



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Арслан Хазем

**Разработка методики проектирования зажимных устройств станочных
приспособлений с применением материалов с памятью формы**

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель

Коротких Михаил Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы машиностроения ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты:

Сафронов Алексей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Заведующий лабораторией плазменных технологий ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук», Лаборатория плазменных технологий (г. Санкт-Петербург).

Халимоненко Алексей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроения ФГБОУ ВО «Санкт-петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра машиностроения (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский Государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «04» февраля 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26. федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главное здание, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «__» ____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, У.2.5.6.26,
кандидат технических наук

Хрусталева Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время внедрение систем числового программного управления (ЧПУ) значительно увеличило производительность станочного оборудования, однако установка, снятие и закрепление заготовок остаются сложными задачами, особенно в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Автоматизация закрепления заготовок осуществляется с использованием пневматических или гидравлических устройств, что требует дополнительных установок и оборудования. Часто такие устройства характеризуются неприемлемыми габаритами. В этом контексте перспективным представляется создание устройств, способных преобразовывать электрическую энергию непосредственно в механическое усилие или управляемых электрической энергией.

Имеется потенциал для разработки зажимных устройств с использованием элементов из металлов с памятью формы, которые отличаются компактными размерами и способны развивать достаточные усилия. Актуальность данной работы обусловлена потребностью в автоматизации закрепления заготовок на современном металлообрабатывающем оборудовании.

Цель работы заключается в создании методики определения конструктивных параметров автоматизированных зажимных элементов станочных приспособлений с использованием материалов с памятью формы (МПФ) и оптимизации их конструкций для различных условий применения.

Задачи работы

Основными задачами исследования, поставленными в работе, являются:

1. Разработка конструкции электромеханических зажимных устройств с применением МПФ и расчетное обоснование их конструкции.
2. Проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения расчетных параметров зажимных устройств, включающих элементы из МПФ.
3. Обоснование рациональной конструкции зажимных элементов, анализ и выявление их параметров для повышения эффективности закрепления заготовок.
4. Разработка методики оптимизации зажимных элементов с использованием МПФ, направленной на совершенствование технологии и повышение её эффективности.

Объектом исследования являются зажимные устройства станочных приспособлений с применением элементов из материалов с памятью формы.

Предметом исследования является методика проектирования и оптимизации конструкции таких зажимных устройств.

Научная новизна данного исследования заключается в создании методики определения и оптимизации конструктивных параметров, предложенных принципиально новых электромеханических зажимных элементов станочных приспособлений с использованием МПФ.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в создании методики проектирования и оптимизации электромеханических силовых приводов станочных приспособлений с применением материалов с памятью формы. Методика основана на законах механики, деформации твердого тела и установленных экспериментально явлениях деформации МПФ при термическом воздействии.

Практическая значимость полученных результатов выражается в их потенциальном применении в станочных приспособлениях и разнообразных малогабаритных электромеханических зажимных устройствах. Предложенные устройства позволяют удаленно управлять закреплением и раскреплением заготовок в условиях автоматизированного производства.

Методология и методы исследования

При создании методики определения конструктивных параметров предлагаемых зажимных элементов проводились теоретические расчеты основных типов элементов, отличающихся вариациями упругого элемента такими как винтовые пружины, тарельчатые пружины или пневматические сильфоны.

Оптимизация параметров зажимных элементов осуществлялась компьютерным моделированием в среде MATLAB.

Экспериментальные исследования проводились с применением лабораторного оборудования и стандартных средств измерения линейных размеров, электрических и температурных параметров.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработка новых конструкций зажимных устройств, основанная на применении МПФ, а также их расчетное обоснование, представляют собой сущностные элементы исследования, соответствующие требованиям, сформулированным в пунктах 5 и 8 паспорта специальности;

2. Экспериментальное подтверждение рассчитанных параметров зажимных устройств, включенное в рамки работы, соответствует требованиям, изложенным в пункте 8 паспорта специальности;

3. Обоснование рациональной конструкции зажимных элементов, являющееся неотъемлемой частью исследования, соответствует требованиям пункта 9 паспорта специальности;

4. Создание методики расчета и оптимизации зажимных элементов, основанной на использовании материалов с памятью формы, согласуется с критериями, установленными в пунктах 5 и 8 паспорта специальности.

Степень достоверности и апробацию результатов

Достоверность научных выводов подкрепляется согласованностью результатов экспериментальных исследований с расчетными данными предложенной методики определения и оптимизации конструктивных параметров зажимных устройств. Результаты научной деятельности были представлены на научно-технических конференциях и конкурсе в период с 2019 по 2023 г.:

1. ММЕSE. Современное машиностроение: Наука и образование. 10-я международная научно-практическая конференция (Санкт-Петербург, 2021 г.);

2. ИИМ. Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» (Санкт-Петербург, 2022 г.);

3. ММЕSE. Современное машиностроение: Наука и образование. 11-я международная научно-практическая конференция (Санкт-Петербург, 2022 г.);

4. BIG PhD. Конкурс «Best International Grant for PhD» – грантовая программа поддержки лучших проектов иностранных аспирантур (Санкт-Петербург, 2022 г.);

5. ММЕSE. Современное машиностроение: Наука и образование. 12-я международная научно-практическая конференция (Санкт-Петербург, 2023 г.).

Результаты работы могут быть использованы на большинстве машиностроительных предприятий и в учебном процессе дисциплины Проектирование станочных приспособлений в ФГБОУ ВО «СПбПУ».

Публикации

Научные выводы данной исследовательской деятельности были подвергнуты апробации через их опубликование в рецензируемых научных журналах и представление на научно-технических конференциях в период с 2019 по 2023 год. Общее число научных публикаций, посвященных теме диссертационной работы, составляет 8 статей, в том числе 4 опубликованы в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), 2 в базе данных Scopus и 2 в журналах, включенных в перечень ВАК. Публикации служат основой для оценки полноты изложения результатов исследования в соответствующих научных изданиях.

Получен патент РФ № 2775658. Термомеханический силовой привод. / Коротких М. Т., Арслан Х. Кл. МПК: F03G 7/06. Патент выдан 06.07.2022 г.

Получен патент РФ № 2796035. Термомеханический силовой привод. / Коротких М. Т., Арслан Х. Кл. МПК: F03G 7/06. Патент выдан 16.05.2023 г.

Работа соответствует паспорту специальности – 2.5.6. «Технология машиностроения» пунктам: 5. «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов» и 8. «Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении» и 9. «Методы и средства повышения производительности изготовления изделий машиностроения».

Структура работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований. Основные материалы изложены на 112 страницах машинописного текста, в том числе содержат 18 таблиц, 32 рисунка и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимого исследования, определены научные задачи, поставленные перед ним, а также ясно сформулирована цель работы. Приведены основные научные достижения, которые формируют научную новизну диссертации, а также научные положения, которые предполагается защищать. Отмечена практическая значимость результатов работы и определены объект и предмет исследования. В дополнение к этому представлена структура диссертации и краткое описание ее основных разделов.

В первой главе выявлено, что анализ литературных и патентных источников показал недостаточное количество информации о применении зажимных устройств станочных приспособлений с использованием МПФ. В результате этого были предложены и представлены новые электромеханические зажимные элементы, разработанные для обеспечения необходимого усилия при закреплении заготовок и автоматического освобождения их после обработки. Эти элементы также обеспечивают сохранение зажимного усилия при отключении электропитания.

