проведения междисциплинарного анализа с последующей оптимизацией технических систем. Эта программная платформа позволяет объединить графический интерфейс приложений и используется для адаптации существующих расчетных комплексов в рамках одного проекта. Система включает в себя несколько десятков модулей и приложений для анализа и синтеза технических устройств. Рассмотрим ниже следующие программные решения, применение которых потенциально возможно для сформулированных задач вычислительного эксперимента.

Модуль **Ansys Transient Structural** (решатель Mechanical APDL) в отличие от статических программ расчета (например: программного модуля Static Structural) позволяет выполнить анализ переходных процессов как для деформируемой конструкции, так и для абсолютно жестких тел. Например, нагрузка при статическом структурном анализе не изменяется или изменяется незначительно, что не нарушает установившихся условий. Недостаток данного модуля заключается в том, что визуально нельзя посмотреть соприкосновение заготовки с матрицей или двух собираемых элементов конструкции при сборке с помощью МИОМ, однако данный модуль может быть использован для оценки механических напряжений, возникающих в заготовке или токопроводе индуктора при нагружении. В этом случае действие электродинамических сил заменяют давлением данных сил, которое прикладывается к возможной зоне деформации.

Модуль **LS-DYNA** (программный комплекс ANSYS) – научный комплекс, первая версия которого разработана еще в 1976 году. Изначально он предназначался для расчетов взаимодействия жидкостей с металлическими деталями при высоких скоростях процесса. В его пакет входит явный решатель, не требующий адаптации при решении динамических задач, включая задачи МИОМ.

Для решения квазистатических задач в LS-DYNA используется динамический алгоритм с реализацией метода установления. Данный модуль включает в себя отработанные контактные алгоритмы с большим набором оболочечных моделей [11, 13, 15].

Кроме этого, в LS-DYNA (начиная с версии ls980) существует электромагнитный модуль, разработка которого активно велась с 2005 года. Он позволяет решать задачи с учетом механики, тепловых эффектов и электромагнетизма [64] (Рисунок 1.5).

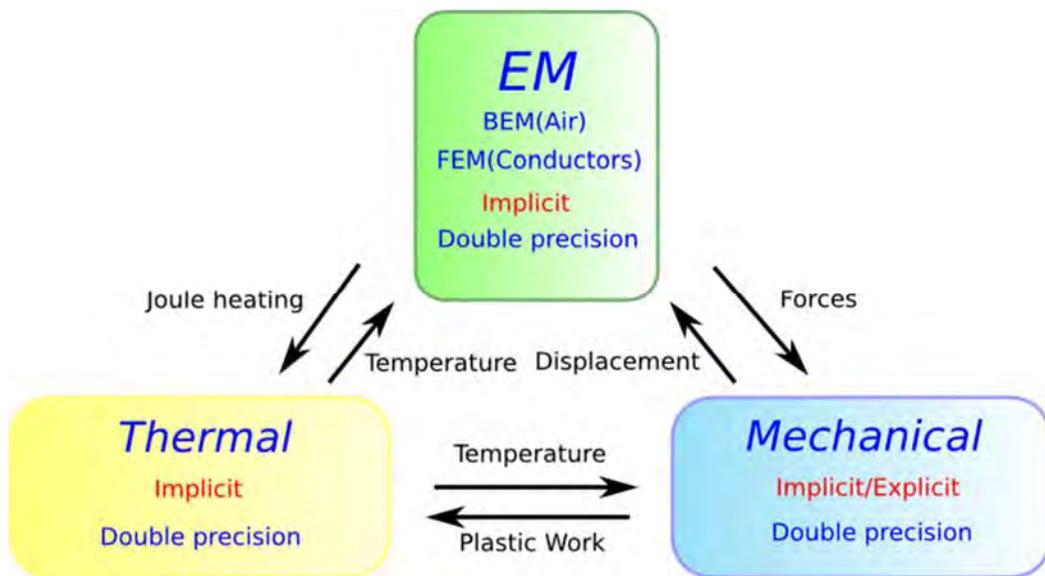


Рисунок 1.5 – Взаимосвязь электромагнитного решателя с механическим и тепловым

Моделирование процессов воздействия электродинамических сил на заготовку производится за счет вычислений трех решателей (электромагнитного (ЭР), теплового (ТР) и механического (МР)), имеющих разные временные шаги).

Расчеты электромагнитных полей и вихревых токов производятся ЭР за счет решения уравнений Максвелла при аппроксимации вихревых токов с использованием метода граничных элементов для диэлектриков или окружающего воздуха. После окончания расчетов, программой оценивается возникающая в узлах сила Лоренца. Эти данные отправляются в МР, который рассчитывает деформацию заготовки. ТР включает в себя различные модели расчета выделяемого тепла (в том числе и джоулевого) и позволяет учесть время нагрева системы «индуктор-заготовка», что делает расчет более точным.

1.5 Выводы по разделу

1. МИОМ – это перспективный, развивающийся способ ОМД, востребованный в условиях современной промышленности не только в единичном, но и в серийном производстве.

2. Максимальный эффект, достигаемый при внедрении данного способа при серийном производстве – это обработка материалов и сплавов с высокой электропроводностью (медь, алюминий и т.д.).

3. Алгоритм расчета индукторных систем для серийного производства должен основываться не только исходя из максимальной эффективности операции, но включать в себя прочностные расчеты токопровода и изоляции (особенно индуктора на «обжим») для увеличения срока службы данного инструмента.

4. Применение программы ANSYS (со встроенным редактором LS-DYNA) позволяет провести полноценный машинный эксперимент процессов МИОМ, что существенно позволит сократить время исследования и сроки проектно-конструкторских разработок.

1.6 Цель и задачи исследования

С учетом выводов, полученных на основе проведенного обзора, поставлена цель настоящей работы: повышение эффективности технологических процессов магнитно-импульсной обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства путем совершенствования алгоритма расчета параметров данного процесса и исследования прочностных характеристик индукторных систем на «обжим», а также использования технических и технологических решений, снижающих себестоимость и повышающих геометрическую точность изготавливаемых изделий.

Поставленная цель определила следующие основные задачи исследования:

1. Проанализировать современные методики расчета параметров МИОМ с целью адаптации их к условиям серийного производства для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок.
2. Усовершенствовать алгоритм расчета параметров процесса МИОМ с учетом прочностных характеристик индукторных систем на «обжим» и возможности использования полученных данных для последующего компьютерного моделирования.
3. Исследовать воздействие давления электродинамических сил на токопровод и межвитковую изоляцию индукторных систем на «обжим», а также совместное влияние их геометрических и физических параметров на прочность индукторных систем на «обжим» при МИОМ, определить опасную зону токопровода при разряде в которой возможно разрушение витков в следствии максимальных механических напряжений.
4. Разработать конструкцию и технологию изготовления индукторных систем на «обжим», а также технологической оснастки для расширения возможностей МИОМ в условиях серийного производства.
5. Использовать результаты исследования в промышленности и учебном процессе.

2 Совершенствование математической модели расчета параметров МИОМ для цилиндрических заготовок по схеме «обжим»

Процесс расчета операций МИОМ можно разделить на несколько этапов (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Предлагаемый алгоритм расчета операций МИОМ

На первом этапе анализируется чертеж детали и выбирается схема обработки: внешнее расположение заготовки в индукторе («раздача») или внутреннее расположение заготовки в индукторе («обжим»). Далее производятся предварительные расчеты индукторной системы, параметров системы «индуктор-заготовка», выполняется расчет давления электродинамических сил для выполнения операции. Данные расчеты выполняются в соответствии с «классической» методикой, разработанной в работах Хименко, Попова, Глущенко, Карпухина [39, 55, 59]. После вышеуказанных расчетов производится проектирование индуктора, а его собственные электрические параметры, а также собственная индуктивность и активное сопротивление заготовки уточняются с помощью уравнений, полученных в институте «Эникмаш» [92]. Далее производится расчет индуктивности системы «индуктор-заготовка» с учетом технологических и изоляционных зазоров между элементами системы, заданным сечением и количеством витков индуктора, определяется необходимая энергия разряда установки.

Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма расчета является наличие блока расчета токопровода на прочность, производимой в программе ANSYS, реализующей МКЭ (см. главу 3). Исходными данными для проверки индуктора являются геометрические размеры и материал токопровода и давление пондеромоторных сил на заготовку, которое приравнивается согласно третьему закону Ньютона к давлению, действующему на индуктор на «обжим». Данная проверка позволяет сделать выводы о целесообразности применения внешнего бандажа или использования конструкции индукторной системы с открытым токопроводом для естественного охлаждения.

Уточнение параметров МИОМ производится в программе LS-DYNA. Исходными данными для моделирования являются геометрические размеры и материалы индуктора и заготовки, электрические параметры обработки (индуктивности системы «индуктор-заготовка» и установки, емкость накопителя конденсаторов, напряжение разряда, параметры разрядного тока индуктора).

2.1 Расчет необходимого давления на заготовку при выполнении операций МИОМ

На рисунке 2.2 приведена схема МИУ. Блок импульсных конденсаторов заряжается от высоковольтного зарядного блока. За счет блока управления, запасаемая энергия может плавно регулироваться напряжением заряда конденсаторов. При достижении напряжения на конденсаторах заданного уровня, блок управления останавливает заряд и включает разрядник F , который разряжает конденсаторы на индуктор L . В некоторых случаях индуктор подключается через согласующий элемент. В процессе разряда в рабочей зоне индуктора возникает импульсное магнитное поле, которое используется для операций МИОМ [138, 140].

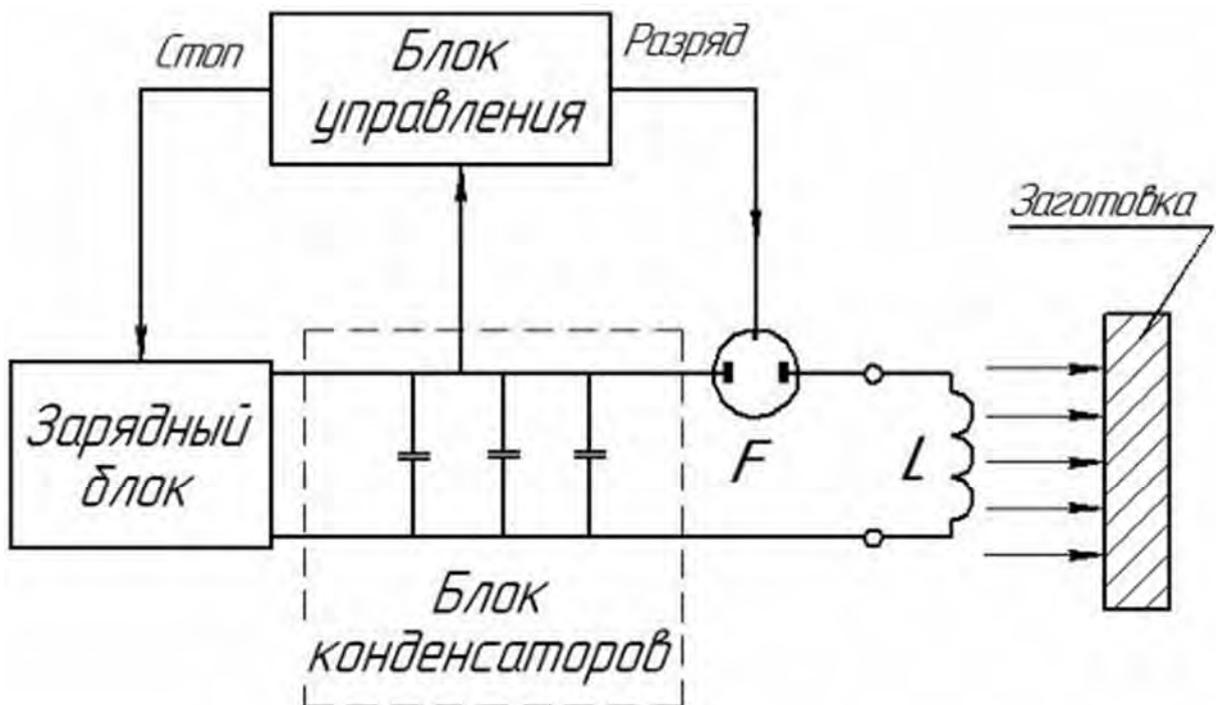


Рисунок 2.2 – Схема магнитно-импульсной установки

Энергия импульса при разряде будет равна: [140]:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.1)$$

где C – емкость батареи конденсаторов МИУ, U – напряжение заряда.

В процессе разряда конденсаторов в рабочей зоне индукторной системы возникает электромагнитное поле, наводящее в обрабатываемой детали вихревые токи. При взаимодействии электромагнитных полей, возникших в индукторе и заготовке, возникают электродинамические (пондеромоторные) силы, приводящие к деформации и импульсному нагреву заготовки. Ток, протекающий в разрядной цепи магнитно-импульсной установки, имеет характер затухающей синусоиды.

В работе [59] показано, что максимальное значение скорости перемещения заготовки достигается примерно к моменту $3/8$ первого периода колебания разрядного тока. Это объясняется тем, что к данному моменту заготовка получает достаточно большие перемещения, увеличивающие зазор между индуктором и заготовкой, и величина тока в индукторе снижается относительно максимальных значений. что в совокупности приводит к тому, что электродинамические силы, действующие на заготовку становятся меньше значения, необходимого для разгона заготовки, дальнейшее ее движение происходит за счет накопленной кинетической энергии. В этом случае можно предполагать, что работа деформации, необходимой для изготовления детали, равна величине кинетической энергии заготовки, накопленной на участке разгона [56, 61].

Согласно работам [39, 55, 119], средняя величина удельной работы деформации при степенной аппроксимации кривой упрочнения определяется по выражению:

$$a_y = \frac{B_d}{1+m_m} \varepsilon_c^{1+m_m}, \quad (2.2)$$

где B_d и m_m – характеристики обрабатываемого материала (таблица 2.1), ε_c – средняя интенсивность деформации.

Для цилиндра:

$$\varepsilon_c = \frac{r}{r_0} - 1;$$

для конуса:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right);$$

для сферы:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right);$$

для рифта:

$$\varepsilon_c = \frac{\pi \cdot r_p}{4r_0}.$$

Здесь r – значение радиуса детали; r_0 – радиус заготовки; r_p – радиус рифта.

На рисунке 2.3 представлены наиболее характерные элементы трубчатых деталей. На эпюрах интенсивности деформации пунктиром показаны их средние значения, которые для выполнения характерных деталей равны следующим величинам.

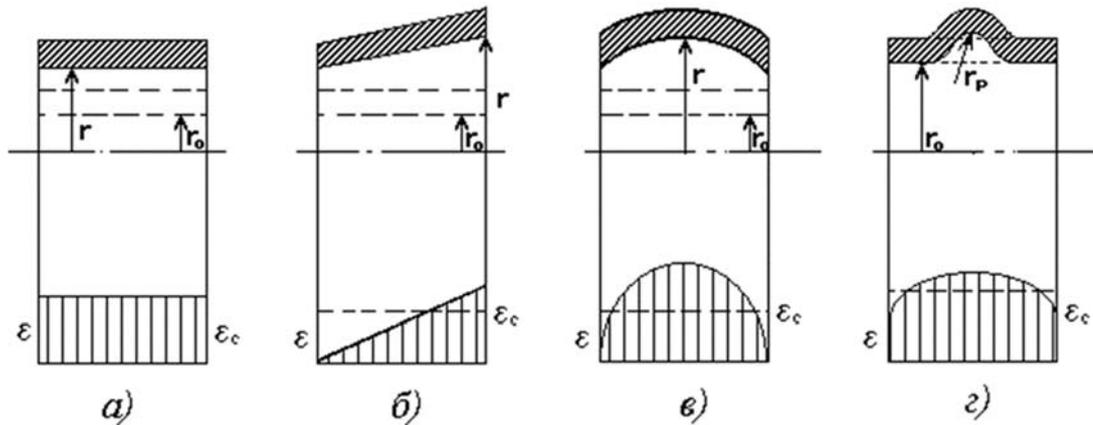


Рисунок 2.3 – Варианты формоизменения трубчатых заготовок и эпюры интенсивности деформаций: а – цилиндр; б – конус; в – сфера; г – рифт

Таблица 2.1 – Значения механических характеристик материалов

| Марка материала | B_d * 10^7 Па | m_m | $\sigma_{0,2}$ * 10^7 Па | k_d | ρ * 10^3 кг/м ³ | ρ_e * 10^{-8} Ом*м |
|-----------------|----------------------|-------|-------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| АМцАМ | 24,7 | 0,255 | 5,5 | 2,466 | 2,7 | 3,76 |
| АМг3М | 39,8 | 0,214 | 12 | 1,952 | 2,7 | 4,95 |
| АМг6М | 57,4 | 0,23 | 16,5 | 1,66 | 2,64 | 7,1 |
| Д16АМ | 36,5 | 0,236 | 9,5 | 2,135 | 2,77 | 4,35 |
| Д16АТ | 71,2 | 0,17 | 30 | 2,135 | 2,77 | 5,95 |
| 08кп | 59 | 0,156 | 24 | 1,267 | 7,871 | 10,2 |
| сталь 10 | 61,9 | 0,158 | 25 | 1,22 | 7,856 | 19,25 |
| сталь 20 | 74,8 | 0,161 | 30 | 1,021 | 7,859 | 24,2 |

Продолжение таблицы 2.1 – Значения механических характеристик материалов

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------|------|-------|-----|-------|------|------|
| Л62 | 73,3 | 0,329 | 11 | 2,023 | 8,5 | 7,2 |
| М1 | 48,8 | 0,327 | 7 | 2,336 | 8,94 | 1,78 |
| БрБ2 | 69,3 | 0,155 | 8,2 | 1,021 | 8,2 | 6,8 |

Обозначения в таблице 2.1: V_d и m_m – характеристики обрабатываемого материала, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, k_d – коэффициент динамичности, ρ – плотность материала, ρ_e – удельное электрическое сопротивление.

Полная работа деформации заготовки, необходимая для осуществления заданной операции, для выбранной модели вычисляется по выражению:

$$A = a_y \cdot Q, \quad (2.3)$$

где Q – объем деформируемой части заготовки.

Кинетическая энергия деформируемого участка заготовки к концу участка разгона определится из выражения:

$$W_k = \frac{m \cdot V_c^2}{2} = \frac{\rho \cdot Q \cdot V_c^2}{2} \quad (2.4)$$

где m – масса деформируемой части заготовки, ρ – плотность материала заготовки, V_c – средняя скорость деформируемой части заготовки к концу участка разгона.

Совместное решение выражений (2.3) и (2.4) позволяет получить выражение для расчета средней скорости деформируемой части заготовки в конце участка разгона, необходимой для выполнения заданной операции:

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \cdot a_y}{\rho}}. \quad (2.5)$$

Так как разгон заготовки происходит в течение первого полупериода разрядного тока, то без большой ошибки можно положить, что разрядный ток в индукторе изменяется по синусоидальному закону. Тогда уравнение движения заготовки запишется в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P_m}{\rho \cdot s} \cdot \sin^2 \omega t. \quad (2.6)$$

Здесь P_m – амплитуда ЭД; s – толщина заготовки; ω – круговая частота разрядного тока; t – время.

После интегрирования уравнения (2.6) выражение для скорости разгона заготовки получит следующий вид:

$$V = \frac{P_m}{2\omega \cdot \rho \cdot s} \left(\omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right). \quad (2.7)$$

После подстановки в выражение значений времен $\omega t = 3/4\pi$ и скорости разгона заготовки $V = V_c$, выражение для амплитудного значения давления магнитного поля, необходимого для выполнения операции получит вид:

$$P_m = 0,7005 \cdot V_c \cdot \rho \cdot s \cdot \omega = 4,4 \cdot V_c \cdot \rho \cdot s \cdot f, \quad (2.8)$$

где f – циклическая частота разрядного тока. Следовательно, полученное выражение позволяет рассчитать значения параметров магнитно-импульсного нагружения, необходимых для формовки заданной детали.

Интегрирование уравнения (2.7) по времени позволяет получить выражение для перемещений заготовки в следующем виде:

$$x = \frac{P_m}{4\omega^2 \cdot \rho \cdot s} \left(\omega^2 \cdot t^2 + \frac{1}{2} (\cos 2\omega \cdot t - 1) \right). \quad (2.9)$$

После подстановки величины P_m из формулы (2.7)

$$x = \frac{V}{2\omega} \cdot \frac{\omega^2 \cdot t^2 + 0,5(\cos 2\omega t - 1)}{\omega t - 0,5 \sin 2\omega t}. \quad (2.10)$$

В конце участка разгона ($\omega t = 3/4\pi$; $V = V_c$) перемещение заготовки h составит:

$$x = h = 0,888 \frac{V_c}{\omega} = 0,141 \frac{V_c}{f}. \quad (2.11)$$

Величина h является критерием применимости данной методики расчета процессов МИОМ. Если значение h меньше величины зазора между индуктором и заготовкой, то расчеты по данной методике могут дать значительную ошибку [55].

2.2 Расчет давления электродинамических сил при операциях сборки и калибровки

При расчете операций сборки и калибровки по вышеописанной методике могут возникать существенные расхождения из-за получаемой малой величины ра-

боты деформации. Однако, как показывают исследования [59], величина ЭД существенна и основное действие электродинамических сил уходит на формирование канавок или переходных радиусов профиля. Это не относится к деталям, калибровка которых происходит по диаметру без подобных площадок (в работе подобные детали не рассматриваются). Минимальное значение ЭД рассчитывается по формуле:

$$P_L = \frac{\sigma_{0,2} \cdot k_d \cdot s}{r_{min}}, \quad (2.12)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, k_d – коэффициент динамичности, s – толщина стенки, r_{min} – минимальный радиус закругления. Согласно рекомендациям [59], для исправления овальности тонкостенной трубы необходимое значение ЭД P_m должно превышать в 1,5 раза величину P_L , рассчитанную по выражению (2.12). При расчете процессов калибровки тонкостенных цилиндрических деталей, имеющих зазоры с матрицей или оправкой, необходимая величина давления ИМП должна в 1,5...2 раза превышать значение P_L . Сборку цилиндрических деталей с гладкой поверхностью соединения следует осуществлять при ЭД, составляющим $3P_L$.

2.3 Предварительный расчет электромагнитных параметров системы «индуктор-заготовка» с расчетом индукторной системы

При проектировании и расчете технологических процессов МИОМ применяются методы, основанные на теории цепей [44, 59, 92]. Технологическую систему МИОМ при этом представляют различными одно- или двухконтурными эквивалентными схемами замещения (Рисунок 2.4, а, б).

Использование одноконтурной схемы замещения разрядной цепи магнитно-импульсной установки, позволяет значительно упростить анализ процессов магнитно-импульсной обработки, но снижает точность получаемых результатов [55, 59]. Однако на основании данной методики можно произвести предварительный расчет оптимального количества витков индуктора, а затем уточнить полученные

данные с использованием двухконтурной схемы замещения. Также с помощью данной методики целесообразно произвести расчет коэффициентов, необходимых для дальнейших расчетов энергии разряда.

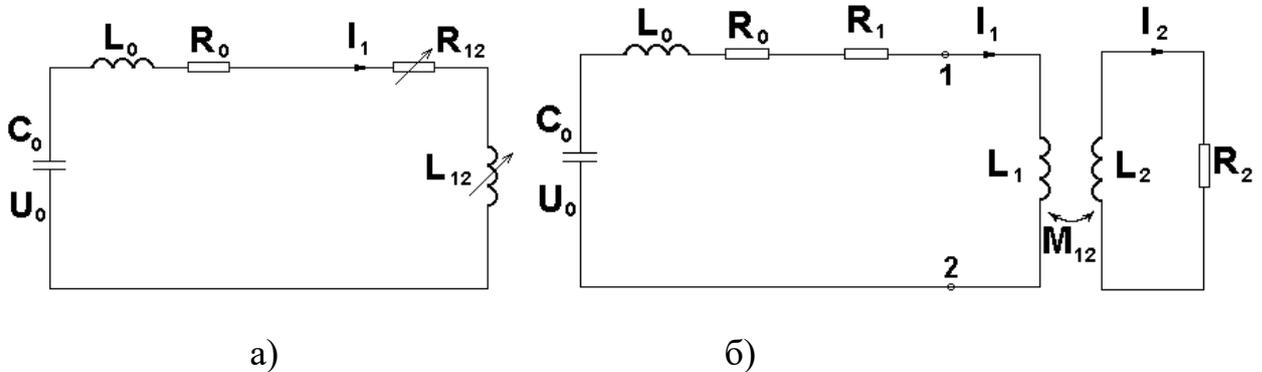


Рисунок 2.4 – Схемы замещения системы «оборудование-инструмент-заготовка»

При одноконтурной схеме замещения (Рисунок 2.4, а) значения индуктивностей, а также сопротивлений системы «индуктор – заготовка» заменяются на эквивалентные значения (индуктивность L_{12} и сопротивление R_{12}). При двухконтурной схеме замещения (Рисунок 2.4, б): первичный контур образуют конденсаторы МИУ емкостью C_0 с собственной индуктивностью L_0 , сопротивление R_0 разрядной цепи МИУ, сопротивление R_1 индуктора, а также индуктивность индуктора L_1 . Вторичный контур (Рисунок 2.4, б) образует заготовка, которая может быть представлена как одновитковая катушка с индуктивностью L_2 и сопротивлением R_2 . Магнитная связь между контурами с индуктором и заготовкой отражена взаимной индуктивностью M_{12} .

Однослойные цилиндрические индукторы, применяемые для «обжима» полых осесимметричных заготовок магнитным отталкиванием, представлены на рисунке 2.5.

Взаимное расположение компонентов системы «индуктор-заготовка» влияет на распределение магнитного поля в поперечном сечении их витков, а также на значения их электрических параметров: взаимных и собственных сопротивлений и индуктивностей. Данное обстоятельство учитывается выбором расчетных диаметров данных компонентов [94].

Для предварительного определения необходимого числа витков индуктора возможно использование методики из работы [55].

Приближенная эквивалентная индуктивность системы «индуктор-заготовка» при одноконтурной схеме замещения рассчитывается по формуле (для «обжима»):

$$L_{co} = \pi \mu_0 N^2 \frac{d_{зно} (\Delta + 0.5(\Delta_{э1} + \Delta_{э3}))}{h_{в1}}, \quad (2.13)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, N – количество витков индуктора; $d_{зно}$ – наружный диаметр заготовки; $h_{в1}$ – высота витка индуктора; Δ – величина изоляционного зазора между индуктором и заготовкой; $\Delta_{э1}$ и $\Delta_{э3}$ – значения скин-слоя в материалах индуктора и заготовки.

