

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование кафедры)  
15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»  
(код и наименование направления подготовки)  
Технология автоматизированного машиностроения  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Определение технологических параметров и проектирование устройств для реализации термосиловой обработки

Студент	<u>А.В. Попов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Д.Ю. Воронов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультант	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент Н.М. Бобровский \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ Г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов \_\_\_\_\_  
(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 Г.

Тольятти 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1 Исследование состояния вопроса	7
1.1. Обоснование необходимости проведения патентного исследования.	7
1.1.1. Формирование программы исследования	8
1.1.2. Оценка исходных условий.	9
1.1.3. Формулировка цели исследования	9
1.1.4.. Выбор стран проверки.	9
1.2. Особенности патентного законодательства стран проверки.	9
1.3. Технические решения, подлежащие анализу.	11
1.3.1. Выявление технических решений, используемых в объекте.	11
1.3.2. Определение ИТР в зависимости от объема выпуска или экспорта объекта.	11
1.4. Выбор покупных изделий, подлежащих проверке на патентную чистоту.	12
1.4.1 Выявление комплектующих (покупных) изделий, применяемых в объекте.	12
1.4.2 Определение комплектующих, подлежащих проверке в зависимости от объема выпуска или экспорта и их стоимости.	12
1.4.3 Определение комплектующих, подлежащих проверке в зависимости от сроков известности.	12
1.5 Определение и подбор технической документации.	12
1.6 Регламент поиска.	13
1.6.1 Определить классификации изобретений, действующих в странах проверки.	13
1.6.2 Определение МКИ и УДК	13
1.6.3 Установление глубины поиска.	14
1.6.4 Источники информации для поиска.	14

1.7. Патентный поиск	15
1.8. Существенные признаки.	23
1.9 Показатели положительного эффекта	25
1.10 Сопоставительный анализ преимуществ и недостатков ИТР и аналогов (при исследовании достигнутого уровня) приспособления «Стапель сборно-секционный»	26
1.11 Вывод по результатам патентного исследования	26
1.12 Описание усовершенствованного объекта по результатам патентного исследования на примерах аналогов	28
1.13. Существующие технологии изготовления маложестких валов и направления их совершенствования.	31
Выводы по главе 1	43
Глава 2 Методика определения технологических параметров термосиловой обработки и конструктивных параметров устройств ее реализующих.	44
2.1 Данные для расчета	44
2.2 Расчет допустимых напряжений	45
2.3 Определение осевых усилий	45
2.4 Расчет параметров стапеля	46
2.5 Рабочее усилие стапеля	48
2.6 Расчет усилия сдвига и напряжений среза и смятия.	49
2.7 Расчет величины пластической деформации.	50
2.8 Определим величину крутящего момента прикладываемого к детали совместно с осевым усилием, создаваемым стапелем.	51
2.9 Определим рабочие частоты крутильных и продольных колебаний создаваемых волноводом комплексных колебаний, прикладываемых к детали.	56
2.10 Определение режимов охлаждения для детали.	57
2.11 Определение режимов охлаждения для стапеля.	63
Выводы по главе 2	65

Глава 3 Проектирование устройств для проведения термосиловой обработки и управления данным процессом.	66
3.1. Проектирование устройства для термосиловой обработки.	66
3.2. Разработка системы автоматического управления термосиловой обработки многоступенчатых мало жестких валов.	77
Выводы по главе 3	85
Заключение. Выводы по диссертации. ....	86
Список используемой литературы . ....	87

## ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение требований к качеству, надёжности и долговечности технических изделий становится ключевой задачей современного машиностроения. Вследствие создания всё более прочных и технологичных конструкций узлов и агрегатов, в современном машиностроении происходит естественное снижение металлоёмкости продукции и, как результат, формирование значительного класса маложестких деталей: валы, оси, ходовые винты, шпиндели станков, гребные винты и т.д. Такие детали зачастую лимитируют межремонтные, межсервисные и ресурсные интервалы изделий. Производство подобных деталей в нашей стране постоянно увеличивается, что обусловлено все возрастающей потребностью в прецизионных машинах, ростом скоростей вращения технологического оборудования в нефтяной, газовой, автомобильной, судостроительной и авиационной промышленности. Поэтому, задачи разработки технологий изготовления деталей данного класса, являются актуальными задачами современного машиностроения, а поиск резервов повышения точности обработки и ее последующее сохранение – актуальной научной проблемой технологии машиностроения. Основной проблемой при изготовлении маложестких деталей типа «Вал», является релаксация внутренних остаточных напряжений. Релаксация этих напряжений уже после изготовления детали приводит к непредсказуемому короблению. Таким образом, достигнув точности в ходе техпроцесса, мы можем потерять ее уже в ходе эксплуатации. Причем указанные трудности изготовления маложестких деталей возрастают с увеличением отношения их длины к диаметру, так как в данном случае наблюдается снижение жесткости изделий, а процессы релаксации напряжений способны оказывать все более значительное влияние на стабильность геометрической формы маложестких валов.

Цель магистерской диссертации: на базе патентного и литературного анализа, определение технологических параметров и проектирование устройств, для реализации термосиловой обработки. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1. Проанализировать состояние вопроса в области проектирования

устройств, для термосиловой обработки;

- 2. Разработать методику определения технологических параметров термосиловой обработки и конструктивных параметров устройств ее реализующих;
- 3. Спроектировать устройства для термосиловой обработки.

# Глава 1 Исследование состояния вопроса

Задача данной главы – на базе патентного и аналитического исследования определить уровень развития техники по вопросу термосиловой обработки маложестких валов и других прогрессивных технологических процессов.

## 1.1. Обоснование необходимости проведения патентного исследования.

Главным показателем уровня развития техники является развитие технических средств, реализующих данную технологию. Основным элементом оснастки для термосиловой обработки является приспособления для термической обработки – сборно-секционный стапель (ССС).

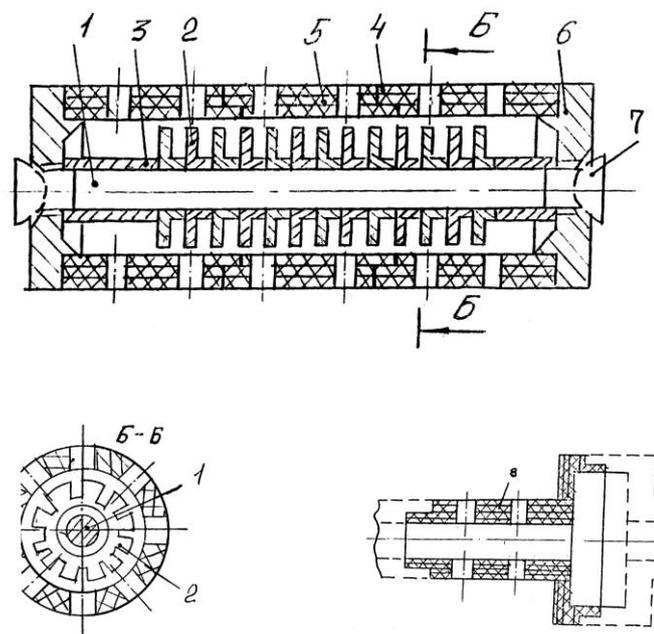


Рисунок 1.1. – Эскиз объекта

Усовершенствовать сборно-секционный стапель (ССС) можно путем выявления прогрессивных технических решений (ТР), которые могут лечь в основу конструкции усовершенствованного приспособления в результате патентных исследований достигнутого уровня вида техники «Стапели сборно-секционные» и возможности его использования в технологическом процессе.

Стапель сборно-секционный – приспособление, применяемое в термических операциях с целью стабилизировать и минимизировать уровень внутренних остаточных напряжений для длинномерных деталей типа «Вал» в радиальном и осевом направлении возникающих как в процессе механической обработки, так и после нее. Стапель сборно-секционный, (рис. 1.1), содержит заготовку 1, с нарезанной на обоих концах резьбой, на наружной поверхности которой размещают радиаторы 2 и дистанционные втулки 3, стапель 4, в виде трубы большого диаметра, с термоизоляционным покрытием 5, крышки-подпятника 6 и сферической пяты 7. Стапель сборно-секционный работает следующим образом. При нагревании конструкции появляется осевое усилие, вызванное разницей коэффициентов линейного расширения заготовки 1 и стапеля 4, которое через замкнутую силовую цепь – стапель 4, крышки-подпятники 6, сферические пяты 7, сообщает заготовке 1. При остывании сборно-секционного стапеля, заготовка 1 остывает минимум в 5 раз быстрее стапеля 4, за счет термоизоляционного покрытия 5, вследствие чего описанная выше силовая цепь не размыкается, и осевое усилие сохраняется до полного остывания всей конструкции.

Недостатком данного приспособления является высокий уровень внутренних остаточных напряжений в радиальном и осевом направлениях после термической обработки, вследствие несовершенства его конструкции или конструктивных элементов из которых состоит данное приспособление. Неравномерное распределение высокого уровня напряжений внутри материала детали приводит к отклонению геометрии детали от идеальной, то есть к появлению коробления.

### 1.1.1 Формирование программы исследования.

Цель формирования программы исследования: «Стапель сборно-секционный и его конструкция» обеспечение достоверности исследования достигнутого уровня термосиловой обработки.

#### 1.1.2 Оценка исходных условий.

Целью исследования является обеспечить рациональный подход к определению оптимальной конструкции приспособления для проведения термической обработки, а также оценить данную конструкцию приспособления с точки зрения проведения исследования.

#### 1.1.3 Формулировка цели исследования.

Целью данного исследования уровня развития «Стапели сборно-секционные» является усовершенствование исследуемого приспособления для термосиловой обработки и нахождение таких технических решений, устраняющих его недостатки, указанные в описании объекта исследования, а именно: высокий уровень внутренних остаточных напряжений возникающих внутри материала в радиальном и осевом направлениях за счет не совершенства его конструкции или конструктивных элементов из которых состоит данное приспособление.

#### 1.1.4 Выбор стран проверки.

Исследования проводим в отношении ведущих стран в области машиностроения: России, ФРГ, США, Франции, Великобритании и Японии.

#### 1.2 Особенности патентного законодательства стран проверки.

Задача данного раздела – выявление особенностей патентного законодательства стран проверки, которые необходимо принять во внимание.

Таблица 1.1 – Патентное законодательство стран проверки.

Положение законодательства	РФ	Англия	США	ФРГ	Япония
Патентный закон, дата его вступления в силу	1961	1961	1961	1961	1961
Виды промышленной собственности, охраняемые в стране	Товарный знак промышленный образец				
Требования к новизне и к источникам, порочащим ее	Абсолютно мировая	Абсолютно мировая	Абсолютно мировая	Абсолютно мировая	Абсолютно мировая
Срок действия патента возможность его продления	20	20	20	20	20
Наличие косвенной защиты	имеется	имеется	имеется	имеется	имеется

### 1.3 Технические решения, подлежащие анализу.

Приспособление для термосиловой обработки - стапель сборно-секционный (ССС) характеризуется конструктивными признаками – наличие элементов, их формой, материалами, взаимным расположением и взаимосвязью, а также режимами управления процессов термической обработки. Следовательно, данное приспособление рассматриваем как объект исследования.

#### 1.3.1 Выявление технических решений, используемых в объекте.

Объект – приспособление «Стапель сборно-секционный» содержит следующие технические решения:

- а) Приспособление «Стапель сборно-секционный» - общая компоновка
- б) Конструкция приспособления «Стапель сборно-секционный»
- в) Комплектующие приспособления «Стапель сборно-секционный»
- г) Режимы управления положенные в основу термического процесса работы приспособления «Стапель сборно-секционный»

#### 1.3.2 Определение ИТР в зависимости от объема выпуска или экспорта объекта.

Для достижения цели исследования уровня техники – обеспечить рациональный подход к определению оптимальной конструкции приспособления «Стапель сборно-секционный» и управление режимами термического процесса, будем рассматривать следующие технические решения:

- а) Приспособление «Стапель сборно-секционный» - общая компоновка
- б) Конструкция приспособления «Стапель сборно-секционный»
- в) Режимы управления положенные в основу термического процесса работы приспособления «Стапель сборно-секционный»

#### 1.4. Выбор покупных изделий, подлежащих проверке на патентную чистоту.

Задача данного этапа – установить перечень, комплектующих изделий и полуфабрикатов сведения, о патентной чистоте которых следует принять, во внимание при экспертизе объекта в целом.

##### 1.4.1 Выявление комплектующих (покупных) изделий, применяемых в объекте.

К покупным комплектующим изделиям, присутствующим при составлении конструкции данного приспособления можно отнести радиаторы 2, крышки подпятники 6, сферические пяты 7.

##### 1.4.2 Определение комплектующих, подлежащих проверке в зависимости от объема выпуска или экспорта и их стоимости.

Комплектующие изделия не подлежат проверке

##### 1.4.3 Определение комплектующих, подлежащих проверке в зависимости от сроков известности

Определение вида проверки комплектующих (запрос в ЦНИИПИ, запрос на предприятие-изготовитель, экспертиза на патентную чистоту используемых технических решений).

Комплектующие изделия не подлежат проверке

#### 1.5 Определение и подбор технической документации.

Задача данного этапа – подобрать техническую документацию на исследуемый объект, в которой исчерпывающей полнотой показаны или описаны ИТР.

Исследование будем проводить по следующей технической документации:

в качестве источников технической документации для данного исследования применяем:

- 1) описания изобретений к патентам и авт. свидетельствам;
- 2) реферативные журналы ВИНТИ 14А «Резание металлов. Станки и инструменты» (14 «Технология машиностроения»).

## 1.6 Регламент поиска.

1.6.1 Определить классификации изобретений, действующих в странах проверки.

В странах проверки действуют следующие классификации изобретений:

В России действует классификация МКИ.

В Великобритании, Германии, Японии действует классификация МКИ и национальная (НКИ).

В США действует национальная классификация (НКИ).

## 1.6.2 Определение МКИ и УДК

Для определения рубрики МКИ «Стапель сборно-секционный»; общая компоновка и конструкция определяем ключевое слово «Термический процесс, режимы и обработка».

По алфавитно-предметному указателю, т.2, определяем рубрику МКИ: С21D, В23Q.

По МКИ, Т.2, разделы В и С, уточняем рубрики МКИ:

С21D<sup>1</sup>/<sub>78</sub> – устройства для создания напряженного состояния при ТО;

С21D<sup>1</sup>/<sub>62</sub> – устройства для быстрого охлаждения;

С21D<sup>9</sup>/<sub>06</sub> – устройства для правки;

В23Q<sup>15</sup>/<sub>00</sub> – способы и устройства для автоматического управления ТО

Индекс УДК определяем по указателю: 621.785.79 и 621.9(088.8)

### 1.6.3 Установление глубины поиска.

Из анализа конструкции приспособления и условий термической обработки, и в частности вида техники «Стапели сборно-секционные», полагаем, что наиболее прогрессивные технические решения содержатся в изобретениях сделанных за последние 10 лет. Поэтому глубину поиска при исследовании определяем в 10 лет. В соответствии с этим сроком устанавливаем и глубину поиска по каждой из стран проверки при экспертизе и исследовании приспособления «Стапель сборно-секционный» на патентную чистоту. Учитывая учебный характер экспертизы и исследования глубина поиска может быть уменьшена в соответствии с имеющимися в распоряжении фонда источников технической информации. При исследовании патентоспособности 20 лет.

### 1.6.4 Источники информации для поиска.

4 Источники информации для :

- 1) бюллетень открытий и изобретений РФ;
- 2) Сборник «Изобретения стран мира»;
- 3) Журнал «Резание металлов»;
- 4) Журнал «Станки и инструменты»
- 5) Журнал «Вестник машиностроения»
- 6) Журнал «Изобретатель и рационализатор»
- 7) Описания к авторским свидетельствам
- 8) Технические книги в области термической обработки

При исследовании патентной чистоты будем принимать во внимание только сведения о патентах стран проверки

Таблица 1.2 – Регламент поиска.

Приспособление для ТСО)	МКИ (НКИ) и УДК	Страны поиска	Глубина поиска, лет	Источники информации
1) Приспособление (ССС)	МКИ: С21D <sup>1</sup> / <sub>78</sub> С21D <sup>1</sup> / <sub>62</sub> С21D <sup>9</sup> / <sub>06</sub> В23Q <sup>15</sup> / <sub>00</sub>	РФ Россия (СССР) Великобритания США Япония Германия	15 (1988-2003)	Описаны выше в пункте 1.6.4. данной диссертации
2) Приспособление (ССС)	УДК: 621.785.79 621.9(088.8)	РФ Россия (СССР)	20 (1983-2003)	
Несмотря на то, что в странах проверки различная глубина поиска, окончательно в учебных целях для всех стран проверки принимаем глубину поиска 20 лет				«Изобретатель и рационализатор»

### 1.7. Патентный поиск

Таблица 1.3 – Патентная документация, подвергаемая анализу.