Во второй главе рассматриваются различные конструкции зажимных элементов, предложенные и запатентованные в рамках исследования. Эти конструкции подразделяются по типу упругого элемента, который может представлять собой винтовую пружину (Рисунок 1, а, б), набор тарельчатых пружин (Рисунок 1, в, г) или сильфон, заполненный сжатым газом (Рисунок 1, д). В дополнение к упругому элементу, параллельно ему устанавливается элемент из МПФ, который находится в растянутом квазипластическом состоянии под воздействием упругого элемента.

Элементы из МПФ могут быть выполнены в виде проволоки, когда множество витков проволоки размещается вдоль упругого элемента, либо в виде фольги, образующей оболочку вокруг упругого элемента. Особенностью данных конструкций является возможность ограничения расширения упругого элемента силами, развиваемыми в элементах из МПФ при их квазипластическом удлинении (Рисунок 1, а, в), либо ограничение деформации упругого элемента дополнительным механическим ограничителем (Рисунок 1, б, г, д). С учетом особенностей конструкции требуется соответствующий методический анализ для расчета их параметров.

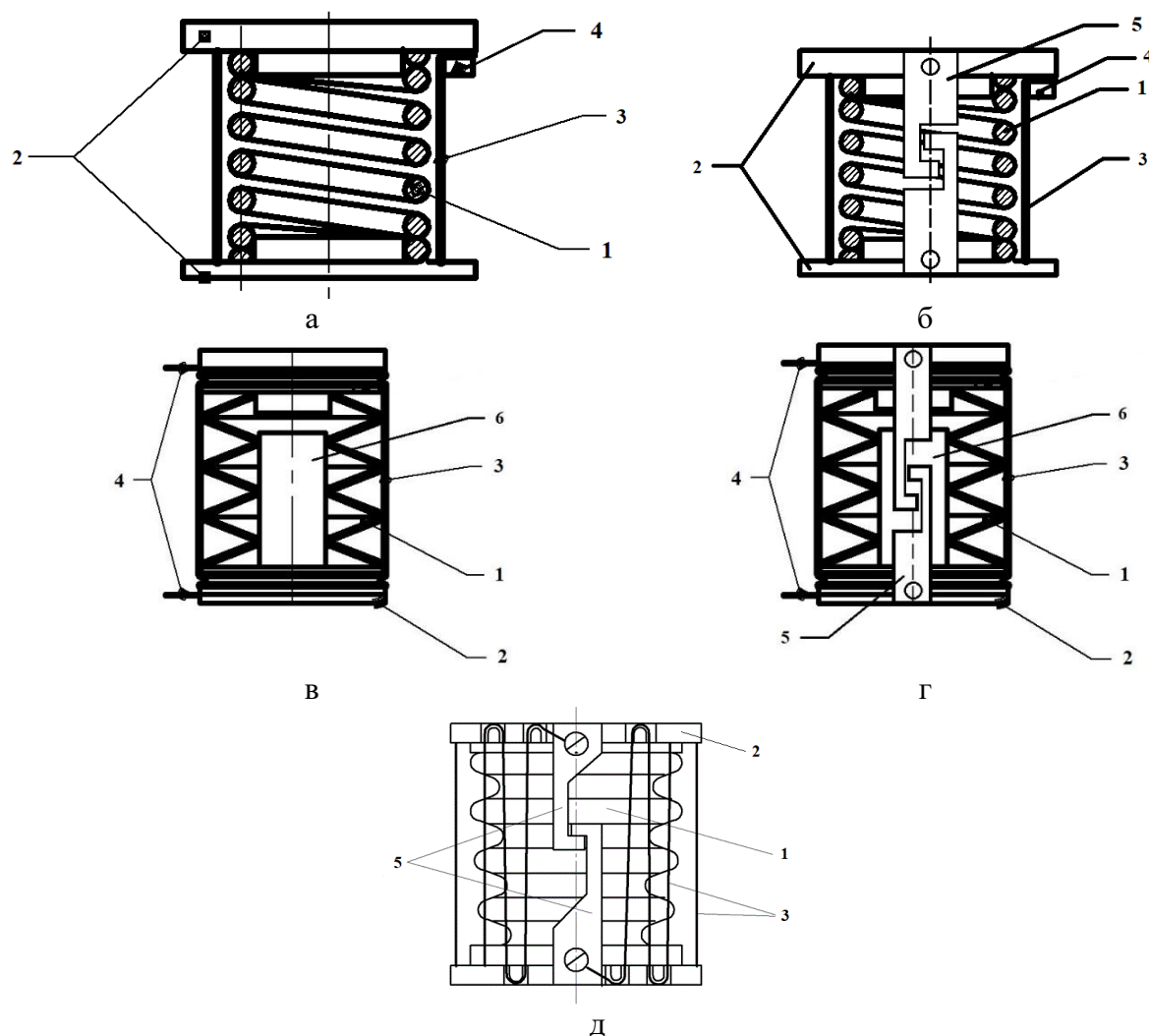


Рисунок 1 – Конструкция зажимных устройств

1 – упругий элемент: а – винтовая пружина без ограничителя, б – винтовая пружина с ограничителем, в – набор тарельчатых пружин без ограничителя, г – набор тарельчатых пружин с ограничителем, д – сильфон с ограничителем; 2 – изолирующие торцевые накладки или металлические торцы; 3 – элементы из МПФ (нитинол) выполнены из проволоки или из фольги; 4 – клеммы для подвода электрического тока; 5 – наружный ограничитель; 6 – направляющая ось.

Эти элементы из МПФ способны подвергаться обратимой квазипластической деформации до 5%, что обеспечивает их использование в течение большого количества рабочих циклов, при их деформации при нагреве выше и охлаждении ниже критической температуры фазового перехода. Предварительно сжатая пружина, с установленными элементами из МПФ, растягивает их до предельной пластической деформации, и при нагреве элементов, например, подачей электрического тока, они сжимаются, воздействуя на пружину. Таким образом, созданный упругий элемент способен укорачиваться при кратковременном нагреве элементов из МПФ.