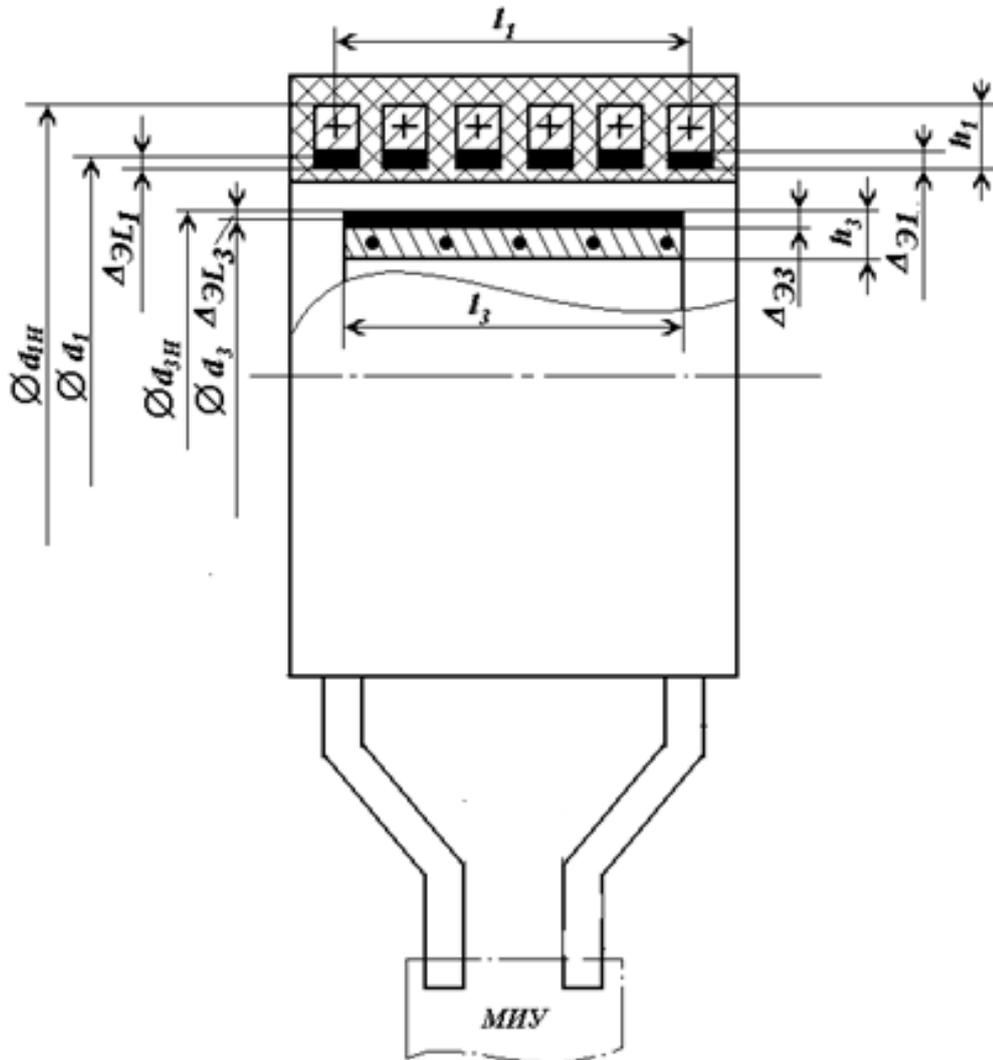


Рисунок 2.5 – Индуктор на «обжим»

Глубина проникновения тока в материалы индуктора и заготовки, рассчитываются по формулам:

$$\Delta_{э1} = \sqrt{\frac{\rho_c}{\pi\mu_0 f}} \quad (2.14)$$

$$\Delta_{э3} = \sqrt{\frac{\rho_p}{\pi\mu_0 f}}, \quad (2.15)$$

где ρ_c и ρ_p – удельное электрическое сопротивление материалов индуктора и заготовки соответственно.

Рабочая частота разрядного тока f определяется по выражению:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_c + L_{dc}) \cdot C}}. \quad (2.16)$$

Здесь L_{dc} – паразитная индуктивность разрядной цепи, включающая собственную индуктивность МИУ, соединительного кабеля и токоподводов индуктора; C – емкость батареи конденсаторов МИУ.

Критерием эффективности работы индуктора является коэффициент согласования параметров индуктора и установки K_1 , который вычисляется по выражению [55, 59]:

$$K_1 = \frac{L_c}{L_c + L_{dc}} = \frac{f_{dc}^2 - f^2}{f_{dc}^2}, \quad (2.17)$$

где L_{dc} и f_{dc} – индуктивность и частота разрядного тока МИУ в режиме короткого замыкания; f – рабочая частота разрядного тока, рассчитанная по формуле (2.16); L_c – индуктивность системы (индуктор-заготовка) индуктора.

Задача повышения коэффициента K_1 , тесно связана с совершенствованием оборудования для МИОМ, так как основная часть паразитной индуктивности – это индуктивность установки [55, 59].

В работах [55, 59] отмечается, что оптимальное значение коэффициента K_1 находится в диапазоне от 0,8 до 0,9. Количество витков индуктора при выполнении операции по схеме «обжим» N_c можно оценить по формуле:

$$N_c = \sqrt{\frac{K_1 \cdot L_{dc} \cdot l_c}{(1 - K_1) \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot (D + \Delta) \cdot \Delta \cdot (\Delta_{э1} + \Delta_{э3})}}, \quad (2.18)$$

где l_c – длина индуктора.

При этом длина индуктора l_c выбирается в зависимости от выполняемой операции:

- при формовке цилиндра длина индуктора $l_c = 1$ длины деформируемого участка заготовки l_b ;
- при формовке конуса $l_c = (1,2 \dots 1,3)l_b$;
- при отбортовке и завальцовке трубы $l_c = 1,5l_b$;
- при формовке сферы $l_c = l_b$;
- при формовке рифта $l_c = (0,7 \dots 0,8)l_b$.

Шаг витков индуктора s_c следует согласовать с размерами имеющейся шины или возможностями механической обработки при изготовлении индуктора. Высота витка индуктора выбирается из условия, что отношение рабочей энергии разряда установки при выполнении операции к площади поперечного сечения шины не должно превышать значения $0,5 \dots 1,0$ кДж/мм [55, 54]. Если после проведения расчетов окажется, что данное условие не выполняется, то следует скорректировать выбор сечения витка и повторить расчет.

После выбора размеров и количества витков индуктора с целью определения более точных параметров системы «индуктора-заготовка» целесообразно произвести повторный расчет по предложенной методике, описанной в следующих разделах.

2.4 Расчет индуктивностей индуктора и заготовки

Согласно методике расчета индуктивности из работ [91, 92, 119], индукторы и заготовки условно разделяются на длинные и короткие. Токопровод индукторной системы считается длинным при превышении осевой длины его диаметра. В противном случае индуктор считается коротким.

Индуктивность индукторной системы – это сумма индуктивностей ее составляющих, то есть индуктивности токоподводов (паразитная индуктивность) и индуктивности токопровода индуктора. В зависимости от расположения индуктора,

токоподводы могут быть различной длины и формы, а также в качестве токоподводов может использоваться коаксиальный кабель. В данной работе индуктивность токоподводов не рассчитывается и не учитывается при дальнейших расчетах. Расчет индуктивности производится исходя о допущении равномерности распределения тока в зазоре между индуктором и заготовкой, без учетов краевых эффектов. Возникающая в данном случае погрешность не критична при инженерных расчетах.

Индуктивность короткого индуктора ($0,3 \leq l_1/d_1 \leq 1$) определяется как

$$L_1 = \frac{d_1^2}{l_1} \cdot \left(4,1 + 3,9 \cdot \left(\frac{l_1}{d_1} \right) \right) \cdot N_1^2 \cdot 10^{-7}, \quad (2.19)$$

индуктивность длинного индуктора ($l_1/d_1 > 1$):

$$L_1 = \frac{d_1^2}{l_1} \cdot \left(9,9 - \frac{3,2 \cdot d_1}{l_1} \right) \cdot N_1^2 \cdot 10^{-7}, \quad (2.20)$$

где l_1 – длина индуктора по оси заготовки, N_1 – количество витков индуктора.

Расчетный диаметр индуктора, на «обжим» (Рисунок 2.5) определяется по формуле:

$$d_1 = d_{1в} + 2 \cdot \Delta_{эл1}, \quad (2.21)$$

где $d_{1в}$ – внутренний диаметр индуктора; $\Delta_{эл1}$ – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в материал индуктора,

$$\Delta_{эл1} = \begin{cases} (1/2) \cdot \Delta_{эл} & \text{при } (1/2) \cdot \Delta_{эл} \leq (1/3) \cdot h_1 \\ (1/3) \cdot h_1 & \text{при } (1/2) \cdot \Delta_{эл} > (1/3) \cdot h_1 \end{cases}$$

где h_1 – радиальная толщина витка цилиндрического индуктора.

Индуктивность заготовки при условии $0,3 \leq l_3/d_3 \leq 1$ определится по формуле:

$$L_3 = \frac{d_3^2}{l_3} \cdot \left(4,1 + 3,9 \cdot \left(\frac{l_3}{d_3} - 0,3 \right) \right) \cdot 10^{-7}; \quad (2.22)$$

при $l_3/d_3 > 1$

$$L_3 = \frac{d_3^2}{l_3} \cdot \left(9,9 - \frac{3,2 \cdot d_3}{l_3} \right) \cdot 10^{-7}; \quad (2.23)$$

где l_3 – длина заготовки.

Расчетный диаметр заготовки d_3 , при операции «обжим» определится по формуле:

$$d_3 = d_{3н} - 2 \cdot \Delta_{эл3}, \quad (2.24)$$

где $d_{3н}$ – наружный диаметр заготовки; $\Delta_{эл3}$ – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в материал заготовки.

$$\Delta_{эл3} = \begin{cases} (1/2) \cdot \Delta_{эз} & \text{при } \Delta_{эз} \leq (1/3) \cdot h_3 \\ (1/3) \cdot h_3 & \text{при } \Delta_{эз} > (1/3) \cdot h_3 \end{cases}$$

где h_3 – радиальная толщина заготовки, $\Delta_{эз}$ – глубина проникновения тока в материал заготовки (2.15).

2.5 Расчет активных сопротивлений индукторной системы и заготовки

Активное сопротивление токопровода индуктора вычисляется по формуле:

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{l_1 \cdot \Delta_{эр1}} \cdot N_1^2, \quad (2.25)$$

где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление материала токопровода; d_1 – расчетный диаметр индуктора; l_1 – длина индуктора по оси заготовки; N_1 – количество витков; $\Delta_{эр1}$ – условное значение эквивалентной глубины проникновения электромагнитного поля в материал индуктора.

$$\Delta_{эр1} = \begin{cases} \Delta_{э1} & \text{при } \Delta_{э1} \leq h_1 \\ h_1 & \text{при } \Delta_{э1} > h_1 \end{cases}$$

Активное сопротивление заготовки:

$$R_3 = \rho_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_3}{l_3 \cdot \Delta_{эр3}}, \quad (2.26)$$

где ρ_3 – удельное электрическое сопротивление материала заготовки; l_3 – длина заготовки; d_3 – расчетный диаметр заготовки, $\Delta_{эр3}$ – условное значение эквивалентной глубины проникновения электромагнитного поля в материал заготовки.

$$\Delta_{эр3} = \begin{cases} \Delta_{эз} & \text{при } \Delta_{эз} \leq h_1 \\ h_1 & \text{при } \Delta_{эз} > h_1 \end{cases}$$

Добротность контура заготовки Q_3 при круговой частоте ω :

$$Q_3 = \omega \cdot \frac{L_3}{R_3}, \quad (2.27)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (2.28)$$

2.6 Расчет взаимной индуктивности индуктора и заготовки

Взаимная индуктивность для операции «обжим»:

$$M_{13} = \left(\frac{d_3 \cdot d_1}{l_3 \cdot l_1} \cdot \left(\varphi \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l_3 + l_1}{d_1} \right)^2} - 4,5 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l_1 - l_3}{d_1} \right)^2} \right) \right) \cdot N_1 \cdot 10^{-7}, \quad (2.29)$$

где φ – безразмерный коэффициент, равный:

$$\varphi = \begin{cases} 5 & \text{при } \frac{l_3}{d_1} > 1 \\ 4,8 & \text{при } \frac{l_3}{d_1} < 1. \end{cases}$$

2.7 Расчет суммарных эквивалентных параметров технологической системы МИОМ

Суммарная эквивалентная индуктивность системы «установка-индуктор-заготовка» и сопротивление при использовании одноконтурной эквивалентной схемы рассчитываются по формулам:

$$L_S = L_{dc} + L_{\text{вн}} + L_c, \quad (2.30)$$

$$R_S = R_{dc} + R_{\text{вн}} + R_c, \quad (2.31)$$

где L_{dc}, R_{dc} – индуктивность и сопротивление МИУ, $L_{\text{вн}}, R_{\text{вн}}$ – вносимые параметры индуктивности и сопротивления в разрядный контур за счет взаимодействия с заготовкой при разряде, L_c, R_c – эквивалентная индуктивность и сопротивление системы «индуктор-заготовка» (значение L_c вычисляется по формуле (2.14)).

$$L_{\text{вн}} = L_3 \cdot K_{11}^2 \cdot K_{12}^2, \quad (2.32)$$

$$R_{\text{вн}} = R_3 \cdot K_{11}^2 \cdot K_{12}^2. \quad (2.33)$$

K_{11} – коэффициент индуктивной связи заготовки с индуктором, K_{12} – коэффициент, учитывающий потери в контуре заготовки.

$$K_{11} = \frac{M_{13}}{L_3}, \quad (2.34)$$

$$K_{12} = \frac{Q_3}{\sqrt{1+Q_3^2}} \quad (2.35)$$

2.8 Расчет необходимой энергии при выполнении операций МИОМ и параметров разрядного тока

Для расчета энергии, требуемой для выполнения операции «обжим», воспользуемся формулой, приведенной в работах [59, 107]:

$$W = \frac{P_m \cdot \Omega \cdot \Delta_e}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}, \quad (2.36)$$

где Ω – площадь рабочей поверхности индуктора; Δ_e – эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой; K_1 – коэффициент, рассчитанный по формуле (2.17);

K_2 – коэффициент, учитывающий потери в разрядном контуре; K_3 – коэффициент, учитывающий, уменьшение давления на заготовку в рабочем зазоре индукторной системы; K_4 – коэффициент, учитывающий просачивание магнитного поля через стенку заготовки.

$$\Omega = \pi \cdot d_1 \cdot l_3. \quad (2.37)$$

d_1 – расчетный диаметр индуктора, определяемый по формуле (2.21);

l_3 – длина заготовки.

$$K_2 = e^{(-\frac{1}{Q_\Sigma} \cdot \tan^{-1} 2 \cdot Q_\Sigma)}, \quad (2.38)$$

где Q_Σ – добротность разрядного контура.

$$Q_\Sigma = \frac{\omega \cdot (L_1 + L_{BH})}{R_1 + R_{BH} \cdot (\frac{M_{13}}{L_3})}. \quad (2.39)$$

Согласно работе [107], коэффициент K_3 определяется по формуле (для «обжима»):

$$K_3 = 1 - \frac{\Delta_e}{r_1}, \quad (2.40)$$

где Δ_e – эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой, r_1 – расчетный радиус индуктора.

$$\Delta_e = \Delta + \Delta_{\varepsilon 1} + \Delta_{\varepsilon 3}, \quad (2.41)$$

где Δ – физический зазор между индуктором и заготовкой.

$$r_1 = d_1/2 \quad (2.42)$$

$$K_4 = \frac{1}{1 + \frac{1}{Q_3^2}}, \quad (2.43)$$

где Q_3 – рассчитывается по формуле (2.27).

Согласно формуле (2.1) необходимое напряжение U для выполнения операции определяется как:

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot W}{C}}.$$

Разрядный ток в индукторе определяется уравнением:

$$I_1 = I_{m1} \cdot e^{-\delta_1 t} \cdot \sin \omega_1 t, \quad (2.44)$$

где I_{m1} – амплитуда разрядного тока при $\delta_1=0$; δ_1 – коэффициент затухания колебаний разряда, ω_1 – уточненное значение круговой частоты разрядного тока.

Параметры разрядного тока I_{m1} , δ_1 и ω_1 вычисляются по следующим формулам:

$$I_{m1} = \frac{U}{\omega_1 L_s} \approx U \cdot \sqrt{\frac{C}{L_s}}; \quad (2.45)$$

где C – емкость конденсаторов МИУ.

$$\delta_1 = \frac{R_s}{2 \cdot L_s}; \quad (2.46)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{C \cdot L_s} - \delta_1^2}, \quad (2.47)$$

если $\delta_1^2 \ll \frac{1}{L_s \cdot C}$. При невыполнении данного условия значение ω_1 приравнивается к полученному значению ω , полученному по формуле (2.27).

2.9 Выводы по разделу

1. Предложен алгоритм расчета определения параметров технологической системы МИОМ, позволяющий уточнить собственные параметры (индуктивность, активное сопротивление) индукторной системы и заготовки.

2. Данный алгоритм может использоваться в инженерных расчетах при проектировании процессов МИОМ. При этом полученные параметры обработки

возможно использовать в программе МКЭ для моделирования операций с целью проверки или дальнейшей оптимизации.

3 Моделирование и прочностной расчет токопровода индукторных систем на "обжим" с использованием программы ANSYS с обработкой данных методом планирования эксперимента

3.1 Воздействие электродинамических сил на токопровод индукторных систем на «обжим»

Наиболее широко используемая в серийном производстве индукторная система представлена на рисунке 3.1. В данной конструкции внешний силовой элемент (бандаж) отсутствует, что позволяет виткам охлаждаться при взаимодействии с окружающим воздухом, а токопровод связан с внутренней изоляцией путем поджатия крепежными элементами индукторной системы [124].

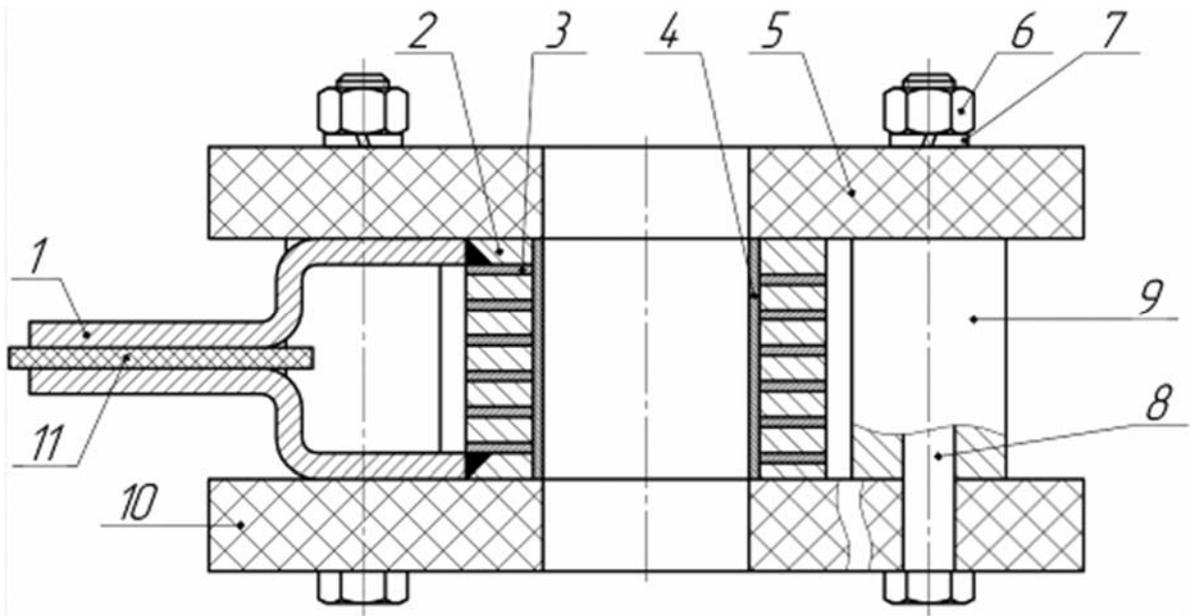


Рисунок 3.1 – Индукторная система на «обжим» без внешнего бандажа:

1 – выводы токопровода, 2 – токопровод индуктора, 3 – межвитковая изоляция, 4 – основная изоляция, 5, 10 – верхняя и нижняя плиты, 6, 7, 8 – крепежные элементы, 9 – распорные втулки, 11 – изоляция токоподводов

Токопровод индуктора является одним из силовых элементов конструкции, который должен выдерживать механические усилия, возникающие при разряде.

При выполнении операций МИОМ, на витки индукторной системы на «обжим» воздействуют механические аксиальные F_z и радиальные F_r силы, возникающие при взаимодействии электромагнитных полей токопровода индукторной системы с обрабатываемой заготовкой [50, 54, 82, 101, 124], распределение которых показано на рисунке 3.2. Максимальные разрушающие силы действуют в радиальном направлении.

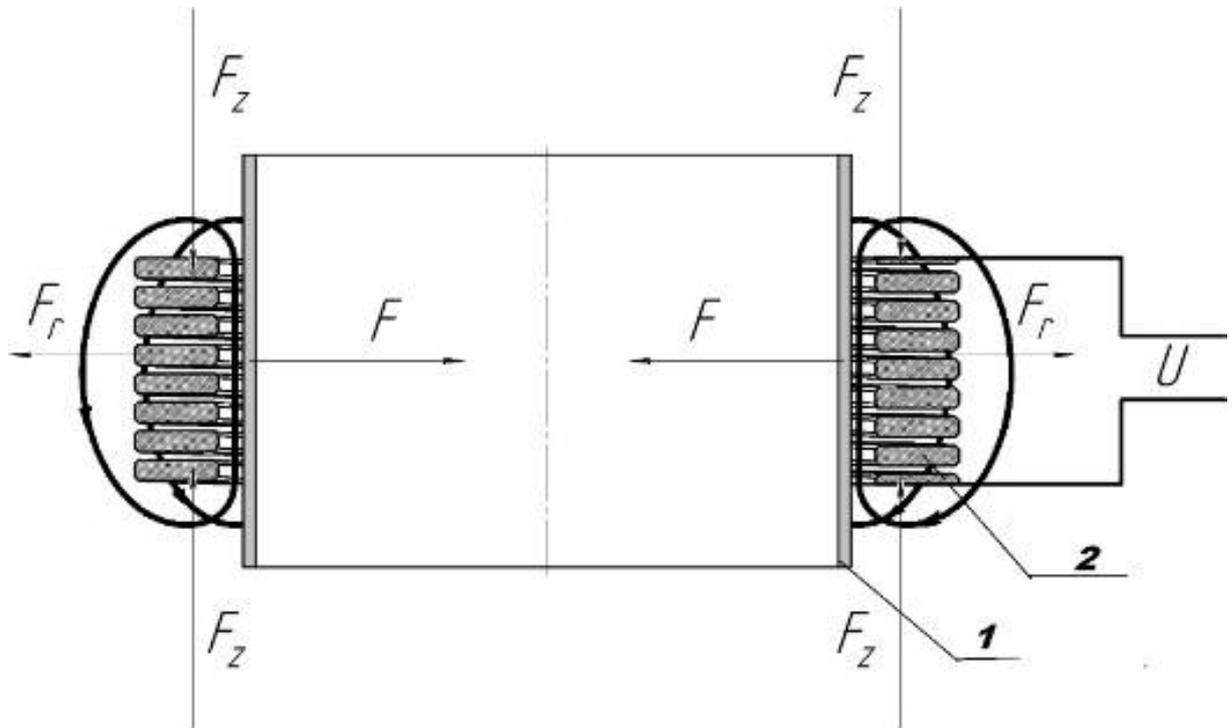


Рисунок 3.2 – Распределение механических «разрушающих» сил в токопроводе во время операции «обжим»:

1 – заготовка, 2 – токопровод индуктора

Для компенсации аксиальных сил F_z в конструкции индукторной системы на «обжим» без внешнего бандажа (Рисунок 3.1) применяются плиты и крепежные элементы, поэтому расчет на прочность данной конструкции можно свести к определению максимального давления радиальных сил F_k , которое согласно закону сохранения энергии будет численно равно давлению электродинамических сил F действующих на заготовку при разряде.

3.2 Проверка токопровода индуктора на «обжим» с использованием программы ANSYS

Для проведения проверки индуктора на «обжим» предлагается следующая последовательность действий с использованием программы ANSYS (модуль Transient Structural) [69, 71, 75, 99]. Геометрические параметры индукторной системы, давление электродинамических сил рассчитываются с помощью аналитических формул, приведенных в главе 2.

С помощью САД-программ (Компас, AutoCAD и др.) создается модель проверяемого токопровода индукторной системы с межвитковой изоляцией, в которой в качестве имитации закрепления верхней и нижней плитой токопровода предусматриваются зоны закрепления (Рисунок 3.3). После запуска системы в среде Workbench необходимо перенести указанный модуль в рабочую среду проекта. Полученный файл (формат .stp) с 3D-моделью загружается с помощью пункта меню Geometry вышеуказанного модуля.