Приспособление для ТСО	Патент	Автор	Сущность технического решения	Сведения о действии патента	Подлежит (не подлежит) анализу
1	2	3	4	5	6
1. Станпель сборно-секционный	Россия (СССР), описание изобретения к авторскому свидетельству №1258847 С21D <sup>1</sup> / <sub>78</sub>	Драчев О.И., Мозур В.К. Россия (СССР), 23.02.86 «Способ обработки нежестких деталей»	Способ обработки нежестких деталей, преимущественно типа валов, включающих механическую обработку и нагрев поверхностного слоя до температур отпуска. <i>Отличающийся</i> тем, что с целью стабилизации размеров детали за счет создания в ней напряженного состояния, перед механической обработкой прикладывают осевое растягивающее усилие, создающее нормальные напряжения, равные пределу текучести материала детали при температуре отпуска. Нагрев поверхностного слоя осуществляют на глубину, большую глубины залегания остаточных напряжений, созданных механической обработкой, но меньшую устроенной глубины их залегания. Затем проводят выдержку	Действует	Подлежит

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6
			<p>при температуре отпуска и охлаждения на воздухе, после чего растягивающее усилие снимают</p>		
<p>2. Стапель сборно-секционный</p>	<p>Россия (СССР), описание к АС №4689434 С21D<sup>9</sup>/06</p>	<p>Драчев О.И., Иванов О.И., Хенкина Э.Н., Россия (СССР), 10.05.89 «Способ ТО асимметричных длинномерных деталей»</p>	<p>1. Способ термической обработки асимметричных длинномерных деталей, включающих установку детали в перфорированный стапель с фиксацией ее по торцам, нагрев, выдержку до достижения пластической деформации, превышающих упругую величину, и их охлаждение. <i>Отличающуюся</i> тем, что с целью повышения качества обработки детали, путем предотвращения коробления детали по оси, на деталь перед установкой ее в стапель нанизывают распорные втулки и между ними с переменным шагом звездообразные радиаторы. Фиксацию детали осуществляют путем навинчивания на концы детали пят до соприкосновения с крышками стапеля, выполненными со сферическими подпятниками.</p>		

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6
			<p>Стапель выполняют многослойным с наполнителем между слоями, причем стапель выполняют из материала с коэффициентом линейного расширения, большим коэффициента линейного расширения материала детали, а наполнитель выполняют из материала с коэффициентом теплоотдачи, меньшим коэффициента теплоотдачи материала детали.</p>		
<p>3. Стапель сборно-секционный</p>	<p>Россия (СССР), описание к АС №1407969, С21D<sup>1</sup>/<sub>62</sub></p>	<p>Драчев О.И., Мозур В.К. Россия (СССР), 07.07.88 «Устройство для закалки валов малой жесткости»</p>	<p>Способ по п.1, отличающийся тем, что заданную величину пластической деформации достигают путем выполнения стапеля в виде набора кольцевых секций.</p>		

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6
4. Управление ТО	Россия (СССР), описание к АС №1561385, В23Q <sup>15</sup> / <sub>00</sub>	Драчев О.И., Палагнюк Г.Г. СССР, 11.05.88 «Способ автоматического управления процессом ТО»	Способ автоматической диагностики и управления процессом термомеханической обработки мало- жестких деталей, заключается в том, что заготовку устанавливают в шахтную печь, один конец заготовки жестко фиксируют относительно стапеля, а другой в зажимном устройстве силового нагружения, и одновременно воздействует на заготовку температурно-силовыми факторами динамического и статического нагружения в осевом направлении и регистрирует приращение температуры, величину линейного температурного удлинения и активную энергию динамического воздействия, отличающийся тем, что с целью повышения эффективности и эксплуатационной точности обеспечения геометрических и физико-механических свойств параметров заготовки при термической обработке,		

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6
5. Управление ТО	Россия (СССР), Описание в АС №4652441, В23Q <sup>15</sup> / <sub>00</sub>	Драчев О.И., опубликовано 30.12.88. «Способ автоматического управления ТО»	Способ автоматического обеспечения параметров асимметричных маложестких деталей при термомеханической обработке заключается в том, что заготовку устанавливают в ступень, один конец которой фиксируют относительно ступени, а второй в зажимном механизме силового нагружения и одновременно воздействуют на нее температурно-силовыми факторами в осевом направлении, при этом формируют диагностические признаки путем регистрации приращения температуры, величины линейного удлинения и в функции этих приращений управляют температурно-силовыми параметрами, отличающийся тем, что с целью повышения эффективности и эксплуатационной точности геометрических и физико-механических параметров заготовки ее устанавливают в горизонтальную многосекционную печь на опору-призму со встроенными		

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6
			<p>в нее пневмоизмерителями, и нагревают до средней наперед заданной температуры, автоматически выравнивают температуру по длине и прикладывают с заданной скоростью поперечной пластической деформации диаметра заготовки, осевую растягивающую силу, одновременно контролируют текущий размер – утонение диаметра заготовки в зонах локального нагрева равных длине нагревательных элементов с помощью пневмоизмерителей и в случае неравномерных изменений – утонение диаметров заготовки, управляют температурным режимом в локальных зонах, в диапазоне температур когда условный предел текучести изменяется не более десяти процентов, включая или режим остывания для локальных зон с большими пластическими поперечными деформации, обеспечивая при этом повышение физико-механических свойств; или режим стабилизации средней заданной температуры</p>		

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6
			<p>сохраняя физико-механические свойства соответствующие заданной средней температуре, и выдерживают ее в таком состоянии в течении заданного техпроцессом времени, одновременно контролируют стабильность температуры по длине заготовки и включают режим остывания печи с заданной скоростью, автоматически поддерживая равномерную температуру остывания по всей длине заготовки до начального, наперед заданного значения.</p>		

## 1.8. Существенные признаки.

Приспособление «Стапель сборно-секционный», общая компоновка, конструкция и условия работы данного приспособления и его аналогов.

Таблица 1.4 – Существенные признаки - «Стапель сборно-секционный».

№	Признаки технического решения	ИТР	Аналоги				
			А.С. №1258847	А.С. №4689434	А.С. №1407969	А.С. №1561385	А.С. №4652441
Элементы							
1	Стапель	+	-	+	+	+	+
2	Радиаторы	+	-	+	-	-	-
3	Крышки-подпятники	+	-	+	+	+	-
4	Сферические пяты	+	-	+	+	+	-
5	Дистанционные втулки	+	-	+	-	-	-
6	Нагревательный элемент	-	+	-	-	+	+
7	Подпружиненный штифт	+	-	-	-	-	-
8	Стопорная гайка	-	-	-	+	+	-
9	Втулки в отверстиях трубы стапеля	-	-	+	+	+	+

Выявляем существенные признаки ИТР и проводим анализ на основе отображенных и занесенных признаков в (таблицу 1.4). Если техническое решение принципиально решает другую задачу, то документ исключаем из дальнейшего рассмотрения и исследования. Если же технические решения направлены на решение той же задачи представленной аналогами ИТР, то документ включаем в перечень для детального анализа и рассмотрения, делая отметку об этом в графе 6 таблицы 1.3.

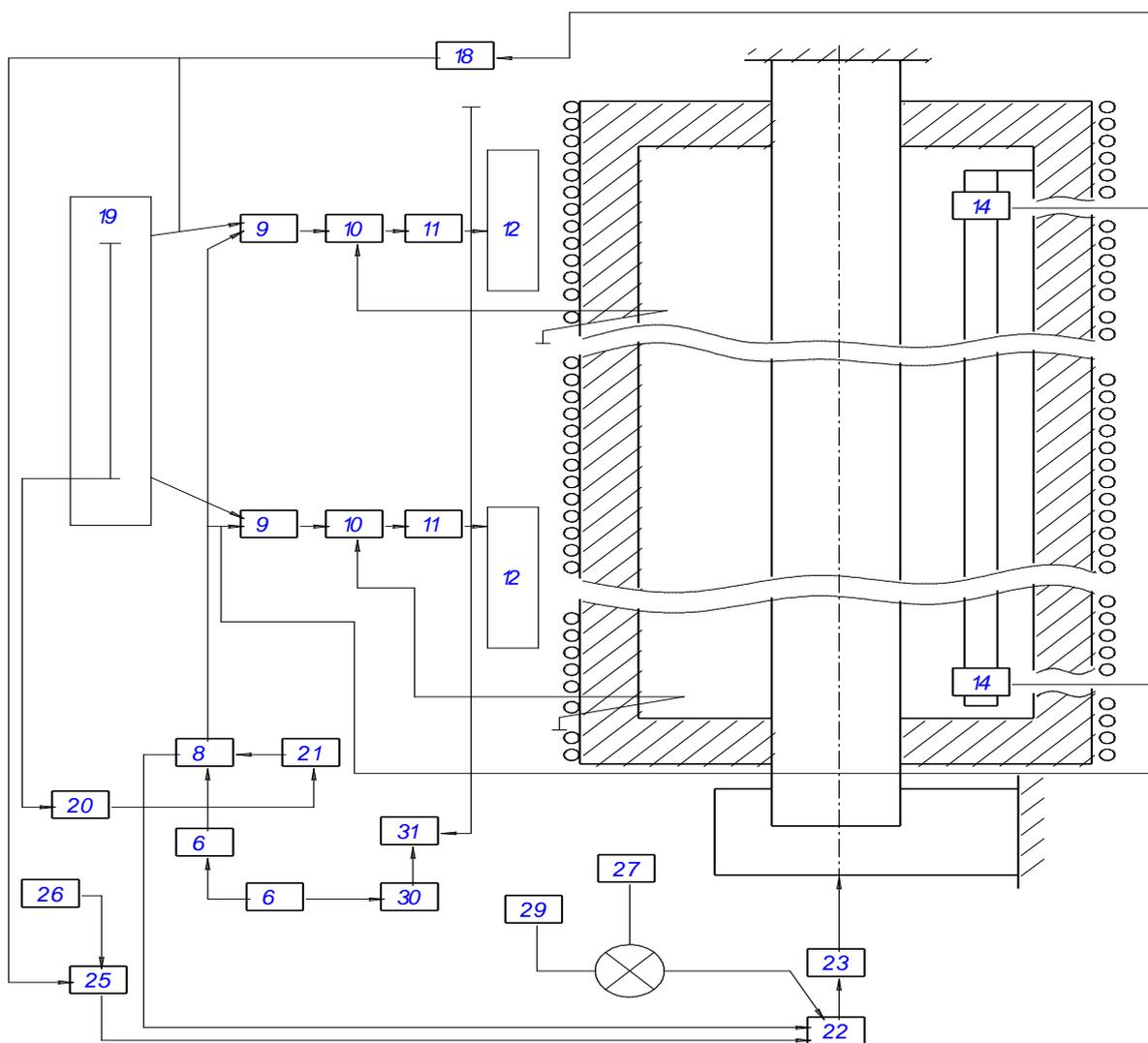


Рисунок 1.2. – Аналог описание к АС №1561385, В23Q<sup>15</sup>/<sub>00</sub>

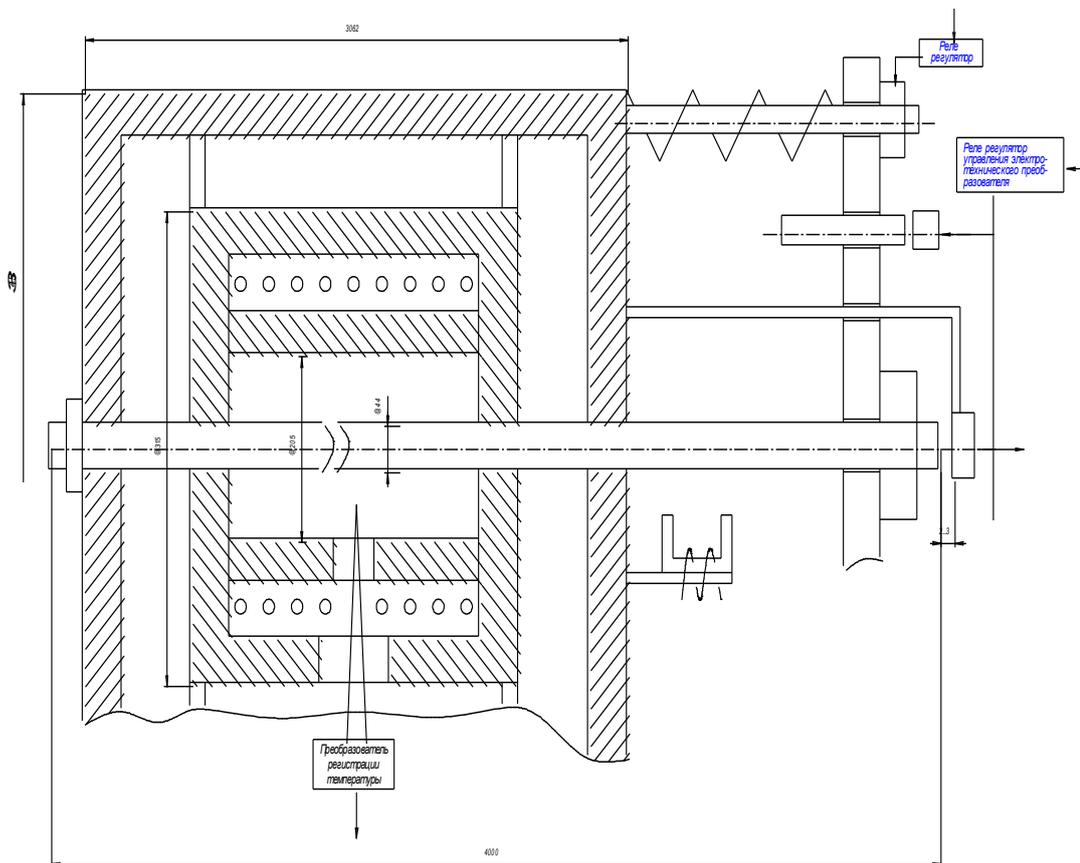


Рисунок 1.3. – Аналог описание к АС №4652441, В23Q<sup>15</sup>/00

### 1.9 Показатели положительного эффекта

а) Показатели, служащие достижению цели:

1. Снижение уровня внутренних напряжений в осевом направлении
2. Снижение уровня внутренних напряжений радиальном направлении

б) Показатели, косвенно содействующие достижению цели:

1. Оптимальный режим термического процесса
2. Оптимальные условия проведения термического процесса

в) Показатели, не влияющие на цель, но усиливающие полезные свойства объекта:

1. Совершенство конструкции
2. Прочность конструкции

г) Показатели, не влияющие на цель, но ослабляющие вредные свойства объекта:

1. Повышение производительности термического процесса
2. Удобство эксплуатации приспособления «Сборно-секционный стапель»

#### 1.10 Сопоставительный анализ преимуществ и недостатков ИТР и аналогов (при исследовании достигнутого уровня) приспособления «Стапель сборно-секционный»

Оцениваем обеспечение положительного эффекта каждым аналогом в баллах по группам:

- а) от 0 до 5 баллов;
- б), в), г) от –2 до 2.

ИТР по каждому показателю выставаем оценку «0»

Заносим оценки в графы 3-8 (таблицы 1.5). Суммируем оценки по каждому аналогу, заносим их в нижнюю строку (таблицы 1.5). Видим, что наибольшую сумму баллов имеет аналог приспособления «Стапель сборно-секционный» описание к авторскому свидетельству №1407969. Следовательно, данное решение является наиболее оптимальным. Его принимаем для использования в усовершенствованном объекте.

#### 1.11 Вывод по результатам патентного исследования

Наиболее прогрессивным техническим решением является приспособление для термической обработки «Стапель сборно-секционный» по УДК 621.9(088.8). Прогрессивное приспособление «Стапель сборно-секционный» обладает патентной чистотой по России и возможно в других странах. Следовательно, если есть патентная чистота, то мы можем выпускать и эксплуатировать приспособление для термической обработки «Стапель сборно-секционный» в России и экспортировать в другие страны.

Таблица 1.5 – Преимущества и недостатки аналогов.

Показатели положительного эффекта		ИТР	Аналоги				
			Описание к АС №1258847	Описание к АС №4689434	Описание к АС №1407969	Описание к АС №1561385	Описание к АС №4652441
1	2	3	4	5	6	7	8
а)	Показатели, обеспечивающие достижение цели усовершенствования						
	1. Снижение уровня внутренних напряжений	0	1	1	3	1	1
б)	Показатели, косвенно содействующие достижению цели						
	2. Оптимальный режим ТО	0	-2	0	1	2	2
в)	Показатели, усиливающие полезные свойства объекта						
	3. Простота конструкции	0	2	1	1	-1	-1
г)	Показатели, ослабляющие вредные свойства объекта						
	4. Повышение производительности ТО	0	1	-1	2	0	0
Суммарный положительный эффект			2	1	7	2	2

## 1.12 Описание усовершенствованного объекта по результатам патентного исследования на примерах аналогов

(51) МКИ C21D<sup>1</sup>/<sub>62</sub>

(53) УДК621.9(088.8)

(54) Приспособление «Стапель сборно-секционный»

(57) Изобретение относится к термомеханической обработке длинномерных малоэластичных деталей типа «Вал»

### Приспособление

«Стапель сборно-секционный».

Изобретение относится к технологии машиностроения, а более конкретно к устройствам для механической обработки длинномерных деталей.

Известны устройства для термомеханической обработки деталей типа «вал», содержащие стапель, выполненный в виде трубы из материала с другим коэффициентом линейного расширения, чем изделие с двумя захватами, установленными относительно торца стапеля.

Недостатком таких устройств является невозможность удержания изделия – вал в напряженном состоянии при снижении температуры до 20°С, т.к. стапель сжимается быстрее вала.

Известен стапель сборно-секционный для термомеханической обработки длинномерных деталей типа «вал», содержащий стапель, состоящий из нескольких секций, радиаторы с радиальными пазами, установленные по наружной поверхности заготовки вдоль ее длины и зафиксированные через дистанционные втулки, крышки-пяты относительно торцов стапеля, сферическими подпятниками с обеих сторон.

Недостатком такого стапеля является высокий уровень внутренних напряжений после обработки в следствии невозможности существенного снижения уровня остаточных напряжений осевой пластической деформации.

Целью настоящего изобретения является снижение уровня внутренних напряжений при термомеханической обработке.

Указанная цель достигается тем, что на заготовку, перед фиксацией ее в корпусе, устанавливают радиаторы с радиальными пазами, их количество и площадь зависит от геометрических параметров и физико-механических свойств изделия, дистанционные втулки, далее заготовку с радиатором и дистанционными втулками фиксируют в осевом направлении крышками-подпятниками, относительно торца корпуса.

Крышки-подпятники выполняют с отверстиями в центре, переходящие во внутреннюю сферическую поверхность. Корпус выполняют многослойным. Далее на конце заготовки накручивают сферические пяты с фиксатором, выполненным в виде подпружиненного штифта и отверстия в заготовке, устанавливают направляющие втулки с пальцами на внутренней поверхности, которые находятся в сопряжении со спиральными пазами на концах заготовки и жестко крепят от проворота.

Сущность изобретения поясняется чертежом (рис. 1.4), где изображен стапель в разрезе. Стапель сборно-секционный содержит многослойный корпус 1, в виде трубы с наполнителем, радиаторы 2 с радиальными пазами и дистанционными втулками 3, установленные на наружной поверхности заготовки 4 с двумя отверстиями 5 и двумя спиральными пазами с резьбой на обоих концах. Крышки-подпятники 7 с отверстиями в центре, переходящие во внутренние сферические поверхности, сопряженные с ними сферические пяты 8 с подпружиненными во внутренние сферические поверхности, сопряженные с ними сферические пяты 8 с подпружиненным штифтом 9, жестко закрепленные направляющие втулки 10 с пальцами 11 на внутренней поверхности.

Стапель сборно-секционный работает следующим образом:

При нагревании конструкции появляется осевое усилие, вызванное разницей коэффициентов линейного расширения заготовки 4 и корпуса 1, которое через замкнутую силовую цепь – корпус 1, крышка подпятника 7, сферическая пята 8, сообщается заготовке 4, а также крутящий момент, создаваемый спи-

ральным пазом 6 на конце заготовки 4 и пальцем 11 на внутренней поверхности направляющей втулки 10, при движении заготовки 4 при нагреве по внутренней поверхности жестко закрепленной направляющей втулке 10, которой фиксируют подпружиненным штифтом 9. При остывании конструкции осевое усилие сохраняется за счет того, что заготовка 4, до полного остывания всей конструкции. Крутящий момент, зафиксированный подпружиненным штифтом 9 и отверстием 5 в заготовке 4 сохраняется до полного остывания всей конструкции. Использование изобретения позволяет снизить уровень внутренних напряжений, что позволяет увеличить эксплуатационную точность и повысить качество готовых изделий.