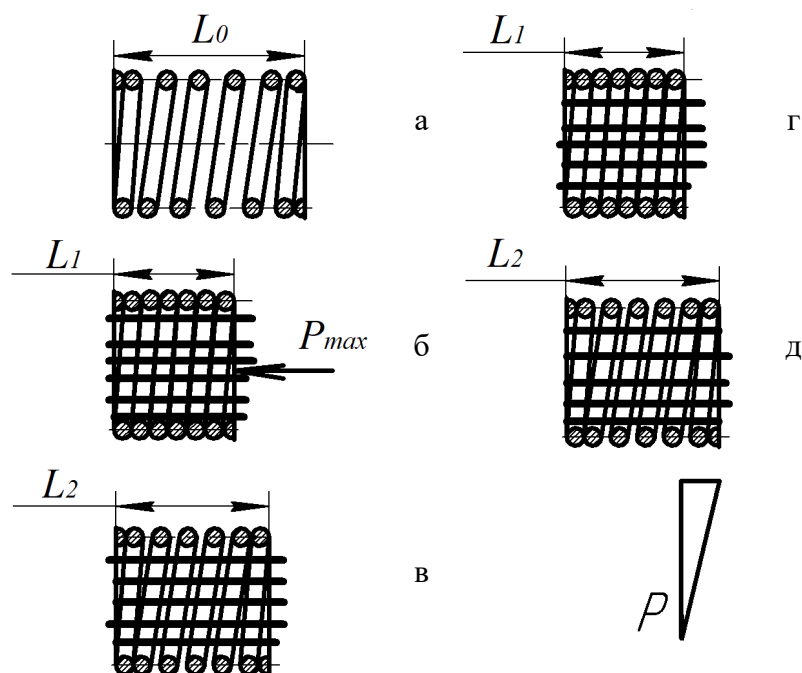


Рисунок 2 – Последовательность создания и работ зажимного устройства

На Рисунке 2 изображена последовательность создания и работы зажимного элемента. Исходно пружина длиной L_0 (Рисунок 2, а), находящаяся в свободном состоянии, сжимается до предела упругости на длину L_1 и в сжатом состоянии между изолирующими фланцами на торцах пружины устанавливаются элементы из МПФ без предварительного натяжения (Рисунок 2, б). После снятия силы сжатия пружина расправляется до длины L_2 , что приводит к растяжению проволоки из МПФ на заданную величину, не превышающую предельной пластической деформации, восстанавливаемой при фазовом переходе (Рисунок 2, в).

При нагреве проволоки до температуры фазового перехода, например, при пропускании через нее электрического тока, она укорачивается и сжимает пружину до размера L_1 , что может быть использовано для освобождения зажатого объекта (Рисунок 2, г).

При остывании проволоки пружина стремится удлиниться до размера L_2 , что используется для зажима объекта крепления. Для определения силы закрепления заготовки может быть использована диаграмма сжатия пружины с установленными на ней элементами МПФ (Рисунок 2, д). В качестве элементов из МПФ может использоваться как проволока, так и тонкопленочная оболочка вокруг упругого элемента (фольга).

Представленная методика расчета устройства с винтовой пружиной сжатия при ограничении ее деформации растяжением до предельного состояния элементов из МПФ показала, что устройства закрепления могут иметь достаточно малые габариты и существует множество вариантов устройств с заданными параметрами.

Однако надежность таких устройств может оказаться недостаточной из-за возможных колебаний деформации элементов из МПФ при изменении свойств материала или упругого элемента. В связи с этим был проведен расчетный анализ зажимного элемента с упругим элементом в форме винтовой пружины и механическим ограничителем деформации в виде упора (Рисунок 3).

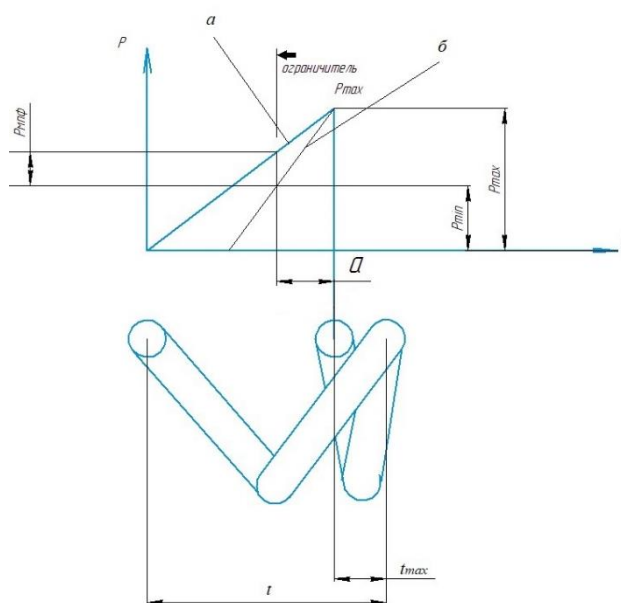


Рисунок 3 – Характеристики винтовой пружины с ограничителем удлинения упругого элемента в 5%, а: характеристики винтовой пружины сжатия; б: характеристики винтовой пружины сжатия с установленными элементами МПФ

Ограничитель деформации 5% был выбран на основе данных о много цикловой деформации конкретного сплава (нитинол).

где $P_{\min} = P_{\text{закр}}$ – рабочее усилие зажимного элемента (сила закрепления); $P_{\max}$ – максимальное усилие при сжатии пружины до соприкосновения витков, и усилие, при котором устанавливаются элементы из МПФ; $P_{\text{МПФ}}$ – сила растяжения элемента МПФ при

деформации пружины до ограничителя; a – рабочий ход витка, определяемый из условия деформации МПФ менее 5%; t – шаг витка винтовой пружины сжатия.

При расчете винтовых пружин сжатия последовательность определения конструктивных параметров пружин принята согласно ГОСТ 13765-86, а методика расчета конструктивных параметров зажимного элемента определена в следующей последовательности:

1. Задаются рабочее усилие зажимного элемента (сила закрепления) $P_{закр}$ и рабочий ход при освобождении заготовки $a_{закр}$, гарантирующего свободное извлечение заготовки.

Если задано усилие закрепления $P_{закр}$, которое не должно быть менее P_{min} , то усилие при сжатии витков, в данном случае P_{max} можно выбирать из условия (Рисунок 3):

$$P_{max} > P_{min} + P_{МПФ} \quad (1)$$

Чтобы определить $P_{МПФ}$ надо знать сечение МПФ достаточное для деформации пружины при ее сжатии при нагреве элемента из МПФ:

$$S_{МПФ} = \frac{P_{max}}{\sigma} \quad (2)$$

Тогда:

$$P_{МПФ} = S_{МПФ} \times \sigma_T \quad (3)$$

где σ_T – напряжение возникающие в сплаве с памятью формы при деформации в холодном состоянии (для нитинола $\sigma_T=200\text{МПа}$); σ – напряжение возникающие в сплаве с памятью формы при нагреве элементов из МПФ выше температуры фазового перехода (для нитинола $\sigma=800\text{МПа}$).

Если задаться, например, превышением максимальной силы над номинальной силой закрепления на 20%:

$$P_{max} = \frac{P_{закр}}{1 - \left(\frac{\sigma_T}{\sigma} \times 1,2 \right)} \quad (4)$$

2. Так как диаметр пружины определяется по напряжении материала пружины при кручении при заданной нагрузке согласно ГОСТ 13764-86, то диаметр пружины равен:

$$D = \sqrt{\frac{8K_w P_{max} i^3}{\pi \tau}} \quad (5)$$

где K_w – коэффициент, связанный с геометрическими параметрами пружины; τ – допускаемое касательное напряжение.

Для класса пружин II по ГОСТ 9389-75, используемой для изготовления пружин, марки стали 51ХФА или 60С2А, принимаем $\tau=960\text{МПа}$, при диаметре проволоки пружины $d=3\dots12\text{мм}$. А $\tau=800\text{МПа}$, при диаметре проволоки пружины $d=14\dots70\text{мм}$.

Коэффициент K_w определяется по следующей формуле:

$$K_w = \frac{4i-1}{4i-4} + \frac{0,615}{i} \quad (6)$$

где i – индекс пружины, затем диаметр проволоки пружины d определяется по формуле:

$$i = \frac{D}{d} \quad (7)$$

Рассчитав средний диаметр пружины D по формуле (5), определен диаметр пружинной проволоки d по формуле (7).