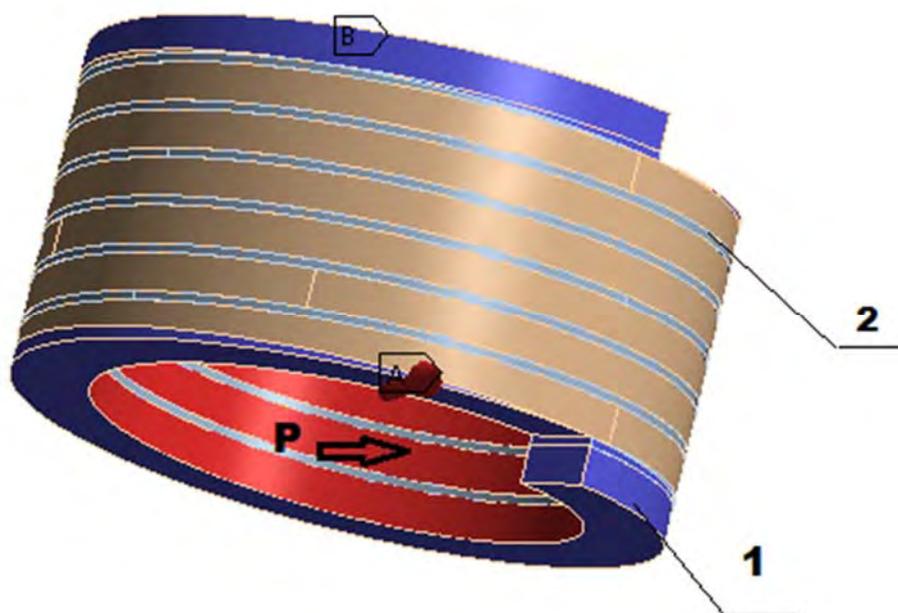


Рисунок 3.3 – Модель токопровода индуктора с межвитковой изоляцией: 1 – токопровод индуктора, 2 – межвитковая изоляция, А, В – места закрепления, Р – давление, прилагаемое к токопроводу

В разделе Engineering Data (Рисунок 3.4) вводятся данные (плотность, модуль Юнга, предел прочности согласно справочным данным для материалов) для материалов токопровода и изоляции.

| Outline of Schematic C2, D2: Engineering Data | | | | | |
|---|----------------------------------|---|--------------------------|--------|--|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source | Description |
| 2 | Material | | | | |
| 3 | Structural Steel | | <input type="checkbox"/> | | Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1 |
| 4 | text | | <input type="checkbox"/> | | |
| * | Click here to add a new material | | | | |

| Properties of Outline Row 3: Structural Steel | | | | | |
|---|---|-------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Density | 8700 | kg m ⁻³ | | <input type="checkbox"/> |
| 3 | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | | | <input type="checkbox"/> | |
| 4 | Coefficient of Thermal Expansion | 1,2E-05 | C ⁻¹ | | <input type="checkbox"/> |
| 5 | Zero-Thermal-Strain Reference Temperature | 22 | C | | <input type="checkbox"/> |
| 6 | Isotropic Elasticity | | | <input type="checkbox"/> | |
| 7 | Derive from | Young's ... | | | |
| 8 | Young's Modulus | 1,17E+11 | Pa | | <input type="checkbox"/> |
| 9 | Poisson's Ratio | 0,35 | | | <input type="checkbox"/> |
| 10 | Bulk Modulus | 1,3E+11 | Pa | | <input type="checkbox"/> |
| 11 | Shear Modulus | 4,3333E+10 | Pa | | <input type="checkbox"/> |
| 12 | Alternating Stress Mean Stress | Tabular | | <input type="checkbox"/> | |
| 16 | Strain-Life Parameters | | | <input type="checkbox"/> | |
| 24 | Tensile Yield Strength | 2,5E+08 | Pa | | <input type="checkbox"/> |
| 25 | Compressive Yield Strength | 2,5E+08 | Pa | | <input type="checkbox"/> |
| 26 | Tensile Ultimate Strength | 4,6E+08 | Pa | | <input type="checkbox"/> |
| 27 | Compressive Ultimate Strength | 0 | Pa | | <input type="checkbox"/> |

Рисунок 3.4 – Раздел Engineering Data

Т.к. расчет производится только в линейной области, то целесообразно использовать упрощенные линейные модели поведения материалов (без учета деформационного упрочнения и скоростных эффектов). Выбираются модели материала:

для токопровода модель изотропного однородного тела (шаблон Isotropic Elasticity, плотность Density), для изоляции модель анизотропного материала (шаблон Anisotropic Elasticity, плотность Density).

В разделе Model с помощью функции Pressure задается давление P_m (формулы (2.9), (2.13)) на внутреннюю поверхность модели по закону треугольника с нуля до времени достижения максимального давления, т.е. $3/8 T$, которое ограничивается по формуле:

$$t_{max} = \frac{3}{8} \cdot T = \frac{3}{8 \cdot f}, \quad (3.1)$$

где T – период разрядного тока, f – рабочая частота разряда (полученная по формуле (2.16)). В качестве граничных условий (раздел Model) выбираются Fixed Support (запрет поступательных и вращательных степеней свободы). Расчет производится с использованием упрощенных линейных моделей поведения материалов (без учета скоростных эффектов и упрочнения за счет деформации).

Выполнение сеточного разбиения производится в блоке Mesh, для чего применяется генератор Body Sizing с размером элемента не более $1/4$ от толщины.

После выполнения вышеуказанных условий запускается расчет проекта.

В разделе Solution, используя поля распределений напряжений по Мизесу, приступаем к анализу напряжений в индукторе и изоляции. Для изоляции допускается анализ проводить по главным напряжениям Principal Stress.

В связи с тем, что анализ производится в линейной области, то значения напряжений не должны превышать предел текучести для материала токопровода и временного сопротивления для материала изоляции.

3.3 Планирование факторного эксперимента расчёта на прочность токопровода индуктора на «обжим»

Для изучения поведения токопровода индукторной системы на «обжим» при разряде был проведен эксперимент с использованием программы ANSYS для раз-

ных диаметров индукторных систем и сечения витков. Разработка моделей производилась в редакторе КОМПАС-3D с последующим импортированием данных. В качестве материалов токопровода были выбраны металлы с пределом текучести от 70 до 250 МПа. В качестве материала межвитковой изоляции выбран текстолит ПТК толщина 1,5 мм ГОСТ 28611-90. Характеристики материалов принимались согласно справочной литературе [66, 124].

Анализ проведенных ранее исследований показал, что влияние выбранных входных факторов на выходной параметр носит нелинейный характер, поэтому для достаточно адекватного описания математической модели (ММ) можно воспользоваться полиномами второй степени, что предполагает варьирование входных факторов на трех уровнях, т.к. число уровней варьирования на единицу больше показателя высшей степени полинома [28, 120]. Внутренний диаметр индуктора, предел текучести материала и момент сопротивления сечения витка индуктора были приняты как варьируемые входные факторы – X_1 , X_2 и X_3 соответственно (см. таблицу 3.1).

В качестве выходной переменной (отклика) было выбрано максимальное давление на индуктор – Y .

Остальные факторы и параметры при расчетах и моделировании принимались как условия опыта и при проведении вычислительного эксперимента не изменялись.

При решении таких задач целесообразно выбирать модель в виде полинома второй степени [28, 114, 120]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i x_i + \sum_{i=1}^N b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^N b_{ij} x_i x_j, \quad (3.1)$$

где x_i , x_j – кодированные значения факторов; b_0 , b_i , b_j – коэффициенты уравнения регрессии; i , j – номера факторов.

Кодированные значения факторов вычисляются по формуле:

$$x_i = (X_i - X_{i0}) / \Delta X_i, \quad (3.2)$$

где X_i – натуральное значение фактора на любом уровне; X_{i0} – натуральное значение фактора на основном уровне; ΔX_i – интервал варьирования фактора.

Таблица 3.1 – Матрица 3-х факторного планирования второго порядка

| Номер опыта | Кодированные значения факторов | | | | | | | | | Y |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_1X_2 | X_1X_3 | X_2X_3 | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | |
| 1. | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y_1 |
| 2. | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | Y_2 |
| 3. | -1 | -1 | +1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | Y_3 |
| 4. | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | Y_4 |
| 5. | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | Y_5 |
| 6. | -1 | 0 | +1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | Y_6 |
| 7. | -1 | +1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | Y_7 |
| 8. | -1 | +1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | Y_8 |
| 9. | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y_9 |
| 10. | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y_{10} |
| 11. | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | Y_{11} |
| 12. | 0 | -1 | +1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | Y_{12} |
| 13. | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Y_{13} |
| 14. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Y_{14} |
| 15. | 0 | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Y_{15} |
| 16. | 0 | +1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | Y_{16} |
| 17. | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | Y_{17} |
| 18. | 0 | +1 | +1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | Y_{18} |
| 19. | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y_{19} |
| 20. | +1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | Y_{20} |
| 21. | +1 | -1 | +1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | Y_{21} |
| 22. | +1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | Y_{22} |
| 23. | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | Y_{23} |
| 24. | +1 | 0 | +1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | Y_{24} |
| 25. | +1 | +1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | Y_{25} |
| 26. | +1 | +1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | Y_{26} |
| 27. | +1 | +1 | +1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y_{27} |

Формулы перехода к значениям факторов в кодированном масштабе:

$$x_1 = (X_{1i} - 100)/50, x_2 = (X_{2i} - 160)/90, x_3 = (X_{3i} - 32)/11.$$

Для построения математической модели был использован метод планирования второго порядка [28, 75, 120].

Трехфакторный эксперимент проводился согласно матрице планирования экспериментов (таблица 3.1), построенной на базе матрицы для линейной модели с достройкой до плана второго порядка.

3.4 Реализация факторного эксперимента

Согласно данному плану машинного эксперимента были проведены 27 опытов по алгоритму, описанному в разделе 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты моделирования индукторов МКЭ

| № | $D_{вн}$, мм | σ_m , МПа | W_y | P_l , МПа | X1 | X2 | X3 |
|----|---------------|------------------|-------|-------------|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 50 | 70 | 21 | 8 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | 50 | 70 | 32 | 12 | -1 | -1 | 0 |
| 3 | 50 | 70 | 43 | 15 | -1 | -1 | +1 |
| 4 | 50 | 160 | 21 | 15 | -1 | 0 | -1 |
| 5 | 50 | 160 | 32 | 20 | -1 | 0 | 0 |
| 6 | 50 | 160 | 43 | 24 | -1 | 0 | +1 |
| 7 | 50 | 250 | 21 | 22 | -1 | +1 | -1 |
| 8 | 50 | 250 | 32 | 29 | -1 | +1 | 0 |
| 9 | 50 | 250 | 43 | 35 | -1 | +1 | +1 |
| 10 | 100 | 70 | 21 | 5.5 | 0 | -1 | -1 |
| 11 | 100 | 70 | 32 | 8 | 0 | -1 | 0 |
| 12 | 100 | 70 | 43 | 13 | 0 | -1 | +1 |
| 13 | 100 | 160 | 21 | 9 | 0 | 0 | -1 |
| 14 | 100 | 160 | 32 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 100 | 160 | 43 | 19 | 0 | 0 | +1 |
| 16 | 100 | 250 | 21 | 12 | 0 | +1 | -1 |
| 17 | 100 | 250 | 32 | 20 | 0 | +1 | 0 |
| 18 | 100 | 250 | 43 | 27 | 0 | +1 | +1 |
| 19 | 150 | 70 | 21 | 3 | +1 | -1 | -1 |
| 20 | 150 | 70 | 32 | 6 | +1 | -1 | 0 |
| 21 | 150 | 70 | 43 | 8 | +1 | -1 | +1 |
| 22 | 150 | 160 | 21 | 6 | +1 | 0 | -1 |

Продолжение таблицы 3.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|-----|-----|----|------|----|----|----|
| 23 | 150 | 160 | 32 | 7.5 | +1 | 0 | 0 |
| 24 | 150 | 160 | 43 | 11 | +1 | 0 | +1 |
| 25 | 150 | 250 | 21 | 8 | +1 | +1 | -1 |
| 26 | 150 | 250 | 32 | 11 | +1 | +1 | 0 |
| 27 | 150 | 250 | 43 | 12.5 | +1 | +1 | +1 |

$D_{вн.}$ – внутренний диаметр индуктора; σ_m – предел текучести материала индуктора; P_1 – максимальное давление на токопровод с учетом изоляции; W_y – момент сопротивления сечения.

Анализ максимальных напряжений по Мизесу (раздел Solution) проводился при условии, что напряжение в токопроводе не должны превышать предел текучести и одновременно – временного сопротивления для межвитковой текстолитовой изоляции.

В результате расчетов были получены значения максимально возможного давления на токопровод индуктора без перехода материала из упругого в пластическое состояние при условии сохранности изоляции (таблица 3.2).

3.5 Обработка полученных результатов. Получение вторичной математической модели

Полученные значения (таблица 3.2) были обработаны с помощью ЭВМ. Листинг расчета по результатам таблицы представлен ниже.

Регрессионный анализ

- 10 Число параметров модели
- 10 Число оставшихся параметров
- 27 Число точек плана
- 3 Число факторов

Экспериментальные данные

```

8,000 12,000 15,000 15,000 20,000
24,000 22,000 29,000 35,000 5,500
8,000 13,000 9,000 11,000 19,000
12,000 20,000 27,000 3,000 6,000
8,000 6,000 7,500 11,000 8,000

```

Обработка эксперимента

| | | | | | | | |
|----|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 8,00 | 1,00 | 7,43 | 0,00 | -1,00 | -1,00 | -1,00 |
| 2 | 12,00 | 1,00 | 11,55 | 0,00 | -1,00 | -1,00 | 0,00 |
| 3 | 15,00 | 1,00 | 16,12 | 0,00 | -1,00 | -1,00 | 1,00 |
| 4 | 15,00 | 1,00 | 14,27 | 0,00 | -1,00 | 0,00 | -1,00 |
| 5 | 20,00 | 1,00 | 19,48 | 0,00 | -1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 24,00 | 1,00 | 25,13 | 0,00 | -1,00 | 0,00 | 1,00 |
| 7 | 22,00 | 1,00 | 22,23 | 0,00 | -1,00 | 1,00 | -1,00 |
| 8 | 29,00 | 1,00 | 28,52 | 0,00 | -1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 9 | 35,00 | 1,00 | 35,26 | 0,00 | -1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 10 | 5,50 | 1,00 | 5,51 | 0,00 | 0,00 | -1,00 | -1,00 |
| 11 | 8,00 | 1,00 | 8,43 | 0,00 | 0,00 | -1,00 | 0,00 |
| 12 | 13,00 | 1,00 | 11,79 | 0,00 | 0,00 | -1,00 | 1,00 |
| 13 | 9,00 | 1,00 | 9,31 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -1,00 |
| 14 | 11,00 | 1,00 | 13,31 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 15 | 19,00 | 1,00 | 17,76 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 16 | 12,00 | 1,00 | 14,23 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | -1,00 |
| 17 | 20,00 | 1,00 | 19,31 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 18 | 27,00 | 1,00 | 24,84 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 |
| 19 | 3,00 | 1,00 | 4,04 | 0,00 | 1,00 | -1,00 | -1,00 |
| 20 | 6,00 | 1,00 | 5,75 | 0,00 | 1,00 | -1,00 | 0,00 |
| 21 | 8,00 | 1,00 | 7,90 | 0,00 | 1,00 | -1,00 | 1,00 |
| 22 | 6,00 | 1,00 | 4,80 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | -1,00 |
| 23 | 7,50 | 1,00 | 7,59 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | 11,00 | 1,00 | 10,83 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 |
| 25 | 8,00 | 1,00 | 6,68 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | -1,00 |
| 26 | 11,00 | 1,00 | 10,55 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 27 | 12,50 | 1,00 | 14,87 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ И КРИТЕРИЙ СТЬЮДЕНТА

| М | В | Т |
|----|---------|-----------|
| 1 | 13,3148 | 1509,7581 |
| 2 | -5,9444 | 1456,0856 |
| 3 | 5,4444 | 1333,6111 |
| 4 | 4,2222 | 1034,2290 |
| 5 | -3,0417 | 608,3333 |
| 6 | -1,2083 | 241,6667 |
| 7 | 1,0833 | 216,6667 |
| 8 | 0,2222 | 31,4270 |
| 9 | 0,5556 | 78,5674 |
| 10 | 0,2222 | 31,4270 |

ДИСПЕРСИЯ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ 0,0003

КРИТЕРИЙ БАРТЛЕТА 0,0000

КРИТЕРИЙ ФИШЕРА 5402,4785

В результате обработки результатов эксперимента получена следующая вторичная модель зависимости максимального давления от входных параметров:

$$Y = 13,315 - 5,944 \cdot x_1 + 5,444 \cdot x_2 + 4,222 \cdot x_3 - 3,042 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,028 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,083 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,222 \cdot x_1^2 + 0,566 \cdot x_2^2 - 0,222 \cdot x_3^2. \quad (3.3)$$

Функции откликов представлены в виде 3-мерных графиков (Рисунки 3.5-3.7)

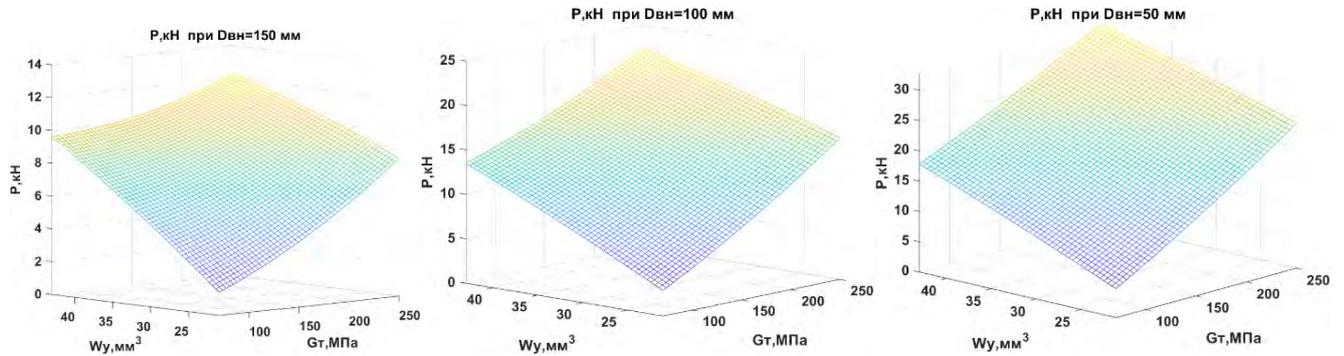


Рисунок 3.5 – Зависимость предельного давления электродинамических сил от момента сопротивления и предела текучести

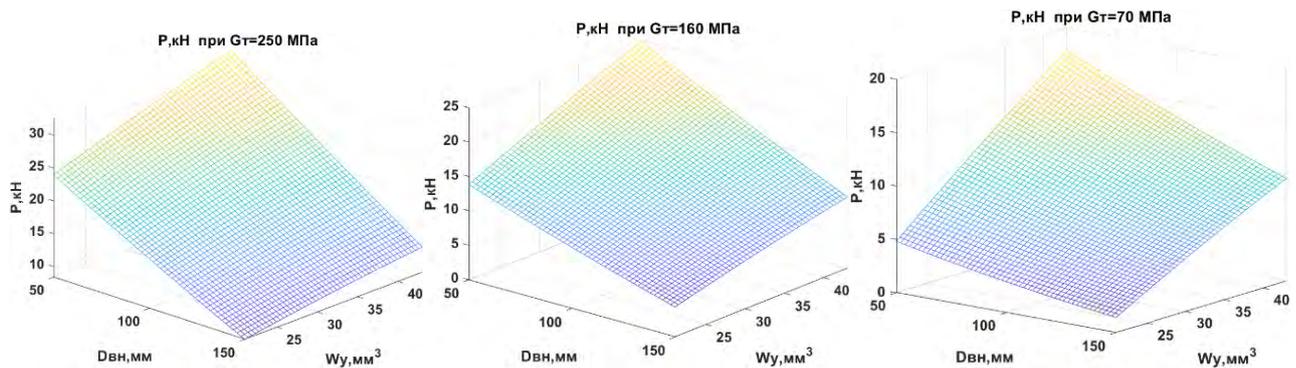


Рисунок 3.6 – Зависимость предельного давления электродинамических сил от момента сопротивления и внутреннего диаметра.

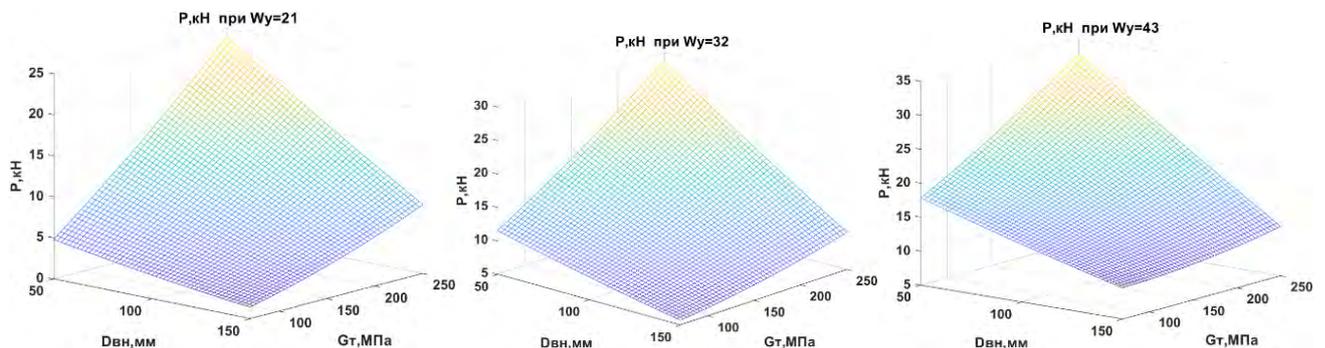


Рисунок 3.7 – Зависимость предельного давления электродинамических сил от внутреннего диаметра и предела текучести

Анализ уравнения регрессии (3.3) показал, что наибольшее влияние на величину максимального давления на индуктор до начала перехода его материала из упругого в пластическое состояние оказывает внутренний диаметр индуктора, наименьшее – момент сопротивления сечения, о чем свидетельствуют абсолютные значения коэффициентов при кодированных значениях этих факторов при линейных членах уравнения регрессии. Максимальную нелинейность этой зависимости дает предел текучести материала индуктора, о чем свидетельствует абсолютное значение коэффициента при кодированном значении этого фактора при квадратичном члене уравнения регрессии. Наибольшее совместное влияние на функцию отклика оказывают внутренний диаметр и предел текучести. В результате анализа полученных данных выявлено, что наибольшее влияние на функцию отклика оказывают входные параметры первой степени, т.е. функция отклика близка к линейной.

3.6 Исследования влияния на прочность токопровода индукторной системы закрепления и межвитковой изоляции

При рассмотрении полученных результатов было выявлено, что опасная зона где достигаются максимальные напряжения находится на внутренней поверхности второго или предпоследнего витков, то есть в соседних витках от зон закрепления (Рисунки 3.8, 3.9). Это подтверждается на практике даже в случае с индукторной системой с внешним бандажом (Рисунок 3.10).

Для исследования влияния взаимодействия токопровода и межвитковой изоляции для некоторых опытов были произведены повторные исследования без учета трения между витками индуктора и текстолитовой изоляцией (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты моделирования максимального давления по прочности индуктора

| № | $D_{вн}$, мм | σ_m , МПа | W_y | P_1 , Мпа | P_2 , Мпа |
|----------|---------------|------------------|----------|-------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 50 | 70 | 21 | 8 | 6 |
| 2 | 50 | 70 | 32 | 12 | 9 |

Продолжение таблицы 3.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------------|-----|-----|----|-----|----|
| 3 | 50 | 70 | 43 | 15 | 11 |
| 4 | 50 | 160 | 32 | 20 | 15 |
| 5 | 50 | 160 | 43 | 24 | 18 |
| 6 | 50 | 250 | 21 | 22 | 17 |
| 7 | 50 | 250 | 32 | 29 | 22 |
| 8 | 100 | 70 | 21 | 5.5 | 4 |
| 9 | 100 | 250 | 21 | 12 | 9 |
| Среднее значение $P_1 / P_2 = 1,33$ | | | | | |

Как видно из данной таблицы 3.3, токопровод индуктора с учетом силы трения способен выдерживать в среднем в 1,33 раза большее давление электродинамических сил, чем без данного учета.

