

АЛЕХИНА Валентина Константиновна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СИЛОПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛА
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет).

Научный руководитель:

Гречников Федор Васильевич – академик РАН, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», заведующий кафедрой обработки металлов давлением.

Официальные оппоненты:

Кухарь Владимир Денисович - доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра «Теоретической механики», заведующий кафедрой;

Филимонов Сергей Вячеславович – доктор технических наук, акционерное общество «АэроКомпозит-Ульяновск», начальник отдела подготовки производства.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

Защита состоится 17 сентября 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.215.03, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/resources/dis_protection/alekhina

Автореферат разослан «__» июля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Я. А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди всей номенклатуры деталей современного машиностроения большую группу составляют те что, изготавливаются из тонкостенных листовых заготовок с использованием операций «вырубка-пробивка». Такие детали (небольших размеров) используются в электротехнической, автомобильной, часовой, аэрокосмической и других отраслях промышленности. Это, например, различного рода электроконтакты, элементы приборов, часовых механизмов, прокладки клапанов и исполнительных органов управления и многие другие. Их изготовление, как правило, осуществляется в инструментальных штампах на кривошипных, гидравлических прессах или с использованием устройств и оборудования специальных видов листовой штамповки (эластичной средой, высокоэнергетических). Перемещения инструмента или вырубаемой заготовки составляют от долей до нескольких миллиметров, а сила вырубки-пробивки несколько сотен ньютонов. При этом объем производства может быть, как единичным, так и серийным.

В настоящее время для реализации технологий вырубки-пробивки используются прессы с большим усилием деформирования. Их применение, особенно в условиях мелкосерийного производства, технически и экономически нецелесообразно (не эффективно) из-за чрезмерных развиваемых по сравнению с потребным для производства тонколистовых деталей усилий деформирования, большого потребления ими электроэнергии, значительных массогабаритных характеристик, большой занимаемой площади, сложности перемещения заготовок с одного прессы на другой.

Аналогичные проблемы возникают и при использовании испытательных приборов, реализующих небольшие упругопластические деформации, например, твердомеров.

В связи с этим, поиск новых источников нагружения, например, возникающих при структурных превращениях в материалах с эффектом памяти формы и создание на их основе деформирующих устройств для пластического деформирования тонких заготовок является актуальной задачей.

Степень разработанности. Большой объем работ по исследованию процессов, которые протекают в материалах с эффектом обратимой памяти формы, их функциональных свойств, а также по их применению в устройствах различного назначения провел научный коллектив Санкт-Петербургского государственного университета: С.П. Беляев, А.Е. Волков, В.А. Ермолаев, З.П. Каменцева, С.Л. Кузьмин, В.А. Лихачев, В.Ф. Мозгунов, А.И. Разов, Р.Ю. Хайров. Также по данной тематике выполняются работы на базе Национального исследовательского Томского государственного университета под руководством Ю.И. Чумлякова. В список научных школ по изучению материалов с эффектом памяти формы наряду с вышеуказанными входят: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук; Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации; Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; Сибирский федеральный университет, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) и др.

Анализируя патентно-литературные источники можно констатировать, что опубликованные в них результаты посвящены фундаментальным исследованиям в области материаловедения, аустенитно-мартенситных превращений. Большое количество работ отражают результаты практического использования материалов с эффектом памяти формы в медицине и технике, в качестве образования неразъемных соединений, различного рода привода.

Несмотря на большое количество публикаций в данном направлении, работ, посвященных тепловым эффектам, сопровождающим рабочий цикл (нагрев-охлаждение) и их влиянию на эффективность развития напряжений, не обнаружено; недостаточно работ по исследованию технологических и эксплуатационных характеристик (свойств) силоприводов, созданных на основе материалов с эффектом памяти формы, что не даёт возможности в полной мере создать методику их расчета и проектирования, особенно для деформирующих устройств. Это направление использования силоприводов с эффектом памяти формы в обработке металлов давлением освещено наиболее слабо. Восполнение этих пробелов и обуславливает актуальность данной диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является совершенствование силоприводов из материалов с эффектом памяти формы и создание на их основе высокоэффективного деформирующего и испытательного оборудования и устройств для реализации технологий обработки металлов давлением.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи исследования:

1. Установить влияние неравномерности нагрева силовых элементов на эффективность возникновения напряжений в процессе реализации в материале эффекта памяти формы.
2. Разработать конструкции многозвенных силоприводов из термически тонких силовых элементов.
3. Осуществить компьютерное моделирование тепловых процессов (нагрев-охлаждение) в силовых элементах разной формы и геометрических размеров при использовании различных методов нагрева (пропусканием тока, конвективный и лучистый теплообмен).
4. Определить технологические и эксплуатационные свойства силоприводов для использования их при разработке деформирующих устройств и оборудования.
5. Создать и испытать линейку разработанных силоприводов с различным усилием деформирования, перемещением и с использованием разных типов силовых элементов.
6. Разработать, изготовить и опробовать опытно-промышленные головные образцы деформирующих и испытательных устройств и оборудования с силоприводом из материала с эффектом памяти формы (пресс, штамп-пресс, твердомер).

Область исследования: содержание диссертационной работы соответствует п.5 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штампового инструмента» и п.6 «Оптимизация конструкций, разрабатываемых кузнечных, прессовых, штамповочных и прокатных машин, их взаимосвязь со средствами автоматизации и механизации» областей паспорта специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением.

Объект исследования: оборудование и деформирующие устройства процессов вырубки-пробивки тонколистового материала.

Предметом исследования является силоприводы из материала с эффектом памяти формы.