3. Рассчитывается жесткость одного витка пружины c по формуле:

$$c = \frac{G d^4}{8 D^3 K_2} \quad (8)$$

где G – модуль упругости материала пружины $G=80\text{ГПа}$; коэффициент K_2 определяется по следующей формуле:

$$K_2 = 1 + \frac{1}{2i} - \frac{1}{2i^2} \quad (9)$$

4. Определяется шаг одного витка пружины:

$$t = d + \frac{P_{max}}{c} \quad (10)$$

5. Расстояние между витками пружины L :

$$L = t - d \quad (11)$$

6. Деформация витка допустимая свойствами МПФ на 5%. Тогда деформация витка с установленными элементами из МПФ составит:

$$a = 0,05L \quad (12)$$

7. А требуемое количество витков при рабочем ходе $a_{закр}$:

$$n = \frac{a_{закр}}{a} \quad (13)$$

где $a_{закр}$ – рабочий ход при освобождении заготовки.

8. Соответственно длина пружины с установленными МПФ элементами и ограниченная упором:

$$L_2 = (d + a)n \quad (14)$$

9. Длина винтовой пружины сжатия в свободном состоянии L_0 :

$$L_0 = (t \times n) + (1,5d) \quad (15)$$

10. Исходя из возможности пластической возвратной деформации растяжения элемента из МПФ на 5%, определяется длина элемента из МПФ:

$$L_{МПФ} = \frac{a_{закр}}{0,05} \quad (16)$$

В соответствии с представленной методикой были рассчитаны конструктивные параметры зажимных устройств с винтовыми пружинами сжатия с рабочим ходом $a_{закр}=2\text{мм}$ и усилием закрепления $P_{закр}=5000\text{Н}$, при механическом ограничении деформации пружины (Таблица 1).

Таблица 1 – Расчетные данные конструктивных параметров зажимного элемента с винтовой пружиной сжатия, элементами из МПФ и ограничителем деформации упругого элемента в 5%

№	$P_{закр},$ [Н]	$a_{закр},$ [мм]	i	$D,$ [мм]	$d,$ [мм]	$L_2,$ [мм]	$L_0,$ [мм]	$L_{МПФ},$ [мм]	$c,$ [Н/мм]	n	$P_{max},$ [Н]	$P_{МПФ},$ [Н]	$S_{МПФ},$ [мм ²]
1	5000	2	3	28,44	9,48	169,73	221,9	40	3159,72	17,69	7142,9	1785,71	8,93
2	5000	2	3,5	34,63	9,89	118,04	170,9	40	2094,18	11,73	7142,9	1785,71	8,93
3	5000	2	4	41,27	10,32	87,15	140,6	40	1473,86	8,25	7142,9	1785,71	8,93

Оказалось, что такая конструкция позволяет при тех же функциональных параметрах обеспечить меньшие габариты устройства, чем зажимные элементы с ограничителем деформации упругого элемента квазипластической деформацией элементов из МПФ, хотя конструктивные параметры также могут иметь множество вариантов.

Пружины сжатия часто выполняются в виде набора тарельчатых пружин, поэтому был проведен расчетный анализ устройства закрепления с использованием таких пружин (Рисунок 4).

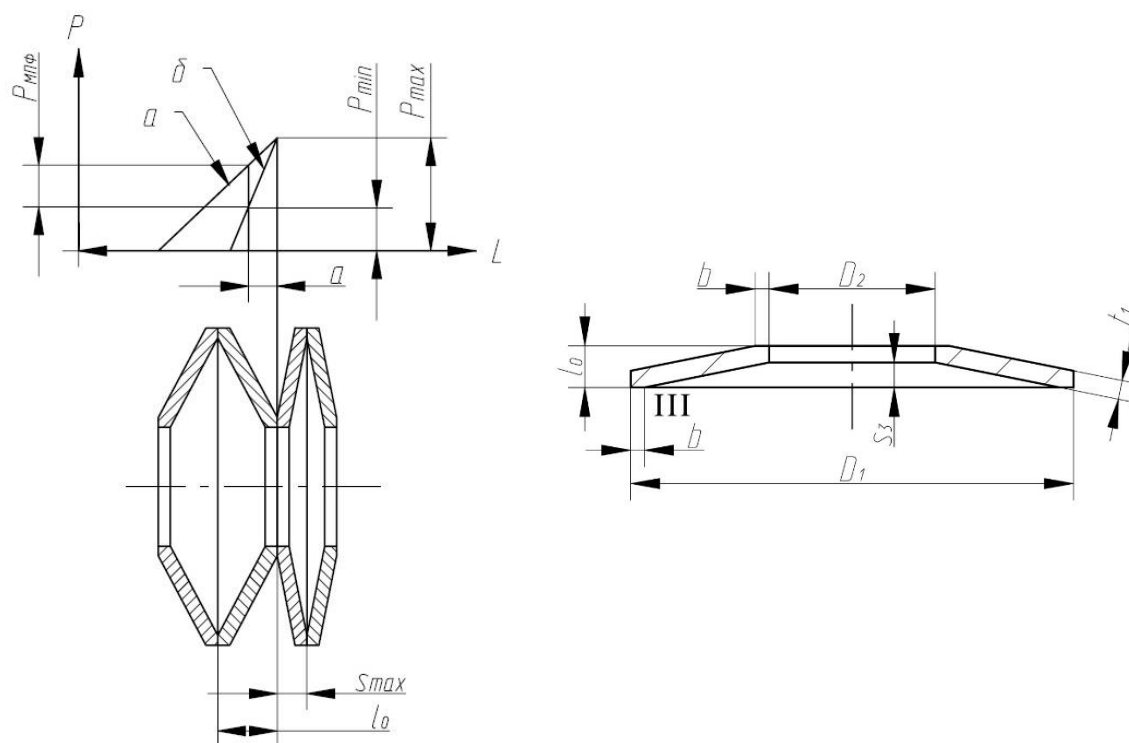


Рисунок 4 – Характеристики и конструктивные параметры тарельчатых пружин с ограничителем удлинения упругого элемента в 5%, а: характеристики тарельчатых пружин; б: характеристики тарельчатых пружин с установленными элементами МПФ

При расчете тарельчатых пружин последовательность определения конструктивных параметров принята по ГОСТ 3057-90:

Напряжение растяжения в кромке III (Рисунок 4) является определяющим при циклическом нагружении. При расчете определяют максимальное напряжение σ_{III} :

$$\sigma_{III} = \frac{4Es}{(1-\nu^2)Y(D_1-2b)^2} \times \frac{D_2+2b}{D_1-2b} \times \left[(2 \cdot C_2 - C_1) \left(s_3 - \frac{s}{2} \right) + C_2 t_1 \right] \quad (17)$$

где Y , C_1 , C_2 – коэффициенты; σ_{III} – допустимые напряжения растяжения при максимальной деформации в кромке III; E – модуль упругости материала тарельчатых пружин $E=2,06 \cdot 10^5$ МПа; ν – коэффициент Пуассона $\nu=0,3$; D_1 – наружный диаметр пружины; D_2 – внутренний диаметр пружины; s_3 – максимальная возможная деформация; t_1 – толщина тарельчатой пружины; b – ширина опорной плоскости.