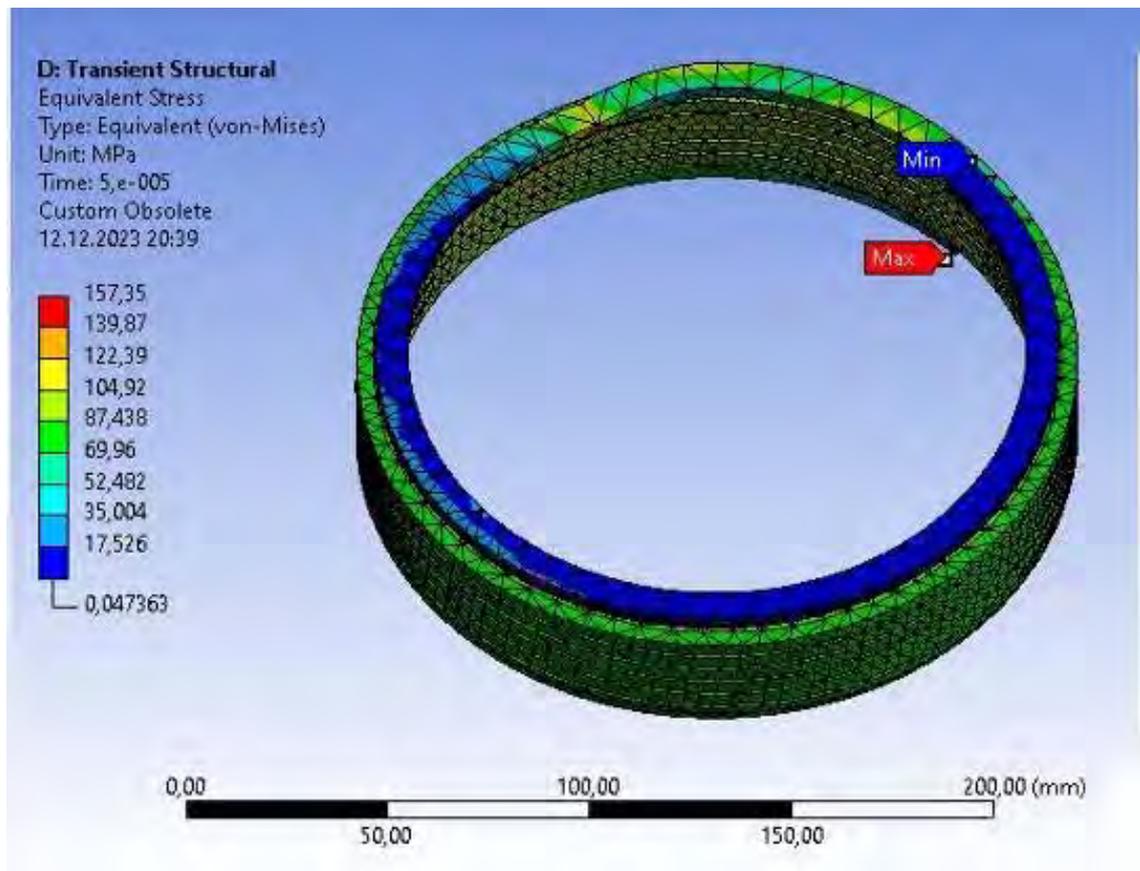


Рисунок 3.8 – Распределение напряжения в токопроводе (опыт 26, таблица 3.1)

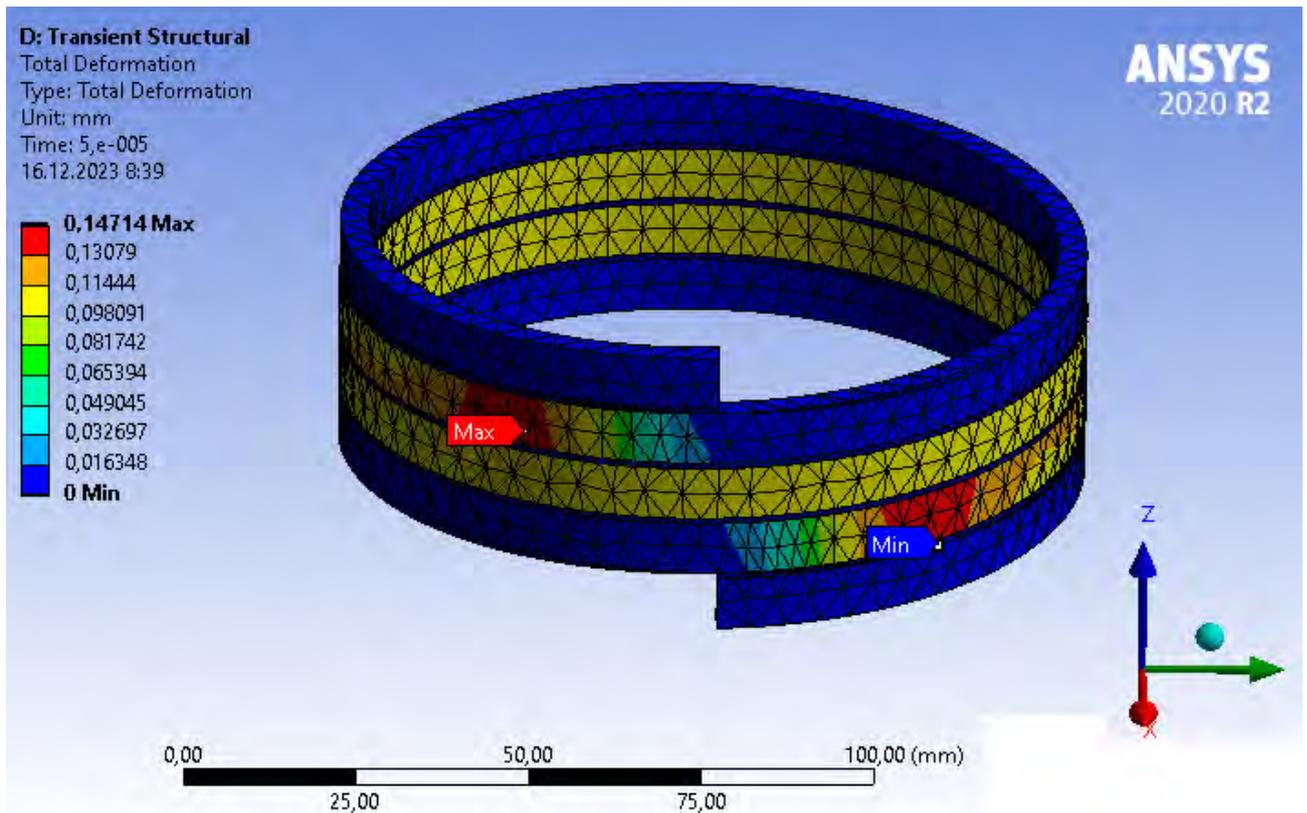


Рисунок 3.9 – Распределение напряжения (опыт 16, таблица 3.1)



а)



б)

Рисунок 3.10 – Индуктор на «обжим» после разрушения.
 а) межвитковое замыкание, б) разрушение бандажа токовыводов

3.7 Выводы по разделу

В результате проведенного исследования прочностных характеристик токопроводов индукторных систем с помощью программы ANSYS были сделаны следующие выводы:

1. Выявлено, что опасная зона где достигаются максимальные напряжения находится на внутренней поверхности второго или предпоследнего витков, то есть в следующих витках от зон закрепления.

2. Использование межвитковой изоляции из материалов с высокой механической прочностью и высоким коэффициентом трения в контакте с металлом токопровода приводит к упрочнению индукторной системы в 1,33 раза. Этим требованиям удовлетворяет текстолит и стеклотекстолит и не соответствуют используемые в настоящее время фторопласт, лавсан и другие полимеры.

3. Анализ уравнения регрессии (3.3) показал, что наибольшее влияние на величину максимального давления на индуктор до начала перехода его материала из упругого в пластическое состояние оказывают внутренний диаметр индуктора, наименьшее – момент сопротивления сечения, максимальную нелинейность этой зависимости дает предел текучести материала индуктора, наибольшее совместное влияние на функцию отклика оказывают внутренний диаметр и предел текучести.

4 Разработка эффективных технологических процессов МИОМ в условиях серийного производства

В главе приведены примеры использования результатов исследований автора, выполненных при организации участка магнитно-импульсной обработки на ПАО «Императорский тульский оружейный завод», разработки и внедрения технологических процессов «обжима» применительно к калибровочным операциям и для сборочных операций.

4.1 Организация участка МИОМ на ПАО «Императорский Тульский оружейный завод»

Для решения задач на основе технологии МИОМ по заказу ПАО «ИТОЗ» в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева была спроектирована и изготовлена четырехпостовая магнитно-импульсная установка МИУ 30/4 [138] (Рисунок 4.1).

Основные технические характеристики МИУ 30/4:

1. Максимальная запасаемая энергия – 32 кДж.
2. Напряжение заряда накопителя энергии в пределах диапазона – 2...16 кВ.
3. Емкость накопителя энергии – 254 мкФ.
4. Собственная частота установки 24 кГц.
5. Количество технологических постов – 4.
6. Индуктивность разрядного контура при коротком замыкании на выходных зажимах – не более $0,17 \cdot 10^{-6}$ Гн.
7. Производительность, при работе с запасаемой энергией до 30 кДж – не более 120 циклов заряд-разряд/ч.
8. Время заряда накопителя энергии до запасаемой энергии 30 кДж не более 8 с.

9. Средний ресурс накопителя энергии при напряжении заряда 15 кВ, с реверсом полярности напряжения на конденсаторах до 60% – не менее 100000 циклов заряд-разряд.

10. Питание – от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц – 380 В.

К несомненным плюсам данного оборудования можно отнести:

1. Габариты установки, позволяющие разместить производственный участок в небольшом помещении.
2. Возможность последовательного выполнения различных операций на разных постах.
3. Возможность настройки каждого поста на фиксированное напряжение, которое запоминается после переключения на другой пост, а также при выключении установки.
4. Снижение время переналадки постов за счет передвижных столов и т.д.



а)



б)

Рисунок 4.1 – Установка МИУ 30/4 (а) и ее пульт управления (б)

Для обеспечения безопасности оператора МИУ и пульт управления находятся в разных помещениях, разделенных между собой металлической дверью с

окном, выполненным из монолитного поликарбоната толщиной 8 мм. Данный материал не уступает по прозрачности стеклу, но при этом способен выдержать частицы, летящие со скоростью до 200 м/с, а также обладает звукопоглощающим свойством. На двери расположен концевой выключатель, предотвращающий выполнение операции при ее открытии. Сама установка снабжена ключ-биркой, при его отсутствии в пульте МИУ выполнение операции технически невозможно. При выполнении работ по установке и съёму деталей на постах МИУ, согласно инструкции по охране труда, оператор вытаскивает ключ из пульта и берет его с собой, тем самым гарантирует собственную безопасность от случайного включения МИУ. Кроме того, в качестве дополнительной меры безопасности, МИУ снабжена световой и звуковой сигнализацией о начале выполнения операции.

Согласно правилам устройства электроустановок потребителей (ПУЭ-7), операторы должны иметь третью группу допуска до 1000 В и выше. Количество операторов – 2 человека.

Средняя производительность участка – 80 операций за 8 часов.

4.2 Использование компьютерного моделирования для разработки технологических процессов МИОМ

4.2.1 Расчет технологического процесса детали «Корпус»

Деталь «Корпус» (Рисунок 4.2) изготовлена из алюминиевого сплава АМг6М методом ротационной вытяжки. Толщина стенки в зоне обжатия 1,2 мм. Требуется: разработка технологического процесса, индуктора и технологической оснастки для выполнения операции «обжим» согласно чертежу. Контролируемые размеры: внутренний диаметр и длина зоны деформации, переходной радиус R3 мм, зона выхода на номинальный диаметр не более 20 мм. Программа выпуска: 350-500 штук в месяц [70, 72, 112].

При изготовлении детали «Корпус» имеют место два лимитирующих условия: необходимо обеспечить формовку меньшего цилиндрического участка, а

также сформировать переходную зону между двумя цилиндрическими участками [72].

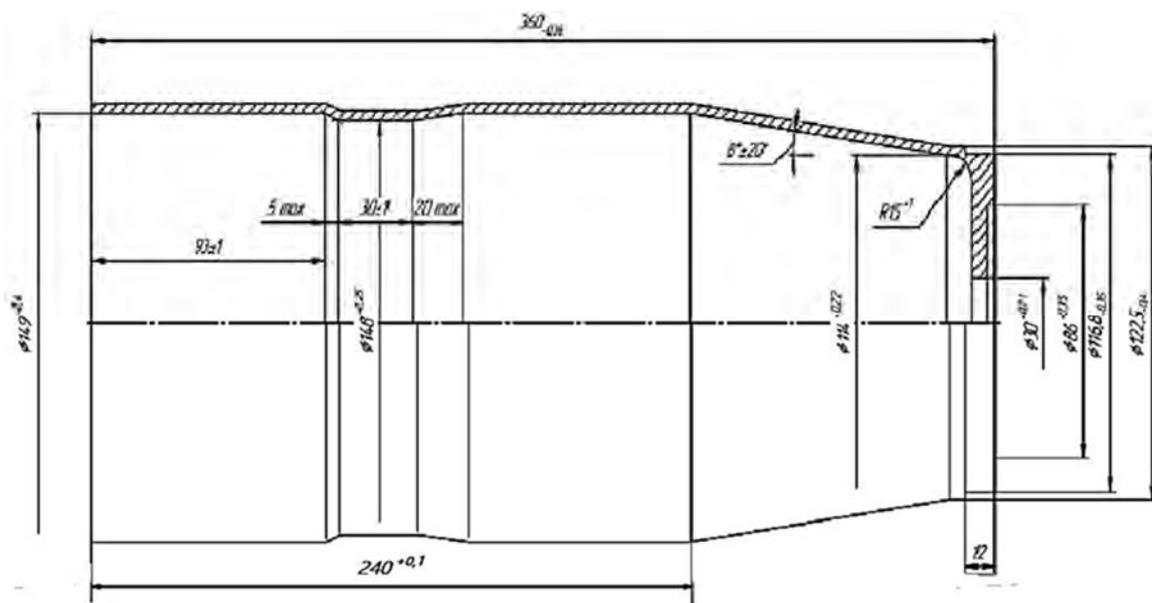


Рисунок 4.2 – Деталь «Корпус»

При принятии решения о применении технологии выполнения данной операции были рассмотрены следующие варианты:

1. Раскатка роликом на токарном станке.
2. Прессование на гидравлическом прессе.
3. Магнитно-импульсная штамповка.

При проведении практических экспериментальных исследований было выяснено следующее:

1. При раскатке роликом не выполнятся размер «входа» на обжимаемую поверхность – не более 5 мм, и внешняя поверхность имеет видимую волнистость, что не допускается по требованию заказчика.

2. Для обеспечения требуемых размеров при раскатке роликом необходимо использовать цанговую оснастку, которая при зажиме может оставлять следы на внутренней поверхности, что также не допускается.

3. При обжиме на гидравлическом прессе остаются следы с двух сторон в месте контакта пуансона и матрицы, что также не допускается.

Исходя из этого, в качестве технологии изготовления детали была выбрана МИОМ.

Величина минимального давления, обеспечивающая формирование цилиндрического участка при малых перемещениях, рассчитывается по формуле (2.13):

$$P_m = \frac{1,5 \cdot \sigma_{0,2} \cdot k_d \cdot s}{R} = \frac{1,5 \cdot 16,5 \cdot 10^7 \cdot 1,66 \cdot 0,0012}{0,003} = 164,34 \text{ МПа.}$$

Внутренний диаметр индуктора, учитывая толщину воздушного зазора, толщину изоляции витка, а также основную изоляцию между внутренним диаметром токопровода и заготовки, согласно рекомендациям [55, 59]: 153 мм. Так как для данной детали установлены требования на точные размеры на краях обжимаемой поверхности (R3, линейные размеры «входа» и «выхода» не более 5 и не более 20 мм) предварительная длина индуктора выбирается равной 1,2 зоны деформирования, т.е. 36 мм. В качестве вариантов, для изготовления токопровода индуктора были выбраны материалы: медь М1, сталь 45, бронза БрБ2, как наиболее часто используемые для данной операции [124]. Начальное значение коэффициента K_1 принимаем равным 0,9. Полученные значения $F_0 = 7589,46$ Гц, глубина проникновения тока в материал заготовки $\Delta_{эз} = 1,4$ мм. Индуктивность системы «индуктор-заготовка» $L_c = 1,08 \cdot 10^{-6}$ Гн. Значения полученных зазоров и количества витков представлены в таблице 4.1.

Расчет электрических параметров выполнялся в программе для ЭВМ [116, 117, 118], выполненной на основе уравнений главы 2.

Таблица 4.1 – Предварительные значения полученных зазоров и количества витков

| Материал токопровода | F_0 , Гц | Глубина проникновения тока в материал индуктора $\Delta_{э1}$, мм | Эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой Δ_e , мм | Расчетное количество витков, N |
|----------------------|------------|--|---|--------------------------------|
| Медь М1 | 7589,46 | 0,77 | 1,885 | 6,9 |
| Сталь 45 | | 2,88 | 2,94 | 5,58 |
| БрБ2 | | 1,5 | 2,25 | 6,38 |

Для всех трех индукторных систем принимаем количество витков равное 7, сечения витка 4*8 мм. Согласно рекомендациям [54], в качестве изоляционного материала используется лавсановая нить. Материал основной изоляции текстолит толщиной 0,3 мм. Длина индуктора с учетом изоляции составляет $7 \cdot 4,9 = 34,3$ мм.

Уточнение эквивалентной индуктивности, а также величин «скин-слоя», коэффициента и частоты обработки производится с помощью метода приближения. Начальный зазор принимается равным физическому, т.е. 0,8 мм. Результаты расчета в программе приведены в таблицах 4.2-4.5.

Таблица 4.2 – Результаты уточненных параметров

| Материал токопровода | f , Гц | ω , Гц | $L_c * 10^{-6}$, Гн | $\Delta_{эз}$, мм | $\Delta_{э1}$, мм | Δ_e , мм |
|----------------------|----------|---------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| Медь М1 | 7268 | 46666,2 | 1,718 | 1,4 | 0,79 | 1,99 |
| Сталь 45 | 5620 | 35311,5 | 2,93 | 1,71 | 3,3 | 3,37 |
| Бронза БрБ2 | 6601 | 41475,3 | 2,12 | 1,65 | 1,65 | 2,44 |

Таблица 4.3 – Результаты уточненных параметров

| Материал токопровода | d_1 , мм | d_3 , мм | R_1 , Ом | R_3 , Ом | $L_1 * 10^{-6}$, Гн | $L_3 * 10^{-6}$, Гн | $M_{13} * 10^{-6}$, Гн |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Медь М1 | 152,19 | 150 | 0,015 | 0,0008 | 12,6 | 0,25 | 1,559 |
| Сталь 45 | 154,7 | 149,69 | 0,052 | 0,0008 | 12,97 | 0,2497 | 1,548 |
| Бронза БрБ2 | 154,65 | 149,75 | 0,0286 | 0,0008 | 12,97 | 0,25 | 1,55 |

Таблица 4.4 – Результаты уточненных параметров

| Материал токопровода | Q_3 | K_{21} | K_{22} | $L_{вн} * 10^{-6}$, Гн | $R_{вн}$, Ом | $L_{13} * 10^{-6}$, Гн | R_{13} , Ом |
|----------------------|--------|----------|----------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Медь М1 | 14,392 | 6,218 | 0,998 | 9,646 | 0,031 | 2,954 | 0,047 |
| Сталь 45 | 10,873 | 6,199 | 0,96 | 9,518 | 0,031 | 3,455 | 0,084 |
| Бронза БрБ2 | 12,775 | 6,2 | 0,997 | 9,55 | 0,031 | 3,416 | 0,06 |

Таблица 4.5 – Результаты уточненных параметров

| Материал токопровода | Q_Σ | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | W , Дж | U , В |
|----------------------|------------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|
| Медь М1 | 4,877 | 0,908 | 0,74 | 0,974 | 0,995 | 8234 | 8052 |
| Сталь 45 | 3,252 | 0,945 | 0,647 | 0,95 | 0,992 | 16020 | 11230 |
| Бронза БрБ2 | 4,23 | 0,924 | 0,709 | 0,96 | 0,994 | 10690 | 9173 |

Дальнейшее уточнение результаты расчетов было проведено с применением программного комплекса LS-DYNA [13]. Электрические параметры обработки были заданы на основании полученных данных (Таблицы 4.2-4.5). Для описания материала заготовки (сплав АМГ6) использовалась модель MAT_POWER_LAW_PLASTICITY [13, 134]. Данная модель предполагает материал изотропным и позволяет учитывать деформационное и скоростное упрочнение металлов. Зависимость между напряжением текучести σ_s и интенсивностью тензора логарифмических деформаций ε_i для данного материала задавалась степенным соотношением:

$$\sigma_s = K_d \cdot B \cdot \varepsilon_i^m,$$

где K_d – корректирующий коэффициент динамичности; $K_d = 2,402$ [55]; B, m – параметры кривой деформационного упрочнения [13].

Материал токопровода индуктора задавался моделью MAT_ELASTIC, а материал матрицы (Ст. 30ХГСА) – MAT_RIGID (Рисунок 4.3).

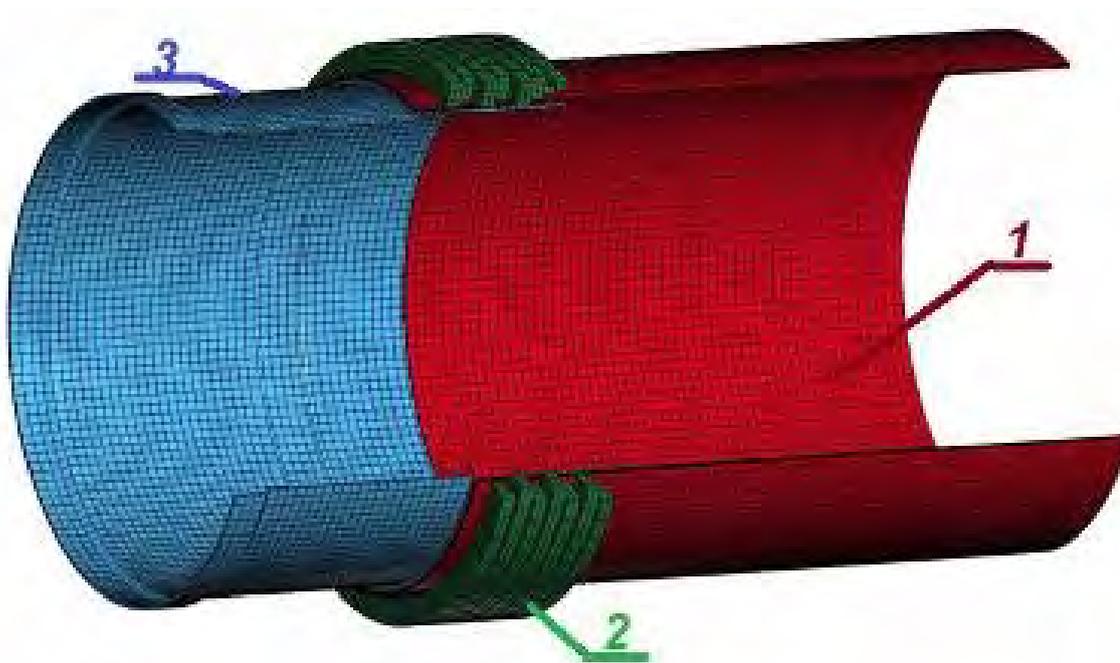


Рисунок 4.3 – Конечно-элементная модель: 1 – модель заготовки, 2 – модель индуктора, 3 – модель оправки

Для работы электромагнитного решателя LS-DYNA [64] задавались дополнительные карты, в том числе с моделью материала EM_MAT_001 для задания

электрической проводимости проводников – заготовки и токопровода индуктора. На рисунках 4.4-4.7 представлены результаты моделирования процесса для индукторной системы с медным токопроводом.

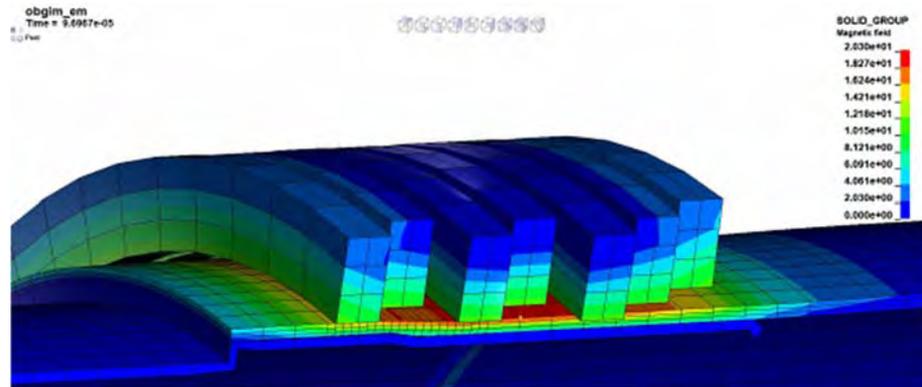


Рисунок 4.4 – Распределение магнитного поля (для медного индуктора)

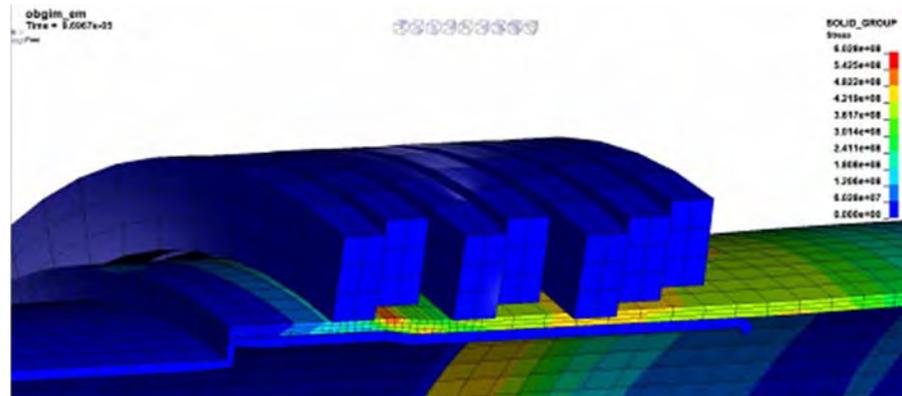


Рисунок 4.5 – Распределение механического напряжения (для медного индуктора)

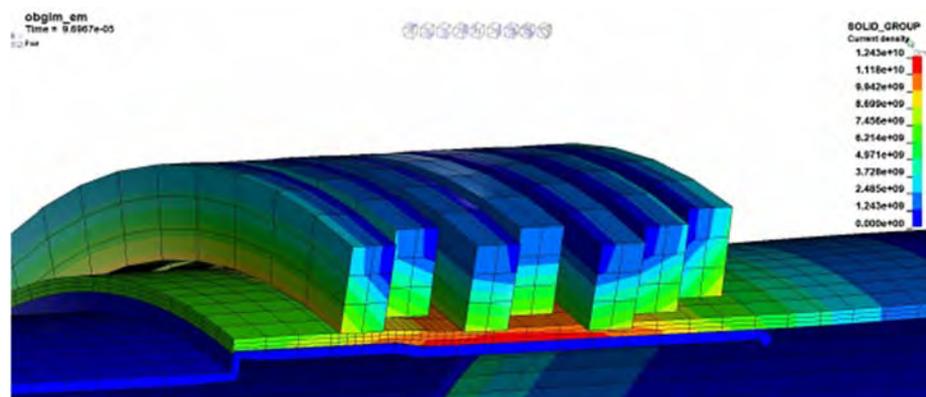


Рисунок 4.6 – Распределение плотности тока (для медного индуктора)

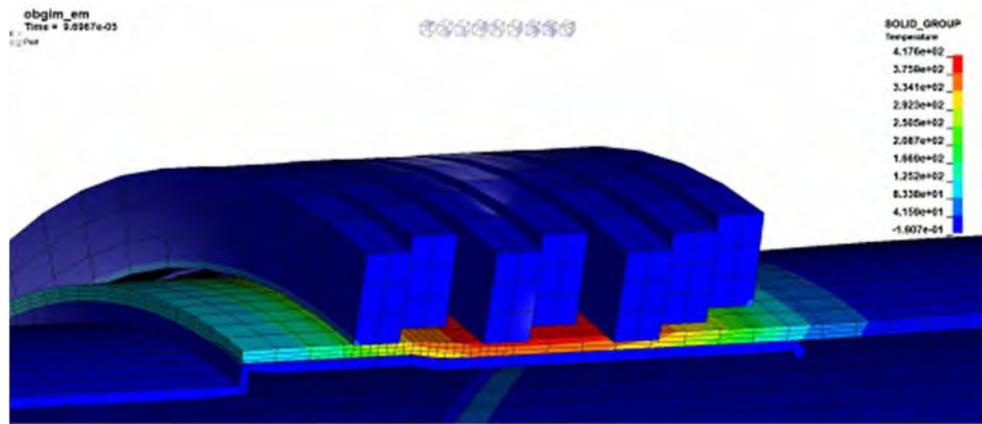


Рисунок 4.7 – Распределение температуры заготовки (для медного индуктора)

Анализ с помощью LS-DYNA показал правильность аналитических расчетов, кроме того, после анализа полученных данных принято решение о использовании индуктора с медным токопроводом по следующим причинам:

1. Минимальное напряжение разряда.
2. Минимальная температура разогрева токопровода (Рисунки 4.8-4.9), что существенно влияет на электроизоляционные и прочностные свойства изоляции.