Научная новизна исследования:

1. Определен механизм эффективного развития напряжений, возникающих при реализации эффекта памяти формы, с учетом неравномерности нагрева силовых элементов.
2. Разработаны новые конструкции многозвенных силоприводов, использующих термически тонкие (проволочные, пластинчатые и стержневые) силовые элементы из сплава ТН-1 с эффектом памяти формы.
3. Осуществлено компьютерное моделирование тепловых процессов в силовых элементах разной формы и размеров при различных методах нагрева. Найдены значения минимального времени нагрева до рабочих температур; получены соответствующие уравнения регрессии.

4. Определены значения эксплуатационных свойств силовых элементов (связь скорости нагрева со скоростью развития усилий деформирования, величина возвратного усилия деформирования и т.д.), необходимые для обеспечения стабильной работы разработанных силоприводов из материала с эффектом памяти формы.

Научная значимость исследования: в результате проведенных исследований предложена методика проектирования универсального многозвенного силопривода, силовые элементы которого выполнены из термически тонкого материала с эффектом памяти формы.

Практическая ценность исследования:

1. Разработаны конструкции деформирующих и испытательных устройств с силоприводом из материала с эффектом памяти формы.

2. Созданы действующие образцы деформирующего и испытательного оборудования, устройств с силоприводом из материала с эффектом памяти формы.

3. Изготовленный пресс-штамп испытан в лабораторных условиях при производстве типовой детали «Контакт», используемой в изделиях ракеты-носителя «Союз-5» на предприятии АО «РКЦ «Прогресс».

Методология и методы исследования: Для моделирования тепловых процессов, протекающих при нагреве и охлаждении силовых элементов, использовался программный комплекс ANSYS Mechanical. Экспериментальные исследования свойств силоприводов осуществлены на специально созданном стенде с использованием современных методик, аппаратуры и приборов: замер температур (тепловизор FLIR Thermovision A20M), замер развиваемых напряжений и деформаций, усилий и перемещений (тензометрические датчики), токовых нагрузок. Фиксация полученных измерений осуществлялась на многолучевом осциллографе LeCroy Wavesurfer 44Xs-A в едином временном масштабе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Влияние неравномерности нагрева силового элемента на эффективность развития усилий деформирования при реализации эффекта памяти формы в сплаве ТН-1.

2. Новые конструкции многозвенных силоприводов из термически тонких силовых элементов.

3. Результаты компьютерного моделирования тепловых процессов в силовых элементах различных форм, геометрических размеров и при использовании разных методов их нагрева (нагрев пропусканием тока, конвективный и лучистый теплообмен), позволившие обеспечить эффективность режимов работы силопривода.

4. Результаты экспериментальных исследований технологических и эксплуатационных свойств силовых элементов.

5. Методика проектирования силоприводов.

6. Линейка силоприводов с различными усилием деформирования и перемещением. Результаты их испытаний.

7. Действующие образцы деформирующего и испытательного оборудования и устройств, результаты их опытно-промышленной проверки и рекомендации по практическому использованию.

Степень достоверности.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современного лицензионного программного продукта Ansys Mechanical. Экспериментальные исследования осуществлялись на современном сертифицированном оборудовании, оснащенном новейшими средствами измерения. Подтверждением достоверности полученных результатов исследований является хорошее совпадение полученных данных компьютерного моделирования и экспериментов.

Апробация результатов диссертации.

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: IV Международная научно-техническая конференция Металлофизика. Механика материалов и процессов деформирования (г. Самара, 2015 г.); XIII Международная молодежная научная конференция «Королёвские чтения» (г. Самара,

2015 г.); XIX Форум по проблемам науки, техники и образования (г. Москва, 2015 г.); V Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (г. Томск, 2016 г.); 64ый Всемирный салон инноваций, научных исследований и новых технологий «Brussels Innova» (г. Брюссель, 2016 г.); XIV Международная молодёжная научная конференция «Королёвские чтения» (г. Самара, 2017 г.); 15 Международная школа – конференция «Новые материалы – материалы инновационной энергетики: разработка, методы исследования и применение» (г. Москва, 2017 г.); 19th International Conference on Joining Materials (г. Хельсингёр, 2017 г.); XII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, 2017 г.); XIII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, 2018 г.); XLV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2019 г.); VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (г. Самара, 2019 г.); XV Международная молодёжная научная конференция «Королёвские чтения» (г. Самара, 2019 г.); Международная выставка изобретений «Inventions Geneva» (г. Женева, 2021 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 20 научных трудах, в том числе в 3 статьях, опубликованных в рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьях – в научных изданиях, индексируемых базой данных Scopus, 5 патентах на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (111 наименования) и трех приложений. Диссертация изложена на 144 страницах, содержит 91 рисунок и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, дана краткая характеристика работы, включающая научную новизну, теоретическую и практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор экспериментальных и теоретических исследований по теме работы. Рассмотрены структурные превращения никелида титана. Описаны области применений материалов с эффектом памяти формы в технике. В конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию эффективности развития усилий деформирования, развиваемых силоприводами из материала с эффектом памяти формы, и новым конструктивным решением.

При разработке силоприводов из материала с эффектом памяти формы было обнаружено снижение их эффективности с увеличением площади поперечного сечения. Так для получения усилия деформирования силопривода в несколько тысяч ньютонов потребовалось увеличить диаметр стержневого силового элемента до 20-25 мм. Однако вовремя испытаний таких стержневых элементов было выявлено значительное снижения их эффективности. Проведенный анализ показал, что возможной причиной такого поведения силового элемента является неравномерность его нагрева по сечению. Наружные слои стержня в результате лучистого теплообмена достигли температуры реализации эффекта памяти формы и были готовы проявить заложенную деформацию, однако внутренние холодные слои, не давали возможности для ее реализации.