В соответствии с представленной методикой были рассчитаны примеры конструктивных параметров зажимных устройств при рабочем ходе раскреплении $a_{закр}=2$ мм для усилий закрепления $P_{закр}=5000$ Н, при ограничении деформации механическим устройством (Таблица 2).

Таблица 2 – Расчетные данные конструктивных параметров зажимного элемента с тарельчатыми пружинами, элементами из МПФ и ограничителем деформации упругого элемента в 5%

№	$P_{закр}$, [Н]	D_1 , [мм]	D_2 , [мм]	L_2 , [мм]	L_0 , [мм]	$a_{закр}$, [мм]	t_1 , [мм]	s_3 , [мм]	b , [мм]	n_1	P_{max} , [Н]	$P_{МПФ}$, [Н]	$S_{МПФ}$, [мм ²]
1	5000	32,52	16,26	134,04	183,00	2	2,2	0,85	0,5	60	7142,9	1785,71	8,93
2	5000	38,26	15,304	134,51	182,85	2	2,5	0,76	0,5	53	7142,9	1785,71	8,93
3	5000	43,80	17,52	107,02	155,40	2	2,5	0,96	0,5	42	7142,9	1785,71	8,93

Применение упругих элементов в виде набора тарельчатых пружин обеспечивает меньшие габариты зажимного устройства, по сравнению с устройством, в котором применяются винтовые пружины сжатия, но конструктивные параметры таких устройств также многовариантны.

Попытки повысить силовые характеристики упругого элемента привели к предложению конструкции с упругим элементом в виде пневматического сильфона, заполненного газом под высоким давлением. Естественно, такой элемент должен иметь механический ограничитель его расширения (Рисунок 5).

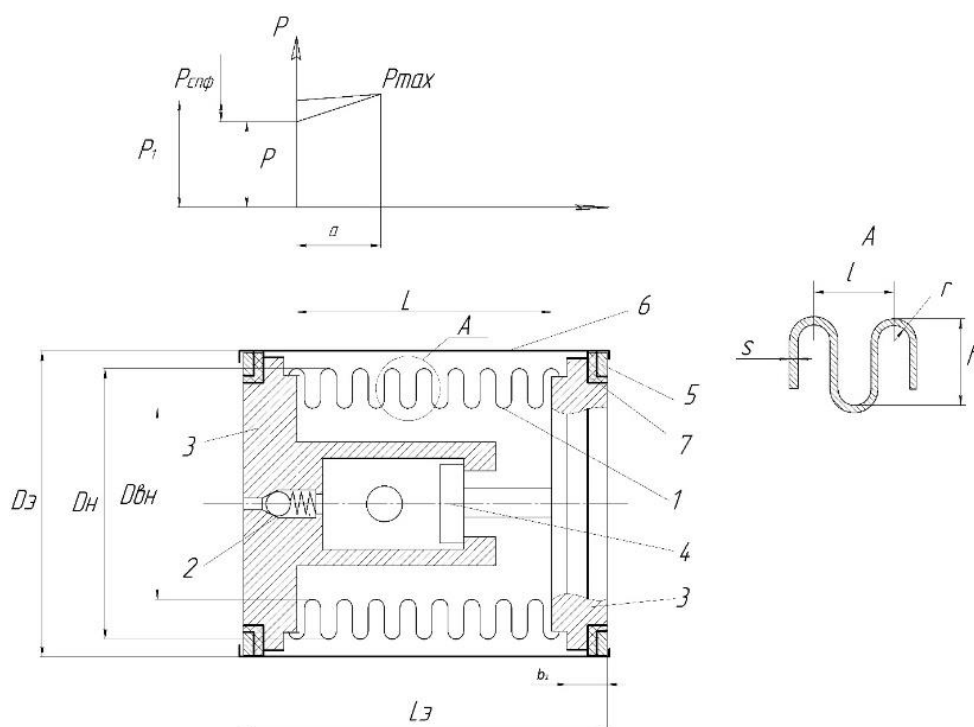


Рисунок 5 – Схема электромеханического сильфонного зажимного элемента с применением МПФ

Задавшись предварительно требуемым теоретическим развиваемым усилием элемента P_{max} (Рисунок 5), силу сильфона можно задать, пренебрегая жесткостью его рубашки:

$$P_{max} = p \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (18)$$

где D_c – средний диаметр сильфона; p – требуемое давление газа для заполнения сильфона.

В соответствии с представленной методикой были рассчитаны примеры конструктивных параметров зажимных элементов из упругих сильфонов при рабочем ходе раскрепления $a_{закр}=2\text{мм}$, 4мм для усилий закрепления $P_{закр}=5000\text{Н}$, при ограничении деформации механическим устройством. В Таблице 3 приведены расчетные данные, которые показывают, что такие зажимные элементы могут быть весьма компактными.

Таблица 3 – Расчетные данные параметров многослойных сильфонов при закреплении зажатого объекта с ограничителем

№	$P_{закр}$, [Н]	a , [мм]	p , [МПа]	D_c , [мм]	P_{max} , [Н]	$L_{МПФ}$, [мм]	$S_{МПФ}$, [мм ²]	$P_{МПФ}$, [Н]	$D_{э\sim}$, [мм]	$L_{э\sim}$, [мм]
1	5000	2	30	14,6	7140	40	8,9	1780	20	50
2	5000	4	30	14,6	7140	80	8,9	1780	20	90

Конструктивные параметры зажимных элементов с использованием сильфонов под давлением могут находиться в широких пределах, что определяется давлением газа внутри сильфона.

Работа всех рассмотренных элементов возможна только при обратимой деформации элементов из МПФ, в которых при нагреве выше критической точки возникает деформация при высоких напряжениях в сплаве, которые для нитинола в 3 раза превышают напряжения при квазипластическим холодном деформировании.

Поэтому сжатие упругого элемента с целью освобождения заготовки осуществляется нагревом элементов из МПФ выше критической температуры (70-90 °С). Такой нагрев проще всего осуществлять электрическим током, регулируя его импульс, достаточный для разогрева данной массы МПФ до заданной температуры при безопасном напряжении источника питания (24В или 36В). Такой нагрев можно реализовать от конденсаторного источника питания (Рисунок 6).

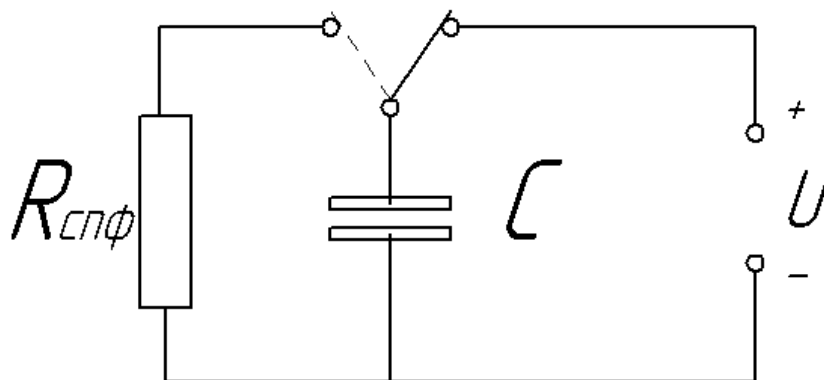


Рисунок 6 – Источник нагрева элемента из МПФ

Требуемое количество энергии для нагрева до заданной температуры:

$$E = C_t M (T_K - T_H) \quad (19)$$

где C_t – массовая теплоемкость МПФ; M – суммарная масса элемента МПФ; T_K – температура фазового перехода материала; T_H – исходная температура элемента из МПФ.