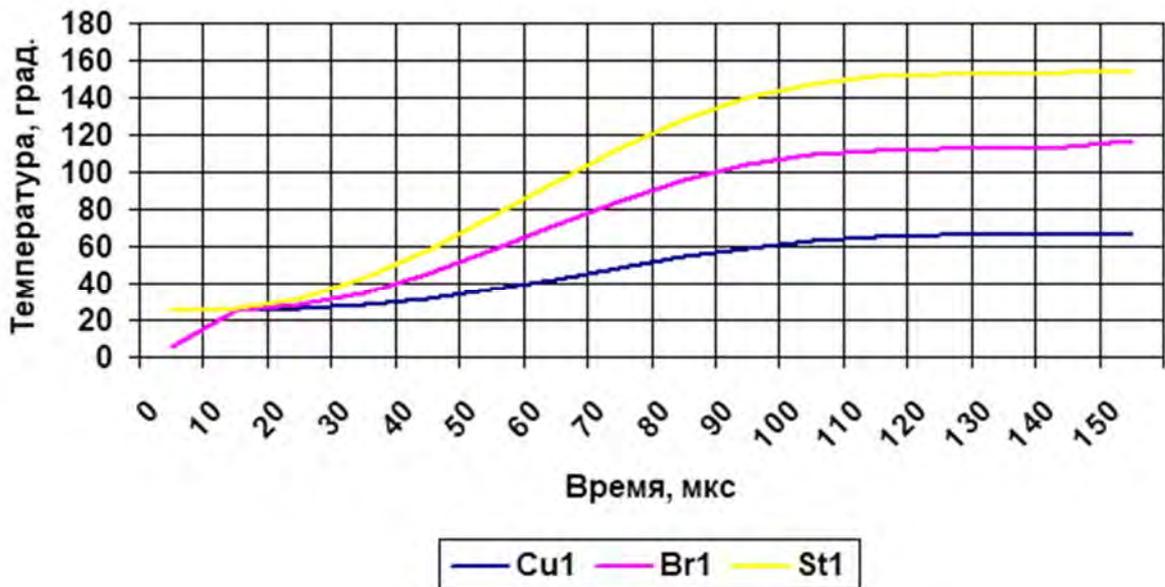


Рисунок 4.8 – График температур индукторов (поверхность обращенная к заготовке)

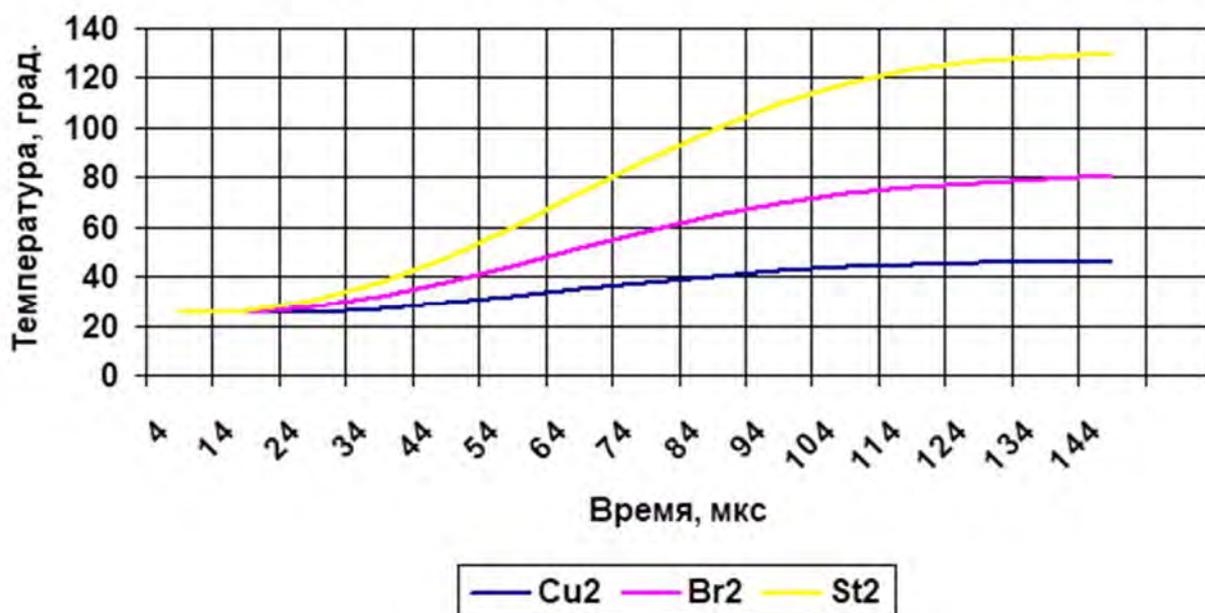


Рисунок 4.9 – График температур индукторов (внешняя поверхность)

После проведения практического испытания с помощью цифрового осциллографа АКТАКОМ ADS-2061MV и петли Роговского [41] была получена осциллограмма, представленная на рисунке 4.10.

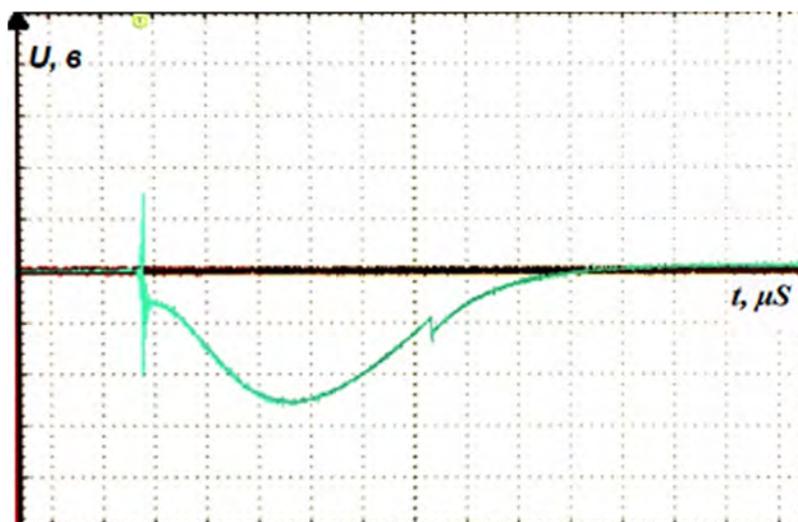


Рисунок 4.10 - Осциллограмма процесса «обжима» детали «Корпус»

При расшифровке осциллограммы получены следующие данные:

1. Масштаб по вертикали Y – 10 В/клетка.
2. Масштаб по горизонтали (развертка) X – 20 t мкс/клетка.
3. Максимальная амплитуда разрядного тока:

$$I_{max} = U_1 \cdot S_i,$$

где U_1 – размах амплитуды осциллограммы (10, В/клетка * 2,5 клетки), S_i – дели-
тельный коэффициент петли Роговского (для используемого датчика $S_i=5,9$ кА/В).

$$I_{max} = 25 \text{ В} * 5,9 \text{ кА/В} = 147 \text{ кА}.$$

4. Частота разрядного тока f_1 :

$$f_1 = \frac{1}{T_0},$$

где T_0 – период колебаний по осциллограмме:

$$T_0 = 20 \text{ с}^{-6}/\text{кл.} * 7 \text{ кл.} = 140 \text{ с}^{-6}.$$

$$f_1 = 7142,8 \text{ Гц}.$$

5. Напряжение разряда 8 кВ.

6. Индуктивность системы «индуктор-установка заготовка»

$$L_{\text{и.у.з.}} = \frac{1}{((2 \times \pi \times f_1)^2 * C)} = 1,954 * 10^{-6} \text{ Гн}.$$

7. Индуктивность системы «индуктор-заготовка»:

$$L_{c1} = L_{\text{и.у.з.}} - L_{\text{уст.}}$$

где $L_{\text{уст.}}$ – индуктивность установки ($0,17 * 10^{-6}$).

$$L_{c1} = 1,784 * 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Полученные L_{c1} и f_1 отличаются на 3% по сравнению с расчетными (Таблица 4.2).

Поверхность, полученная после операции МИОМ, представлена на рисунке 4.11.

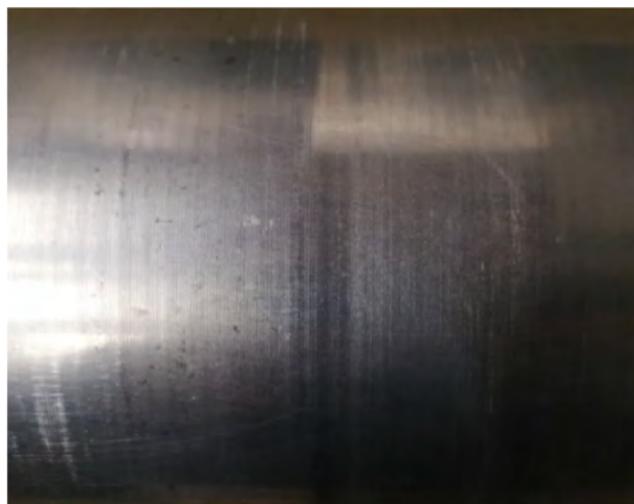


Рисунок 4.11 – Участок детали «Корпус» после «обжима»

Измерение индуктивности токопровода индуктора проводилось с помощью прибора RLC АКПП 6108. Полученная индуктивность индуктора $L_I = 12,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, что на 4% меньше чем расчетная (Таблица 4.3).

Для выполнения данной операции в условиях серийного производства разработана оснастка [103], представленная на рисунках 4.12 - 4.14.

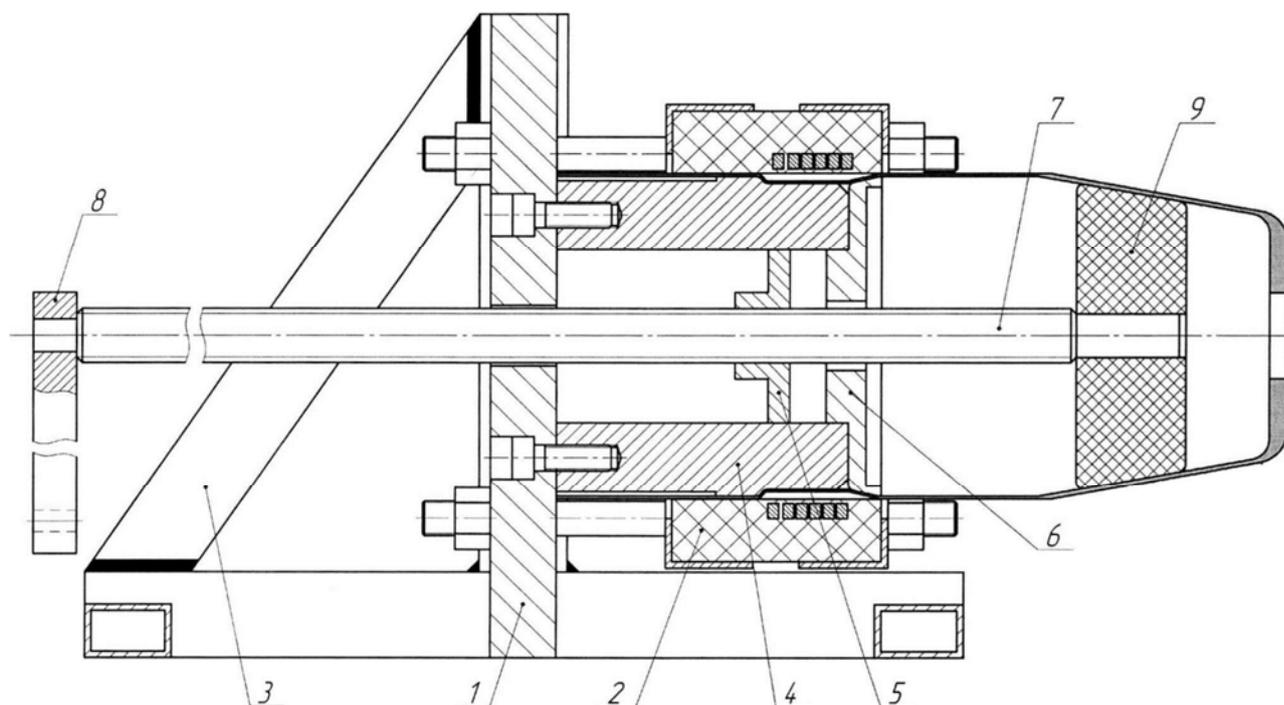


Рисунок 4.12 – Оснастка для «обжима»: 1 – Плита, 2 – Индуктор, 3 – Рама, 4 – Оправка, 5 – Выталкивающая втулка, 6 – Сборная оправка, 7 – Винт, 8 – Ручка, 9 – Конус выталкивателя

Принцип работы приспособления следующий: перед началом работы оператор, выкручивает винт 7 до исходного положения влево, вставляет сборную оправку 6 в отверстие оправки 3 (Рисунок 4.12). Заготовка устанавливается через индуктор 2 в оправку 3. Происходит включение установки и разряд, после которого оператор вращает ручку 8, выталкивающая втулка 5 перемещаясь на винте 7 смещает сборную оправку 6 из цилиндрической оправки 4, при этом оправка 6 остается внутри детали и удаляется оператором. Время на проведение операции 6 минут,

включая время на подготовку. Детали, изготавливаемые данным способом, полностью соответствуют чертежным размерам и требованиям конструкторской документации.

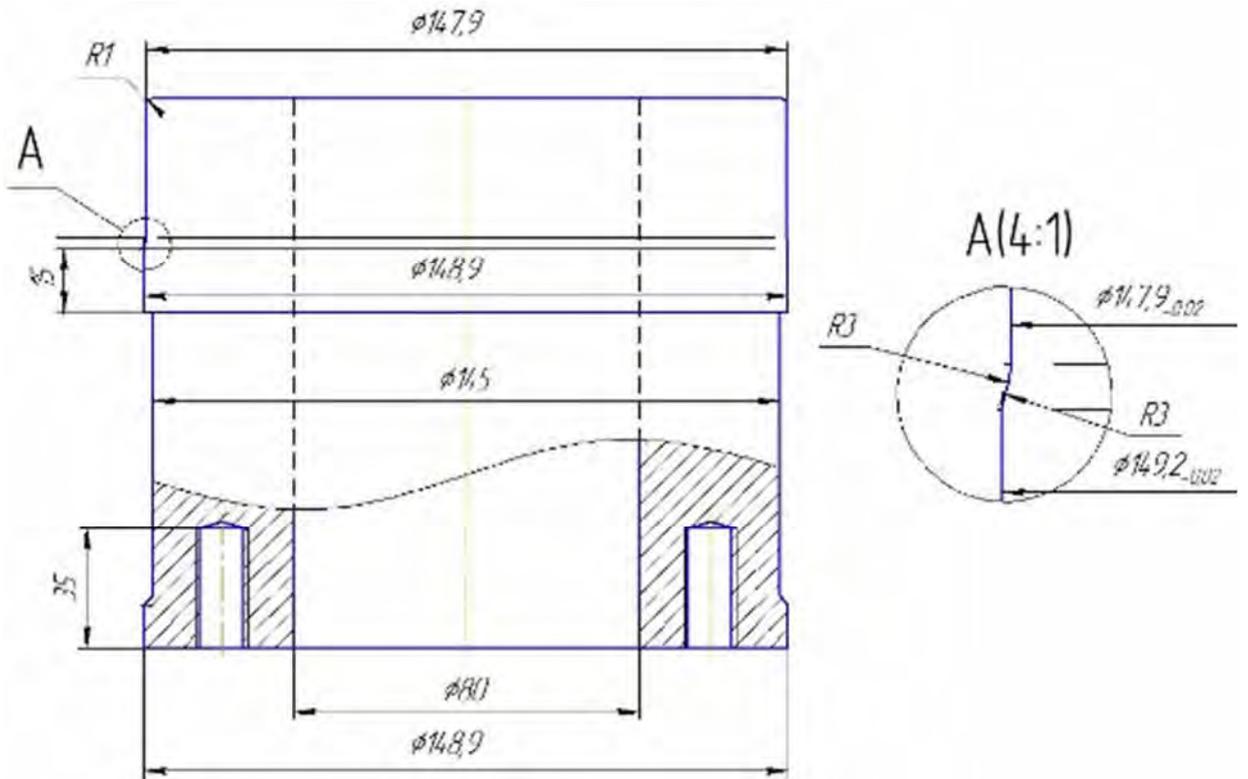


Рисунок 4.13 – Оправка для «обжима» (позиция 4)

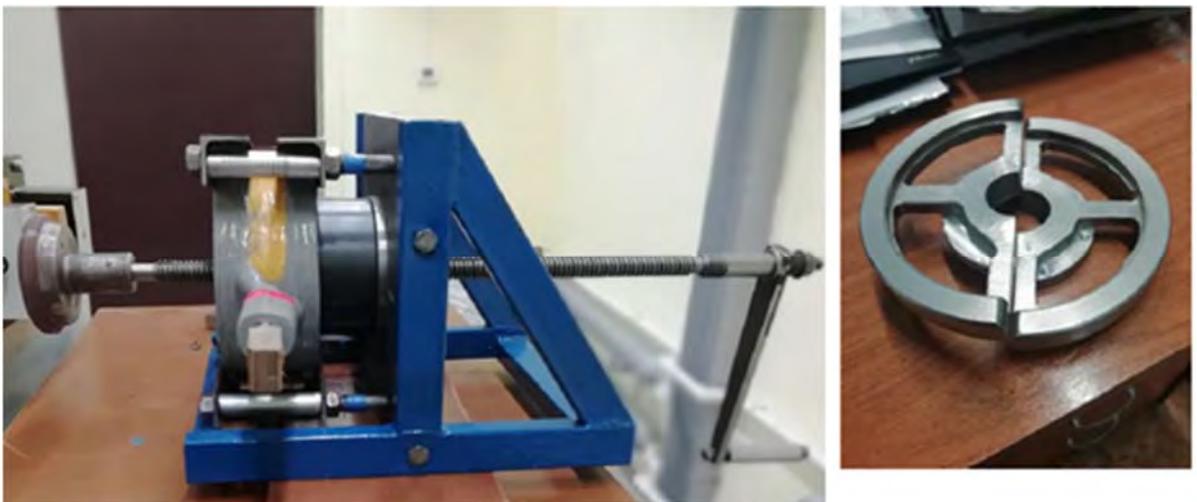


Рисунок 4.14 – Оснастка для «обжима» с медным индуктором и сборная оправка

Дальнейшим развитием применения сборных конструкций оправок для трубных заготовок (Рисунок 4.15) в условиях серийного производства могут служить конструкции оснастки с устройством для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-импульсной штамповкой [104]. Изобретение относится к обработке металлов давлением импульсным магнитным полем металлических оболочек по схеме «обжим» (рисунок 4.16).



Рисунок 4.15 – Деталь «Втулка»

Устройство для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-импульсной штамповкой содержит: основание 2, на котором установлена опорная плита 3 с рамой 9, установленная в них индукторная система 4, токоподводы которой соединяются с выводами МИУ. В центральное отверстие основания 2 и опорной пластины 3 устанавливается нижний пневмоцилиндр 6 со штоком 8, на котором закреплена нижняя часть оправки 10, сверху рамы 9 установлен верхний пневмоцилиндр 5 со-

осно нижнему и на его штоке 7 закреплена верхняя часть оправки 11, плотно со-
стыкованная с нижней частью оправки 10 в месте изгиба профиля формообразова-
ния.

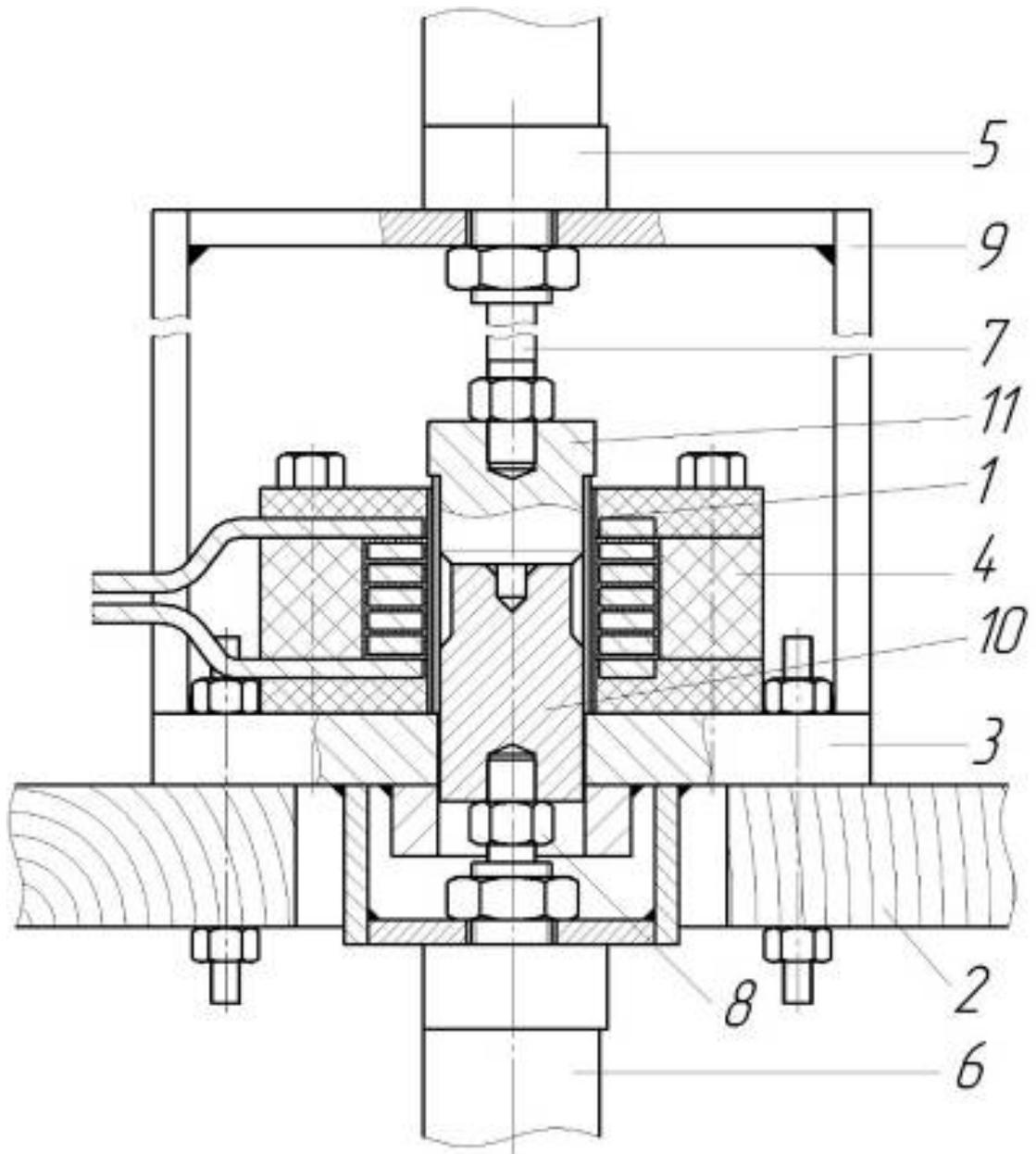


Рисунок 4.16 – Устройство для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-
импульсной штамповкой: 1 – заготовка, 2 – основание, 3 – основание рамы, 4 –
индуктор, 5 – верхний пневмоцилиндр, 6 – нижний пневмоцилиндр,
7 – шток верхнего пневмоцилиндра, 8 – шток нижнего пневмоцилиндра,
9 – рама, 10 – нижняя часть оправки, 11 – верхняя часть оправки

Принцип работы устройства (Рисунок 4.16): в начальный момент времени шток 8 нижнего пневмоцилиндра 6 с нижней частью оправки 10 находится в крайнем нижнем положении, установленный в раме 9 верхний пневмоцилиндр 5 со штоком 7 с верхней частью оправки 11 находится в крайнем верхнем положении, обеспечив свободный доступ заготовки 1 во внутреннюю полость магнитно-динамического блока 4. Затем обрабатываемая трубчатая оболочка 1 устанавливается внутренней полостью на нижнюю часть оправки 10 до упора торцом в опорную пластину 3, а снаружи она размещается внутри полости индуктора 4. Далее шток 8 нижнего пневмоцилиндра 6 поднимает нижнюю часть оправки 10 до уровня начала входа формообразующего профиля нижней матрицы 10 согласно чертежам трубчатой оболочки 1, потом шток 7 верхнего пневмоцилиндра 5 опускает верхнюю матрицу 11 во внутреннюю полость трубчатой оболочки 1 до плотного стыкования с нижней частью матрицы 10 в месте изгиба профиля формообразования. При этом кольцевой выступ на верхней матрице 11 упирается в верхний торец трубчатой оболочки 1 и прижимает ее нижним торцом к опорной плите 3. Далее подается напряжение с МИОМ и выполняется операция «обжим». В результате чего трубчатая оболочка обжимается с размерами входа-выхода диаметра согласно требованиям чертежа на обработанную трубчатую оболочку. При извлечении трубчатой оболочки 1 шток 7 верхнего пневмоцилиндра 5 поднимает верхнюю матрицу 11 в крайнее верхнее положение с выходом ее из внутренней полости трубчатой оболочки 1, а потом шток 8 нижнего пневмоцилиндра 6 опускает нижнюю матрицу 10 до нижнего крайнего уровня. После этого обработанная трубчатая оболочка 1 беспрепятственно извлекается из магнитно-динамического блока 4. Изобретение позволяет расширить технологические возможности применения магнитно-импульсной обработки при выполнении «обжима» трубчатой оболочки из цветных сплавов с точными размерами входа и выхода в изначальный диаметр заготовки с механизацией при базировании заготовки в условиях мелкосерийного и серийного производства. Данное устройство снабжено пневмосистемой с верхним и нижним пневмоцилиндрами со штоками и закрепленной между ними составной формообразующей матрицей. В нижнем основании выполнено центральное отверстие, а опорная плита

закреплена на основании горизонтально и соосно отверстию основания. На опорной плите жестко закреплена рама в которой установлен магнитно-динамический блок. В центральном отверстии основания размещен нижний пневмоцилиндр с закрепленной на его штоке нижней частью матрицы. Сверху рамы установлен верхний пневмоцилиндр соосно нижнему и на его штоке закреплена верхняя часть матрицы с кольцевым упорным выступом, плотно прижатая к нижней части матрицы в месте изгиба профиля формообразования, а профиль формообразующего инструмента выполнен на состыкованных верхней и нижней частях матрицы.