Для проверки высказанного предположения был осуществлён поисковый эксперимент. Стержень выполнен составным – втулка-ось с обеспечением хорошего термического контакта между ними. Нагрев производился в электрической печи.

При достижении втулкой температуры мартенситного превращения, её осевой размер увеличивается, согласно наведенной памяти, а размер непрогретой до этой температуры оси остается неизменным (рисунок 1).

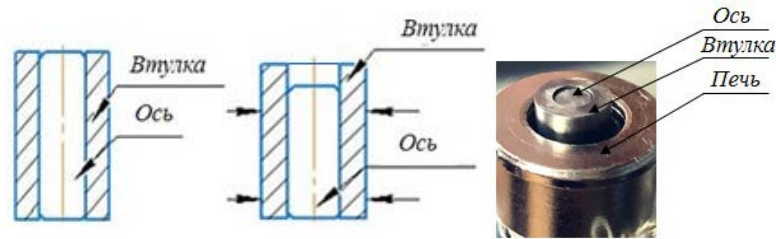
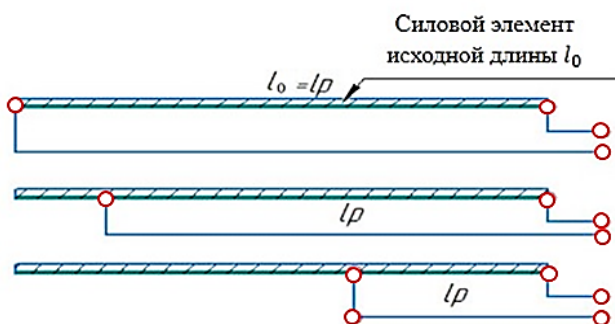


Рисунок 1 – Изменение размеров составного стержневого силового элемента

Следовательно, для эффективной работы силопривода, должна быть обеспечена равномерность его нагрева по сечению. Для достижения этого условия, силовой элемент должен быть термически тонким телом, т.е. критерий Био (Bi), характеризующий соотношение количества подводимой к поверхности тела теплоты и отводимого от нее к внутренним слоям в результате теплопроводности и численно равный отношению коэффициента теплоотдачи к поверхности тела, умноженного на толщину тела, к коэффициенту его теплопроводности не должен превышать $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \leq 0,2$.

Если неравномерность нагрева по сечению снижает эффективность работы силопривода из материала с эффектом памяти формы, то логично предположить, что и неравномерность нагрева силового элемента по длине, так же будет снижать его эффективность.

Был проведен следующий эксперимент. В качестве силового элемента использовалась проволока из сплава ТН-1. Нагрев проволоки $\varnothing 1,5$ мм осуществлялся пропусканием по нему тока. Точки подключения тока обеспечивают необходимую для эксперимента неравномерность нагрева по длине проволоки (рисунок 2).



○ – Точки подключения; l_0 – длина силового элемента; l_p – длина зоны нагрева

Рисунок 2 – Схема подключения тока к проволочному силовому элементу

Во всех случаях конечная температура нагрева составляла 110°C . Эффективность работы силового элемента оценивалась по развиваемому усилию (рисунок 3).

Таким образом установлено, что возникновение неравномерности нагрева по длине снижает развиваемое усилие.

Предложено новое техническое решение (Патенты РФ №163932, №172360) – конструкции многозвенного силопривода, состоящего из термически тонких элементов (проволоки, пластин) (рисунок 4). Одна из технических проблем возникающая при создании многозвенного силопривода, является проблема закрепления силовых элементов в единый сборочный узел силопривода. При работе силопривода происходило их выскальзывание из конструктивной заделки. Проблема надежного закрепления силовых элементов в сборочных узлах силопривода решена с использованием технологии магнитно-импульсной сборки – обжим кольца (Патент РФ №182028).

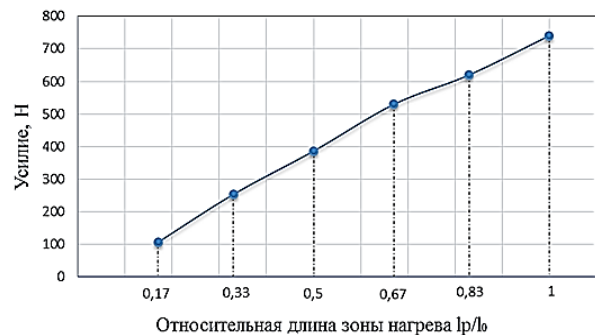


Рисунок 3 – Зависимость развиваемого силовым элементом усилия деформирования от относительной длины зоны нагрева l_p/l_0

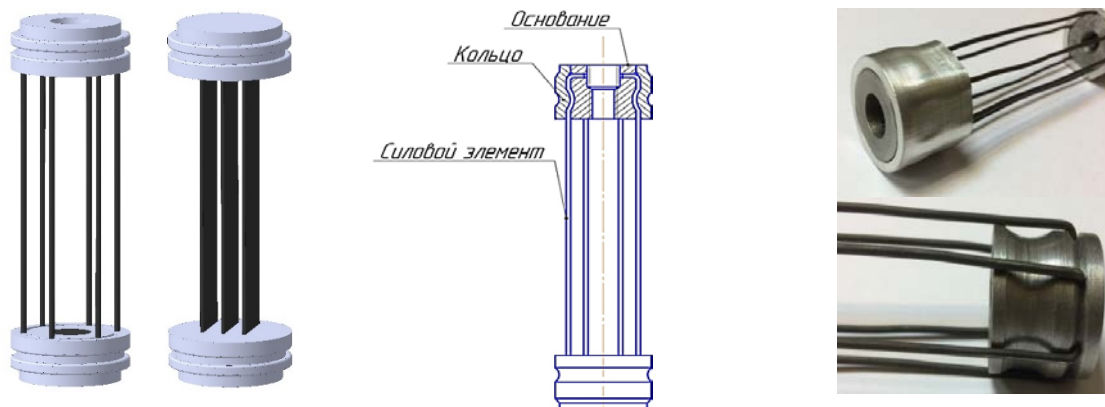


Рисунок 4 – 3D модель, схема и внешний вид многожильного силопривода с термически тонкими силовыми элементами

Термически тонкое тело (проволока, пластина, стержень) обеспечивает равномерность нагрева по сечению и, кроме того, значительно облегчает реализацию в них эффекта памяти формы, не требуя приложения значительных усилий.