На Рисунке 7 представлена зависимость температуры от времени нагрева с температурой перегрева $T_K=90^\circ\text{C}$ при использовании нескольких количеств ветвей элемента из МПФ ($n_{\text{МПФ}}=10, 14, 18$) при последовательном их соединении и при использовании элементов из МПФ электрически соединены параллельно ($n_{\text{МПФ}}=1$).

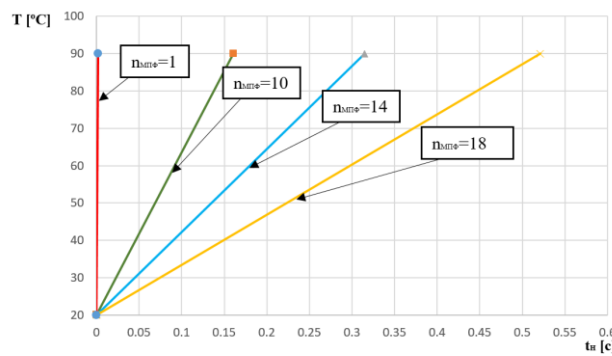


Рисунок 7 – Зависимость температуры элементов из МПФ от времени нагрева при нагреве импульсным источником электрического тока напряжением 36В

При выполнении фланцев элемента из МПФ, выполненных из изоляционного материала и электрического соединения ветвей элемента из МПФ последовательно время нагрева, обеспечивающего сжатие упругого элемента и освобождения заготовки, доходит до 1 секунд и может быть уменьшено за счет сокращения числа проволочных ветвей элемента. Для уменьшения времени нагрева элемента из МПФ и сокращения времени на раскрепление заготовки целесообразно фланцы элемента выполнять металлическими при электрическом соединении ветвей элемента из МПФ параллельно, или сам элемент из МПФ изготавливать в виде фольги, при этом время нагрева, а, следовательно, и время освобождения заготовки может быть менее 1 секунды.

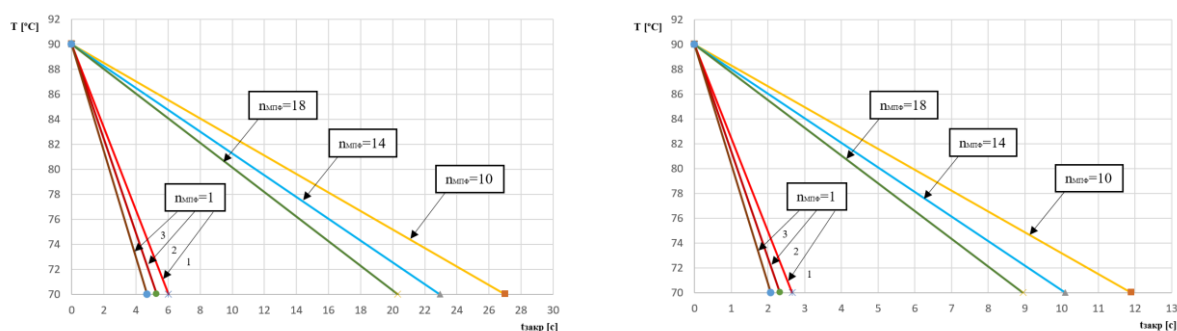
Время же закрепления будет зависеть от времени остывания элементов из МПФ ниже критической температуры либо за счет естественной конвекции, либо за счет принудительного охлаждения. Увеличение этого времени можно получить за счет сокращения поверхности элементов из МПФ (за счет применения более толстых элементов при меньшем их количестве) и за счет некоторого перегрева выше температуры критического перехода. Уменьшение этого времени достигается применение элемента из МПФ в виде фольги, имеющей большую площадь поверхности, чем проволочные элементы, окружающей упругий элемент (Рисунок 8).

Охлаждение элементов из МПФ и закрепление заготовки будет происходить за счет естественной конвекции воздуха вокруг МПФ за время:

$$t_{\text{закр}} = \frac{C_t \times M (T_K - T_{\text{кр}})}{\alpha \times F \times (T_{\text{ср}} - T_{\text{ос}})} \quad (20)$$

где T_K – температура перегрева МПФ выше температуры фазового перехода; $T_{\text{кр}}$ – критическая температура фазового перехода МПФ, обеспечивающая надежность срабатывания привода; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности элемента

МПФ; $T_{\text{ср}}$ – средняя температура нагретого элемента МПФ; $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды.

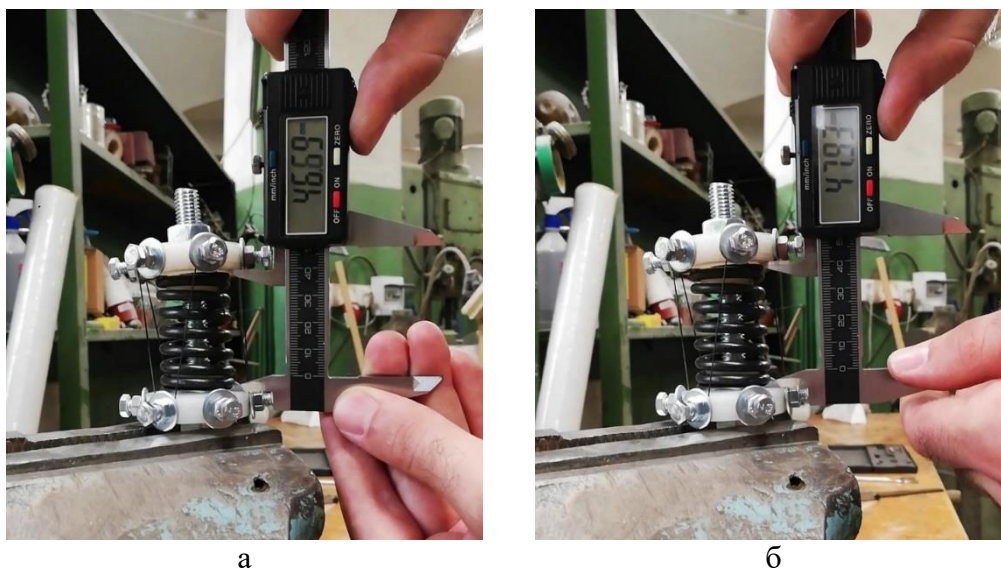


а

б

Рисунок 8 – Зависимость температуры элементов из МПФ от времени остывания при температуре перегрева $T_K=90^{\circ}\text{C}$: а – при свободной конвекции $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, б – при применении охлаждения потоком воздуха $\alpha = 22,7 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, где $n=1$ при использовании фольги из нескольких разных площадей поверхности элемента МПФ

Представленные теоретические выводы по обоснованиям конструкции зажимных устройств с применением МПФ проверялись на лабораторной модели.



а

б

Рисунок 9 – Термомеханическое зажимное устройство: а – при нагреве элементов из МПФ; б – при остывании элементов из МПФ

При проведении экспериментов на макете зажимного элемента через проволоку из МПФ пропусклся электрический ток, который нагревал проволоку до температуры фазового перехода, это приводило к сокращению длины проволоки и сжатию пружины, что используется при освобождении заготовки (Рисунок 9, а). А при отключении нагрева проволока остывает, и пружина возвращается в исходное положение, что используется для

закрепления объекта (Рисунок 9, б). Эксперименты подтвердили расчетные параметры зажимного элемента.