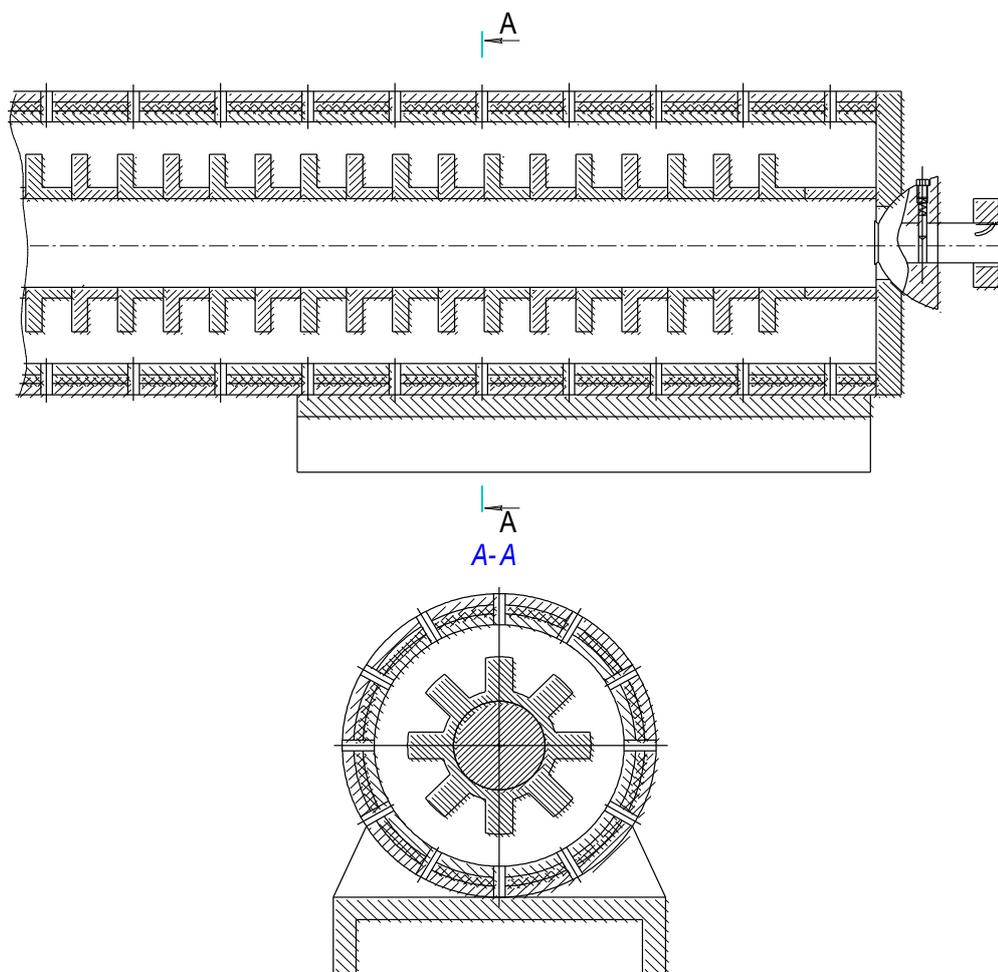


Рисунок 1.4. – Стапель сборно-секционный.

### 1.13. Существующие технологии изготовления маложестких валов и направления их совершенствования.

Основной проблемой при изготовлении маложестких деталей типа «Вал», как правило, являются высокие по величине и хаотично распределенные в материале вала внутренние напряжения. В результате релаксации данных напряжений происходит коробление изделий, причем процесс релаксации нередко значительно растянут во времени, а это может приводить к короблению уже готового изделия.

Данные напряжения возникают при термической обработке, обработке резанием, обработке давлением и других технологических процессах. Главными причинами их образования являются неоднородности деформационных и температурных полей, а также фазовые превращения.

Такие напряжения характерны, в основном, для заготовительного этапа обработки маложестких валов, на последующем этапе, к ним добавочно аккумулируются остаточные напряжения процесса резания. Поскольку в процессе резания в поверхностном слое возникают остаточные напряжения, которые суммируются и накладываются на напряжения заготовительного этапа. Релаксация этих напряжений уже после изготовления детали приводит к непредсказуемому короблению. Таким образом, достигнув точности в ходе техпроцесса, мы можем потерять ее уже в ходе эксплуатации. Причем указанные трудности изготовления МЖД возрастают с увеличением отношения их длины к диаметру, так как в данном случае наблюдается снижение жесткости изделий, а процессы релаксации напряжений способны оказывать все более значительное влияние на стабильность геометрической формы маложестких валов. [25-36]

Основным способом снижения таких напряжений, применяемым в технике, является термообработка, например отпуск. Механизмом снижения напряжений при отпуске, является их релаксация в определенном температурном диапазоне. Однако данный процесс имеет ряд недостатков:

- 1) остаточные напряжения снимаются не полностью;

2) при нагреве и последующем охлаждении заготовки невозможно обеспечить равномерное распределение остаточных напряжений по длине и поперечному сечению заготовки;

3) операция отпуска для деталей такого типа является крайне низко производительным процессом.

Существующие технологические процессы изготовления маложестких деталей (см. рисунок 1.5) имеют, как правило, значительное количество технологических переходов, на которых снимается минимальный припуск, причем после каждого такого перехода, необходим промежуточный отпуск.

Однако данные методы не обеспечивают высокой производительности и могут привести к увеличению стоимости обработки.

Одним из способов повышения эксплуатационной точности МЖД является использование в качестве заготовок круглых калиброванных прутков с последующим поверхностным пластическим деформированием. Калиброванный металл используют, для изготовления валов погружных насосов, служащих для выкачивания воды с глубины. Ключевым моментом достижения эксплуатационной точности данного метода являются повторные обжатия калиброванного металла.

К достоинствам данного метода можно отнести снижение трудоемкости и повышение производительности процесса изготовления маложестких валов.

Однако изготовление МЖД, с применением данного способа обработки, экономически целесообразно лишь на отдельных предприятиях, занимающихся изготовлением круглого проката и располагающих специальным дорогостоящим оборудованием.

Наиболее эффективным способом снижения напряжений является технология, предложенная научной школой профессора Зайдеса С.А.

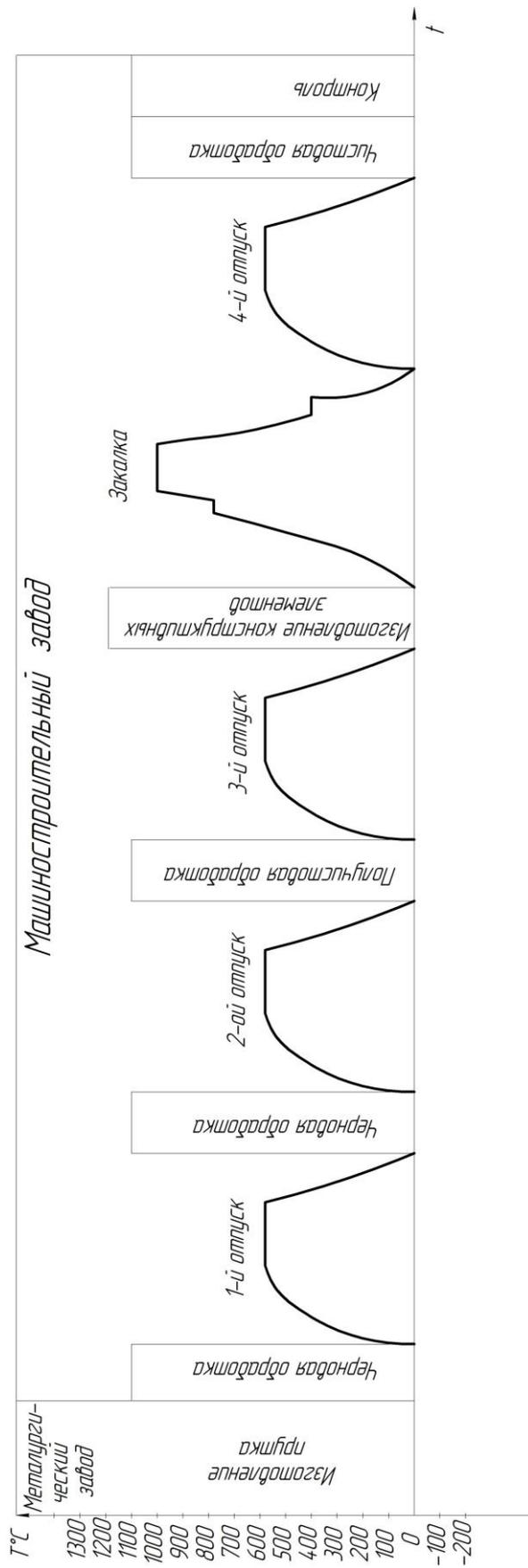


Рисунок 1.5. – Схема изготовления маложестких валов.

Сущность данного способа состоит в том, что на опоре, закрепленной на станине, закрепляют опорные элементы с ограничителями, обладающие деформируемыми свойствами. Нижняя пара клиновых элементов, соединяется с верхними клиновыми элементами, специальными клиновыми толкателями, которые оснащены ограничителями хода. Специальная траверса соединена с верхними клиновыми элементами и с толкателями, установленным над верхними деформируемыми элементами. С наружной стороны траверса соединена с приводным патроном. Причем верхние деформирующие и нижние опорные элементы выполнены в виде призм, имеющих по меньшей мере три последовательно расположенных осесимметричных выступа. Устройство компактно, просто в использовании и конструкции.

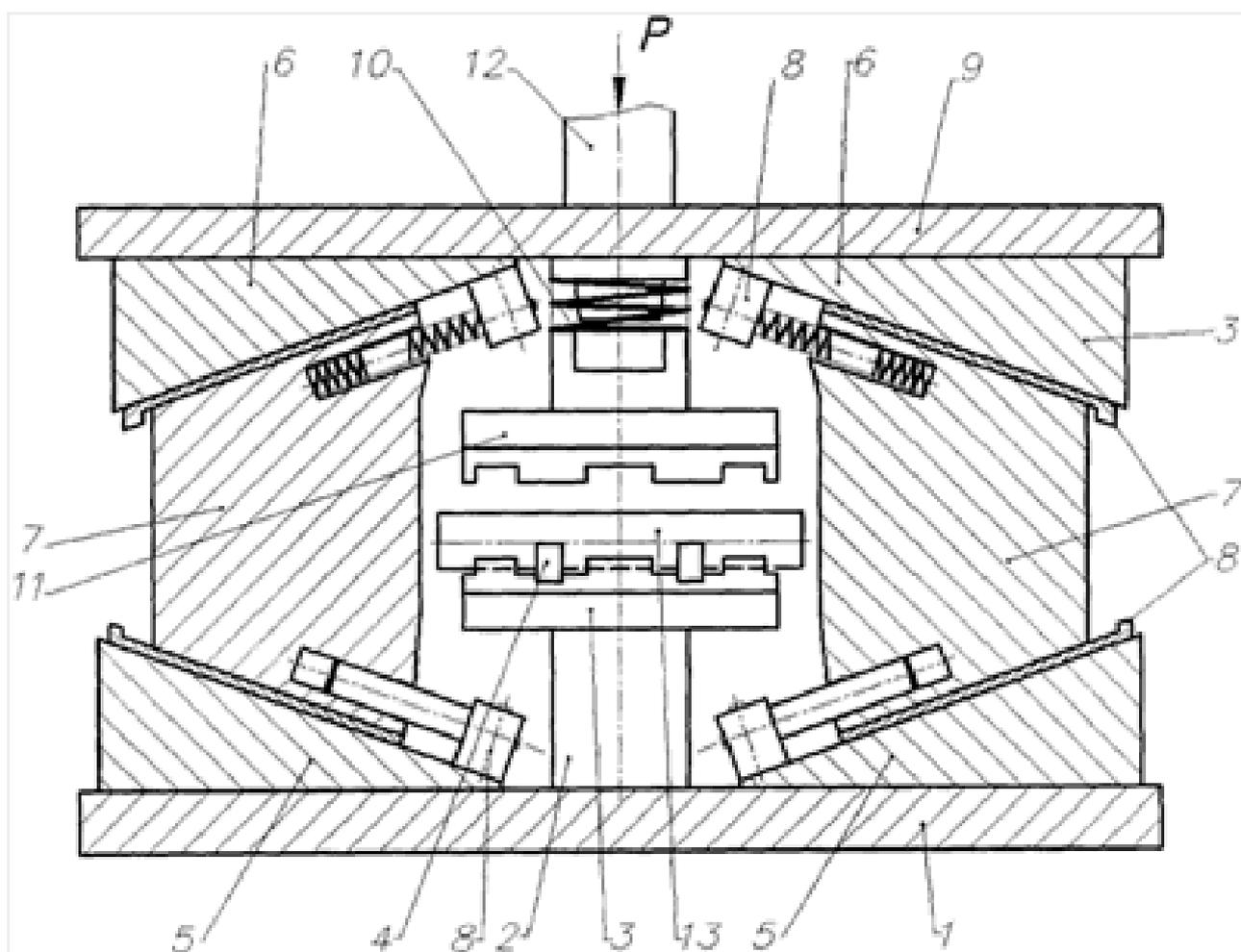


Рисунок 1.6. – Устройство правки мало жестких валов сжатием.

К основным недостаткам такого подхода можно отнести:

- нестабильность геометрии и формы изделия после правки;
- неполное снятие остаточных напряжений;
- низкая жесткость конструкции машины;
- невысокое качество правки за счет неравномерной деформации при низкой жесткости системы.

Более прогрессивным способом, предложенным той же научной школой, является устройство для правки изделий сжатием маложестких валов. Данное устройство, содержащее станину, верхние деформирующие и нижние опорные элементы, расположенные в шахматном порядке, приводной патрон в виде цилиндра, дополнительно оснащено траверсой, двумя клиновыми толкателями, парами верхних и нижних клиновых элементов с регулируемыми ограничителями продольного перемещения клиновых толкателей, опорой, закрепленной на станине, подпружиненным толкателем, при этом клиновые толкатели расположены между клиновыми элементами, траверса внутренней стороной соединена с подпружиненным толкателем, примыкающим к верхним деформирующим элементам, нижние опорные элементы снабжены ограничителями радиального перемещения, выполнены деформирующими и размещены горизонтально на опоре соосно с клиновыми толкателями, причем верхние и нижние деформирующие элементы выполнены в виде призм, имеющих, по меньшей мере, три последовательно расположенных осесимметричных выступа.

Наличие новых конструктивных элементов и взаимосвязи между ними, а именно: траверса, два клиновых толкателя, пары верхних и нижних клиновых элементов с регулируемыми ограничителями продольного перемещения клиновых толкателей, опора, закрепленная на станине, подпружиненный толкатель, при этом клиновые толкатели расположены между клиновыми элементами, траверса внутренней стороной соединена с подпружиненным толкателем, примыкающим к верхним деформирующим элементам, нижние опорные элементы

снабжены ограничителями радиального перемещения, выполнены деформирующими и размещены горизонтально на опоре соосно с клиновыми толкателями, причем верхние и нижние деформирующие элементы выполнены в виде призм, имеющих, по меньшей мере, три последовательно расположенных осесимметричных выступа, способствуют увеличению точности и производительности.

Новые элементы конструкции работают на достижение технического результата следующим образом.

Траверса предназначена для передачи усилия от приводного патрона к подпружиненному толкателю и паре клиновых элементов. При отсутствии траверсы не будет происходить одновременной передачи радиального и осевого воздействия на деталь.

Пары верхних и нижних клиновых элементов обеспечивают передачу осевого усилия на клиновые толкатели. При отсутствии пар верхних и нижних клиновых элементов не будет осуществляться осевое сжатие детали.

Ограничители продольного перемещения используются для регулировки перемещения клиновых толкателей. При отсутствии ограничителей продольного перемещения клиновые толкатели могут сбиться с траектории движения при их максимальном и минимальном перемещении.

Подпружиненный толкатель необходим для перемещения верхних деформирующих элементов и создания радиального воздействия на изделие. При отсутствии подпружиненного толкателя не будет происходить правки изделия в радиальном направлении.

Клиновые толкатели нужны для создания осевого усилия на изделие. При отсутствии клиновых толкателей правка сжатием не будет осуществлена. Передать нагрузку заготовке другим способом практически не представляется возможным. Если устранить осевое усилие, то заготовка будет подвергнута только упругой деформации изгиба радиальным воздействием верхних деформирующих и нижних опорных деформирующих элементов и эффекта правки не будет.

Опора предназначена для закрепления на ней нижних опорных деформирующих элементов. При отсутствии опоры невозможно производить правку изделия, так как оно должно находиться между клиновыми толкателями соосно с ними.

Ограничители радиального перемещения необходимы для регулирования радиального сжатия изделия. При отсутствии ограничителей радиального перемещения изделие после радиального воздействия верхних деформирующих элементов может изогнуться еще сильнее.

Выполнение верхних и нижних опорных деформирующих элементов в виде призм, имеющих, по меньшей мере, три последовательно расположенных осесимметричных выступа, необходимо для равномерного деформирования изделия по всей длине, самоцентрирования изделия, снижения трения при правке в местах контакта изделия с деформирующими элементами, а также для получения возможности править изделия различных диаметров, т.е. расширить ассортимент обрабатываемых изделий. При выполнении деформирующих элементов другой формы, например сплошного сечения, не будет обеспечиваться равномерной деформации изделия, повысится сила трения, и невозможно будет править изделия различных диаметров.

Для правки маложестких валов предложена установка для правки маложестких валов. В данной установке призмы расположены на плите и взаимодействуют с заготовкой под действием ударной нагрузки посредством штока, при этом не обеспечивается достаточная жесткость и устойчивость концевых участков заготовки при ударном воздействии. Это приводит к низкому качеству правки, уменьшению срока службы призм и невозможности править детали разного диаметра. В предлагаемом устройстве для правки изделий сжатием призмы расположены на опоре соосно с клиновыми толкателями для возможности качественной правки изделий различных диаметров, при этом призмы взаимодействуют с изделием посредством подпружиненного и клиновых толкателей. Это улучшает качество правки, увеличивает срок службы призм.

Известно устройство для правки малоожестких деталей растяжением, содержащее станину, зажимные головки, выполненные в виде клиновых элементов, наклонных захватов. В известной конструкции клиновые элементы предназначены для создания растягивающих усилий за счет взаимодействия с ними траверсы и наклонных захватов, в связи с этим на изделие действуют растягивающие усилия. В предлагаемой конструкции устройства для правки изделий сжатием клиновые элементы предназначены для создания сжимающих усилий за счет того, что они связаны с траверсой, передающей усилие от цилиндра к клиновым элементам, и клиновыми толкателями, которые передают усилие к изделию от клиновых элементов. В результате их взаимодействия на изделие действует сжимающее усилие.