Экспериментальная проверка подтвердила факт сложения усилий, создаваемых каждым силовым элементом в единое усилие силопривода. Так, силопривод из пяти проволочных силовых элементов диаметром 1 мм с усилием 300 Н каждый, развивает общее усилие силопривода ~1500 Н.

В третьей главе выполнено компьютерное моделирование процессов нагрева и охлаждения силового элемента с использованием программного комплекса Ansys, основанного на методе конечных элементов.

Циклическую работу силопривода обеспечивает многократный нагрев и охлаждение силовых элементов. Для доказательства равномерности нагрева силовых элементов по сечению и длине, выбора наиболее эффективного (быстрого и экономичного) метода нагрева осуществлено моделирование процессов теплопередачи. При этом рассматривались три схемы нагрева – пропусканием через силовой элемент электрического тока, обдув силового элемента нагретым воздушным потоком (конвективный теплообмен) и нагрев силового элемента в печи (лучистый теплообмен).

Охлаждение во всех случаях осуществляется конвективным теплообменом – воздушным потоком (сжатый воздух) с комнатной температурой.

Нагрев пропусканием тока. Моделирование процесса нагрева силового элемента пропусканием через него электрического тока проводилось при помощи связанного электротеплового расчета с использованием модулей Electric, в котором рассчитывалось электрическое поле, ток, протекающий по проводнику, и Transient Thermal, позволяющий рассчитать время, необходимое для нагрева до конечной температуры. Для расчета температурных полей учитывались физико-механические свойства сплава ТН-1.

Для построения сетки конечных элементов использовались шестигранные конечные элементы SOLID291 при выполнении электродинамического расчета со степенью свободы напряжения и элемент SOLID90 при расчете поля температур. Полученная сетка состояла из 50 тысяч узлов и 10 тысяч элементов. Источник нагружения – сила тока, действующая нормально одному из торцов проводника, вектор которой направлен в модель. На противоположном конце проводника задавалось нулевое напряжение (0 В). В качестве граничных условий принята естественная конвекция с поверхностями проводника при принятии в качестве окружающей среды воздух с температурой 20 °С.

На рисунке 5 показано полученное в результате расчета распределение температуры по поперечному сечению проволочного силового элемента, подтверждающие равномерность нагрева. Варьируемые при моделировании параметры: сила тока, форма и размеры поперечного сечения.

На рисунке 6 в качестве примера показан характер изменения температуры во времени, а в таблице 1 полученные значения времени нагрева до заданной температуры

110°C при использовании проволочных силовых элементов, в свою очередь в таблице 2 приведены значения необходимого времени для нагрева до 110°C силовых элементов других форм поперечного сечения при пропускании тока 20А.

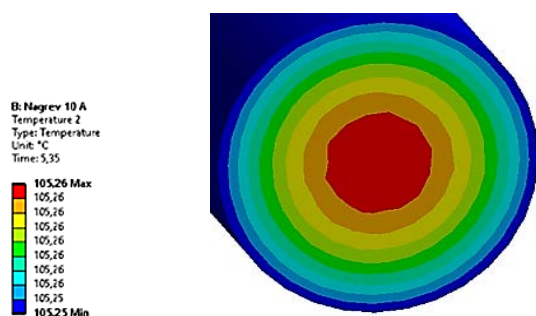


Рисунок 5 – Распределение температуры по поперечному сечению проволочных силовых элементов при пропускании по ним электрического тока

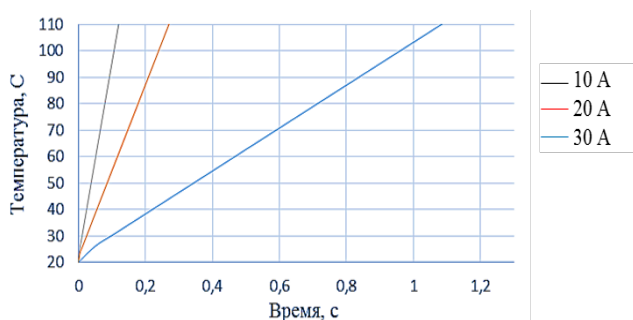


Рисунок 6 – График зависимости температура – время при различной силе тока для проволоки с диаметром поперечного сечения 1, 1,5 и 2мм

Таблица 1 – Время нагрева проволоки до температуры 110°C при различных диаметрах поперечного сечения и силе тока

Диаметр поперечного сечения, мм	Сила тока, А		
	10	20	30
1,0	1,09 с	0,27 с	0,12 с
1,5	5,68 с	1,42 с	0,63 с
2,0	17,89 с	4,35 с	1,95 с

Таблица 2 – Время нагрева силового элемента до температуры 110°C при различных геометрических формах и силе тока 20 А

Форма и размер поперечного сечения, мм	Сила тока, 20 А
Проволока диаметром 1,5	1,42 с
Стержень диаметром 10	499,98 с
Пластина 1x5	10,95 с

Конвективный теплообмен. Моделирование процесса конвективного теплообмена осуществлялась на принципах CFD (Computational Fluid Dynamic) расчетов в программном комплексе ANSYS CFX. Силовой элемент обдувался потоком воздуха с постоянной на входе температурой 110°C. Для построения расчётной области использовалась универсальная CAD-система ANSYS SpaceClaim Direct Modeler.