В третьей главе выявлена значительная вариативность конструктивных параметров указанных зажимных устройств, что акцентирует внимание на необходимости оптимизации их конструкции.

Целевой функцией оптимизации были выбраны минимальные объемные габариты устройства $\min (V=S \times L)$, при заданных функциональных параметрах: усилие закрепления $P_{\text{закр}}$ и рабочем ходе $a_{\text{закр}}$. И ограничениях, связанных с прочностными параметрами упругого элемента и элементов из МПФ.

С целью определения наилучших минимальных габаритов зажимных устройств была реализована программа оптимизации в среде MATLAB. В рамках этой программы использовался метод перебора вариантов. На Рисунке 10 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма, позволяющего оптимизировать конструкцию по габаритам.

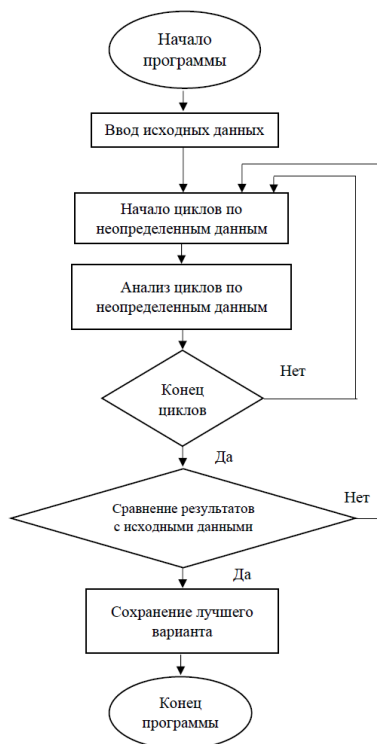


Рисунок 10 – Блок-схема программы для оптимизации конструктивных параметров зажимного элемента

В соответствии с представленной методикой оптимизации были рассчитаны примеры конструктивных параметров зажимных элементов с применением МПФ с рабочим ходом $a_{\text{закр}} = 2\text{мм}$ и усилие закрепления $P_{\text{закр}} = 2000\text{Н}, 5000\text{Н}, 10000\text{Н}$ (Таблица 4, 5 и 6) с упругим элементом в виде винтовых пружин, тарельчатых пружин и пневматических сильфонов.

Таблица 4 – Характеристики термомеханических зажимных элементов с применением винтовых пружин и элементов из МПФ

Вариант	$a_{\text{закр}},$ [мм]	$P_{\text{закр}},$ [Н]	$D,$ [мм]	$d,$ [мм]	$L_2,$ [мм]	n	i	$V_{\text{Винтовые}},$ [мм ³]
1	2	2000	25,662	6,497	89,60	13,484	3,95	$7,28 \cdot 10^4$
2	2	5000	40,576	10,272	89,60	8,528	3,95	$18,19 \cdot 10^4$
3	2	10000	63,916	15,979	104,13	6,392	4	$52,2 \cdot 10^4$

Таблица 5 – Характеристики термомеханических зажимных элементов с применением тарельчатых пружин и элементов из МПФ

Вариант	$a_{\text{закр}},$ [мм]	$P_{\text{закр}},$ [Н]	$D_1,$ [мм]	$D_2,$ [мм]	$s_3,$ [мм]	$t,$ [мм]	$b,$ [мм]	n	$L_2,$ [мм]	$V_{\text{Тарельчатые}},$ [мм ³]
1	2	2000	22,5	13	0,5	1,25	0,5	100	127	$5,05 \cdot 10^4$
2	2	5000	30,5	12	1	1,85	0,3	50	94,5	$6,90 \cdot 10^4$
3	2	10000	33,5	12	1	2,5	0,4	50	127	$11,19 \cdot 10^4$

Таблица 6 – Характеристики термомеханических зажимных элементов с применением пневматических сильфонов и элементов из МПФ

Вариант	$a_{\text{закр}},$ [мм]	$P_{\text{закр}},$ [Н]	$p,$ [МПа]	$D_c,$ [мм]	$L_2,$ [мм]	$V_{\text{Сильфон}},$ [мм ³]
1	2	2000	16,2	15	90	$4,42 \cdot 10^4$
2	2	5000	25	19,1	90	$5,99 \cdot 10^4$
3	2	10000	25	27	90	$9,68 \cdot 10^4$

Выводы из расчетной оптимизации:

- Наименьшими габаритными размерами могут обладать зажимные устройства с пневматическим сильфонным упругим элементом.
- Применение тарельчатых пружин в зажимных элементах с применением МПФ имеет преимущества по габаритам по сравнению с применением винтовых пружин сжатия.
- Предложенные устройства имеют меньшие габариты по сравнению с применяемыми на практике пневматическими устройствами и не требуют сложных и дорогих дополнительных устройств

В четвертой главе рассмотрены возможности практического применения разработанных зажимных устройств на основе МПФ. Приведены конкретные примеры их применения в различных областях технологии машиностроения:

1. Автоматизированный прихват:

Наиболее простое применение, это электромеханический прихват, состоящий из упругого элемента тарельчатых пружин и элементов из МПФ, например, проволочного типа (Рисунок 11).

Закрепление в данном случае осуществляется пружиной, а раскрепление деформацией элементов из МПФ при их нагреве пропусканием электрического тока.

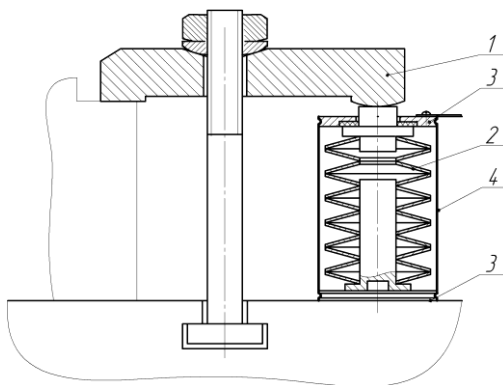


Рисунок 11 – Закрепление заготовки автоматизированным прихватом: 1 – прихват; 2 – упругий элемент; 3 – фланец с токопроводом; 4 – элементы из МПФ

2. Автоматизированные машинные тиски:

Элементы такого типа могут встраиваться в автоматизированные тиски. Такие тиски механически с помощью винта регулируются на требуемый размер в партии заготовок, а закрепление и раскрепление заготовки может производиться автоматически (Рисунок 12).

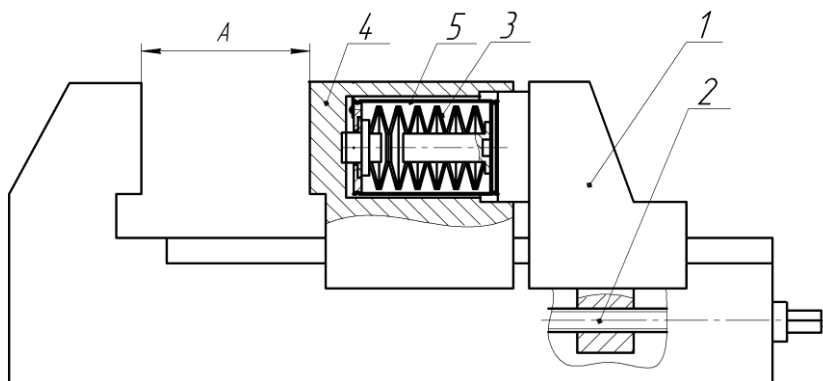


Рисунок 12 – Машинные тиски с автоматизированным приводом: 1– подвижная губка; 2 – ходовой винт; 3 – упругий элемент; 4 – зажимная губка; 5 – элементы из МПФ

3. Автоматизированный цанговый патрон:

Такие элементы могут встраиваться в различные патроны, например, цангового типа, которые могут использоваться как для закрепления инструмента, так и заготовок (Рисунок 13).