Рассмотренные устройства и способы обработки малоожестких валов, предложенные научной школой профессора Зайдеса С.А., являются наиболее прогрессивными, но не способны обеспечить достаточную точность и производительность.

Снизить уровень остаточных напряжений по длине заготовки, а также время и энергоёмкость процесса позволяют различные способы виброобработки. При виброобработке в материал детали, определенным образом, вводится энергия колебаний. Энергия колебаний запускает механизм сдвигов в кристаллической решетке, вызывая перераспределение напряжений. С точки зрения расхода энергии, вибрации необходимо прикладывать на резонансной частоте. Различным способам виброобработки свойственны и другие недостатки, такие как: отсутствие информации о протекании релаксационных процессов по длине и сечениям детали, сложность используемой конструкции. Такой способ имеет ограниченную область применения и сложности с управлением данным процессом.

Ещё одним способом повышения эксплуатационной точности малоожестких деталей является операция термосиловой обработки (см. рисунок 1.7) с применением системы автоматического управления параметрами техпроцесса. Суть метода заключается в равномерном продольном и поперечном упругопластиче-

ском деформировании маложесткого вала, посредством осевого растягивающего усилия при термообработке. При остывании в наружных и внутренних слоях вала возникают противоположные по знакам напряжения, за счет того, что скорость охлаждения наружных слоев существенно выше, чем внутренних. При полном охлаждении напряжения изменяют знаки, на противоположные. Таким образом, получается, что все напряжения в наружных слоях будут одного знака, что устранил коробление. Если в дальнейшем, при обработке резанием, обеспечить снятие равномерного припуска, то позволит сохранить данную внутреннюю структуру материала и исключит коробление маложесткого вала. Поэтому, из технологического процесса обработки маложесткого вала можно исключить все промежуточные отпуска, применяемые для снижения и стабилизации напряжений. В тоже время, термосиловую обработку рационально проводить при стандартной термообработке (закалке, отпуске). Такой подход в несколько раз увеличивает производительность изготовления маложестких валов, существенно повысить точность, исключить коробление, и снизить себестоимость обработки.

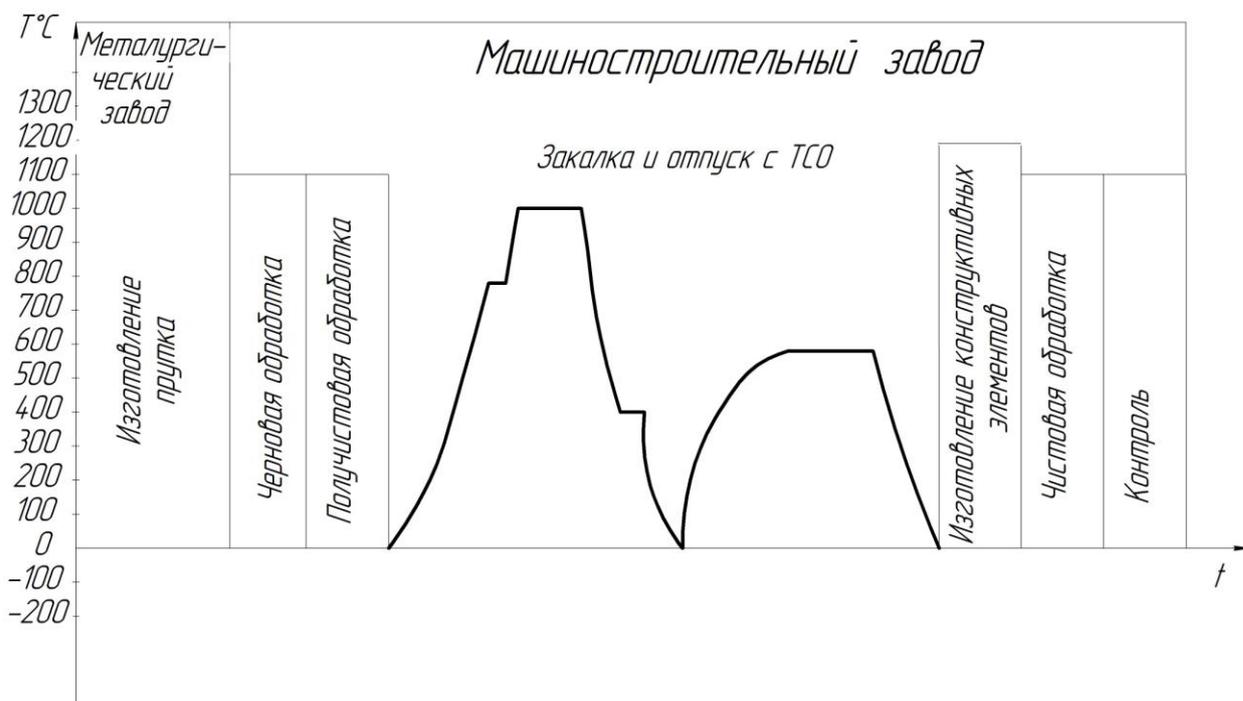


Рисунок 1.7. – Схема изготовления маложестких валов с применением термосиловой обработки.

При термосиловой обработке необходимо оперативно контролировать температуру, величину и скорость осевой деформации.

Существуют различные методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала, с небольшим снижением уровня остаточных напряжений. Основными из них являются динамическое и статическое старение, вибростарение, ультразвуковое старение и старение при помощи тепловых ударов. Однако данные методы крайне низко производительны.

Таким образом, анализирую выше сказанное, можно сделать вывод о том, что термосиловая обработка является самым перспективным методом обработки малоожестких валов.

Ещё один важный фактор, который не полностью рассмотрен авторами, это процесс фазового превращения аустенита в мартенсит. Дело в том, что углерод и легирующие элементы в стали (кроме кобальта) снижают температуры начала и конца аустенитно-мартенситного превращения. При этом температура завершения мартенситного превращения для высокоуглеродистых сталей может достигнуть  $-80^{\circ}\text{C}$ , и лишь для сталей с содержанием углерода до 0,6% эта температура превышает комнатную. Поэтому, для таких материалов, необходимо в технологический процесс изготовления МЖД включать специальную обработку – обработку холодом (см. рисунок 1.8). Если этого не делать то часть аустенитной фазы стабилизируется, а другая часть перейдет в другую фазу, отличную по объему, что может вызвать коробление МЖД.

Существенное влияние на формирование структуры материала оказывает и скорость охлаждения. Превращение аустенита при различных степенях переохлаждения описывается диаграммами изотермического превращения аустенита в ферритно-цементитные смеси (перлит, сорбит, тростит). При некоей критической скорости образуется только мартенсит. Данный процесс способствует увеличению прочности, снижением объема и ударной вязкости, а это может привести к увеличению напряжений, и хрупкому разрушению деталей.

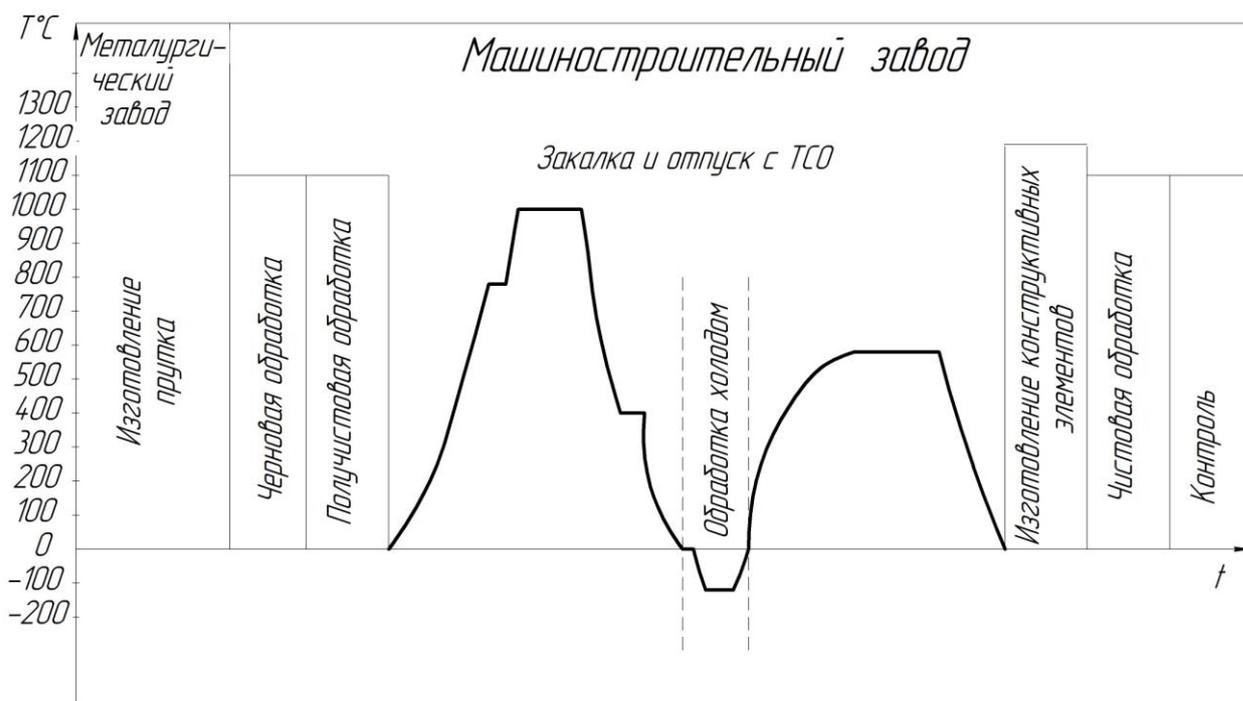


Рисунок 1.8. – Схема изготовления маложестких валов с применением термосиловой обработки и обработки холодом.

Таким образом, чем больше углерода и легирующих элементов в стали и чем выше температура проведения термообработки, тем большее количество остаточного аустенита в стали, тем ниже температура начала и конца аустенитно-мартенситного превращения. Принимая во внимание данные обстоятельства, основой для разработки метода повышения эксплуатационной точности длинномерных многоступенчатых валов, следует принять способ термосиловой обработки. Принцип работы предлагаемого метода заключается в полной автоматизации процесса термосиловой обработки, посредством предварительно разработанного алгоритма работы программы для ЭВМ, которая на основании данных о размерах, исходной и требуемой твердости, а также других физико-механических свойствах материала заготовки, производит расчёт параметров, необходимых для термосиловой обработки маложесткого многоступенчатого вала. В случаях, когда материалом изделия является высоколегированная или высокоуглеродистая сталь, программа автоматически включает в работу контур обработки детали холодом и последующим низкотемпературным или среднетемпературным отпуском (см. рисунок 3). Применение данного метода позво-

лит повысить качество производства маложестких валов. Следует отметить, что разнообразие исходных данных заготовок (геометрические параметры, физические и механические свойства материала) и эксплуатационные требования, предъявляемые к готовым изделиям, исходя из служебных назначений, требуют многовариантных подходов не только по изменению последовательности технологических операций, но и по оптимизации их режимов, а следовательно появляется необходимости разработки САУ процессом обработки.

## Выводы по главе 1

На основании материала, изложенного в главе 1 можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ состояния вопроса, в виде патентного исследования по тематике термосиловой обработки, выявил основных ученых занятых данной научной проблемой: д.т.н., профессор О.И. Драчев; к.т.н., доцент Д.Ю. Воронов; к.т.н., доцент Д.А. Расторгуев.
2. Проведенный патентный анализ выявил основные конструктивные признаки, присущие устройствам для термосиловой обработки: обрабатываемый маложесткий вал; силовой привод – например стапель; управляющий контур в виде системы автоматического управления (САУ).
3. Для надежного функционирования и качественной обработки длинномерных маложестких валов необходимо разработать методику определения технологических параметров термосиловой обработки и конструктивных параметров устройств ее реализующих

## Глава 2 Методика определения технологических параметров термосиловой обработки и конструктивных параметров устройств ее реализующих.

Задача данной главы – произвести расчет и спроектировать приспособление для термосиловой обработки, с целью снижения внутренних напряжений.

### 2.1 Данные для расчета

1. Материал заготовки – прокат сталь 40Х ГОСТ 4543-71.
2. Прочности материала  $\sigma_B = 480$  МПа при  $T = 850$  С<sup>0</sup>
3. Прочности материала  $\sigma_B = 780$  МПа при  $T = 20$  С<sup>0</sup>
4. Обработка – термическая (закалка) отпуск
5. Режимы термообработки:  $T = 900$  С<sup>0</sup>,  $53 \pm 2$  HRC<sub>3</sub>, отпуск  $T = 540$  С<sup>0</sup>
6. Приспособление- специальное
7. Диаметр внутренний стапеля – 92 мм
8. Диаметр внешний стапеля – 120 мм
9. Материал стапеля - сталь 12Х18Н10Т
10. Наполнитель стапеля –песок и чугунная стружка
11. Остывание стапеля с заготовкой - в печи шахтной
12. Нагрев заготовки - электронагрев
13. Длина заготовки – 2142 мм.
14. Диаметр заготовки –44 мм.
15. Предел текучести материала –  $\sigma_{0,2} = 280$ МПа. при  $T = 850$  С<sup>0</sup>
16. Предел текучести материала  $\sigma_T = 550$  МПа
17. Сечение заготовки –  $F = 1520$  мм<sup>2</sup>
18. Коэфф. линейного расширения –  $\alpha_3 = 14,6 \cdot 10^{-6}$  1/С
19. Модуль упругости –  $E = 214 \cdot 10^3$  Н / мм<sup>2</sup>

20. Площадь сечения стапеля –  $F_{CT} = 2512 \text{ мм}^2$

## 2.2 Расчет допустимых напряжений

Наибольшее допустимое напряжение определим как:

$$[\sigma]_{max} = 0.8 \times \sigma_B, \text{ МПа} \quad (2.1)$$

где  $\sigma_B = 430$  МПа – прочность материала при заданной температуре.

Тогда по формуле (2.1) получим:

$$[\sigma]_{max} = 0.8 \times \sigma_B = 0,8 \times 430 = 344 \text{ МПа}$$

Наименьшее допустимое напряжение определим как:

$$[\sigma]_{min} = 1.2 \times \sigma_{0,2}, \text{ МПа} \quad (2.2)$$

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала, равный для данных условий

$$\sigma_{0,2} = 280 \text{ МПа}$$

Тогда по формуле (2.2) получим:

$$[\sigma]_{min} = 1.2 \times \sigma_{0,2}, \text{ МПа} = 1,2 \times 280 = 336 \text{ МПа}$$

Тогда диапазон рабочих напряжений лежит в пределах  $336 \leq \sigma_p \leq 344$ .

## 2.3 Определение осевых усилий

Наибольшее осевое усилие определим как:

$$[P]_{max} = [\sigma]_{max} \times F, \text{ Н} \quad (2.3)$$

где  $F$  – площадь сечения заготовки,  $\text{мм}^2$ ;

Тогда:

$$[P]_{max} = [\sigma]_{max} \times F = 344 \times 1520 = 523 \times 10^3, \text{Н}$$

Наименьшее осевое усилие определим как:

$$[P]_{min} = [\sigma]_{min} \times F, \text{Н} \quad (2.4)$$

где  $F$  – площадь сечения заготовки,  $\text{мм}^2$ ;

Тогда:

$$[P]_{min} = [\sigma]_{min} \times F = 330 \times 1520 = 511 \times 10^3, \text{Н}$$

Таким образом, рабочие осевые усилия в диапазоне  $511 \leq \sigma_p \leq 523$  кН.

## 2.4 Расчет параметров стапеля

Материал для стапеля, должен обеспечить требуемые рабочие усилия, которые определяются как:

$$P_{ст} = E_{ст} \times \alpha_{ст} \times F_{ст} \times \Delta t, \text{Н} \quad (2.5)$$

где  $E_{ст} = 195 \times 10^3$  МПа – модуль упругости материала стапеля, для стали 12Х18Н10Т;

$\alpha_{ст} = 10^{-6} \text{ 1/C}^0$  – коэфф-т линейного расширения материала стапеля;

$F = 2512 \text{ мм}^2$  – площадь сечения стапеля;

$\Delta t$  – разность температур начальной и конечной определим как:

$$\Delta t = (T_H - T_K), \text{°C} \quad (2.6)$$

где  $T_H = 600 \text{ C}^0$  и  $T_K = 20 \text{ C}^0$   $T_H$  – соответственно начальная и конечная температуры;

Тогда:

$$\Delta t = (T_H - T_K) = 600 - 20 = 580 \text{°C}$$

Выразим из формулы (2.5) выражение  $E_{ст} \times \alpha_{ст}$  получим:

$$(E_{ст} * \alpha_{ст})_{искомое} = P_{ст} / F_{ст} * \Delta t \quad (2.7)$$

Как известно, при нагреве какого-либо материала увеличивается его геометрические размеры. Т.е. при термообработке детали типа – «Длинномерный маложесткий вал» его длина увеличивается на некоторую величину. Каждый материал при нагреве до одной и той же температуры увеличивается на различную длину, т.к. обладает своим собственным коэффициентом линейного расширения. Коэффициент линейного расширения длинномерного вала есть физическая величина, показывающая на какую длину увеличиться деталь при нагреве ее на  $1C^0$ . Принцип работы приспособления для термообработки – Сборно-секционного стапеля основан на разнице коэффициентов линейного расширения детали и трубы стапеля. Из-за разницы коэффициентов линейного расширения появляется осевое усилие, которое передается заготовке. Усилие должно быть таковым, чтобы создать осевую пластическую деформацию заготовки, в этом случае исчезают внутренние напряжения в материале заготовки, вызванные упругими деформациями при механической обработке, структура материала становится однородной по длине и поперечному сечению. Если к осевой пластической деформации добавить еще деформацию кручения, то структура становится еще более однородной, а уровень внутренних напряжений еще ниже. При любой температуре, в любой момент времени коэффициент линейного расширения стапеля должен быть больше коэффициента линейного расширения заготовки.

Тогда будет справедливо выражение:

$$\begin{aligned} (E_{ст} * \alpha_{ст})_{max} &= [P_{ст}]_{max} / F_{ст} * \Delta t, \\ (E_{ст} * \alpha_{ст})_{min} &= [P_{ст}]_{min} / F_{ст} * \Delta t, \end{aligned} \quad (2.8)$$

Подставив полученные данные в формулу (2.8), получим:

$$(E_{ст} * \alpha_{ст})_{max} = 523 \text{ кН} * /2512 \text{ мм}^2 * 580 \text{ C}^0 = 3,6$$

$$(E_{ст} * \alpha_{ст})_{min} = 501 \text{ кН} * /2512 \text{ мм}^2 * 580 \text{ C}^0 = 3,4$$

По справочной литературе, исходя из указанных условий, выбираем марку материала стапеля сталь 12Х18Н10Т, которая имеет следующие параметры -  $\alpha_{ст} = 18,2 * 10^{-6} 1/C^0$ ,  $E_{ст} = 195 * 10^3 \text{ Мпа}$ .