В качестве элементов сеточной модели использовалась гекса- и тетра- формы. Варьируемыми параметрами при моделировании процесса конвективного теплообмена является скорость воздушного потока (турбулентный режим обдува) – скорость потока на входе.

На рисунке 7 показано распределение температур по поперечному сечению и длине пластины, подтверждающее равномерность нагрева.

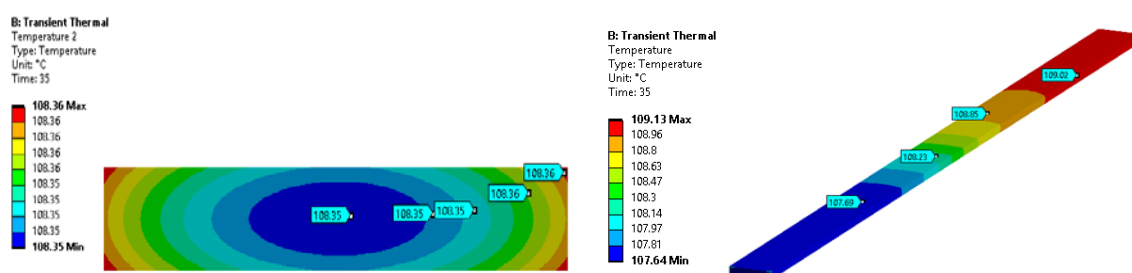


Рисунок 7 – Распределение температуры по поперечному сечению и длине пластины

На рисунке 8 в качестве примера, приведен характер изменения температуры во времени, а в таблице 3 даны значения времени нагрева до $T=110^{\circ}\text{C}$ для силовых элементов с диаметром поперечного сечения 1,0; 1,5 и 2 мм, в таблице 4 приведены данные времени нагрева проволочных, пластинчатых и стержневых силовых элементов до температуры 110°C при скорости потока 20 м/с.

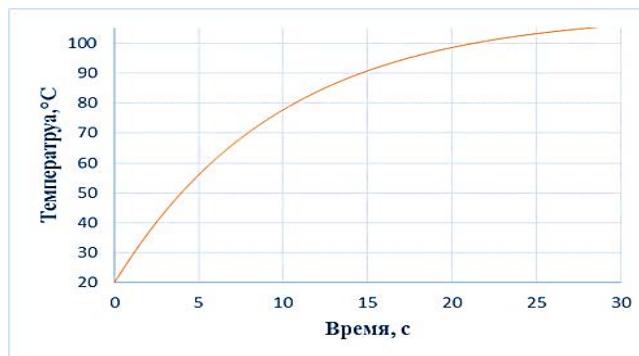


Рисунок 8 – График зависимости температура-время при скорости потока 20 м/с для пластины 1x5 мм

Таблица 3 – Время нагрева силового элемента до температуры 110°C при различных диаметрах поперечного сечения и скорости потока воздуха

Диаметр поперечного сечения, мм	Скорость потока на входе, м/с		
	10	20	30
1,0	59,95 с	45,52 с	22,11 с
1,5	83,15 с	70,49 с	39,43 с
2,0	111,22 с	88,72 с	55,04 с

Таблица 4 – Время нагрева силового элемента до температуры 110°C при различных формах поперечного сечения и скорости потока 20 м/с

Форма и размер поперечного сечения, мм	Скорость потока, 20 м/с
Проволока диаметром 1,5	70,49 с
Стержень диаметром 10	152,37 с
Пластина 1x5	42,37 с

Лучистый теплообмен. Для рассмотрения процесса нагрева силового элемента лучистым теплообменом, прежде всего, необходимо смоделировать тело, с поверхности которого излучается тепло. Использовался нагревательный элемент в виде спирали из материала с высокой проводимостью. Расчет проводился с использованием расчетных модулей Steady – State Thermal и Transient Thermal.

На рисунке 9 показано распределение температур по поперечному сечению и длине пластины и стержня, подтверждающие равномерность нагрева термически тонких силовых элементов.

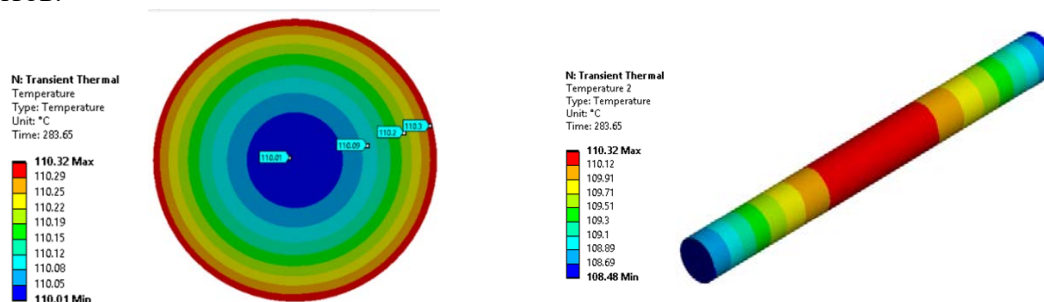


Рисунок 9 – Распределение температуры по поперечному сечению и длине стержня $\varnothing 10$ мм

На рисунке 10 в качестве примера, приведен характер изменения температуры во времени, а в таблицах 5 и 6 даны значения времени нагрева до $T=110^{\circ}\text{C}$ для проволочных, пластинчатых и стержневых силовых элементов, нагреваемых лучистым теплообменом.