4.2.2 Расчёт технологического процесса детали «Обтюратор»

Деталь специального назначения «Обтюратор» (Рисунок 4.17) состоит из пояска (Рисунок 4.18), выполненного из меди М1 и кольца (Рисунок 4.19), выполненного из стали 45. По требованию заказчика при запрессовке не допускаются пустоты и раковины в соединении, что трудновыполнимо при использовании запрессовки на гидравлических прессах [68]. Кроме того, при запрессовке на прессах на внешнем диаметре пояска могут образоваться складки в местах соприкосновения движущих частей штампа (Рисунок 4.20), что также не допускается заказчиком.

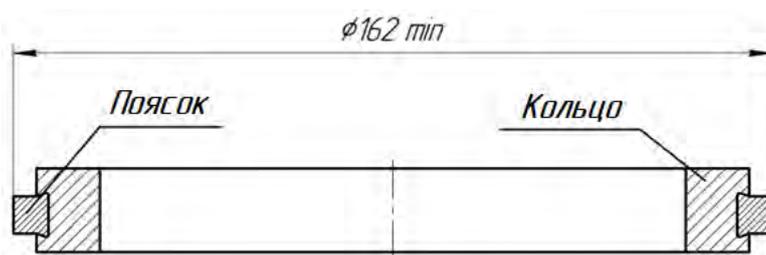


Рисунок 4.17 – «Обтюратор» в сборе

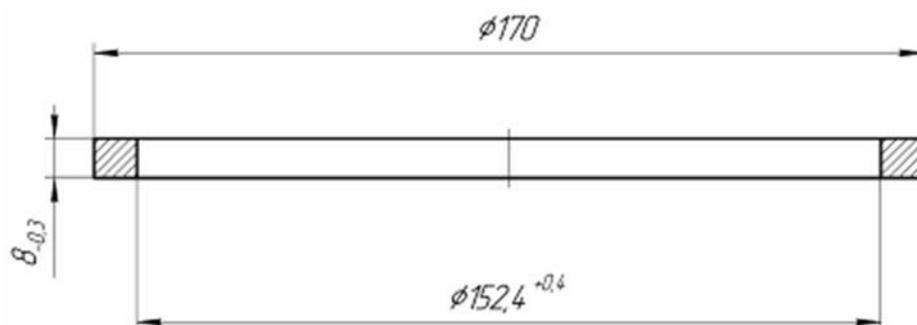


Рисунок 4.18 – Деталь «Поясок»

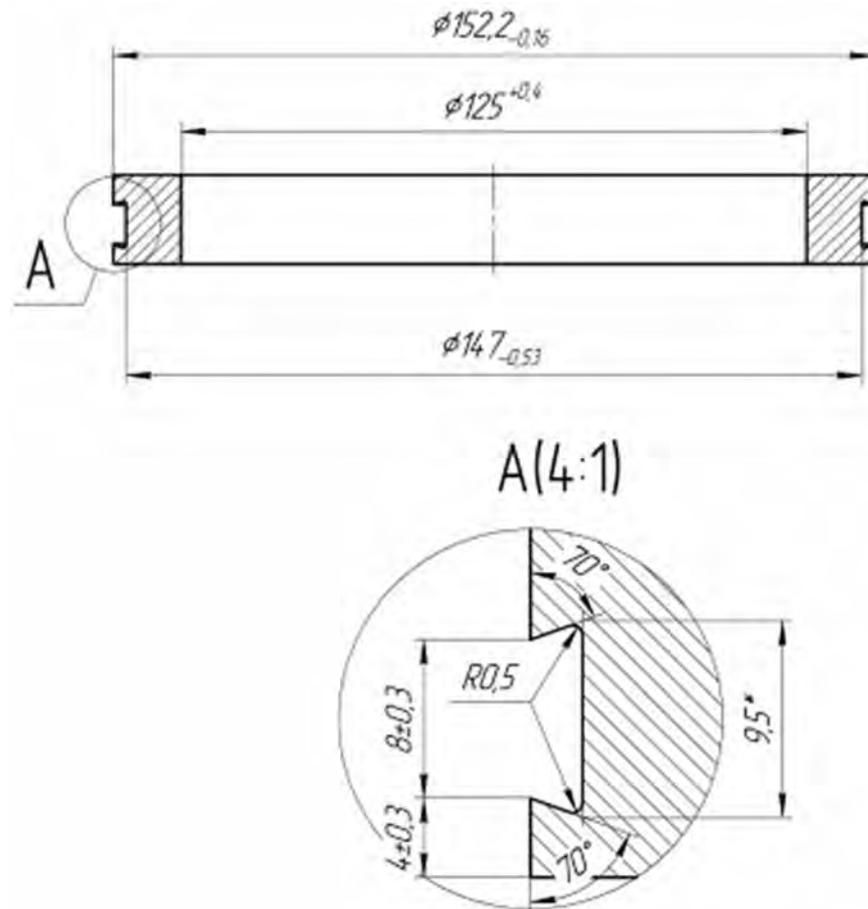


Рисунок 4.19 – Деталь «Кольцо»



Рисунок 4.20 – Внешние дефекты после запрессовки на гидравлическом прессе

Для выполнения данной операции применяется восьми витковый индуктор с внутренним диаметром 174 мм (сечение витка 8*19 мм, материал токопровода бронза БрАЖ 9-4) с осевым бандажом, выполненным из стеклонити. Расчетная индуктивность токопровода согласно формуле 2.19 $L_l=5,742*10^{-6}$ Гн, полученная с помощью прибора RLC АКИП 6108 $L_l=6,01*10^{-6}$ Гн

Для решения данной задачи были разработаны технологическая оправка для запрессовки (Рисунок 4.21), многовитковый индуктор и механизм прижима (Рисунок 4.22). Оправка изготовлена из текстолита ПТК 25 мм ГОСТ 5-78 и служит для заневоливания деталей перед сборкой. Данная оправка не может изготавливаться из металлов во избежание воздействия сил Лоренца.

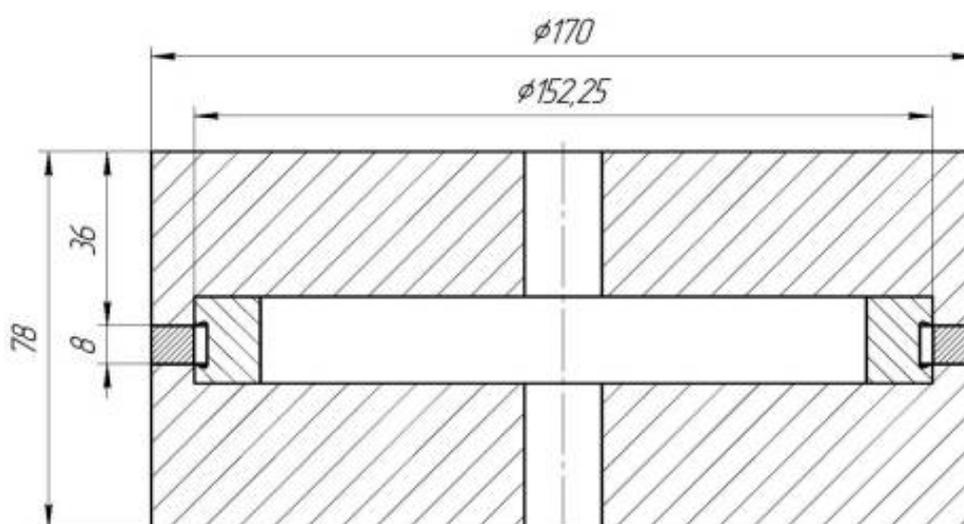


Рисунок 4.21 – Оправка для сборки



Рисунок 4.22 – Индуктор с механизмом прижима

В результате проведенной серии экспериментов было установлено, что оптимальное напряжение разряда МИУ-30 для данной операции составляет 14,5 кВ, что соответствует энергии разряда 27 кДж.

На рисунке 4.23 показан полученный опытный образец. Из рисунка видно, что в процессе магнитно-импульсной запрессовки произошло полное заполнение медью паза, выполненного в стальном кольце.

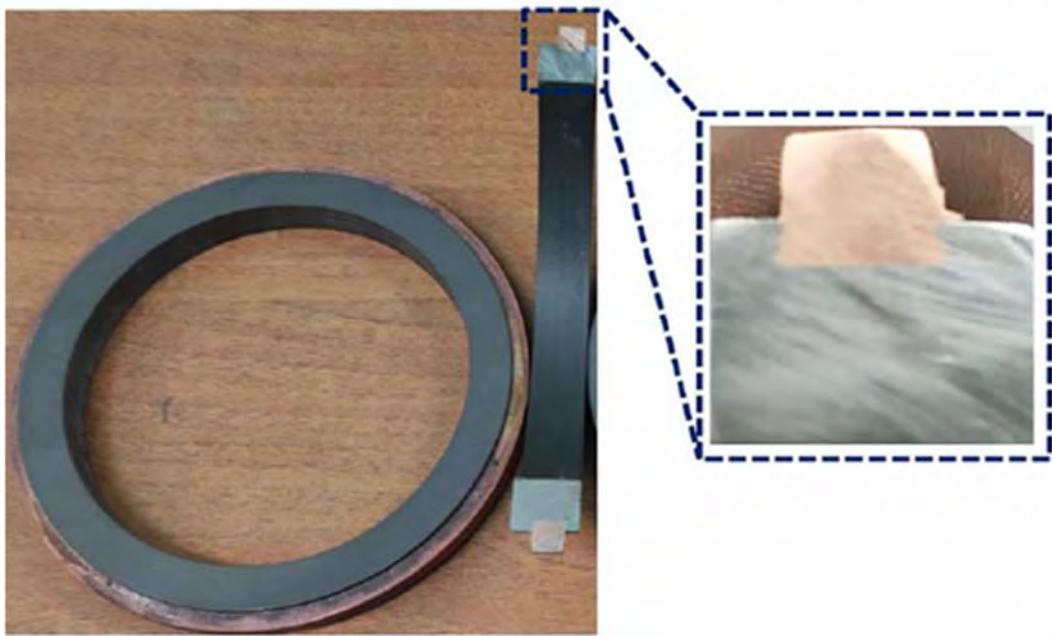


Рисунок 4.23 – Опытный образец

В процессе внедрения данного метода в производство было установлено, что оправка из текстолита не выдерживает механических напряжений, возникающих при операции, и выходит из строя через 4-5 выстрелов (Рисунок 4.24).

Для анализа проблемы было проведено компьютерное моделирование процесса с помощью многоцелевого конечно-элементного комплекса LS-DYNA [68]. Для этого была разработана конечно-элементная модель, состоящая из 4 частей (Рисунок 4.25).



Рисунок 4.24 – Примеры выхода из строя оправки

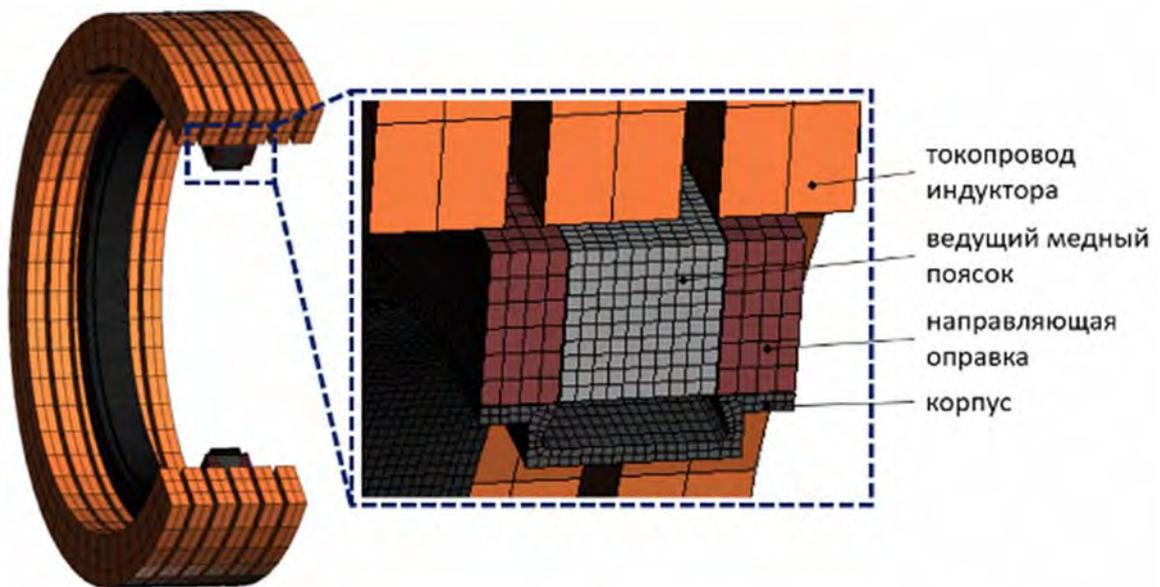


Рисунок 4.25 – Конечно-элементная модель

Для учета влияния больших скоростей деформации металла заготовки использовалась модель материала *MAT_018: MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MPL) [13].

В качестве нагрузки использовалась токовая кривая, полученная экспериментальным путем с помощью пояса Роговского (Рисунок 4.26).

На рисунке 4.27 приведено распределение плотности тока в системе «индуктор-ведущий пояс» и сил Лоренца для момента времени, равному 75 мкс, что соответствует максимальной амплитуде тока. Из рисунка видно, что максимальная

плотность тока, а, следовательно, и силы Лоренца наблюдается на ребрах, расположенных на поверхности пояска, обращенной к индуктору. Это вызвано «скин-эффектом» и наличием свободных витков токопровода индуктора.

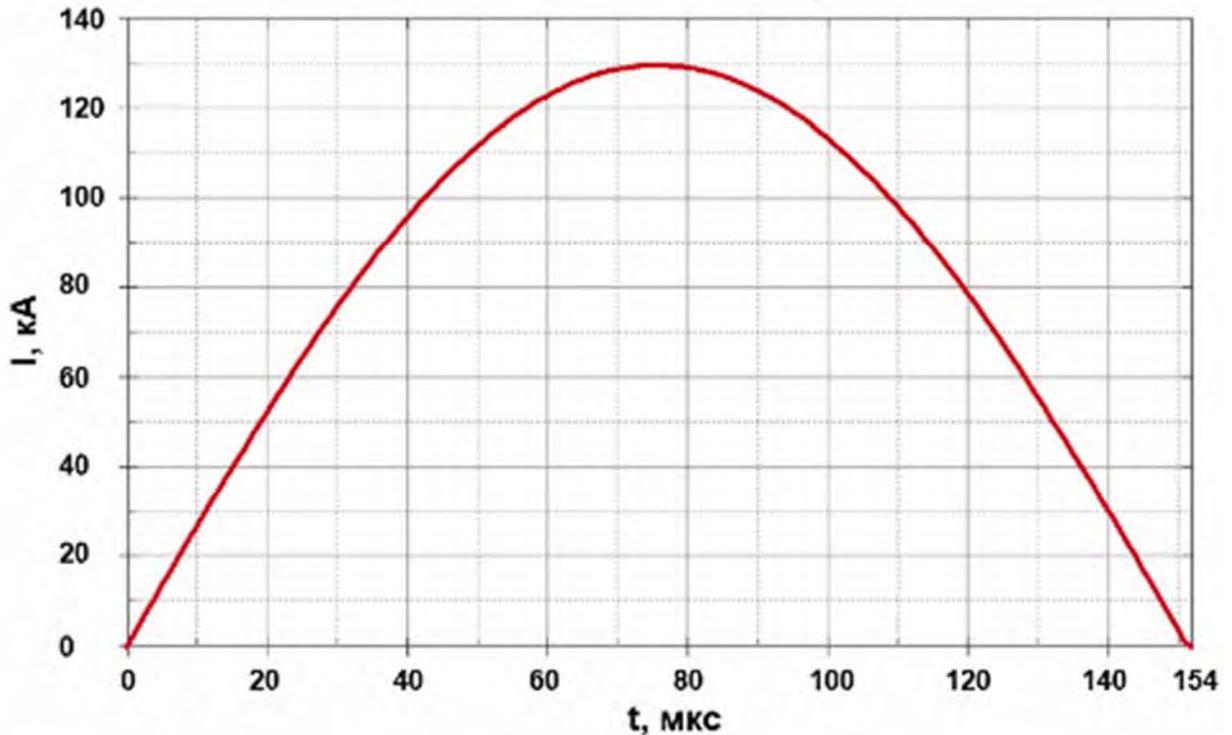


Рисунок 4.26 – Токвая кривая

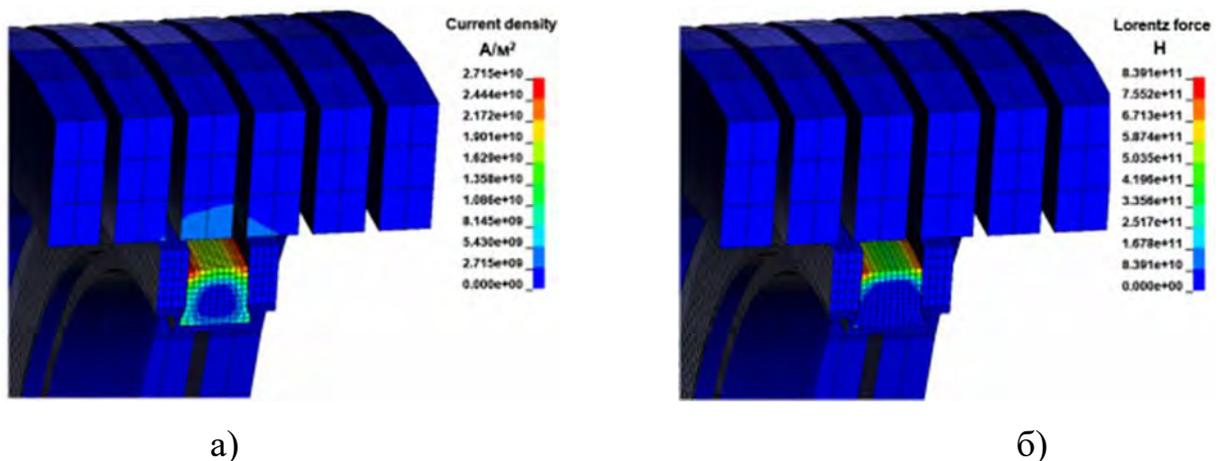


Рисунок 4.27 – Распределение плотности тока в системе «индуктор-заготовка» (а) и сил Лоренца (б)

На рисунке 4.28 представлен график разгона ведущего пояска под действием сил Лоренца. Максимальная скорость перемещения пояска составила 155 м/с.

На рисунке 4.29 показан разогрев системы «индуктор-заготовка» под действием импульсных токов для характерных моментов времени. Максимальная температура наблюдается на ребрах, расположенных на поверхности пояска, что также объясняется «скин-эффектом». Кинематика процесса перемещения пояска и заполнения им паза в детали «кольцо» приведена на рисунке 4.30.

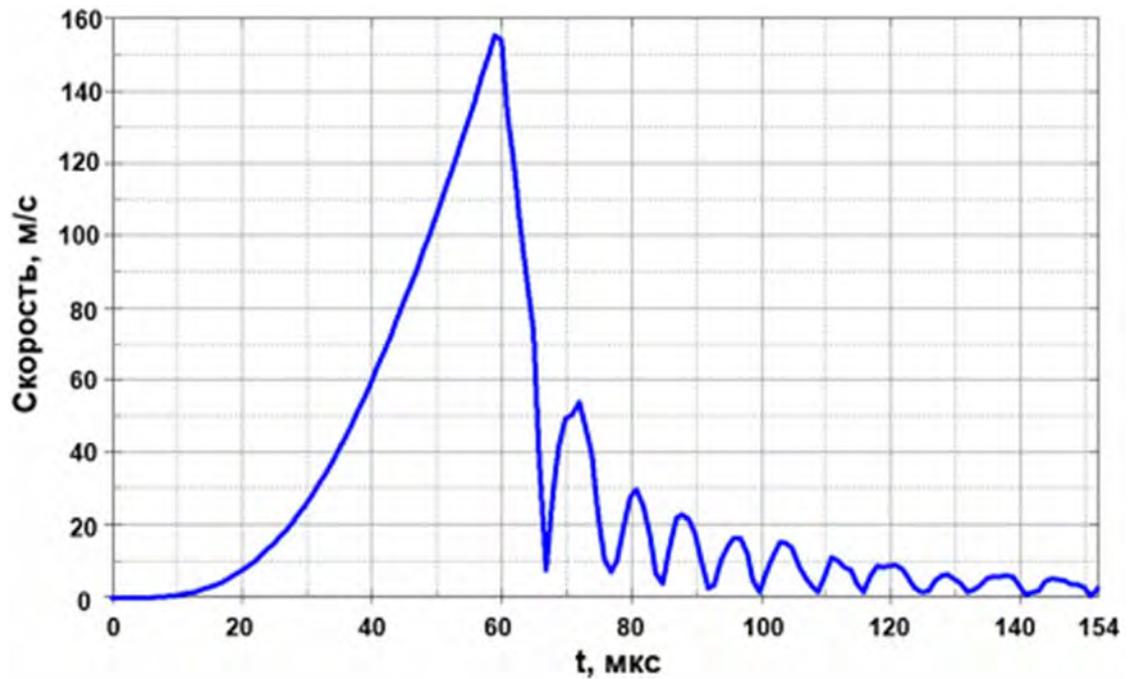


Рисунок 4.28 – Зависимость скорости перемещения ведущего пояска от времени

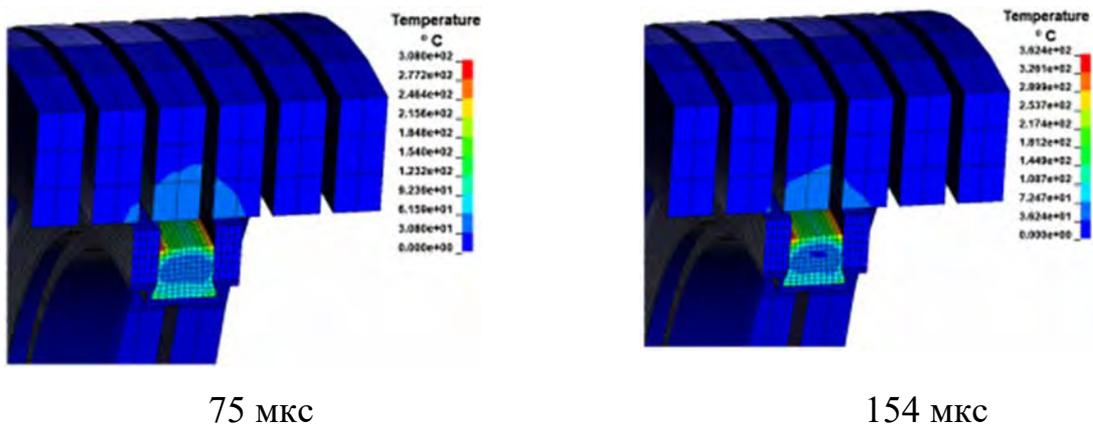


Рисунок 4.29 – Температура разогрева системы «индуктор-заготовка»

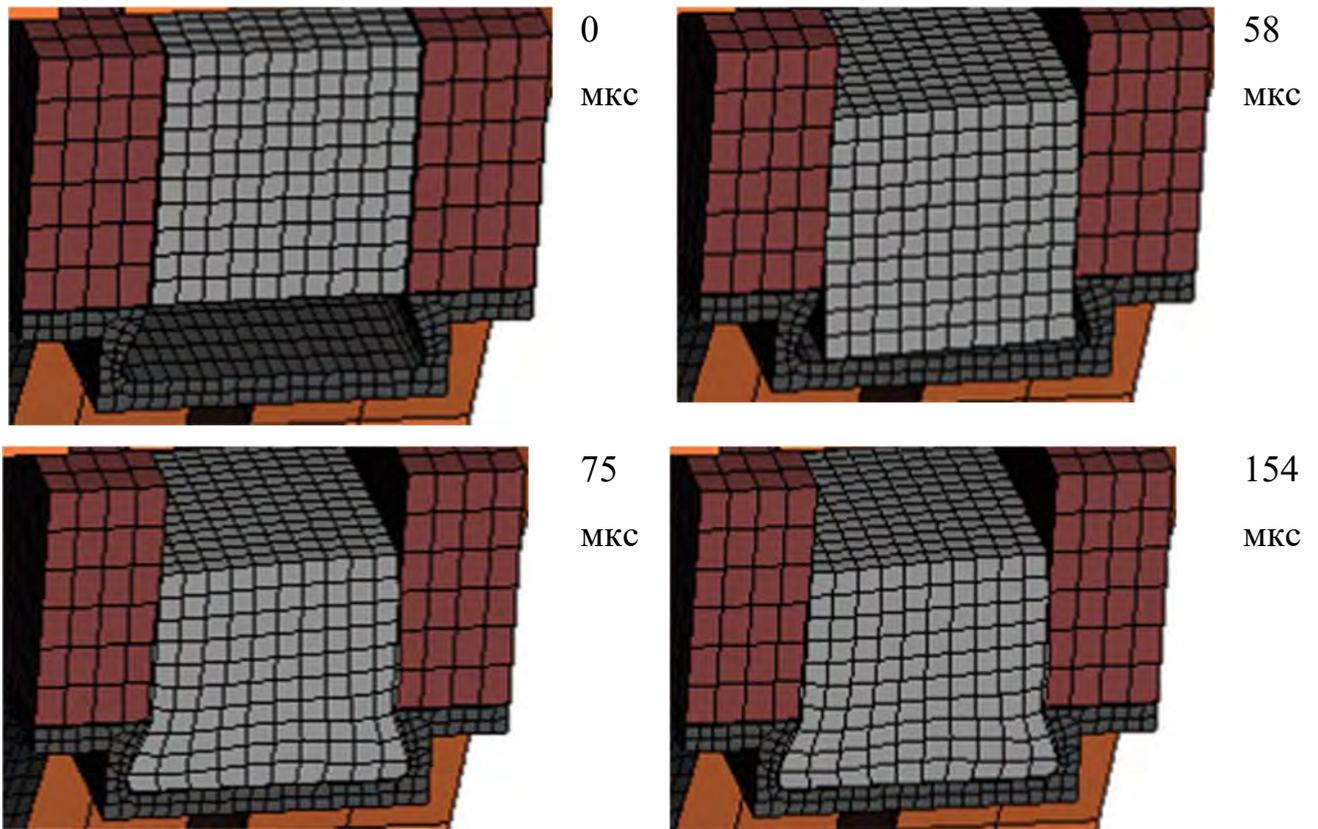


Рисунок 4.30 – Кинематика процесса запрессовки пояска в паз детали кольцо.