## 2.5 Рабочее усилие стапеля

Рабочее усилия стапеля определим по зависимости (2.5):

$$P_{ст} = E_{ст} \times \alpha_{ст} \times F_{ст} \times \Delta t = 195 \times 10^3 \times 18,2 \times 10^{-6} \times 2512 \times 580 = 517 \times 10^3, \text{ Н}$$

Проверим полученное усилие в соответствии с условиями (2.3),(2.4).

$$[P]_{min} = 501 \text{ кН} \leq P_{ст} = 517 \text{ кН} \leq [P]_{max} = 523 \text{ кН}$$

Критическое усилие, по устойчивости определим как:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \times E \times (d_{max} - d_{min})}{64 \times L^2 \times 2} \quad (2.9)$$

где  $E = 130 \text{ ГПа}$  – модуль упругости материала трубы стапеля;

$L = 3000 \text{ мм}$  – длина трубы стапеля;

$\times 2$  – коэфф.-т учитывающий сжимающую нагрузку на две трубы;

$d_{max} = 120 \text{ мм}$ ;  $d_{min} = 92 \text{ мм}$  - соответственно наружный и внутренний диаметр трубы;

Тогда критическое усилие равно:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \times E \times (d_{max} - d_{min})}{64 \times L^2 \times 2} = \frac{3,14^2 \times 130 \times 10^9 \times (0,12 - 0,092)}{64 \times 3^2 \times 2} = 3 \times 10^6, \text{Н}$$

Так как  $P_{кр} = 3,8 \text{ МН} \geq P_{ст} = 517 \text{ кН}$ , то трубы смогут выдержать нагрузку без потери устойчивости.

## 2.6 Расчет усилия сдвига и напряжений среза и смятия.

На резьбу, нарезанную на крайних ступенях вала, воздействует сдвигающая сила, поэтому появляются напряжения среза и смятия.

Напряжение смятия определим как:

$$\sigma_{см} = \frac{S}{d \times h \times z} \leq [\sigma_{см}], \text{МПа} \quad (2.10)$$

где  $d=18 \text{ мм}$  – диаметр резьбы;

$h=50 \text{ мм}$  – толщина резьбового соединения;

$z=2$  – число резьбовых соединений;

$S$  – сдвигающее усилие;

$[\sigma_{см}]$  – допускаемое напряжение на смятие

Сдвигающее усилие определим как:

$$S = \frac{1}{4} \times \pi \times i \times z \times [\tau] \times d^2, \text{Н} \quad (2.11)$$

где  $i=2$  – число плоскостей среза;

$[\tau]$  – допустимое напряжение на срез резьбы;

Напряжение на срез определим как:

$$[\tau] = 0,25 \times \sigma_{0.2}$$

где  $\sigma_{0.2} = 280 \text{ МПа}$  – предел текучести материала детали.

Тогда максимально допустимое напряжение на срез будет равно:

$$[\tau] = 0,25 \times \sigma_{0,2} = 0,25 \times 280 = 70 \text{ МПа}$$

Тогда сдвигающая сила будет равна:

$$S = \frac{1}{4} \times \pi \times i \times z \times [\tau] \times d^2 = \frac{1}{4} \times 3,14 \times 2 \times 2 \times 70 \times 18^2 = 71 \times 10^3, \text{ Н}$$

Тогда, напряжение смятия:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{S}{d \times h \times z} = \frac{71 \times 10^3}{18 \times 50 \times 2} = 39 \text{ МПа} \leq [\sigma_{\text{см}}] = 280 \text{ МПа}$$

Определенная, в ходе расчетов, величина напряжения смятия не превышает допустимого значения.

Напряжение на срез резьбы определим как:

$$\tau_{\text{среза}} = \frac{4S}{\pi \times d \times i \times z}, \text{ МПа} \quad (2.12)$$

Подставим данные в формулу (2.12)

$$\tau_{\text{среза}} = \frac{4S}{\pi \times d \times i \times z} = \frac{4 \times 71 \times 10^3}{3,14 \times 18^2 \times 2 \times 2} = 68, \text{ МПа}$$

Полученное значение напряжения на срез резьбового стержня не превышает допустимого  $\tau_{\text{среза}} \leq [\tau]_{\text{среза}}$ , то есть  $68 \text{ МПа} \leq 70 \text{ МПа}$

## 2.7 Расчет величины пластической деформации.

Пластическую деформацию определим по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2.13)$$

где  $\Delta L$  – удлинение детали;

$L = 2062$  мм – длина детали;

Удлинение детали определим как:

$$\Delta L = \frac{P_{ст} \times L_0}{E_{заг} \times F_{заг}} \quad (2.14)$$

где  $P_{ст} = 517$  кН – рабочее усилие;

$L_0 = 2062$  мм – длина заготовки;

$E_{заг} = 214 \times 10^3$  Н/мм<sup>2</sup> – модуль упругости материала заготовки;

$F_{заг} = 1520$  мм<sup>2</sup> – площадь о сечения заготовки

Тогда, по формуле (2.14) удлинение детали, равно:

$$\Delta L = \frac{P_{ст} \times L_0}{E_{заг} \times F_{заг}} = \frac{517 \times 10^3 \times 2062}{214 \times 10^3 \times 1520} = 4,67 \text{ мм}$$

Тогда, по формуле (2.13) относительная деформация равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{4,67}{2062} \times 100\% = 0,23\%$$

2.8 Определим величину крутящего момента прикладываемого к детали совместно с осевым усилием, создаваемым стапелем.

При обработке мало жестких длинномерных деталей типа «Вал» и в частности рассматриваемый в данной магистерской диссертации детали – типа вала возникают две взаимно связанные проблемы:

1. Происходит коробление длинномерных маложестких деталей типа «Вал», вследствие высокого уровня внутренних напряжений в материале детали после механической обработки. Это приводит к следующему: после механической обработки на контрольной операции все параметры детали, соответствуют заданным. Предприятие – изготовитель отправляет свою продукцию потребителю. Во время транспортировки изделие или в начальный период работы начинают проявляться внутренние напряжения в материале занесенные мехобработкой. Т.к. напряжения распределены хаотично по длине и поперечному сечению изделия, то они не подчиняются ни какому закону и вызываемое ими коробление изделия устранить не удастся. В итоге – изделие неработоспособно – брак. В условиях рынка это грозит предприятию серьезными материальными и моральными убытками, потерей рынка сбыта своей продукции.

2. Существуют специальные ТП обработки маложестких деталей типа «Вал», они устраняют, хотя и частично, проблему, рассмотренную в предыдущем пункте. Однако, такой ТП включает в себя, как правило, несколько термических обработок, 5–6 высокотемпературных отпуска и старение, и как следствие несколько перецентровок. Это приводит к большому расходу режущего инструмента, электроэнергии, основного и штучного времени (термообработка – старение может происходить в течении месяца) и как следствие к высокой стоимости изделия, что в условиях рынка и конкуренции безусловно отрицательно скажется на доходах предприятия. Устранить эти не желательные явления, можно только разобравшись в физической сущности процесса коробления.

Уровень остаточных напряжений достигает значительной величины, а кроме этого напряжения по длине и поперечному сечению детали распределены хаотично. В результате чего, спрогнозировать возникновение коробления практически невозможно, поэтому для релаксации остаточных напряжений в материале маложесткой детали (МЖД) при ее изготовлении используется процесс старения. Однако, старение процесс очень долгий (несколько месяцев), по-

этому возникла необходимость сократить во времени данный процесс. Предлагаю осевую деформацию при ТСО совместить с деформацией кручения.

Функции деформации кручения при ТСО аналогичны функциям осевой деформации, однако их совместное применение позволяет существенно снизить время релаксации напряжений второго рода. Снижение времени релаксации напряжений второго рода происходит за счет ускорения процесса скольжения дислокаций по границам зерен, при действии деформации кручения совместно с осевой деформацией, у дислокаций помимо осевого появляется дополнительное – радиальное направление скольжения дислокаций. Кроме того, часть энергии деформации кручения будет расходоваться на уменьшение размеров зерна. Снижение времени релаксации напряжений второго рода и уменьшение размеров зерен приведет к снижению времени релаксации напряжений первого рода, что в конечном итоге приведет к повышению качества и производительности ТСО.

Величина напряжений от действия деформации кручения должна быть выше предела текучести по касательным напряжениям, так как только в этом случае она будет оказывать описанное выше воздействие на напряжения первого и второго рода. Как известно, существует связь между касательными напряжениями и силовой характеристикой деформации кручения - скручивающим моментом  $M_k$ . Величина  $M_{kr}$  нарастает от нуля до максимума от центра вала, к его периферии в поперечном сечении, и от жесткой заделки до места приложения скручивающего момента в продольном направлении. Однако если приложить деформацию кручения в таком виде при ТСО, то это приведет к формированию неравномерного распределения напряжений по длине и поперечному сечению длинномерного стержня. Приложение осевой деформации совместно с деформацией кручения позволит нам снизить неравномерность распределения остаточных напряжений от действия деформации кручения только в поперечном сечении, тогда как неравномерность распределения остаточных напряжений от действия деформации кручения в продольном направлении останется и

сможет вызвать коробление, так как данные напряжения имеют значительную величину. Следовательно, такая схема приложения деформации кручения при ТСО нас не устраивает, поэтому следует применить другую схему, сводящую неравномерность распределения напряжений в продольном направлении к минимуму. С данной точки зрения, целесообразнее всего, прикладывать скручивающие моменты равные по величине и одинаковые по направлению попеременно с обоих концов стержня. Причем цикл обработки можно считать завершенным, если произошло нагружение стержня скручивающим моментом, который формирует касательные напряжения выше предела текучести по касательным напряжениям, с одного конца, затем произошла разгрузка, и тоже самое проделано с другого конца. Для полного устранения неравномерности распределения остаточных напряжений от действия деформации кручения в продольном направлении, необходимо повторить, описанный выше цикл обработки, приложив к изделию равный по модулю, но противоположный по направлению скручивающий момент. В данном случае, описанные выше релаксационные процессы в материале изделия от действия деформации кручения произойдут, а суммарный скручивающий момент для любой точки, любого сечения будет равен нулю  $M_k=0$ , другими словами в данном случае деформация кручения будет способствовать уменьшению размера зерна, снижать время релаксации остаточных напряжений, не формируя новой неравномерности распределения остаточных напряжений от действия деформации кручения.

Величину крутящего момента прикладываемого к детали выразим из следующей формулы учитывающей диаметр вала и допускаемые напряжения на кручение:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16M_{кр}}{\pi * [\tau]}}, \quad (2.15)$$

где  $[\tau]$  – допускаемое напряжение на кручение, в качестве допускаемого напряжения принимаем напряжение предела выносливости на кручение

$$\tau_{-1}^k = 225 \text{ МН/м}^2$$

Перепишем формулу (2.15) с учетом введенной вновь величины выражая величину крутящего момента

$$M_{кр} = d^3 * \pi * [\tau_{-1}^k] / 16, \quad (2.16)$$

где  $d$  – наибольший диаметр вала, принимаем  $d = 44$  мм;

Определим величину крутящего момента прикладываемый к детали

$$M_{кр} = 0,044^3 * 3,14 * 225 * 10^4 / 16 = 37,61 \text{ Нм}$$

Зная величину крутящего момента прикладываемого с одного и другого конца детали определим угол закручивания вала необходимого для нагружения детали при кручении по формуле:

$$\varphi = M_{кр} * L / J_p * G, \quad (2.17)$$

где  $L$  – длина вала, принимаем  $L = 2142$  мм;

$G$  – модуль сдвига 2-го рода, для стали 40Х, принимаем  $G = 85 * 10^3$  МПа;

$J_p$  – полярный момент инерции, для круглого сечения вала относительно центра определим по формуле:

$$J_p = \pi * d^4 / 64 = \pi * r^4 / 4, \quad (2.18)$$

Определим полярный момент инерции

$$J_p = 3,14 * 2,2^4 / 4 = 18,39 \text{ см}^4$$

Определим угол закручивания

$$\varphi = 37,61 * 2142 / 18,39 * 85 * 10^3 = 5,1^\circ$$

Приложение осевой деформации совместно с деформацией кручения позволит нам снизить неравномерность распределения остаточных напряжений от дей-

ствия деформации кручения только в поперечном сечении, тогда как неравномерность распределения остаточных напряжений от действия деформации кручения в продольном направлении останется и сможет вызвать коробление, так как данные напряжения имеют значительную величину.

Поэтому для полного устранения неравномерности распределения остаточных напряжений от действия деформации кручения в продольном направлении, необходимо повторить, описанный выше цикл обработки, приложив к изделию равный по модулю, но противоположный по направлению скручивающий момент. В данном случае, описанные выше релаксационные процессы в материале изделия от действия деформации кручения произойдут, а суммарный скручивающий момент для любой точки, любого сечения будет равен нулю  $\sum_{k=0}^M M_k = 0$ .

2.9 Определим рабочие частоты крутильных и продольных колебаний создаваемых волноводом комплексных колебаний, прикладываемых к детали.

Частоту продольных колебаний определим по формуле:

$$\omega_{\text{пр}i} = i * \pi * \sqrt{\frac{E}{\rho}} / (L + \Delta L), \quad (2.19)$$

где  $i$  – количество гармоник, то есть длин волн укладываемых на всей длине вала, для данного оборудования возможно получения гармоник до 2-го порядка

$\Delta L$  – удлинение детали при термообработке в стапеле, принимаем равным  $\Delta L = 4,67$  мм;

$E$  – модуль упругости материала, для стали 40Х, принимаем  $E = 214 * 10^3$  МПа

$\rho$  – плотность материала детали, для стали 40Х, принимаем

$$\rho = 0,00785 \text{ кг/см}^3$$

Определим частоту продольных колебаний для 1-ой гармоники

$$\omega_{\text{пр}1} = 3,14 * \sqrt{\frac{214 * 10^3}{0,00785}} / (2142 + 4,67) = 250 \text{ Гц}$$

Определим частоту продольных колебаний для 2-х гармоник

$$\omega_{\text{пр2}} = 2 * 3,14 * \sqrt{\frac{214 * 10^3}{0,00785}} / (2142 + 4,67) = 500 \text{ Гц}$$

Частоту крутильных колебаний определим по формуле:

$$\omega_{\text{кр}i} = i * \pi * \sqrt{\frac{G}{\rho}} / (L + \Delta L), \quad (2.20)$$

Определим частоту крутильных колебаний для 1-ой гармоники

$$\omega_{\text{кр}1} = 3,14 * \sqrt{\frac{85 * 10^3}{0,00785}} / (2142 + 4,67) = 158 \text{ Гц}$$

Определим частоту крутильных колебаний для 2-х гармоник

$$\omega_{\text{кр}2} = 2 * 3,14 * \sqrt{\frac{214 * 10^3}{0,00785}} / (2142 + 4,67) = 316 \text{ Гц}$$

При такой схеме мы можем легко вывести на резонансный режим продольные колебания, но не сможем вывести на резонанс, из-за существования сдвига фаз, крутильные колебания. Поэтому приложение крутильных колебаний приведет к повышенному расходу энергии. С точки зрения физики процесса крутильные колебания оказывают действие на остаточные напряжения, аналогичное действию деформации кручения на режиме выстоя, поэтому применение крутильных колебаний целесообразно даже при увеличении энергоемкости процесса.

Другими словами, существование сдвига фаз и попеременное прикладывание крутильных колебаний с обоих концов изделия по окончании обработки позволяет выполнить условие равенства нулю суммарного скручивающего момента в любой точке любого сечения изделия  $\sum M_k = 0$ .

## 2.10 Определение режимов охлаждения для детали.

Для расчета режимов охлаждения материала, необходимо рассмотреть протекающие при ТСО тепловые процессы. Скорость тепловых процессов, происходящих при ТСО, определим как:

$$a = \frac{\lambda}{c_p} \quad (2.21)$$

где  $\lambda$  и  $C_p$  – коэффициенты теплопроводности и воздействия на проводимое тепло соответственно.

Задача по решению не стационарной теплопроводности, запишется в виде:

$$\frac{dt}{df} = a \times \left( \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) \quad (2.22)$$

Длинномерный вал является, по сути, длинным бесконечным цилиндром, тогда, приведенная выше зависимость примет вид:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a \times \left( \frac{d^2 \theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \times \frac{d\theta}{dy^2} \right) \quad (2.23)$$

Для решения данного уравнения необходимо задание краевых условий:

1.  $r=R$
2. при  $\tau=0$

При решении уравнения (2.23) для данных краевых условий решением будет функция двух критериев:

1. Критерия Био –  $Bi$ ,
2. Критерия Фурье –  $F_0$ .

Скорость нагрева поверхности массивного изделия ( $Bi > 0.15$ ) больше скорости нагрева его центральных слоёв, поэтому время нагрева до заданной температуры всей массы изделия следует определять по продолжительности нагрева центральных слоев. С этой целью обычно используется решение дифференциального уравнения теплопроводности (уравнение Фурье).

Функционально такая зависимость может быть найдена лишь для простейших тел: неограниченной пластины, бесконечно длинного цилиндра и шара, и представляет собой бесконечный ряд тригонометрических функций - функций Бесселя. Для практических расчетов удобнее пользоваться графиками, построенными на основании этих выражений, построенных Д. В. Будриным и позволяющие находить температуру центра неограниченной пластины (его средней плоскости), бесконечного цилиндра (его оси) и шара в зависимости от величины критерия  $Fo$  и критерия  $Bi$ .

При определении температуры центра или поверхности тела через определенный промежуток времени производятся вычисления в следующем порядке:

- 1) определяются критерии  $Bi$  и  $Fo$ ;
- 2) по полученным значениям критериев с помощью соответствующего графика определяется температурный критерий, определяется температура центра или поверхности.

Таким способом можно построить кривую нагрева тела, задаваясь определенными промежутками времени. С помощью приведенных графиков можно определить также время нагрева тела до заданной температуры. Для этого необходимо вычислить критерии  $Bi$  и  $Fo$ , по соответствующему графику найти величину критерия  $Fo$  и затем вычислить время нагрева.

Рассмотренный метод расчета применим лишь для тел неограниченной протяженности или для изделий, которые Приближенно можно считать неограниченными. Например, плиты, длина и ширина которых в десятки раз превышают их толщину, или прутки, длина которых в десятки раз больше их диаметра. Однако рассмотренные графики можно использовать и для расчета времени нагрева изделий, имеющих форму куба, призмы прямоугольного сечения, параллелепипеда или короткого цилиндра. Температурный критерий для какой-либо точки тела конечных размеров равен произведению температурных критериев для этой точки в неограниченных телах, образующих рассматриваемое те-

ло. Цилиндр диаметром  $d$  и длиной  $l$  можно представить себе как тело, образованное пересечением бесконечно длинного цилиндра диаметром  $d$  и перпендикулярной ему бесконечно протяженной пластины толщиной  $L$ . Цилиндр конечных размеров как тело, образованное пересечением бесконечно длинного цилиндра и неограниченной пластины.