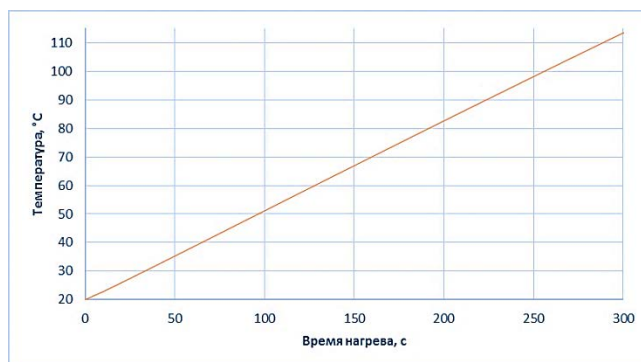


Рисунок 10 – График зависимости температура-время при температуре нагревательного элемента 600°C для стержневого силового элемента с Ø 10 мм

Таблица 5 – Время нагрева силовых элементов до температуры 110°C при различных диаметрах поперечного сечения и температуре нагревательного тела

Диаметр поперечного сечения, мм	Температура Нагревательного элемента, °C		
	400	600	800
1,0	89,95 с	29,57 с	13,32 с
1,5	132,01 с	44,51 с	19,32 с
2,00	175,01 с	58,72 с	25,63 с

Таблица 6 – Время нагрева силовых элементов до температуры 110°C при различных формах поперечного сечения и температуре нагревательного элемента 600°C

Форма и размер поперечного сечения, мм	Температура нагревательного элемента, 600°C
Проволока диаметром 1,5	44,51 с
Стержень диаметром 10	283,65 с
Пластина 1x5	47,58 с

Охлаждение силового элемента (во всех случаях нагрева) осуществлялось обдувом его холодным потоком воздуха. Значения времени возврата к исходной температуре окружающей среды – 20°C – 30°C для проволочного силового элемента составляет 300 – 500 с для естественной конвекции и 7 – 10 с при обдуве холодным воздухом.

Анализ полученных результатов моделирования.

В таблицу 7 сведены результаты моделирования тепловых процессов при использовании различных методов нагрева и типов силовых элементов, что позволяет оценить возможную производительность работы разрабатываемых деформирующих устройств.

Таблица 7 – Время нагрева силовых элементов при различных вариантах нагрева и формах поперечного сечения

Форма и размер поперечного сечения, мм	Метод нагрева		
	Пропускание тока, 20 А	Конвективный теплообмен, 20 м/с	Лучистый теплообмен, 600 °C
Проволока диаметром 1,5	1,42 с	70,49 с	44,51 с
Стержень диаметром 10	499,98 с	152,37 с	283,67 с
Пластина 1x5	10,95 с	42,37 с	47,58

Полученные результаты позволяют выйти на рабочий режим нагрева пропусканием тока не превышающий 2 секунд для проволочных силовых и не превышающий 11 секунд для пластинчатых силовых элементов.

Во всех случаях нагрева для рассматриваемых геометрических размеров достигается равномерность нагрева по сечению и длине.

Выбор типа нагрева должен определяться не только одним параметром – производительностью процесса, а совокупностью параметров и в первую очередь необходимым усилием. Например, для проволочного силового элемента при сечении проволоки 1 мм^2 развиваемое усилие составляет 300 – 400 Н. И для создания усилия 1500 Н потребуется пять проволочных силовых элементов, а для силового элемента из пластины, потребуется только один силовой элемент сечением $1 \times 5 \text{ мм}$. Кроме того, выбор метода нагрева, формы и геометрических размеров силового элемента определяется еще и конструктивными и технологическими соображениями.

Основные результаты моделирования подтверждены экспериментально (по времени достижение конечной температуры).

В четвертой главе исследованы технологические и эксплуатационные свойства термически тонких силовых элементов многозвенного силопривода, необходимых для его проектирования. Для определения качественных и количественных их показателей создан измерительный стенд (рисунок 11), позволяющий в едином временном масштабе фиксировать силу тока, изменение температуры, перемещения, развиваемые усилия. Все эти параметры записывались на многолучевом запоминающем осциллографе LeCroy Wavesurfer 44Xs-A в едином временном масштабе.

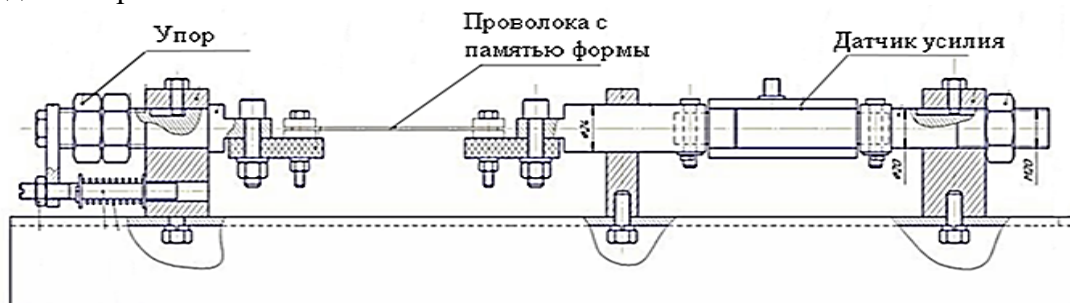


Рисунок 11 – Схема устройства для испытания проволочных силовых элементов

На рисунке 12 для примера показаны измеряемые величины, полученные при испытании проволочного силового элемента.