Надо отметить, что подвод электрической энергии к вращающемуся приспособлению значительно проще, чем пневматической или гидравлической рабочей среды.

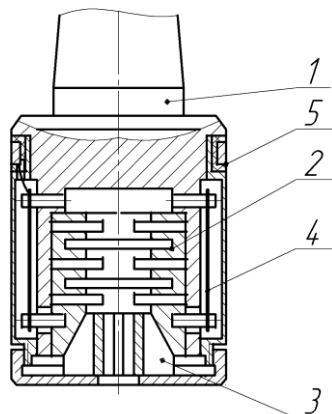


Рисунок 13 – Патрон цанговый автоматизированный: 1 – оправка (корпус); 2 – упругий элемент; 3 – цанга; 4 – элемент из МПФ; 5 – токосъемник

4. Электромеханическое устройство закрепления инструмента в шпинделе станка:

Зажимные устройства такого типа могут использоваться в конструкциях станков. Например, во многих фрезерных станках с ЧПУ закрепление фрезерных оправок в шпинделе осуществляется пакетом тарельчатых пружин, воздействующих на затыг, а раскрепление оправок сжатием этих пружин специальным гидравлическим поршнем, устанавливаемым на обратный конец шпинделя станка. Это усложняет конструкцию станка и требует дополнительного оборудования (гидростанции).

Применяя предложенной устройстве можно сжатие пакета тарельчатых пружин и освобождение фрезерной оправки осуществить элементами из МПФ, что значительно упрощает конструкцию станка (Рисунок 14).

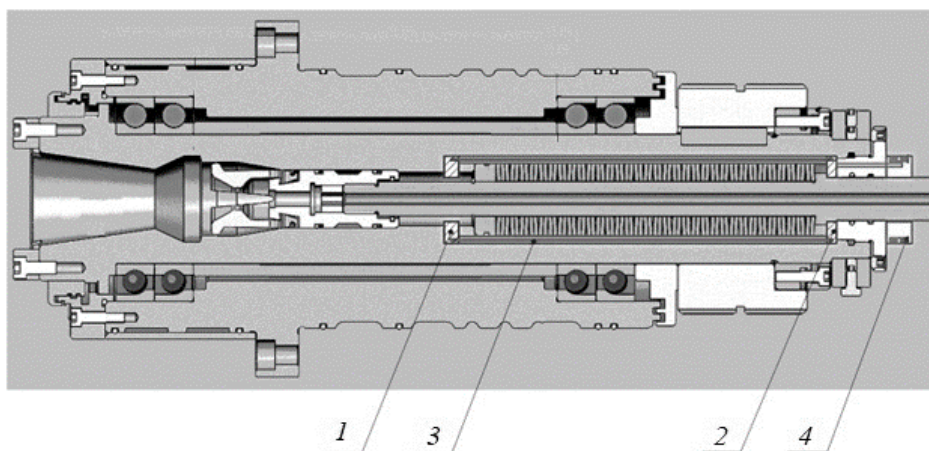


Рисунок 14 – Электромеханическое устройство закрепления инструмента в шпинделе станка на основе применения МПФ: 1 – вал шпинделя кольца; 2 – кольцо; 3 – элемент из МПФ; 4 – токосъемники

Указанные примеры свидетельствуют о широком спектре возможного применения предложенных средств закрепления в автоматизированной станочной оснастке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные термомеханические устройства закрепления, использующие МПФ, обладают функциональными характеристиками, охватывающими широкий диапазон усилий и перемещений при более компактных габаритах по сравнению с применяемыми пневматическими устройствами закрепления.
2. Предложенные устройства закрепления позволяют дистанционно в автоматическом режиме управлять процессом закрепления заготовок, а время закрепления и раскрепления заготовки может регулироваться как за счет конструктивных параметров элементов из МПФ, так и за счет температуры их нагрева и устройств принудительного охлаждения.
3. Предложена методика определения конструктивных параметров электромеханических зажимных устройств с различными типами применяемых упругих элементов.
4. Зажимные устройства с упругими элементами на основе пневматических сильфонов, заполненных газом под давлением, могут обеспечивать значительные усилия закрепления при более компактных габаритах по сравнению с использованием винтовых или тарельчатых пружин.
5. Предложенная методика оптимизации конструктивных параметров зажимных элементов станочных приспособлений с применением МПФ позволяет определять минимальные габариты данных элементов при заданных функциональных параметрах.
6. Разработанные зажимные устройства, использующие МПФ, обладающие компактными размерами и высокой силой закрепления, могут повысить степень автоматизации при обработке заготовок на станках с ЧПУ, оборудованных грузочными манипуляционными устройствами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ:

1. Арслан, Х. Применение электромеханических зажимных устройств с применением материалов с памятью формы в станочных приспособлениях / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Металлообработка. – 2022. – № 1 (127). – С. 51–55.

2. Арслан, Х. Расчетное обоснование термомеханических зажимных устройств для станочных приспособлений / Х. Арслан, М.Т. Коротких // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7 (133). – С. 133–137.

Публикации в других изданиях, рецензируемых SCOPUS:

3. Arslan, H. Electromechanical clamping device using shape memory materials / H. Arslan, M. T. Korotkih // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – P. 150–158.

4. Arslan, H. Optimization method for clamping devices based on shape memory materials / H. Arslan, M. T. Korotkih // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2023. – P. 195–202.

Публикации в изданиях, рецензируемых РИНЦ:

5. Арслан, Х. Электромеханические зажимные устройства с применением материалов с памятью формы / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2021. – С. 564–577.

6. Арслан, Х. Термомеханические зажимные устройства для станочных приспособлений / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Инновационные идеи в машиностроении. – 2022. – С. 99–103.

7. Арслан, Х. Методика оптимизации зажимных устройств на основе материалов с памятью формы / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2022. – С. 385–396.

8. Арслан, Х. Зажимные электромеханические устройства с упругим сильфонным элементом с применением материалов с памятью формы / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2023. – С. 563–576.

Патенты:

9. Коротких, М. Т. Патент на изобретение № RU 2775658 C1 Российская Федерация, МПК F03G 7/06. Термомеханический силовой привод: № 2021119568: заявл. 05.07.2021: опубл. 06.07.2022 / М. Т. Коротких, Х. Арслан; заявитель СПбПУ.

10. Коротких, М. Т. Патент на изобретение № RU 2796035 C1 Российская Федерация, МПК F03G 7/06. Термомеханический силовой привод: № 2022117173: заявл. 24.06.2022: опубл. 16.05.2023 / М. Т. Коротких, Х. Арслан; заявитель СПбПУ.