Расчет времени нагрева изделия ограниченных размеров ведется путем построения кривой нагрева его центральной точки. Определение продолжительность нагрева изделия до заданной температуры производится по полученной кривой нагрева. Если температура печи существенно выше конечной температуры нагрева изделий, необходимо определить перепад температуры в сечении изделия в конце его нагрева. Для этого необходимо определить перепад температур в сечении изделия в конце его нагрева. Для этого необходимо определить температуру поверхности изделия по истечении времени нагрева его центра. Изложенный метод расчета нагрева «массивных» изделий применим лишь для изделий простой формы. Однако на практике зачастую необходимо рассчитывать нагрев изделий сложной конфигурации. Приближенный метод расчета нагрева изделий произвольной формы с использованием рассмотренных выше графиков Д. В. Будрина разработан А. И. Вейнпком. В основу метода А. И. Вейника положен принцип стабильности теплового потока, позволяющий свести расчет нагрева тел произвольной формы - к расчету нагрева тел простейшей формы: пластины, цилиндра или шара. В соответствии с этим изделия подразделяются по форме на три класса. Тела первого класса (класс пластины) характеризуются тем, что их длина и ширина значительно превосходят толщину.

К этому классу, например, относятся листы, трубы (при отношении толщины стенки трубы к диаметру не больше 0,1) и профили (при отношении толщины полки профиля к ее ширине не больше 0,15).

Тела второго класса (класс цилиндра) характеризуются тем, что их длина значительно превышает остальные геометрические параметры. К этому классу от-

носятся, например, прутки, толстостенные трубы и профили, не удовлетворяющие рассмотренным требованиям первого класса.

Третий класс – класс шара, составляют тела равновеликие по всем трем координатным осям.

При выполнении расчета нагрева изделия произвольной формы необходимо, прежде всего, определить класс, к которому можно отнести рассматриваемое изделие. Затем необходимо определить для изделия произвольной формы характерный геометрический размер  $X$ , входящий в состав критериев  $Bi$  и  $Fo$ . Величина  $X$  находится из условия равенства объемов рассматриваемого изделия и эквивалентного простейшего тела. С целью сохранения величины теплового потока на поверхности изделия при переходе к телу простейшей формы вводится критерий формы, который представляет собой отношение поверхности рассматриваемого изделия  $F$  к поверхности эквивалентного простейшего тела  $F_0$ . Создаваемое при охлаждении осевое усилие увеличивается, а значит и увеличивает потенциальную энергию коробления. Причем значительного эффекта осевая сила  $P$  при охлаждении не приносит, а поэтому является вредным фактором, который при ТСО можно стараться устранить или компенсировать функцию, которая описывается по критерию  $Bi_0$ , определяются как:

$$Bi = \frac{\alpha \times R}{\lambda_{cp}} \quad (2.24)$$

где  $\alpha = 581$  – это коэффициент отдачи от масла к поверхности;

$R = 22$  мм – радиус заготовки равный;

$\lambda_{cp}$  – средний коэффициент теплопроводности, который определяется как:

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{300} + \lambda_{600}}{3} \quad (2.25)$$

где  $\lambda_{20} = 35$ ,  $\lambda_{300} = 25$ ,  $\lambda_{600} = 18$  – значение коэффициентов теплопроводности при данных температурах.

Тогда  $\lambda_{\text{ср}}$  определим по формуле (2.25):

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{300} + \lambda_{600}}{3} = \frac{35 + 25 + 18}{3} = 26 \frac{\text{кал}}{\text{мм} \times \text{сек} \times ^\circ\text{C}}$$

Тогда значение критерия Био, определяем как:

$$B_i = \frac{\alpha \times R}{\lambda_{\text{ср}}} = \frac{581 \times 0,22}{26} = 0,49$$

Определим функцию в виде без размерной температуры по формуле:

$$\frac{\theta_0}{\theta} = \frac{(T_k - T_M)}{(T_H - T_M)} \quad (2.26)$$

где  $T_k = 150 \text{ C}^0$ ,  $T_M = 20 \text{ C}^0$ ,  $T_H = 600 \text{ C}^0$  – соответственно конечная температура в центре вала, температура масла и начальная температура при ТСО.

Тогда функция по формуле (2.26) будет равна:

$$\frac{\theta_0}{\theta} = \frac{(T_k - T_M)}{(T_H - T_M)} = \frac{(150 - 20)}{(600 - 20)} = 0,22$$

По графическим зависимостям, рис. 2.1 [10], по  $\theta_0/\theta$  и критерию Био значение критерия Фурье будет равно  $F_0 = 2,9$ .

Функцию, по критерию Фурье, определяем как:

$$F_0 = \frac{\alpha \times \tau}{R^2} \quad (2.27)$$

где  $\alpha = 5 \times 10^{-6}$  – коэфф. температуропроводности;

$\tau$  – время охлаждения заготовки;

Тогда формула для определении времени охлаждения заготовки примет вид:

$$\tau = \frac{R^2 \times F_0}{a} \quad (2.28)$$

Подставим полученные данные в формулу (2.28):

$$\tau = \frac{R^2 \times F_0}{a} = \frac{0,022^2 \times 2,9}{5 \times 10^{-6}} = 118,2 \text{ мин} \approx 2 \text{ часа}$$

2.11 Определение режимов охлаждения для стапеля.

Расчет стапеля – в виде трубы, проведем по формуле:

$$\delta_{\text{ст}} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (2.29)$$

где  $\delta_1 = 15$  мм – ширина внешней трубы;

$\delta_2 = 20$  мм – ширина слоя песка;

$\delta_3 = 15$  мм – ширина внутренней трубы.

Тогда:

$$\delta_{\text{ст}} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 15 + 20 + 15 = 50 \text{ мм}$$

За начало отсчета принимается температура окружающей среды, тогда:

$$\frac{d\theta}{dx} = a \times \frac{d^2\theta}{dx^2} \quad (2.30)$$

Для граничных условий при  $x \pm \delta/2$

$$-\frac{d\theta}{dx} = \frac{\alpha \times \theta}{\lambda_{\text{ст}}} \quad (2.31)$$

где  $\lambda_{\text{ст}}$  – эквивалентная теплопроводность стенки

Тогда с учетом критерия Био и Фурье имеем:

$$\frac{\theta_0}{\theta} = f(B_i, F_0) \quad (2.32)$$

Коэффициент теплопроводности стенки стапеля вычислим по формуле:

$$\lambda_{ст} = \frac{\delta_{ст}}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3} \quad (2.32)$$

Где  $\lambda_1 = \lambda_3 = 59 \frac{\text{кал}}{\text{мм} \times \text{сек} \times ^\circ\text{C}}$  - коэффициент теплопроводности материала стапеля,  
 $\lambda_2 = 0,362$  – коэффициент теплопроводности песка.

Тогда по формуле (2.32), получим:

$$\begin{aligned} \lambda_{ст} &= \frac{\delta_{ст}}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3} = \frac{20}{0,015/59 + 0,02/0,362 + 0,015/59} \\ &= 0,813 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Критерий Био определим как:

$$B_i = \frac{\alpha \times R}{\lambda_{ср}} = \frac{581 \times 0,05}{2 \times 0,812} = 17,37$$

По графику значение критерия Фурье принимаем равным  $F_0 = 0,437$

Определим отношение критерия Фурье и времени:

$$F_0 = \frac{a \times \tau}{\delta^2} = 0,437 \times 10^{-3} \tau$$

Тогда время охлаждения стапеля принимаем  $\tau_{\max} = 20$  часов

## Выводы по главе 2

Проанализировав, приведенные в данной главе проектные расчеты по процессу термосиловой обработки можно сделать следующие выводы:

1. Определен диапазон основных технологических параметров на проведение термосиловой обработки, позволяющий обеспечить наилучшее качество и стабильность обработки;
2. Определены основные конструктивные параметры устройств, для проведения термосиловой обработки с требуемым качеством и производительностью;
3. Для обеспечения высокой точности и стабильности работы устройств для термосиловой обработки, они должны оснащаться системами автоматического управления, так как взаимосвязи, лежащие в основе работы данных установок и в процессе термосиловой обработки, носят нелинейный характер.

## Глава 3 Проектирование устройств для проведения термосиловой обработки и управления данным процессом.

Задача данной главы – на основании анализа существующих достижений в области термосиловой обработке, рассмотренных в главе 1 настоящей работы, и определенных в главе 2 магистерской диссертации требуемых технологических параметров термосиловой обработки и конструктивных параметров устройств ее реализующих, спроектировать устройства для проведения и управления процессом термосилой обработки.

### 3.1. Проектирование устройства для термосиловой обработки.

Данное устройство предназначено для термосиловой обработки (ТСО) длинномерных осесимметричных деталей типа «Вал» и может быть использовано в технологических процессах изготовления мало жестких валов в механических цехах.

Известен способ обработки осесимметричных деталей, включающий деформирование заготовки сжатием или сжатием с кручением посредством пинолей при одновременном нагреве заготовок.

Недостатком данного способа являются, ограниченная область применения (обрабатываются детали типа «Диск» с формообразованием происходящим преимущественно за счет операции прокатки), большие усилия деформирования и неравномерность деформирования по длине заготовки.

Известно устройство для ТСО валов малой жесткости, содержащее стапель с захватами в концевых сечениях, причем стапель выполнен в виде труб из металла с коэффициентом линейного расширения большим, чем у изделия.

Недостатком данного устройства является невозможность обеспечить стабильность прикладываемого усилия в процессе ТСО, что может привести к переупрочнению материала, неравномерной по длине заготовки остаточной де-

формации металла и, следовательно, к нестабильности размеров в эксплуатационный период, потере точности.

Наиболее оптимальным, является способ термосиловой обработки осесимметричных деталей, включающий статическое силовое воздействие на заготовку в процессе термообработки, цикл обработки разделяют на подциклы, в течении каждого из которых статическое силовое воздействие проводят в пределах выбранного участка заготовки, сначала путем последовательного закручивания данного участка в одну сторону с последующим растяжением, затем закручиванием в другую сторону с последующим сжатием за пределом действия закона упругости, причем управление пределом текучести при статическом силовом воздействии производят путем регулирования температурного воздействия на участок заготовки, а длину участка выбирают с учетом гармоник колебаний детали.

Недостатком данного способа является необходимость создания больших рабочих усилий растяжения-сжатия и кручения.

Для устранения этих недостатков и повышения качества изготовления заготовок маложестких осесимметричных деталей необходимо достижение следующих результатов: повысить стабильность размеров и формы длинномерных маложестких осесимметричных деталей за счет устранения направленности осевых остаточных напряжений, оставшихся после заготовительной операции; уменьшение рабочих усилий деформирования за счет выбора рациональной схемы нагружения; уничтожение технологической наследственности за счет полной перестройки текстуры материала при чередовании приложенных внешних сил растяжения-сжатия заготовки, что ведет к более равномерному распределению осевых остаточных напряжений по длине заготовки (вала), так как при релаксации основное влияние на пластическую деформацию оказывает неравномерное распределение осевых остаточных напряжений, данный характер их распределения не направленный и чередующийся по знаку приводит к минимизации пластической деформации готового изделия в эксплуатационный период.

Данная задача решается за счет того, что в способ термосиловой обработки осесимметричных деталей, включают разбиение заготовки на «n» участков с длиной равной не более восьми диаметров заготовки (отношении длины к диаметру здесь и далее обозначаем термином - коэффициент жесткости), поперечными предварительно проточенными канавками, глубиной не более половины величины фактического припуска. Далее вывешивают заготовку вертикально и с нижнего конца заготовки осуществляют монтаж установки силового деформирования одного участка заготовки, причем делают это, начиная со второго – четного участка, при этом установка фиксируется специальными захватами в проточках заготовки. После чего подключают источник нагрева данного участка, присоединением соответствующих клемм к обрабатываемому участку заготовки внутри проточек. Далее осуществляется нагрев до температуры со слабовыраженной зависимостью усилия от деформации, после чего производят осевое деформирование растяжением, чередуя при этом обрабатываемые участки, четные – растягивают, а нечетные – сжимают, при этом величины деформации должны превышать предел упругости на 2-4 %. После достижения требуемого значения температуры, выдержки в напряженном состоянии при постоянной температуре (режим выстоя), нагревательный элемент отключают, а деформированный участок автоматически разгружают с постоянным усилием в функции снижения температуры, до температуры окружающей среды. Далее, пропуская нечетный участок заготовки, деформируют следующий четный участок усилием растяжения, например четвертый, в результате этого происходит деформация – сжатия нечетного - третьего участка, который находится между вторым и четвертым – четными участками, подвергшимися растяжению. Далее аналогичным способом осуществляется деформация всех четных и нечетных участков заготовки до ее верхнего конца.

Устройство для ТСО может включать в себя систему управления, которая содержит датчик линейного перемещения, включенный в цепь управления, а также два силовых привода осевой деформации, кроме этого, система управления выполнена с возможностью управления и диагностики температуры нагре-

ва участков заготовки, имеющая в обратной связи датчик температуры (термопара или пирометр), при этом система управления управляет и скоростью осевой деформации заготовки, причем последняя функционально связана с температурой нагрева, диагностируемой датчиком. Таким образом система управления содержит два контура управления: первый контур – управления величиной и скоростью осевой деформации участков заготовки, второй – управление температурой нагрева участков заготовки, при этом каждый контур управления содержит датчики контроля величины управляемого параметра, включенный в контур обратной связи, и блок управления с задатчиками.

Предварительная проточка поперечных канавок с заданным шагом длины и глубины минимизирует и устраняет направленность поверхностных остаточных напряжений.

Нагрев на деформируемых пластической деформацией участках заготовки, снижает предел прочности материала заготовки и снижает требуемую величину силового воздействия, что способствует минимизации мощности и габаритов силового привода, а также способствует уменьшению габаритов корпуса установки.

Одновременный нагрев и знакопеременное пластическое осевое деформирование формирует однородную структуру материала заготовки и минимизирует уровень остаточных напряжений.

Контроль и управление температурного воздействия является эффективным средством в зоне слабой зависимости предела напряжения упругости от деформации стабилизации и минимизации остаточных напряжений от деформации.

Выбор конструкции захватов для осевого деформирования в виде двух параллельных пластин со встроенными сменными полукольцевыми стопорами позволяет фиксировать заготовки различных диаметров в довольно широком диапазоне.

Применение в конструкции объемных зажимов с встроенными сферическими подпятниками позволяет стабилизировать вектор осевых сил нагружения.

Силовой гидроцилиндр охваченный теплоизолятором с наружной стороны корпуса и со встроенными тремя уплотнительными камерами, выполненными из гибкого эластичного материала и обеспечивающими облегание внутренних поверхностей цилиндра и торцов обоих поршней, позволяет устранить утечки в зазоре поршень-корпус и шток-крышка, что позволяет выполнять требования пожарной безопасности в процессе нагрева заготовки.

Торцы выходных концов шток-поршней выполнены сферическими, что позволяет устранить неточность установки корпуса при перемещении его вдоль заготовки и монтажа.

Система управления повышает эффективность обработки за счет оперативного регулирования значениями технологических параметров в функции процесса деформирования.

Предлагаемое устройство, иллюстрировано чертежами, представленными на рис 3.1-3.6. На рис 3.1 приведена схема механической обработки заготовки. На рис 3.2 приведен общий вид устройства. На рис 3.3 показан разрез А-А. На рис 3.4 показан общий вид силового гидроцилиндра. На рис 3.5 и рис. 3.6 показаны соответственно разрезы Б-Б и В-В.

Способ осуществляется следующим образом. Заготовка обрабатывается на токарном станке в самоцентрирующих люнетах – производится проточка радиальных канавок с равным шагом. Глубина канавок не должна превышать половины величины фактического припуска на последующую обработку. Длина участков, на которые разбивается заготовка при проточке канавок, определяется из условия жесткости заготовки. Отношение длины участка к диаметру заготовки – коэффициент жесткости не должно быть более восьми, см. рис 3.1. Далее заготовку вывешивают вертикально на гибкой ните (например - тросе) и с нижнего конца заготовки осуществляют монтаж установки силового деформирования одного участка заготовки, причем делают это, начиная со второго –

четного участка, при этом установка фиксируется специальными захватами в проточках заготовки. После чего подключают источник нагрева данного участка, присоединением соответствующих клемм к обрабатываемому участку

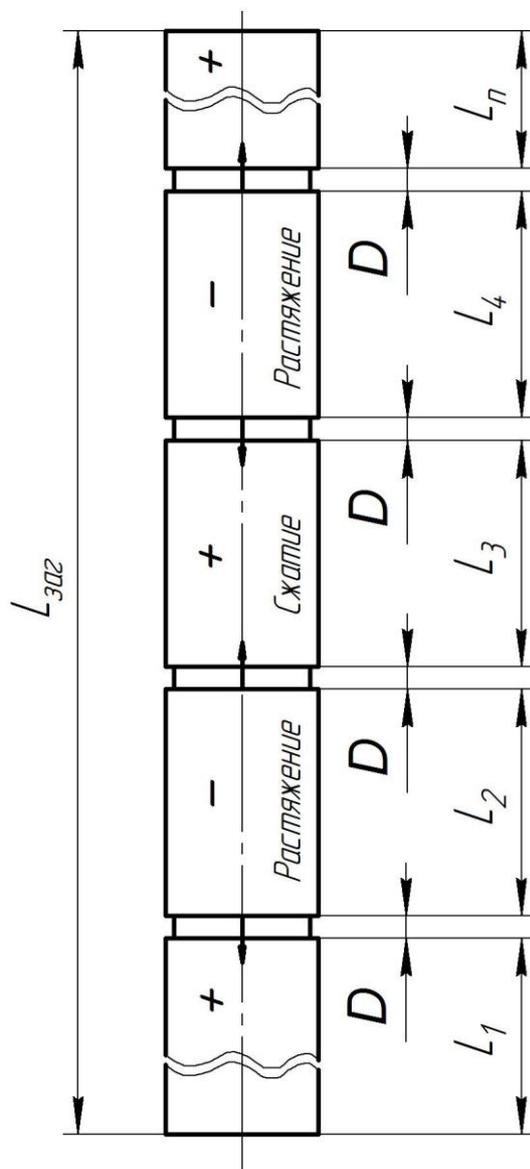


Рисунок 3.1. – Схема обработки заготовки.