Произведенное моделирование показало:

1. Неравномерность в перемещении пояска (Рисунок 4.30). Одна его часть перемещается быстрее, что объясняется расположением индуктора относительно пояска, а также спиральной формой индуктора.

2. Напряжения, возникающие на контактных площадях текстолитовых оправок, достигают 2000 кН (Рисунок 4.31). При этом площадь каждого кольца при внешнем диаметре 0,170 м и внутреннем 0,152 м составляет 0,00455 м². При пересчете в давление это составляет примерно 440 МПа что превышает предел прочности текстолита (140 МПа).

Для решения выявленных проблем было реализовано следующее техническое решение. Контактный поясок верхней оправки был заменен на кольцо из полиуретана для компенсации при расширении меди и возникающих напряжений, а контактный поясок нижней составляющей оправки – на кольцо из стеклопластика, предел прочности которого составляет 1700 МПа (Рисунок 4.32).

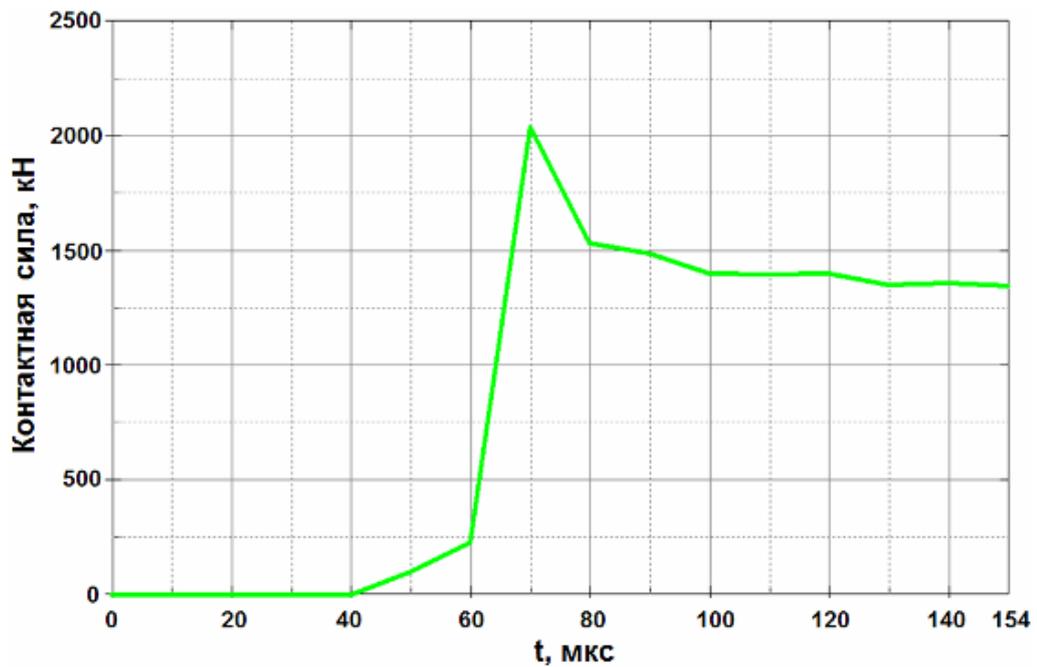


Рисунок 4.31 – Зависимость силы контактного взаимодействия ведущего пояска с направляющей оправкой от времени

Применение данного технического решения позволило увеличить в разы стойкость оправки. В настоящее время количество операций, произведенных на данном приспособлении, составляет более 500 выстрелов без разрушения.

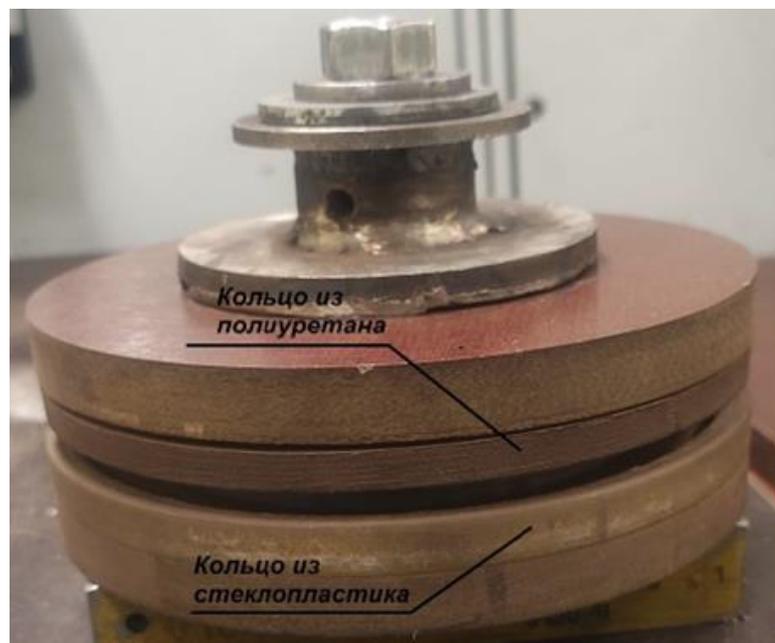


Рисунок 4.32 – Доработанная оправка для запрессовки

4.3 Разработка конструкций индукторных систем на «обжим» с токопроводом сварного типа

Одной из важнейших задач при внедрении технологии МИОМ в серийном производстве является снижение себестоимости изготовления индукторных систем за счет уменьшения времени их изготовления и упрощения конструкции данного инструмента. Использование индукторных систем с токопроводом сварного типа менее эффективно по энергетическим параметрам обработки по сравнению с токопроводами из металлов, обладающими большей электропроводностью и меньшим электрическим сопротивлением, например из меди или бронзы. Однако индукторные системы со стальным токопроводом имеют более высокий ресурс и низкую стоимость чем подобные индукторные системы с токопроводом из меди или бронзы что оправдано в условиях серийного производства [124]. В качестве возможного решения дальнейшего удешевления индукторных систем может служить применение токопроводов сварного типа из стали [74, 105]. Преимуществами предлагаемой конструкции перед известными аналогами является упрощение технологии изготовления токопровода, в том числе больших габаритных размеров по высоте и диаметру, т.к. он изготавливается из отдельных сегментов, а не обрабатывается целиком. Индуктор обладает универсальностью применения за счет варьирования разностью диаметров токопровода, его материалом и межвитковым расстоянием. Минимальный внешний диаметр витков, рекомендуемый к изготовлению данным способом, 50 мм, максимальный 1 м. Индуктор данной конструкции для магнитно-импульсной обработки полых осесимметричных заготовок с токопроводом, состоящим из отдельных сегментов в виде разрезных дисков с вырезанным сектором изогнутых в виток с постоянным шаговым расстоянием (Рисунок 4.33), а также токопроводов, приваренных к крайним сегментам, отличается тем, что согнутые витки из отдельных сегментов в виде разрезных дисков выполненных из листового металла с вырезанным сектором на угол $10 \dots 90^\circ$ сварены друг с другом, сварные швы зачищены до шероховатости не грубее, чем поверхность витка, а токопровод в сборе подвергнут термообработке отпуском.

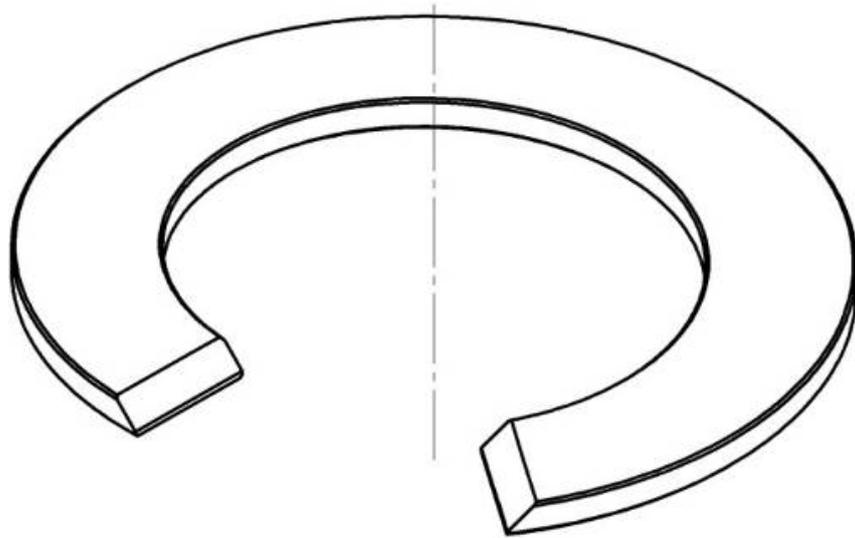


Рисунок 4.33 – Виток индуктора токопровода сварного типа

Токопровод индуктора для магнитно-импульсной обработки осесимметричных металлических заготовок собирается следующим образом. На круглых кольцевых заготовках, вырезанных из листового металла по числу витков токопровода с обточенными наружными и внутренними фасками, вырезают сектор, соответствующий $10...90^\circ$, определяемый межвитковым расстоянием и удобством проведения сварки. Затем разгибают концы, образуя идентичные витки с одинаковым шаговым расстоянием, зависящим от мощности индуктора и габаритов обрабатываемых деталей. Обточив на кромках витков скосы, их соединяют в спираль и сваривают в стык (Рисунок 4.34) зачищая в последующем сварные швы и выравнивая их заподлицо с поверхностями витков во избежание появления концентраторов электрического сопротивления. К готовому токопроводу приваривают токоподводы. Далее проводят термообработку готового индуктора отпуском для снятия остаточных напряжений после сварки по режиму, зависящему от марки материала токопровода. Рекомендуемые стали: Ст.3, сталь 08кп, сталь 45, сталь 03Н18К9М5ТЮ-ВИ (ЧС4-ВИ). Особенностью конструкции является открытое с двух сторон межвитковое пространство, соответственно возможно изолирование витков любым известным способом, например, использование плоских пластин из стеклотекстолита, навивка лавсановой лентой и т.д. Токопроводы данной кон-

струкции могут быть использованы в индукторной системе как с радиальным бандажом, так и без него (Рисунок 4.35). Прочность получаемого токопровода также может быть рассчитана по методике, предлагаемой в настоящей работе. Расчет параметров индукторных систем с токопроводом сварного типа производится также как и для токопроводов, изготовленных другим способом. Немаловажным преимуществом данных индукторов является их ремонтпригодность.



Рисунок 4.34 – Токопровод в сборе

На рисунке 4.35 приведены примеры с использованием индукторной системы с токопроводом сварного типа при калибровке деталей специзделий «Корпус 2» (Рисунок 4.35, а) и «Обтекатель» (Рисунок 4.35, б). Данные детали изготовлены из сплавов алюминия методом ротационной вытяжки. После подрезки на токарном станке и термической обработки для более 20 % данных деталей из партии требуется калибровка по максимальному наружному диаметру. Параметры обработки

подбираются исходя из дефектов, при этом величина напряжения заряда может изменяться с 5 до 9 кВ. Среднее время проведения операции (вместе с замерами) – 4 минуты. При необходимости, операция может проводится повторно до исправления выявленного дефекта. В настоящее время срок службы данных индукторных систем составляет: 15000 выстрелов для индуктора с осевым бандажом и 12500 без осевого.



а)



б)

Рисунок 4.35 – Индуктор на «обжим» с токопроводом сварного типа без осевого бандажа (а) и с осевым бандажом (б)

Сравнение технологических процессов изготовления токопроводов сварного типа и токопроводов, изготовленных точением из круглой заготовки для индукторных систем, приведено в таблице 4.6. В качестве примера использованы данные изготовления семи виткового токопровода с внутренним диаметром 153 мм и внешним диаметром 193 мм, высота витка 6 мм. Материал для изготовления – сталь 30ХГСА. В качестве заготовки для витков токопровода использовался лист из данного металла толщиной 6 мм (масса 13,104 кг), для точеного токопровода круг диа-

метром 200 мм длиной 75 мм (масса 18,55 кг). Стоимость материала для токопровода сварного типа (по ценам 2023 года) – 912,8 рублей, для токопровода, изготовленного методом точения 1300 рублей. В стоимости операции учитывались зарплата основных рабочих, потребляемая электроэнергия оборудования, стоимость инструмента, без учета стоимости амортизации оборудования. Кроме того, в таблицу не внесены данные по термообработке для снятия напряжений после сварки и резки выполняемых для обеих заготовок по одинаковым режимам.

Таблица 4.6 – Сравнение технологических процессов изготовления токопроводов индукторных систем методом точения и с использованием сварки

| № | Операция | | Оборудование | | Время, час. | | Стоимость, руб | |
|--------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------|---------|----------------|---------|
| | Сварка | Точение | Сварка | Точение | Сварка | Точение | Сварка | Точение |
| 1 | Рубка | Резка | Ножницы гильотинные НД3316 | Станок отрезной полуавтом. | 0,25 | 0,3 | 700 | 800 |
| 2 | Токарная обработка | Токарная обработка | Станок токарный 1К63 | Станок токарный 1К63 | 4 | 6 | 2800 | 4200 |
| 3 | Фрезер. | Фрезер. | Станок с ЧПУ Ми-сгон | Вертик. фрезерный станок 6Т13 | 1,5 | 7,5 | 930 | 9800 |
| 4 | Сварка, слесарная обработка | Слесарная обработка | Сварочный полуавтом, УШМ | | 1,5 | 4 | 900 | 2000 |
| Итого: | | | | | 7,25 | 17,8 | 5330 | 16880 |

Сокращения в таблице 4.6: сварка – токопровод сварного типа, точение – токопровод изготовленный методом точения, фрезер. – фрезеровка, полуавтом. – полуавтомат, вертикал. – вертикальный, УШМ – углошлифовальная машинка.

Учитывая стоимость материала, изготовление токопровода сварного типа индуктора в 3 раза дешевле, чем стоимость изготовления токопровода методом точения. При этом время на изготовление тратится меньше в 2,46 раза (таблица 4.6).

4.4 Выводы по разделу

1. На основе предложенного алгоритма было проведено компьютерное моделирование технологического процесса получения изделий «Корпус» в программе LS-DYNA, которое показало правильность предварительных расчетов параметров обработки. Данная деталь внедрена в серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». Разработанные при этом приспособления для МИОМ позволяют повысить точность изготовления подобных деталей и расширить применение МИОМ в серийном производстве.

2. Относительная погрешность определения индуктивности индукторной системы по разработанному алгоритму не превышает 5 %.

3. Произведено компьютерное моделирование детали «Обтюратор» (данная деталь внедрена в серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод»), целью которого являлось повышение прочности оправки. Полученное техническое решение позволило увеличить ресурс оправки примерно в 50 раз. Данное решение может быть применено при изготовлении подобных деталей методом МИОМ.

4. Стоимость индукторных систем на «обжим» с токопроводом сварного типа примерно в 3 раза ниже, чем аналогичная индукторная система с токопроводом, изготовленным методом точения. При этом токопроводы сварного типа могут быть успешно использованы в индукторных системах как с осевым бандажом, так и без него. Данные индукторные системы были внедрены в производство на ПАО «Императорский Тульский оружейный завод» для калибровки деталей «Корпус 2» и «Обтекатель».

Заключение

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом и экспериментальном обосновании новой конструкции индукторных систем на «обжим», снижающей себестоимость данного инструмента для применения в серийном производстве, а также разработке новых приспособлений для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок методом МИОМ в условиях серийного производства, повышающих геометрическую точность этих изделий. В процессе выполненных исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы.**

1. Анализ существующих методик расчета параметров МИОМ показал, что алгоритм расчета индукторных систем для серийного производства должен не только основываться на максимальной эффективности операции, но и включать в себя прочностные расчеты токопровода и изоляции для увеличения срока службы данного инструмента.

2. Усовершенствован алгоритм расчета параметров энергозатрат процессов МИОМ с уточнением собственных индуктивностей и сопротивлений индуктора и заготовки с возможностью использования полученных данных для последующего моделирования в программе МКЭ, а также включающий в себя прочностной расчет индукторной системы на «обжим». На основе данного алгоритма разработано программное обеспечение для расчета технологических параметров процессов МИОМ. Относительная погрешность определения индуктивности компонентов системы не превышает 5 %.

3. Проведенное исследование воздействия давления электродинамических сил на токопровод и межвитковую изоляцию индукторной системы на «обжим» показало, что использование межвитковой изоляции из материалов с высокой механической прочностью и высоким коэффициентом трения в контакте с металлом токопровода приводит к упрочнению индукторной системы в 1,33 раза. Этим требованиям удовлетворяют текстолит и стеклотекстолит и не соответствуют используемые в настоящее время фторопласт, лавсан и другие полимеры. Опасная

зона, где достигаются максимальные напряжения, находится на внутренней поверхности второго или предпоследнего витков, то есть в следующих витках от зон закрепления.

4. Установлено, что наибольшее влияние на величину максимального давления на индуктор до начала перехода его материала из упругого в пластическое состояние оказывает внутренний диаметр индуктора, наименьшее – момент сопротивления сечения. Максимальную нелинейность этой зависимости дает предел текучести материала индуктора. Наибольшее совместное влияние на функцию отклика оказывают внутренний диаметр и предел текучести.

5. Разработана конструкция и технология изготовления индукторных систем на «обжим» с токопроводом сварного типа со стоимостью изготовления в три раза ниже по сравнению с индукторными системами с токопроводом, выполненным по технологии точения, что может снизить себестоимость обрабатываемых деталей и уменьшить время на подготовительные работы.

6. Разработаны технологические оснастки, позволяющие расширить возможности применения технологии МИОМ в серийном производстве для обработки тонкостенных полых осесимметричных деталей из различных металлов и сплавов, повысить точность изготавливаемых деталей за счет сборной конструкции данных приспособлений.

7. Результаты исследований использованы для разработки технологических процессов изготовления деталей «Корпус» и «Обтюратор», внедренных на серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». Общий экономический эффект при внедрении составляет более 1,5 млн рублей.

8. Отдельные материалы исследования использованы на предприятии АО «Тулаточмаш», в учебных процессах кафедр «Механика и процессы пластического формоизменения» (МиППФ) ТулГУ и А2 «Технология конструкционных материалов в производстве ракетно-космической техники» БГТУ «Военмех».

Научные и практические результаты диссертации рекомендуется применять при подготовке технологических операций магнитно-импульсной обработки по

схеме «обжим» тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы связаны с расширением номенклатуры изделий обрабатываемых методом МИОМ.

Список литературы

1. Drastik, F. Možnosti elektromagnetického tváření kovu / F. Drastik, M. Vocol, I. Smrcka // *Strojirenstvi*. – 1965. – № 3. – P. 222-225.
2. Drehmann, R. Experimental and Numerical Investigations into Magnetic Pulse Welding of Aluminum Alloy 6016 to Hardened Steel / R. Drehmann, C. Scheffler, S. Winter [and etc.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 5(3). – P. 66. – DOI: 10.3390/jmmp5030066.
3. *Elektrotechnik Zeitschrift*, Bd. 16. – 1964. – № 18. – P. 529-585.
4. Furth, H. P. New Ideas on magnetic Forming / H.P. Furth, R.W. Waniek // *Metalworking Production*, v. 106. – 1962. – P. 18 (50).
5. Furth, H. P. Production and Use of high transient magnetic Fields / H. P. Furth, R. W. Waniek // *Review of Scientific Instruments*. – 1956 – Vol. 27, I.4 – P. 195-203.
6. Hai-ping, Y. Tendency of homogeneous radial deformation during electromagnetic compression of aluminium tube / Y. Hai-ping, L. Chun-feng, L. Da-hai, M. Xian // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2020. – № 20(1). – P. 7-13.
7. Heggemann, T. Comparative Analysis of Electrohydraulic and Electromagnetic Sheet Metal Forming against the Background of the Application as an Incremental Processing Technology / T. Heggemann, V. Psyk, A. Oesterwinter [and etc.] // *Metals*. – 2022, 12(4). – P. 660. – <https://doi.org/10.3390/met12040660>.
8. Kapitsa, P. L. Method of Producing Strong Magnetic Fields / P.L. Kapitsa // *Proceeding of Royal Society Academy*. – 1924. – № 105. – P. 691-710.
9. Kaushik, D. Design of Pulse Forming Systems for Pulsed Electromagnetic Manufacturing Applications / D. Kaushik, M.J. Thomas // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2022. – Vol. 50, №10 – P. 3677 – 3684. – DOI: 10.1109/TPS.2022.3204106.
10. Körner, J. Numerical Simulation of Magnetic Pulse Welding: Insights and Useful Simplifications / J. Körner, G. Göbel, B. Brenner, E. Beyer // *Proceedings of the 5th International Conference «High Speed Forming 2012»*. – Dortmund, 2012. – P. 315-324.

11. L'Eplattenier, P. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled / P. L'Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft // Mechanical Thermal Electromagnetic Simulations, Proceedings of the 3 International Conference «High Speed Forming 2008». – Dortmund, 2008. – P. 85-96.
12. Langlois, A. P. What magnetic forming can do / A. P. Langlois // American Machinist. – 1961. – Vol. 105. – P. 7.
13. LS-DYNA: User's manual // Livermore software technology corporation, 2014 – Vol. III. – 183p.
14. Magnetic Forming comes to Britain // Metalworking Production – 1963. – Vol. 107. – P. 69-70.
15. Mamutov, A. V. Experimental-analytical method of analyzing performance of coils for electromagnetic forming and joining operations / A. V. Mamutov, S. F. Golovashchenko, V. S. Mamutov // Journal of Materials Processing Tech. – 2018. – P. 86-95.
16. Porstmann, S. A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends / S. A. Porstmann, T. Wannemacher, W. G. Drossel // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 60. – P. 366-383. – <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.041>.
17. Post, R. H. Guest Appearance on / R. H. Post // Science in Action, KQED. – San Francisco, 1958 г. – P. 74-76.
18. Progress Industrial Systems SA: [Electronic resource]. – 2023. – URL: <https://www.progressindustrialsystems.com/> (дата обращения: 18.04.2023).
19. Proskuriakov, N. E. Longitudinal stress waves in viscoelastic and plastic rods / N. E. Proskuriakov, I. V. Lopa, I. V. Zverev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – P. 1441. – DOI:10.1088/1742-6596/1441/1/012109.
20. Proskuriakov, N. E. Simulating the process of workpiece diameter reduction / N. E. Proskuriakov, I. V. Zverev, E. V. Lisovskay // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. – 2020. – Vol. 1. – P. 168-174. – DOI: 10.34660/INF.2020.13.65.025.
21. Proskuriakov, N. E. The effect of heat transfer on the stress-strain material state considering the final rate of heat spread / N. E. Proskuriakov, I. V. Lopa, I. V. Zverev

// Journal of Physics: Conference Series. – 2021. –P 1901. –DOI:10.1088/1742–6596/1901/1/012122.

22. PST Products / /Официальный сайт компании: [сайт]. – 2023. –URL: <https://www.pstproducts.com/> (дата обращения: 22.06.2023).

23. Psyk, V. Determination of Material and Failure Characteristics for High-Speed Forming via High-Speed Testing and Inverse Numerical Simulation / V. Psyk, C. Scheffler, M, Tulke [and etc.] // J. Manuf. Mater. Process . – 2020. – № 4(2). – P. 31. – DOI: [10.3390/jmmp4020031](https://doi.org/10.3390/jmmp4020031).

24. Psyk, V. Electromagnetic forming—A review / V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey [and etc.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – P. 787-829.

25. Psyk, V. Electromagnetic pulse forming / V. Psyk, M. Linnemann, S.i Gerd // Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques, Elsevier Series in Mechanics of Advanced . – 2020. – P. 111-142. -- DOI: [10.1016/B978-0-12-818232-1.00004-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818232-1.00004-7).

26. Xiaohui, C. Incremental electromagnetic-assisted stamping (IEMAS) with radial magnetic pressure: A novel deep drawing method for forming aluminum alloy sheets / C. Xiaohui, L. Jianjun, M. Jianhua [and etc.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. -- 233. – P. 79-88.

27. Xiaohui, C. Tube bulging process using multidirectional magnetic pressure / C. Xiaohui, M. Jianhua, L. Jianjun [and etc.], // Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – Vol. 90. – P. 2075-2028. – DOI: [10.1007/s00170-016-9498-z](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9498-z).

28. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

29. Алиевский, Б. Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек / Б. Л. Алиевский, В. Л. Орлов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.

30. Баранов, М. И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности / М. И. Баранов // Електротехніка і Електромеханіка. 2009. – № 1. – С. 42-54. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=qcrabc> (дата обращения: 07.09.2023)

31. Барвинок, В. А. Выбор материалов для изготовления индукторных систем / В. А. Барвинок, Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008 – № 1. – С. 97-102.
32. Барвинок, В. А. Высокоэффективные технологические процессы изготовления трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В. А. Барвинок, А. Н. Кириллин, А. Д. Комаров // Москва: Наука и технология.– 2002. – 394 с.
33. Барвинок, В. А. Повышение эксплуатационных свойств деталей летательных аппаратов при интенсификации процессов штамповки / В. А. Барвинок, С. Г. Дементьев, В. П. Самохвалов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – Т. 6. – С. 13-16.
34. Барвинок, В. А. Экспериментальные исследования тепловых полей в индукторных системах при магнитно-импульсной штамповке / В. А. Барвинок, Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008– № 1. – С. 103-110.
35. Батыгин, Ю. В. Индукторная система с притягивающим экраном и плоским прямоугольным соленоидом / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, С. А. Шиндерук [и др] // Автомобильный транспорт. – 2017. – С. 146–154.
36. Батыгин, Ю. В. Индукторные системы для магнитно-импульсной раздачи труб прямоугольной формой поперечного сечения / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов [и др] // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 1. – С. 33-35.
37. Батыгин, Ю. В. Экспериментальные исследования процессов в индукторной системе притягивающим экраном при введении дополнительного витка / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, С. А. Шиндерук // Електротехніка і Електромеханіка. – 2014. – № 5. – С. 58-61. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22104737> (дата обращения: 06.09.2023).
38. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г.М. Кобельков//Москва: Наука. – 1987. – 598 с.