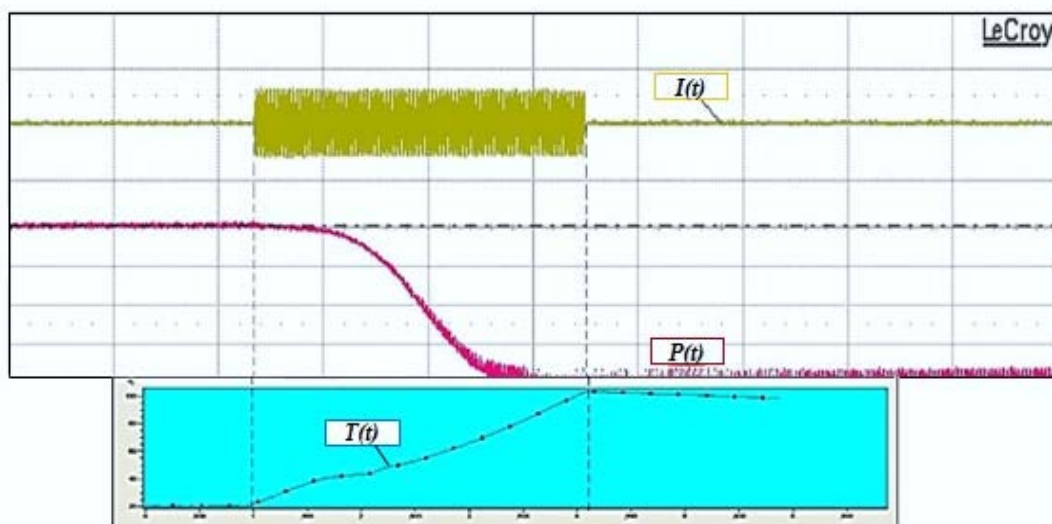


Рисунок 12 – Изменения параметров, развиваемых проволочным силовым элементом во времени

Полученные значения использовались для построения следующих зависимостей: Деформационно-силовой диаграммы, изменение тока $J(\tau)$, $T(\tau)$ и $P(\tau)$ (рисунок 13).

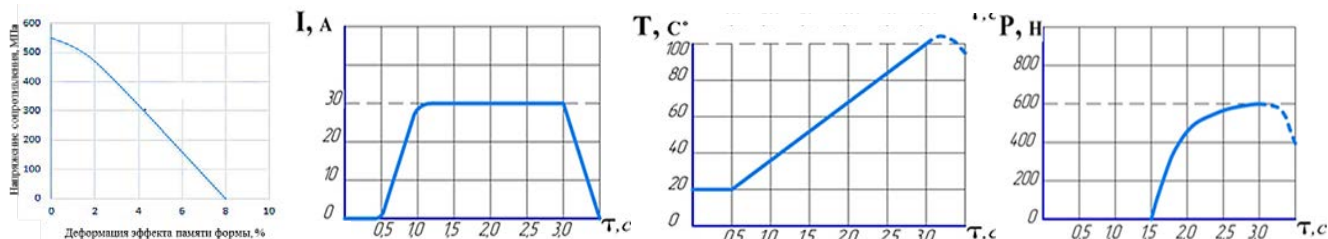


Рисунок 13 – Параметры, фиксируемые при испытаниях силового элемента на измерительном стенде и графики их изменений

Скорость нагрева и скорость развития рабочих напряжений. Полученные экспериментальные данные позволяют установить взаимосвязь параметра скорости нагрева ($\dot{T}$) и скорости развития рабочих напряжений ($\dot{P}$), $\dot{P} = f(\dot{T})$ (рисунок 14).

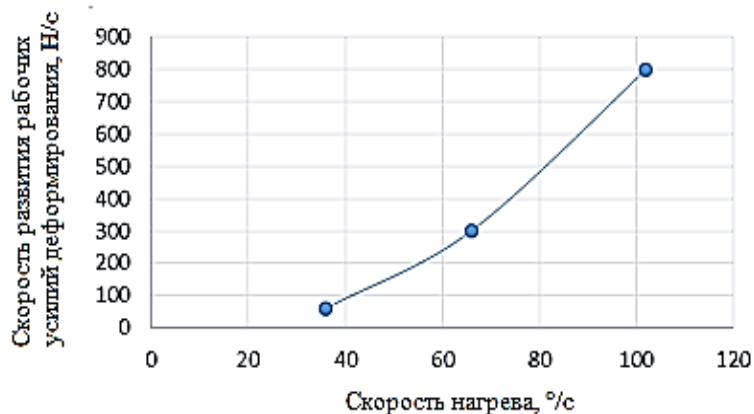


Рисунок 14 – Зависимость скорости нагрева от скорости развития рабочих усилий деформирования

Следовательно, для определения производительности деформирующих устройств с силовым приводом из материала с эффектом памяти формы играет значение не просто температура нагрева силового элемента до температуры превращений, а что, более важно скорость нагрева, т.к. именно она определяет скорость развития рабочих усилий деформирования.

Возвратное усилие. Для нахождения величины возвратного усилия деформирования был изготовлен специальный стенд, позволивший реализовать и замерить все процессы, показанные на рисунке 15. В результате удалось получить зависимость остаточной деформации от величины возвратного усилия деформирования (рисунок 16).