заготовки внутри проточек. Далее осуществляется нагрев до температуры со слабовыраженной зависимостью усилия от деформации, после чего производят осевое деформирование растяжением, чередуя при этом обрабатываемые участки, четные – растягивают, а нечетные – сжимают, при этом величины деформации должны превышать предел упругости на 2-4 %. После достижения

требуемого значения температуры, выдержки в напряженном состоянии при постоянной температуре (режим выстоя), нагревательный элемент отключают, а деформированный участок автоматически разгружают с постоянным усилием в функции снижения температуры, до температуры окружающей среды. Далее, пропуская нечетный участок заготовки, деформируют следующий четный участок усилием растяжения, например четвертый, в результате этого происходит деформация – сжатия нечетного - третьего участка, который находится между вторым и четвертым – четными участками, подвергшимися растяжению. Далее аналогичным способом осуществляется деформация всех четных и нечетных участков заготовки до ее верхнего конца, рис. 3.2.

Направленность осевых остаточных напряжений, обусловленная неравномерностью и неоднородностью распределения последних по длине, минимизируется по уровню остаточных напряжений, что снижает внутреннюю потенциальную энергию заготовки и способствует стабилизации геометрических размеров заготовки.

Устройство для ТСО длинномерных осесимметричных заготовок, рис. 3.2., содержит корпус 1, на котором закреплены силовые гидроцилиндры 2 и 2', наружная поверхность которых покрыта теплоизоляционным кожухом 3, крепление силовых гидроцилиндров 2 и 2' на корпус 1 осуществляется кронштейнами 4 и 4' с помощью болтового соединения, которое показано условно. Два шток-поршня 5 и 5', фиг. 4, изолированы с обеих сторон уплотнительными камерами 6 (6') и 7. Камеры 6 и 6' выполнены в виде конической усеченной трубки, вывернутой наизнанку вовнутрь меньшим диаметром усеченного конуса с образованием двухслойной внахлест складки из упругого эластичного материала, длина которой равна длине двойного хода штоков-поршней 5 и 5', при этом конец меньшего диаметра закреплен на коническом участке крышки цилиндра, а конец большего диаметра – на торце корпуса цилиндра, причем складки выполнены по диаметру штока и внутреннему диаметру поршня. Камера 7 выполнена в виде цилиндра с обоих концов которого имеются сферические стенки с радиусом  $R$  и две складки, причем длина длинна складок для всех камер  $L \leq$



ный слой 9, см. рис.3.5, где он показан условно, которые представляют собой объемные зажимы, осуществляющие фиксацию пластин 10 и 12 захвата заготовки 13, которые оснащены сменными полукольцевыми стопорами 14.

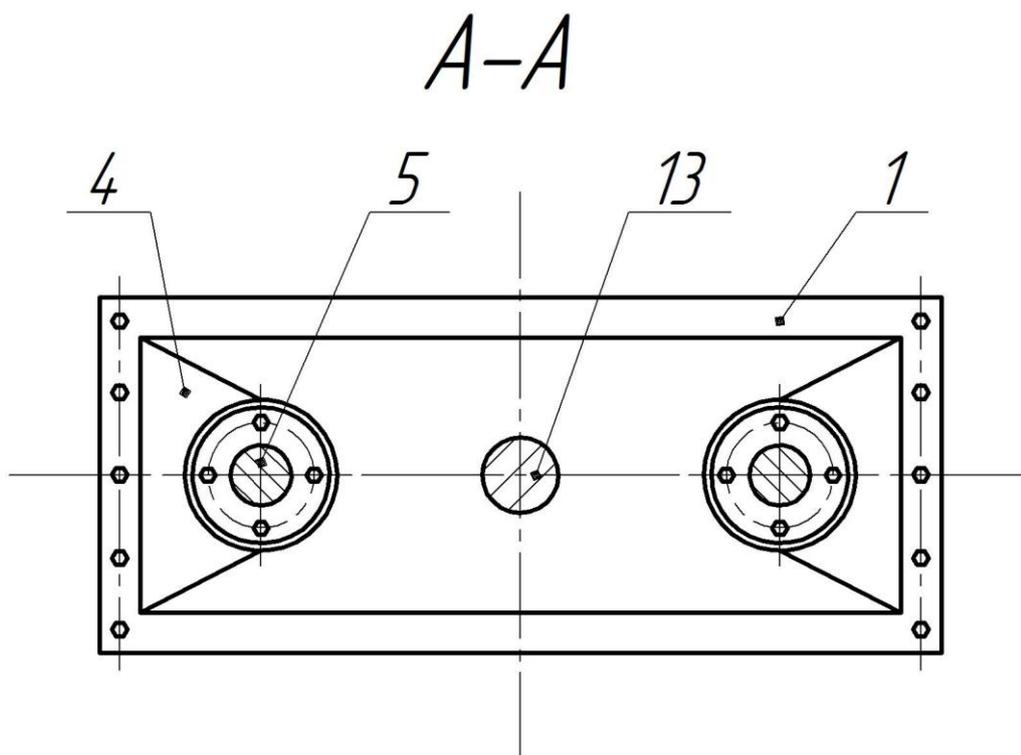


Рисунок 3.3. – Разрез А-А.

Двухконтурная система автоматического управления (САУ) состоит из блока управления 15, первый выход которого подключен к насосной станции 16 с управляемым редуктором давления (не показан), а второй и третий выход к электропреобразователям 17 и 17', выходы преобразователей подключены к центральным входам силовых гидроцилиндров 2 и 2', шток-поршни 5 и 5' которых, см. рис. 3.4, через объемные замки - подпятники 11 и 11' и фиксирующие пластины захвата 10 и 12, через полукольцевые стопоры 14 замыкают силовой поток осевых растягивающих усилий. В обратной связи контуров управления осевой деформацией включены датчики линейных перемещений 18 и 18', последние установлены на кронштейнах 4 и 4', относительно пластин захвата 10 и 12.

Второй контур САУ включает в себя блок управления 15, четвертый выход которого подключен к входу блока питания постоянного тока 19, а выход кото-

рого подключен к заготовке 13, а в обратную связь контура включен датчик температуры - пирометр 20, установленный на кронштейне 4.

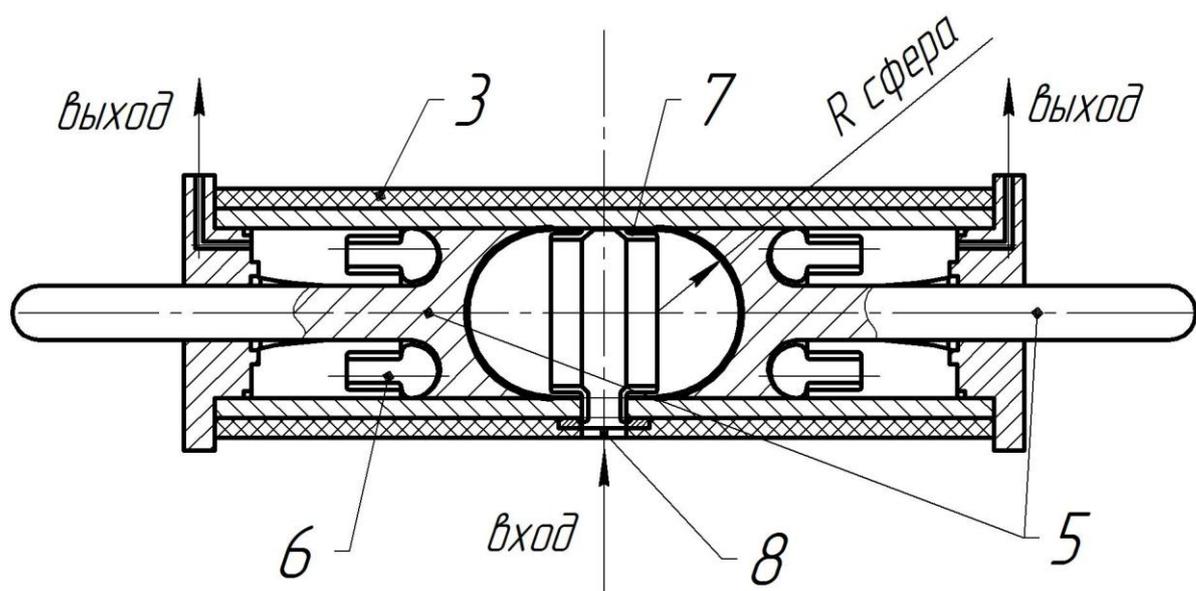


Рисунок 3.4. – Схема привода.

Устройство для ТСО обработки длинномерных осесимметричных деталей типа вал работает следующим образом. На заготовку 13 монтируют установку на втором четном участке путем фиксации в поперечных канавках с помощью двух пластин захвата 10 и 12 со стопорами 14 и одевают с двух сторон захватов 10 и 12 объемные замки-подпятники 11 и 11', удерживая подвешенную конструкцию установки на тросах (показаны условно). Далее согласно алгоритму САУ включается первый контур управления, при этом блок управления 15 выдает сигнал управления на насосную станцию 16, давление в которой устанавливают заранее в функции физико-механических свойств деформированного материала, и на электропреобразователи 17 и 17' последний перераспределяют давление в силовых цилиндрах 2 и 2' при нагружении в центральную полость цилиндра, а при сбросе нагрузки в крайние его полости. Причем силовые гидроцилиндры 2 и 2' крепятся на жестком корпусе 1 с помощью кронштейнов 4 и 4'. На наружных корпусах гидроцилиндров смонтированы теплоизоляционные

кожухи 3, и вместе с цилиндрами закреплены на корпусе 1 с помощью кронштейнов 4 и 4' болтовым соединением (на рисунке не показаны). Далее подается давление в рабочие силовые цилиндры 2 и 2' (в центральную его часть) и

*Б-Б*

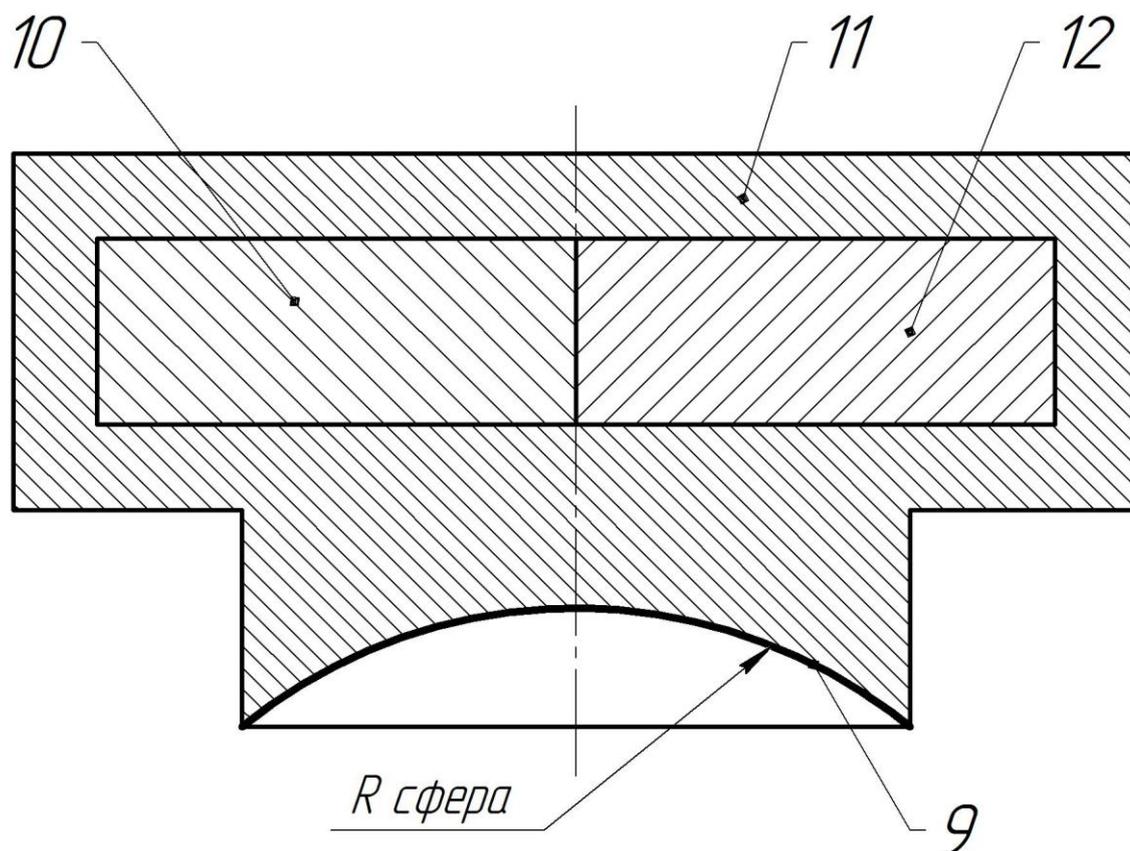


Рисунок 3.5. – Разрез Б-Б.

выбираются зазоры между шток – поршнями 5 и 5' и объемными замками-подпятниками 11 и 11'. Далее включается второй контур управления - нагревом заготовки. Выходной сигнал (согласно алгоритма) с блока управления 15 подается на источник постоянного тока 19, выходной сигнал которого через клеммы соединен с заготовкой 13 до зон захвата участка заготовки. Нагрев участка контролируется датчиком температуры 20, выход которого включен в обратную связь контура управления температурой. Нагрев участка заготовки осуществля-

ется до температуры слабой зависимости усилия от деформации согласно заданному алгоритму. Нагретый участок растягивают с заданной скоростью до заданной величины деформации, но не более 4% деформации. Далее следует выдержка согласно технологии отпуска и разгрузка. Согласно контура управления силового деформирования разгрузка проводится при постоянной нагрузке.

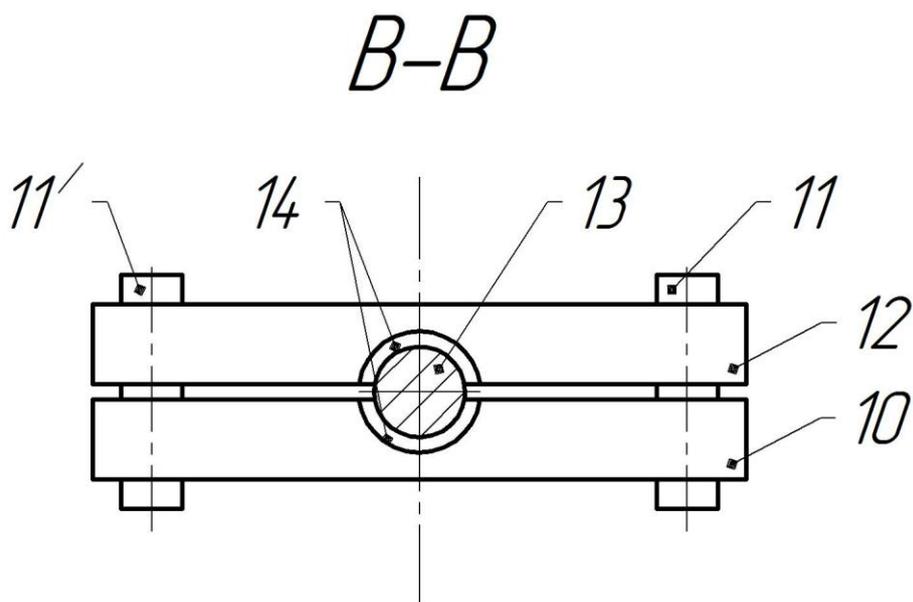


Рисунок 3.6. – Разрез В-В.

### 3.2. Разработка системы автоматического управления термосиловой обработки многоступенчатых маложестких валов.

В современном машиностроении, при обработке маложестких деталей (МЖД) типа «Вал», все чаще находит применение операция термосиловой обработки (ТСО). Данная операция заключается в создании осевой пластической деформации при термообработке (закалке, отпуске) МЖД. Существенным преимуществом применения операции ТСО, является снижение уровня и равномерное распределение внутренних напряжений в материале маложесткого вала, причем

зачастую наблюдается осевая ориентация внутренней структуры заготовки. Такой эффект применения ТСО позволяет повысить точность МЖД и увеличить в несколько раз производительность ее изготовления, за счет замены 5-6 промежуточных отпусков при существующей технологии, одной ТСО по новой технологии.

Для достижения данного эффекта, необходимо управлять параметрами ТСО непосредственно в ходе обработки. В процессе проведения операции ТСО изменяются следующие параметры: температура, величина продольной и поперечной деформации. Данное изменение связано с изменением физико-механических свойств материала заготовки, при изменении температуры в ходе обработки. Кроме этого, величина изменения продольной и поперечной деформаций напрямую связана с геометрическими параметрами МЖД – длиной и площадью поперечного сечения. При этом следует учитывать данные изменения для каждой ступени маложесткого вала в отдельности. Поэтому управление данным комплексом взаимосвязанных параметров в ходе ТСО возможно только с применением САУ данным процессом.

На рисунке 3.7 представлена функциональная схема САУ ТСО, позволяющая управлять параметрами процесса в ходе обработки. Представленная САУ построена по принципу многоканальной системы управления с обратной связью по температуре и поперечной деформации. Количество каналов может быть различным и зависит от числа ступеней маложесткого вала. Кроме этого, имеется канал управления с обратной связью общей величиной и скоростью продольной деформации.

Рассмотрим устройство и работу САУ ТСО более подробно. Базовыми элементами данной функциональной схемы процесса ТСО, являются многосекционная печь 1 и стапель 2 (показан условно). Размеры секции печи 1 не одинаковы и изменяются в зависимости от длины ступеней обрабатываемого вала 3. Внутри каждой секции для контроля температуры установлены термопары 4,5,6. Каждая секция имеет независимый нагревательный элемент 7,8,9, которые создают и поддерживают необходимую температуру в каждой из секций.