39. Белый, И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хищенко // Харьков: Выща школа. – 1977. – 168 с.
40. Беляева, И. А. Компьютерное моделирование процесса магнитно-импульсного обжима трубчатого образца на цилиндрическую оправку / И. А. Беляева, В. А. Глушечков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, 4(6) – С. 1027–1034.
41. Бенгус, В. С. Пояс Роговского для измерения импульсных потоков / В. С. Бенгус // Вестник Харьковского политехнического института. – 1974. – С. 71-78.
42. Бобин, К. Н. Решение практических проблем применения магнитно-импульсной обработки для повышения долговечности тонколистовых деталей летательных аппаратов / К. Н. Бобин, Н. А. Рынгач, Н. В. Курлаев // Научный вестник НГТУ. – 2014. – 1(54). – С. 165-171.
43. Большаков, Г. П. Конструкции индукторов для обжата трубчатых заготовок / Г. П. Большаков, А. А. Есин, Н. Н. Колесниченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 1. – С. 6-8.
44. Бондалетов, В. Н. Определение параметров схем замещения при разряде емкостного накопителя на плоскую спиральную катушку, помещенную над проводящим полупространством / В. Н. Бондалетов, Е. И. Чернов // Высоковольтная импульсная техника. – 1975. – № 2. – С. 14-20.
45. Бондалетов, В. Н. Эквивалентные параметры при нестационарном распределении импульсного электромагнитного поля в проводнике / В. Н. Бондалетов // Электричество. – 1975. – № 8. – С. 55-58.
46. Брон, О. Б. Давление на цилиндрическую деталь при магнитно-импульсной обработке металлов / О. Б. Брон, В. П. Ечепурин // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1968. – № 5. – С. 495-502.
47. Брон, О. Б. Многовитковые индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов / О. Б. Брон, А. М. Сегаль // Ленинград. – 1974. – С. 37-43.
48. Брон, О. Б. Электромагнитное давление / О. Б. Брон // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1975. – № 3. – С. 227-234.

49. Бучинский, В. В. Причины разрушения индукторов при магнитно-импульсной обработке металлов / В. В. Бучинский, А. К. Талалаев, В. П. Чибисов // Передовой производственный опыт. – 1978. – № 2. – С. 44-47.
50. Галкин, И. А. Исследование магнитного поля и индуктивности тонкостенного одновиткового цилиндрического индуктора, расположенного соосно с цилиндрической заготовкой / И. А. Галкин, Ю. А. Попов // Задачи динамики электрических машин. – 1986. – С. 69-73.
51. Галкин, И. А. Расчет индуктивности одновиткового цилиндрического индуктора конечной высоты трапецеидальной формы, с соосно расположенной внутри него цилиндрической заготовкой / И. А. Галкин, Ю. А. Попов // Расчет и оптимизация электромагнитных устройств и систем управления электроприводом. – 1985. – С. 154-159.
52. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
53. Глущенко, В. А. Взаимодействие деформируемой импульсным магнитным полем цилиндрической заготовки с оснасткой. Компьютерное моделирование / В. А. Глущенко, И. А. Беляева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – №4: Т. 18. – С. 71-75.
54. Глущенко, В. А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов: учебное пособие / В. А. Глущенко. – Самара: Учебная литература, 2013. – 148 с.
55. Глущенко, В. А. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глущенко, В. Ф. Карпухин. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2018. – 64 с.
56. Глущенко, В. А. Моделирование процесса магнитно-импульсного обжима цилиндрических / В. А. Глущенко, И. А. Беляева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – 2: Т. 17. – С. 113-118.
57. Глущенко, В. А. Основные направления совершенствования индукторов для магнитно-импульсной обработки. повышение их прочности и ресурса / В.

А. Глушечков, И. В. Зверев, В. И. Песоцкий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 67-71.

58. Глушечков, В. А. Раздача труб импульсным магнитным полем. Результаты компьютерного моделирования / В. А. Глушечков, И. А. Беляева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Т. 17 № 6 (3). – С. 657-665.

59. Глушечков, В. А. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография / В. А. Глушечков // Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.

60. Гнатов, А. В. Экспериментальное определение индуктивности инструментов-индукторов для магнитно-импульсной рихтовки / А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, О. С. Василевич // Автомобильный транспорт. 2014. – №. 34. – С. 105-110.

61. Голенков, В. А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / Голенков В. А., Дмитриев А. М., Кухарь В.Д. и др. - Москва: Машиностроение, 2004. - 464 с. - ISBN 5-217-03247-2. - Текст: электронный // URL: <https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN5217032472.html> (дата обращения: 24.04.2024).

62. Головащенко, С. Ф. Методика проектного расчета многовитковых цилиндрических индукторов для электромагнитной штамповки / С. Ф. Головащенко, А. Г. Овчинников, Р. Б. Шутов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 10. – С. 8-9.

63. Головащенко, С. Ф. Теория и методы проектирования технологических процессов электроимпульсной штамповки: специальность 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Головащенко Сергей Федорович ; М: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 1995. – 460 с.

64. Гречников, Ф. В. Компьютерное моделирование формообразующих операций магнитно-импульсной обработки металлов / Ф. В. Гречников, Д. Г. Черников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 5 (36). – С. 223-227.

65. Гулидов, А. И. Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов / А. И. Гулидов, Н. В. Курлаев, Л. А. Мержиевский [и др.] // Научный вестник НГТУ. – 2005. – 1 (19). – С. 97-110.
66. Драгунов, Ю. Г. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский [и др.]; под общей ред. Ю. Г. Драгунова, А. С. Зубченко – М.: 2014. – 1216 с.
67. Желтков, В. И. Моделирование индуктора, использованного в экспериментах С. Ф. Головащенко / В. И. Желтков, В. Д. Кухарь, А. Е. Киреева // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 151-153.
68. Зверев, И. В. Оценка возможности изготовления детали «обтюратор» методом магнитно-импульсной штамповки / И. В. Зверев, Д. Г. Черников, А. Н. Пасько [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2023. – №8 – С. 691-698. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-691-692.
69. Зверев, И. В. Исследование прочностных параметров спирального индуктора с использованием методов планирования эксперимента / И. В. Зверев, А. Н. Пасько, Н. Н. Архангельская // Наука Промышленность Оборона: труды XXIII Всероссийской конференции: в 4 т. - Т. 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – С. 17-21.
70. Зверев, И. В. Калибровка корпусных деталей магнитно-импульсной штамповкой / И. В. Зверев, Н. Е. Проскуряков // Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды двенадцатой общероссийской научно-практической конференции: в 2 т. – Т. 2. СПб: БГТУ «Военмех», 2020. С. 44 – 47.
71. Зверев, И. В. Моделирование и прочностной расчет спирального индуктора с использованием программы ANSYS / И. В. Зверев // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2021. – №. 12. – С. 159-163. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-154-159.
72. Зверев, И. В. Моделирование процесса обжима корпусных деталей ме-

тодом магнитно-импульсной штамповки / И. В. Зверев, А. Н. Пасько, Н. Н. Архангельская [и др] // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 603-608. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-603-604.

73. Зверев, И. В. Моделирование процесса раздачи корпусных деталей специального назначения / И. В. Зверев, Н. Е. Проскуряков, Д. Г. Черников // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2021. – Вып. 6. – С. 401-405. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-401-406.

74. Зверев, И. В. Разработка конструкций индукторных систем на «обжим» со спиралью сварного типа / И. В. Зверев, А. Н. Пасько, Н. Н. Архангельская // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2023. – №. 12. – С. 596-598. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-596-597.

75. Зверев, И. В. Расчет на прочность спирального индуктора с использованием методов планирования эксперимента / И. В. Зверев, Н.Е. Проскуряков // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2021. – №. 12. – С. 159-163. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-159-164.

76. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг. Пер. с англ. О. П. Троицкого и С. В. Соловьева. Под ред. докт. техн. наук Ю.К. Зарецкого. – М.: «Недра», 1974. – 542 с.

77. Иванов, Е. Г. К расчету индуктора на прочность / Е. Г. Иванов // Импульсное нагружение конструкций. – 1970. – № 1. – С. 11-26.

78. Иванов, Е. Г. Расчет режима магнитно-импульсной обработки трубчатых заготовок / Е. Г. Иванов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – № 7. – С. 17-20.

79. Иливицкий, Г. М. Вопросы тепловых расчетов и режимов эксплуатации неохлажденных импульсных индукторов / Г. М. Иливицкий, В. А. Лесский // Механические взаимодействия в сильных магнитных полях. – 1974. – С. 64-67.

80. Каблучев, С. В. Магнитно-импульсная обработка кольцевых сварных соединений / С. В. Каблучев, Д. С. Перлов, Д. В. Рогозин, Е. Л. Стрижаков // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Т. 18. – С. 31-37.
81. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин // Ленинград: Энергия, 1970. – 415 с.
82. Каськов, В. А. Исследование индукторов для магнитно-импульсной штамповки и разработка инженерных методов их расчета [Электронный ресурс]: дис. ... канд. техн. наук / В. А. Каськов ; Куйбышев. авиац. ин-т им. С. П. Королева. – Куйбышев, 1968.
83. Кирилин, А. Н. Высокоэффективные технологии изготовления трубчатых деталей пластическим деформированием / А. Н. Кирилин, Ю. Е. Паламарчук, В. С. Казаков [и др.] // Сборник трудов по ракетно-космической технике. – Самара: ГНП РКЦ «ЦСКБ Прогресс», 2003. – С. 133-137.
84. Кирилин, А. Н. Повышение предельных возможностей технологических процессов магнитно-импульсной формовки-калибровки тонкостенных деталей / А. Н. Кирилин, Н. П. Родин, Ю. Е. Паламарчук [и др.] // Сборник трудов по ракетно-космической технике. – Самара: ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2003. – С. 141-146.
85. Колесников, С.М. Анализ стойкости многовитковых цилиндрических индукторов для магнитно-импульсной штамповки / С.М. Колесников, В.А. Морозов, Р.Б. Шутов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1994. – № 10. – С. 27-30.
86. Курков, С. В. Метод конечных элементов в задачах динамики механизмов и приводов / С. В. Курков. – Спб.: Политехника, 1991. – 224 с.
87. Курлаев, Н. В. Влияние импульсной обработки на технологические дефекты деталей / Н. В. Курлаев, А. И. Гулидов. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 168 с.

88. Кухарь, В. Д. Анализ существующих индукторов для раздачи трубчатых заготовок / В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева, О.В. Сорвина // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2013. – №. 9, ч. 2. – С. 316-320.
89. Кухарь, В. Д. Математическое моделирование электромеханических процессов, протекающих в индукторе, для магнитно-импульсной штамповки /В. Д. Кухарь, А. Е. Киреева // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2011. – №. 5, ч. 3. – С. 130-135.
90. Кухарь, В. Д. Теория процессов штамповки анизотропных и неоднородных полых цилиндрических заготовок импульсным магнитным полем [Электронный ресурс]: Автореф. дис...докт. техн. наук/ В. Д. Кухарь, Тульск. политехн. ин-т. – Тула, 1989. – 35 с.
91. Лай, Д.З. Моделирование операций электромагнитной штамповки трубчатых заготовок с использованием пакета MATLAB/Simulink / Д.З. Лай// Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2013. – №. 5. – С. 50-56.
92. Магнитно-импульсная обработка металлов / Изд. 3-е доп. [Книга]. – Воронеж: ЭНИКМАШ, 1976. – 182 с.
93. Магнитно-импульсная штамповка полых цилиндрических заготовок / А.К. Талалаев, С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь, Н.Е. Проскуряков. – Тула: «Репроникс Лтд», 1998. – 238 с.
94. Маленичев, И. А. Повышение эффективности операций магнитно-импульсной штамповки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.03.05/ Маленичев Игорь Анатольевич - Тула, 1998. - 235 с.
95. Немцов М. В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности/ М.В. Немцов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
96. Новгородцев, А. Б. Электромеханические переходные процессы в колебательном контуре с изменяющейся индуктивностью / А. Б. Новгородцев, Г. А. Шнеерсон // Механические воздействия в сильных магнитных полях. – 1984. – С. 17-26.

97. Орешенков, А. И. Высокоскоростные методы листовой штамповки / А. И. Орешенков, В. А. Вагин, В. С. Мамутов. – Ленинград: ЛПИ, 1984. – 80 с.
98. Осипенко, Г. И. Анализ влияния параметров установки и системы индуктор-заготовка на величину давления магнитного поля / Г.И. Осипенко, Ю.А. Попов // Исследование новых электротехнологических процессов в металлургии и обработке. –1969. – С. 146-156.
99. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – Москва: ДМК Пресс, 2017. –210 с.
100. Паламарчук Ю. Е. Влияние технологических операций магнитно-импульсной штамповки на эксплуатационные характеристики индукторных систем / Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. П. Самохвалов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 2. – С. 205-211.
101. Паламарчук, Ю. Е. Повышение эксплуатационной надёжности индукторных систем при магнитно-импульсной штамповке / Ю. Е. Паламарчук // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. –№ 3 (2): Т. 11. – С. 564-567.
102. Пасько, А. Н. Математическая модель, описывающая магнитно-импульсную обработку упругопластических заготовок / А. Н. Пасько, А. Е. Киреева, Н. С. Геча // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2015. – №. 10. – С. 30-44.
103. Патент 2743270 Российская Федерация, МПК В 21 D 26/14 В. (2006.01) Устройство для формоизменения оболочки типа "стакан" магнитно-импульсной штамповкой: № 2020125491: заявлено 23.07.20: опубликовано 16.02.21 / Зверев И.В. и др.; заявитель и патентообладатель ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». — 8 с: ил.
104. Патент 2760970 Российская Федерация, МПК В 21 D 26/14 В, (2021.08) Устройство для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-импульсной штамповкой: № 2021108745: заявлено 30.03.21: опубликовано 01.12.21 / Зверев И. В. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. — 8 с: ил.
105. Патент 2790582 Российская Федерация, МПК В 21 D 26/14 В (2006.01). Индуктор для магнитно-импульсной обработки цилиндрических заготовок: №

2021134844: заявлено 26.11.21: опубликовано 27.02.23/ Зверев И. В. и др.; заявитель и патентообладатель БГТУ «ВОЕНМЕХ». — 8с: ил.

106. Петров, М. В. Магнитно-импульсная обработка заготовок типа оболочки вращения / М. В. Петров, В. А. Аврелькин // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 109-116.

107. Попов, Ю. А. Методика расчетов импульсных процессов в индуктивно-связанных системах при магнитно-импульсной обработке металлов: автореф. дисс... канд. техн. наук. – М.: 1970. – 18 с.

108. Попов, Ю. А. Некоторые особенности расчета процессов, использующих силовое воздействие импульсного магнитного поля / Ю. А. Попов // Электрофизические процессы при импульсном разряде. – 1977. – № 4. – С. 84-104.

109. Прокофьев, А. Б. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография / А. Б. Прокофьев, И. А. Беляева, В. А. Глущенко [и др.]. – Самара: Издательство СНЦ, 2019. – 140 с.

110. Проскуряков, Н. Е. Вопросы проектирования и перспективы применения магнитно-импульсных установок / Н. Е. Проскуряков, А. К. Талалаев // Международный конгресс «Конверсия, наука, образование». – Тула, 1993. – С. 26-29.

111. Проскуряков, Н. Е. Выбор рациональных параметров и компоновок магнитно-импульсных установок / Н. Е. Проскуряков // Исслед. в обл. теории, техн. и оборуд. штамп. пр-ва. – 1990. – С. 152-157.

112. Проскуряков, Н. Е. Моделирование процесса обжима корпусных деталей специального назначения / Н. Е. Проскуряков, И. В. Зверев // Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды тринадцатой общероссийской научно-практической конференции: в 2 т. – Т. 2. СПб: БГТУ «Военмех», 2021. С 150-154

113. Самарский университет: официальный сайт. – Самара. – URL: <https://ssau.ru/alaravel/public/index.php/news/17916-samarskiy-universitet-izgotovil-samuyu-moshchnuyu-v-rossii-promyshlennuyu-magnitno-impulsnyuyu-ustanovku> (дата обращения: 13.06.2023).

114. Самохвалов, В.Н. Исследование влияния параметров процесса магнитно-импульсной сборки на характеристики соединения многопроволочных проводов контактной сети / В.Н. Самохвалов, Ж.В. Самохвалова // Вестник СамГУПС — 2012. — №. 1. — С. 116-120.

115. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов / В. Ю. Астапов, Л. Л. Хорошко, Паям Афшари, А. Л. Хорошко // Труды МАИ. — №. 87. — URL: www.mai.ru/science/trudy/ (дата обращения: 20.12.2023).

116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666161 Российская Федерация. Программный комплекс расчета операций обжима и раздачи трубчатых деталей магнитно-импульсной штамповкой : заявлено 19.11.2019 : опубликовано 05.12.2019 / Зверев И.В. [и др.]; правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ, Бюл. № 12. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

117. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614180 Российская Федерация. Моделирование и проектирование технологических операций обжима, раздачи и калибровки трубчатых деталей магнитно-импульсной штамповкой: заявлено 26.01.2021: опубликовано 19.03.2021 / Зверев И. В. [и др.]; правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ, Бюл. № 3 – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

118. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614234 Российская Федерация. Программа расчета электротехнический параметров операций обжима и раздачи трубчатых деталей магнитно-импульсной штамповкой: заявлено 26.01.2021: опубликовано 22.03.2021 / Зверев И.В. [и др.]; правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ, Бюл. № 4 – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

119. Селищев, В. А. Расширение технологических возможностей операций и оборудования магнитно-импульсной штамповки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.03.05 / Селищев Валерий Анатольевич.– Тула, 2000 –227 с.

120. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебник и практикум для вузов / Н. И. Сидняев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 495 с.

121. Сосенушкин, Е. Н. Теоретические и технологические аспекты обжима трубных заготовок / Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская, Д. В. Хачатрян, В. Ю. Киндеров // Известия МГТУ «МАМИ». — 2013. — 2 (16): Т. 2. — С. 139-145.

122. Стукалов, С. А. Технологический процесс изготовления деталей сложной формы в производстве летательных аппаратов путем обжима трубчатых заготовок импульсным магнитным полем : автореф. дис...канд.техн. наук. — Куйбышев, 1986. — 20 с.

123. Талалаев, А. К. Высокопрочные индукторы для магнитно-импульсной обработки металлов / А. К. Талалаев, С. П. Яковлев, В. Д. Кухарь // Тезисы Всесоюзного совещания «Расчет, проектирование, технология изготовления, эксплуатация индукторных систем». — Тула: ТулПИ, 1988. — С. 44-47.

124. Талалаев, А. К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов / А. К. Талалаев. — Москва: Информтехника, 1992. — 143 с.

125. Талалаев, А. К. Определение конструктивных параметров оборудования / А. К. Талалаев, И. А. Маленичев // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного пр-ва. — 1998. — С. 78-82.

126. Талалаев, А. К. Создание новой технологии, оборудования и индукторных систем магнитно-импульсной обработки металлов для массового производства: специальность 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Талалаев Алексей Кириллович — Тула, 1993. — 39 с.

127. Талалаев, А. К. Температурные условия эксплуатации индукторов при магнитно-импульсной обработке / А. К. Талалаев, С. П. Яковлев, В. Д. Кухарь // Чебоксары: Сб. ЧГУ «Импульсное нагружение конструкций» — 1978. — № 9. — С. 58-69.

128. Талалаев, А. К. Экспериментальное исследование условий работы индуктора при МИОМ / А. К. Талалаев, Н. Г. Кресс // Сборник ТПИ «Технология машиностроения». – Тула, 1975. – С. 118-125.
129. Фертик, С. М. Тепловые процессы в спиральных индукторных системах / С. М. Фертик, В. Ю. Хворост // Вестник Харьковского политехнического института. – 1974. – № 94. – стр. 32-37.
130. Хаустов, В. М. Индуктор для деформирования трубчатой оболочки импульсами магнитного поля / В. М. Хаустов // Омский научный вестник. – 2001. – № 15. – С. 70-72.
131. Хаустов, В. М. Совмещенное многопереходное деформирование тонкостенной оболочки импульсами магнитного поля / В. М. Хаустов // Омский научный вестник. – 2001. – № 17. – С. 98-100.
132. Хаустов, В. М. Устройство для деформирования трубчатой оболочки энергией магнитного поля / В. М. Хаустов // Омский научный вестник. – 2001. – № 14. – С. 108-110.
133. Черников, Д. Г. Исследование влияния обработки расплавов импульсным магнитным полем высокой напряженности на структуру и свойства алюминий-кремниевых сплавов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.04 – 178 с.
134. Черников, Д. Г. Исследование процесса магнитно-импульсной формовки с учетом эффекта просачивания магнитного поля сквозь заготовку/ Д.Г. Черников, В.Ф. Карпухин, В.А. Глушечков// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 75-80.
135. Шнеерсон, Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов / Г. А. Шнеерсон . – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
136. Щиголева, С.А. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических результатов исследований для возбуждаемых полей и токов в индукторной системе с коническим отверстием / С.А. Щиголева // Вестник ХНАДУ. – 2012. – № 56. – С. 61-65.

137. Юдаев, В. Б. Основы проектирования эффективных управляемых импульсных процессов штамповки листовых деталей летательных аппаратов: автореф. дис... докт. техн. наук. – Москва, 1993. – 42 с.

138. Юсупов, Р. Ю. Многопостовые магнитно-импульсные установки промышленного назначения / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глущенко, И. В. Зверев // Кузнечно-штамповочное производство. – 2020. – № 2. – С. 20-27.

139. Юсупов, Р. Ю. Универсальные и специальные магнитно-импульсные установки нового поколения / Р. Ю. Юсупов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – 5 (36). – С. 125-130.

140. Юсупов, Р. Ю. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глущенко. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2013. – 128 с.

УТВЕРЖДАЮ
Исполнительный директор
ПАО «Императорский Тульский
оружейный завод»
А. Л. Бахно



« » 20 г.

АКТ

о внедрении в производство научных результатов
диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Зверева И.В.

Председатель комиссии:

Директор по техническим
вопросам ПАО «ИТОЗ» Семенов А.А.

Члены комиссии:

Директор по производству ПАО «ИТОЗ» Колесников М.Ю.

Главный технолог ПАО «ИТОЗ» Курочкин В.В.

Начальник цеха №47 Орешин А.А.

При проектировании технологических процессов с использованием операции
магнитно-импульсной обработки металлов изготовления деталей:

01.515.500.032 «Корпус», 01.516.421.030 «Обтюратор», были использованы
следующие результаты диссертационного исследования Зверева И.В.:

1. Методика расчета параметров магнитно-импульсной обработки.
2. Методика расчета и проверки на прочность индукторных систем.
3. Приспособления для обработки заготовок.

При проектировании технологических процессов изготовления деталей:

01.535.011.222 «Обтекатель», 01.245.011.001 «Обтекатель», 01.245.510.001 «Корпус» – индукторные системы с токопроводом сварного типа.

Общий экономический эффект за счет внедрения данных результатов составил более 1500000 рублей.

Председатель комиссии:

Директор по техническим
вопросам ПАО «ИТОЗ»

Семенов А.А.

Члены комиссии:

Директор по производству
ПАО «ИТОЗ»

Колесников М.Ю.

Главный технолог
ПАО «ИТОЗ»

Курочкин В.В.

Начальник цеха №47

Орешин А.А.

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
АО «Тулаточмаш»



Б.Н. Вытягов

« » 2024 г.

АКТ

о внедрении в производство научных результатов
диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Зверева И.В.

Председатель комиссии:

ВрИО главного технолога Гольнев И.А.

Члены комиссии:

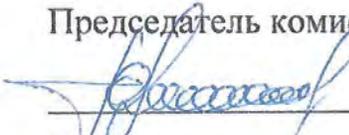
Заместитель начальника МП-5р по технике Захаров А.А.

Начальник отдела ТПиОП Суслин А.А.

На предприятии АО «Тулаточмаш» при проектировании технологических процессов с использованием операции магнитно-импульсной штамповки используются следующие результаты исследования Зверева И.В.:

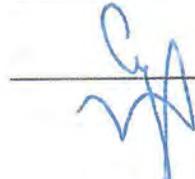
1. Методика расчета параметров магнитно-импульсной обработки.
2. Методика расчета и проверки на прочность индукторных систем.

Председатель комиссии:

 Гольнев И.А.

Члены комиссии:

 Захаров А.А.

 Суслин А.А.



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор ТулГУ,
д.т.н., профессор

В.В. Котов

« _____ » _____ 2024 г.

АКТ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Отдельные результаты кандидатской диссертационной работы соискателя ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» Зверева Ивана Вячеславовича «Совершенствование технологических операций магнитно-импульсной обработки по схеме «обжим» тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства», посвященной решению актуальной научной задачи, а именно, теоретическому и экспериментальному обоснованию новой конструкции токопровода индукторных систем на «обжим», снижающей себестоимость данного инструмента для применения в серийном производстве, а также разработке новых приспособлений для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок методом МИОМ в условиях серийного производства, повышающих геометрическую точность этих изделий, использованы в учебном процессе при подготовке магистров направления 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» с профилем «Высокоэффективные методы обработки металлов давлением» и включены в разделы курсов «Малоотходные ресурсосберегающие технологии штамповки» и «Магнитно-импульсная обработка металлов», а также в научно-исследовательской работе студентов, при курсовом проектировании и выполнении выпускных квалификационных работ.

Заведующий кафедрой МиППФ
д.т.н., проф.


С.Н. Ларин



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д. 1
Тел.: (812) 316-2394, Факс: (812) 490-0591
e-mail: bgtu@voenmeh.ru www.voenmeh.ru
ИНН 7809003047

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности и цифровизации БГТУ
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

д.т.н., проф. Шашурин А.Е.

05.03.2024

05.03.2024 № А2-01

На № _____ от _____

АКТ

о внедрении в учебный процесс научных результатов
диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Зверева И.В.

Председатель комиссии
Заведующий кафедрой А2
«Технологии конструкционных
материалов и производства
ракетно-космической техники»,
к.т.н., доцент

Члены комиссии
доцент кафедры А2, к.т.н.
ст. преподаватель кафедры А2,
ст. преподаватель кафедры А2,

А.Ю. Андриюшкин

Г.А. Воробьева
А.Н. Кочетков
В.А. Ленина

Результаты диссертационного исследования Зверева И.В., представленного на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7 «Технологии и машины обработки металлов давлением», используются в учебном процессе кафедры А2 «Технология конструкционных материалов и производство ракетно-космической техники» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова:

– при изучении учебных дисциплин образовательных программ «Композитные конструкции в ракетно-космической технике» и «Композиты и покрытия в ракетно-космической технике», при проведении исследований и разработок в рамках прохождения научно-исследовательской, проектно-технологической и преддипломной практики и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Председатель комиссии

Члены комиссии

А.Ю. Андриюшкин

Г.А. Воробьева

А.Н. Кочетков

В.А. Ленина