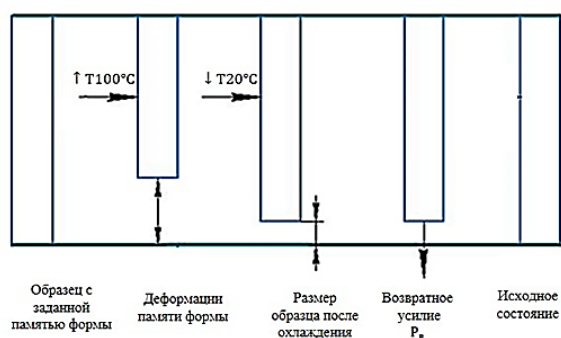


Рисунок 15 – Схема восстановления размеров силового элемента после рабочего цикла

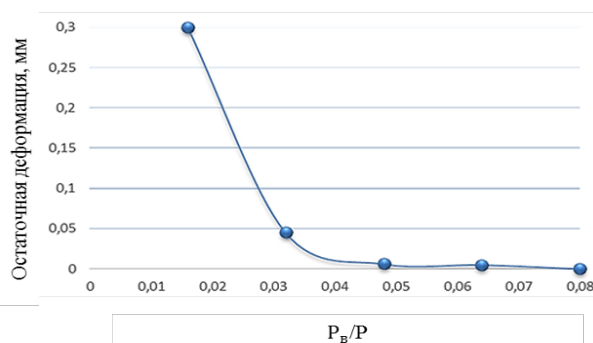


Рисунок 16 – Диаграмма зависимости остаточной деформации от величины возвратного усилия деформирования

Как показали эксперименты – возвратное усилие деформирования должно составлять (с коэффициентом запаса) 10 – 12% от развиваемого рабочего усилия. Так, при рабочем усилии деформирования в ~ 1500 Н, возвратное усилие деформирования составит 150 Н.

Преимущества деформирующих устройств, оборудования в их малых массогабаритных размерах, незначительном энергопотреблении и экологической чистоте.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе теоретического и экспериментального исследования получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Установлен и экспериментально подтвержден факт влияния неравномерности нагрева силового элемента на эффективность развития напряжений при реализации в материале эффекта памяти формы.

2. Созданы конструкции многозвенных силоприводов из термически тонких силовых элементов (провода, пластины и стержни), обеспечивающих равномерность их нагрева. Экспериментально подтверждена их работоспособность. Создаваемое рабочее усилие деформирования представляет сумму усилий деформирования создаваемым каждым силовым элементом.

3. В результате проведенного компьютерного моделирования процессов нестационарного теплообмена найдены минимальное время и наиболее эффективный метод нагрева для силовых элементов различных форм, геометрических размеров. На основании анализа результатов компьютерного моделирования получено уравнение регрессии с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,86$.

4. На созданном экспериментальном стенде получены зависимости, определяющие работу силоприводов: силу тока, температуру, перемещения, развиваемые усилия деформирования силоприводом во времени. Установлена взаимосвязь скорости нагрева со скоростью развития рабочих усилий и значение возвратного усилия деформирования, определяющие производительность деформирующих устройств.

5. Разработана и экспериментально проверена методика проектирования силоприводов для деформирующих устройств.

6. Создана линейка силоприводов с проводочными, пластинчатыми и стержневыми силовыми элементами. Созданные силоприводы испытаны и паспортизированы.

7. На базе разработанных многозвенных силоприводов спроектированы, изготовлены и опробованы в лабораторных условиях действующие модели деформирующих устройств. Осуществлена их опытно-промышленная проверка на примере изготовления типовой детали «Контакт» используемой в изделиях ракеты-носителя «Союз-5». Разработаны рекомендации по практическому использованию результатов диссертационной работы в заготовительно-штамповочном производстве машиностроительных заводов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Алехина, В.К.** Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики / **В.К. Алехина**, В.А. Глушников // Известия Самарского научного центра РАН. - 2017. - Т. 19. № 1 (3). - С. 483 – 488.

2. **Алехина, В.К.** Использование материалов с памятью формы в технических устройствах / **В.К. Алехина**, Р.М. Бикбаев, В.А. Глушников, Ф.В. Гречников // Вестник машиностроения. - 2019. - № 9. - С. 63 – 65.

3. **Алехина, В.К.** Деформирующие устройства с многозвенным силоприводом из материала с "памятью формы" / **В.К. Алехина**, В.А. Глушников, Р.М. Бикбаев // Кузнечно – штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2019. - № 6. - С. 18 – 25.

В изданиях, индексируемых Scopus

4. **Alekhina V.K.** Actuator from a material with the high-temperature shape memory effect and examples of its application in engineering / Glushnikov V., Yusupov R., **Alekhina V.K.**, Egorov Y.A. // Key Engineering Materials. — 2016. — Vol. 684. — P. 523 – 529.

5. **Alekhina V.K.** Applications of Shape Memory / **Alekhina V.K.**, Bikbaev R.M., Glushchenkov V.A., Grechnikov F.V. // Russian Engineering Research 2019. — Vol. 39. Issue 12. — P. 1043 – 1045.

Свидетельства и патенты

6. Патент РФ № 157417 «Устройство для испытания материалов на твердость в условиях космического пространства» / В.А. Глушечков, Р.Ю. Юсупов, **В.К. Алехина**. Заяв. 2015117791/28 зарегистрировано 12.05.2015, Бюл.34.

7. Патент РФ № 163932 «Электротермический силовой привод» / В.А. Глушечков, Р.Ю. Юсупов, **В.К. Алехина**, Ю.А. Егоров. Заяв. 2015153648/06 зарегистрировано 14.12.2015, Бюл.23.

8. Патент РФ № 172360 «Электротермический силовой привод» / В.А. Глушечков, Р.Ю. Юсупов, **В.К. Алехина**, Ю.А. Егоров. Заяв. 2016108679 зарегистрировано 10.03.2016, Бюл.19.

9. Патент РФ № 182028 «Электротермический силовой привод» / В.А. Глушечков, Ф.В. Гречников, **В.К. Алёхина**, Р.М. Бикбаев Заяв. 2018103799 зарегистрировано 31.01.2018, Бюл.22.

10. Патент РФ № 205272 «Термический пресс-штамп» / В.А. Глушечков, **В.К. Алёхина** Заяв. 2020136725 зарегистрировано 06.11.2020.

В других научных изданиях по теме исследования опубликовано 10 работ.