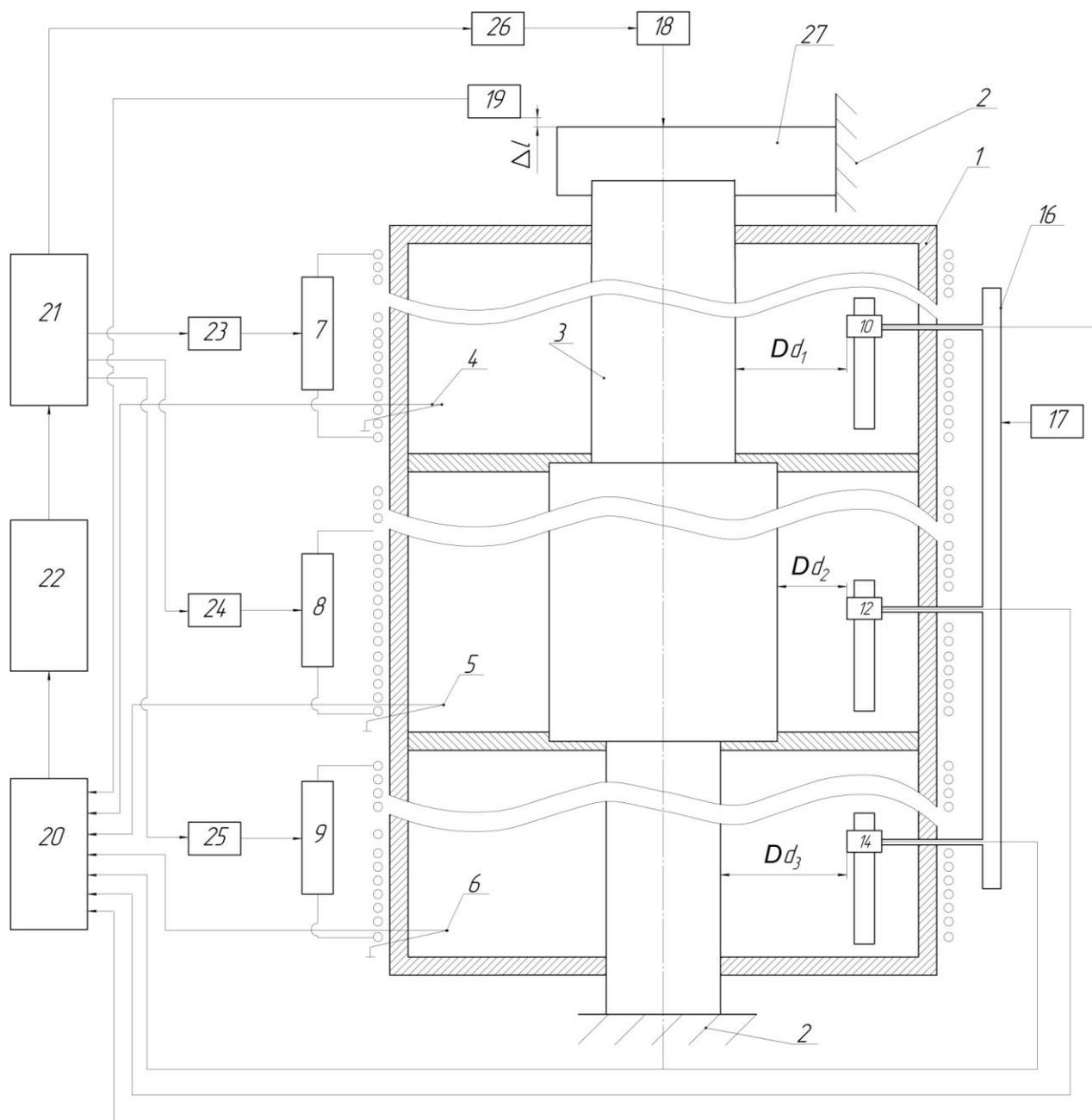


Рисунок 3.7. – Функциональная схема САУ ТСО.

Для контроля величины поперечной деформации в каждой секции установлены пневмоизмерители 10,12,14 на опорах-призмах 11,13,15. Давление воздуха в пневмоизмерителях поддерживается компрессором 17, который постоянно нагнетает давление в пневмо-распределительной магистрали 16, по которой оно передается пневмоизмерителям. Общее осевое усилие создает привод 18. В качестве осевого привода целесообразнее всего использовать гидравлический привод, так как он способен обеспечивать быстрое и бесступенчатое регулирование величины

осевого усилия, способен обеспечить требуемое усилие, является компактным. Контроль величины осевой деформации осуществляется бесконтактным токовых-ревым датчиком линейных перемещений 19.

Работой САУ управляют многовыходовые усилители-преобразователи 20,21, программное обеспечение, установленное на персональном компьютере 22, блок управления приводом осевой деформации 26, блоки управления нагревательными элементами 23,24,25.

Многовыходовой усилитель-преобразователь 20 представляет собой многовыходовой дифференциальный усилитель и аналогово-цифровой преобразователь, выполненные в едином блоке. Его функция заключается в усилении аналоговых сигналов, поступающих каждый на соответствующий вход от термопар 4,5,6, пневмоизмерителей 10,12,14 и датчика линейных перемещений 19, и преобразовании их в цифровую форму. Выходной канал усилителя-преобразователя 20 связан с USB1 портом персонального компьютера 22.

Многовыходной усилитель-преобразователь 21 представляет собой цифро-аналоговый преобразователь и многовыходной дифференциальный усилитель, выполненные в едином блоке. Входной канал усилителя-преобразователя 21 связан с USB2 портом персонального компьютера 22. Его функция заключается в преобразовании цифрового сигнала управления, поступающего с персонального компьютера 22 в аналоговый сигнал, его усиление и передача с соответствующего выхода либо на блоки управления нагревательными элементами 23,24,25, либо на блок управления проводом осевой деформации 26.

Работой персонального компьютера 22 управляет специальное программное обеспечение, содержащее необходимое математическое обеспечение, базы данных и т.д., позволяющее реализовать алгоритм проведения ТСО, для МЖД различных конфигураций и геометрических размеров, выполненных из различных материалов, с учетом постоянного изменения их свойств, при изменении температуры обработки. По сути, программное обеспечение в данном случае заменяет собой функции контроллера, задатчиков и сравнивающих устройств, необходимых для нормального функционирования САУ с обратной связью.

Блоки управления нагревательными элементами 23,24,25 представляют собой автоматические реостаты, позволяющие изменять нагрузку в цепи соответствующего нагревательного элемента 7,8,9, а соответственно регулировать силу тока в нагревательном элементе и температура в секции печи.

Блок управления приводом осевой деформации 26 представляет собой комплекс электрогидравлических устройств, преобразующих управляющий электрический сигнал в изменение давления в приводе осевой деформации 18, и как следствие в изменение осевого усилия.

Рассмотрим работу управляющих контуров САУ ТСО. Первый управляющий контур – контур управления температурой в секциях печи 1. В процессе обработки ТСО имеются три стадии обработки: нагрев, выстой и охлаждение. В процессе нагрева МЖД 3 нагревается от температуры окружающей среды ( $T_0$ ) до температуры закалки или отпуска ( $T_1$ ) при помощи нагревательных элементов 7,8,9. При этом различные ступени вала, вследствие их различных геометрических параметров, требуют их нагрева до температуры  $T_1$  за различное время. Для реализации данного требования все нагревательные элементы имеют независимые цепи управления. Требуемая температура нагрева каждой ступени, в каждый конкретный момент времени задается программным обеспечением персонального компьютера (ПК) 22. Термопары 4,5,6 контролируют температуру, каждая в соответствующей секции печи и передают сигнал каждая на соответствующий вход многовыходового усилителя-преобразователя 20. Который, усиливая и преобразовывая сигнал в цифровую форму, через порт USB1 передает его на ПК. При помощи программного обеспечения принятый сигнал сравнивается с заданным по алгоритму работы.

Полученная разность данных сигналов является управляющим сигналом, который через USB2 ПК поступает на вход многовыходного усилителя-преобразователя 21. Данный блок преобразует цифровой сигнал в аналоговый, усиливает, и передает, через соответствующий выход, на вход соответствующего блока управления нагревательными элементами 23,24 или 25. Данные блоки, преобразуя управляющий сигнал в изменение силы тока в нагревательном элемен-

те 7,8,9, изменяют температуру в соответствующей секции. В процессе работы контура управления температурой нагрева ПК 22 осуществляет последовательный опрос каждого входа многовходового усилителя-преобразователя 20 в соответствии с алгоритмом, и соответственно последовательно выдает управляющие сигналы для исполнительных устройств. Другими словами в каждый конкретный момент времени управление производится только для одной из секций и только по одному из параметров, например - температуре. Можно сказать, что быстродействие такой системы невелико, однако процессы, происходящие при ТСО достаточно инерционны, и время изменения параметров обработки почти на два порядка медленнее, поэтому функционирование САУ по данному алгоритму вполне оправдано, так как позволяет существенно упростить ее устройство и сделать более дешевой. При достижении каждой из секций температуры  $T_1$  САУ переходит на функционирование по режиму выстоя. На данном режиме происходит выдержка МЖД при постоянной температуре в течение определенного времени. По его окончании система переходит в режим охлаждения. Работа САУ на режимах выстоя и охлаждения аналогична работе на режиме нагрева.

Второй управляющий контур – контур управления величиной поперечной деформации функционирует следующим образом.

Количество пневмоизмерителей 10,12,14 определяется количеством нагревательных элементов. Пневмоизмерители, вмонтированы в опоры-призмы 11,13,15, в глубине угловой впадины, которая служит одновременно, как измерительная база, и как направляющая для загрузки заготовки, длина её определяется длиной секций. Опора-призма имеет в своём корпусе обитую магистраль 16, питания пневмоизмерителей воздухом, который нагнетается, с определённым, заранее заданным, давлением, компрессором 17. В зависимости от изменения зазора  $d$  (между торцом бесконтактного пневмоизмерителя и наружной поверхностью заготовки 3), изменяется и расход воздуха в канале пневмоизмерителя. С изменением зазора линейно меняется и расход воздуха. Сигнал об изменении расхода поступает на соответствующий вход многовходового усилителя-преобразователя 20, который передаёт преобразованные сигналы на ПК 22. Последний формирует сигналы

управления на нагревательные элементы 7,8,9, аналогично контуру управления температурой, что позволяет контролировать приращение диаметров ступеней заготовки 3 на контролируемых участках с учётом знака. Программа отключает нагрев в случае утонения контролируемого участка и поддерживает температуру нагрева в тех участках, где не произошло пластической деформации всего объёма материала на одну и ту же величину, т.е., когда утонения всех контролируемых участках не будет одинаковым. После этого вся система переходит в режим выстоя, а затем охлаждения. После окончания работы при достижении наперёд заданной минимальной температуры (например, 100°C), САУ отключается.

Третий контур управления – контур управления величиной и скоростью осевой деформации.

Величину осевого пластического деформирования заготовки, относительно стапеля, контролирует измеритель линейных осевых перемещений 19, который представляет собой токовихревой датчик и жёстко крепится на стапеле 2. Величина осевого пластического деформирования преобразованная, в электрический сигнал измерителем 19, передается на соответствующий вход многовыходового усилителя-преобразователя 20. Который, усиливая и преобразовывая сигнал в цифровую форму, через порт USB1 передает его на ПК. При помощи программного обеспечения принятый сигнал сравнивается с заданным по алгоритму работы. Полученная разность данных сигналов является управляющим сигналом, который через USB2 ПК поступает на вход многовыходного усилителя-преобразователя 21. Данный блок преобразует цифровой сигнал в аналоговый, усиливает, и передает, через соответствующий выход, на вход соответствующего блока управления приводом осевой деформации 26, провод 18 изменяет величину и скорость продольной деформации в соответствии с величиной управляющего сигнала. На режиме выстоя происходит отключение контура осевого деформирования, силовой привод 18 приходит в режим торможения, замыкая механизм захвата 27 на стапель 2. В этом режиме обеспечивает равенство температуры нагрева заготовки по её всей длине, в течении заданного времени выдержки, что обеспечивает осевую деформацию в материале и ориентацию зёрен в направлении силового поля. При осты-

вании принцип работы системы аналогичен режиму нагрева. После достижения заданной температуры данный контур также отключается.

## Выводы по главе 3

Анализируя данные, представленные в главе 3, можно сделать следующие выводы:

1. Технические устройства, реализующие процесс термосиловой обработки, для стабильной и качественной работы должны быть оснащены системами автоматического управления;
2. Спроектировано устройство для термосиловой обработки гладких мало- жестких валов, оснащенное системой автоматического управления, обеспечивающее стабильную и качественную обработку мало жестких валов;
3. Разработано устройство для термосиловой обработки многоступенчатых мало жестких валов, оснащенное системой автоматического управления, обеспечивающее стабильную и качественную обработку мало жестких валов.

## Заключение. Выводы по диссертации

Резюмируя результаты работы, можно сделать выводы, что задачи магистерской диссертации решены:

- 1. Произведен анализ состояния вопроса в области проектирования устройств для термосиловой обработки, выявлены основные ученые и конструктивные подходы, применяемые при проектировании соответствующих устройств;
- 2. Разработана методика определения технологических параметров термосиловой обработки и конструктивных параметров устройств ее реализующих;
- 3. Спроектированы устройства для термосиловой обработки гладких и многоступенчатых маложестких валов, оснащенных системами автоматического управления.

Таким образом, цель магистерской диссертации - определение технологических параметров и проектирование устройств, для реализации термосиловой обработки достигнута.

## Список используемой литературы.

1. Аверченков, В.И. Основы научного творчества. [Электронный ресурс] / В.И. Аверченков, Ю.А. Малахов. — Электрон. дан. — М. : ФЛИНТА, 2011. — 156 с.
2. Авлукова, Ю.Ф. Основы автоматизированного проектирования. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Минск : "Вышэйшая школа", 2013. — 217 с.
3. Агамиров, Л.В. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Том II-1. [Электронный ресурс] / Л.В. Агамиров, М.А. Алимов, Л.П. Бабичев, М.Б. Бакиров. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2010. — 852 с.
4. Акулович, Л.М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. [Электронный ресурс] / Л.М. Акулович, В.К. Шелег. — Электрон. дан. — Минск : Новое знание, 2012. — 488 с.
5. Астанин, В.В. Техническая механика: в четырех книгах. Книга вторая. Сопротивление материалов: учебное пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2012. — 160 с.
6. Бахолдин, А.М. Техническая механика. Сопротивление материалов. (теория и практика). [Электронный ресурс] / А.М. Бахолдин, О.М. Болтенкова, О.Ю. Давыдов. — Электрон. дан. — Воронеж : ВГУИТ, 2013. — 172 с.
7. Безъязычный, В.Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в машиностроении. [Электронный ресурс] / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов, Ю.К. Чарковский, Е.В. Шилков. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 432 с.

8. Безъязычный, В.Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении: учебное пособие. [Электронный ресурс] / В.Ф. Безъязычный, М.Л. Кузменко, В.Н. Крылов, А.В. Лобанов. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 539 с.
9. Блюменштейн, В.Ю. Проектирование технологической оснастки. [Электронный ресурс] / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Клепцов. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2014. — 224 с.
10. Бокштейн, Б.С. Физическая химия: термодинамика и кинетика. [Электронный ресурс] / Б.С. Бокштейн, М.И. Менделев, Ю.В. Похвиснев. — Электрон. дан. — М. : МИСИС, 2012. — 258 с.
11. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 736 с.
12. Быков, В.В. Исследовательское проектирование в машиностроении. [Электронный ресурс] / В.В. Быков, В.П. Быков. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2011. — 256 с.
13. Вивденко, Ю.Н. Технологические системы производства деталей наукоемкой техники: Учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2006. — 559 с.
14. Гарифуллин, Ф.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебно-методическое пособие. [Электронный ресурс] / Ф.А. Гарифуллин, Р.Ш. Аюпов, В.В. Жилияков. — Электрон. дан. — Казань : КНИТУ, 2013. — 248 с.
15. Грызунов, В.И. Металлургическая теплотехника. [Электронный ресурс] / В.И. Грызунов, Н.В. Фирсова, С.Е. Крылова, Е.Ю. Приймак. — Электрон. дан. — М. : ФЛИНТА, 2014. — 108 с.

16. Гусев, А.А. Проектирование технологической оснастки. [Электронный ресурс] / А.А. Гусев, И.А. Гусева. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2013. — 416 с.
17. Дуваров, В.Б. Технология конструкционных материалов. [Электронный ресурс] / В.Б. Дуваров, Т.В. Хмеленко. — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2012. — 115 с.
18. Ермолаев, В.А. Технологические процессы в машиностроении: конспект лекций: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : НИЯУ МИФИ, 2011. — 264 с.
19. Исакова, И.В. Основы инженерного творчества. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2013. — 63 с.
20. Киселев, А.П. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / А.П. Киселев, А.А. Крашенников, А.А. Фатина. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2014. — 42 с.
21. Локощенко, А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2016. — 504 с.
22. Маталин, А.А. Технология машиностроения. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 512 с.
23. Новиков, И.И. Металловедение: В 2 т-х. Т. 1. Основы металловедения; Т. 2. Термическая обработка. Сплавы. [Электронный ресурс] / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной, Н.А. Белов. — Электрон. дан. — М. : МИСИС, 2014. — 1020 с.
24. Неведров, А.В. Основы научных исследований и проектирования : учеб. Пособие. [Электронный ресурс] / А.В. Неведров, А.В. Папин, Е.В. Жбырь. — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2011. — 108 с.

25. Сулов, А.Г. Научные технологии в машиностроении. [Электронный ресурс] / А.Г. Сулов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный, Ю.С. Авраамов. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2012. — 528 с.
26. Титов, А.В. Исследование физико-механических характеристик деформируемых материалов: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / А.В. Титов, Е.Ю. Ремшев, В.П. Белогур. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2013. — 110 с.
27. Титух, И.Н. Устойчивость механических систем. Статика: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / И.Н. Титух, С.П. Яковлев. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2014. — 121 с.
28. Фещенко, В.Н. Справочник конструктора. Комплект в двух томах: Книга 1. Машины и механизмы: Учебно-практическое пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Вологда : "Инфра-Инженерия", 2016. — 400 с.
29. Фещенко, В.Н. Справочник конструктора. Комплект в двух томах: Книга 2. Проектирование машин и их деталей: Учебно-практическое пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Вологда : "Инфра-Инженерия", 2016. — 400 с.
30. Филонов, И.П. Инновации в технологии машиностроения. / И.П. Филонов, И.Л. Баршай. — Электрон. дан. — Минск : "Высшая школа", 2009. — 110 с.
31. Чулков, В.А. Методология научных исследований.— Пенза : ПензГТУ, 2014. — 200 с.
32. Guven U. The fully plastic rotating disk with rigid inclusion. / U. Guven //ZAMM - Journal of applied mathematics and mechanics –2006 – vol. 77 – issue 9 – p. 714-716.
33. Jiang-jiang Zhu. Thermo-elastic-plastic Stress and Strain Analysis and Life Prediction of Gas Turbine Blade / Jiang-jiang Zhu, Zi-chun Yang, // Int. Conf. on

- Measuring Technology and Mechatronics Automation, (ICMTMA) – 2010. – V. 3. –p. 1019-1022.
34. Nejad M.Z. Exact elasto-plastic analyses of rotating disks made of functionally graded materials. / M.Z. Nejad, A. Rastgoo, A. Hadi // International Journal of Engineering Science – 2014 – Vol. 85 – p. 47-57
35. Przemieniecki J.S. Theory of Matrix Structural Analysis. New York: Dover Publications, 2010. 480 p.
36. Wen Xue Qian. Finite Element Analysis of a Compressor Disk / Wen Xue Qian, Li Yang Xie, Xiao Wei Yin. // J. Advanced Materials Research. – 2010. – V. 118.– p. 49-53.