

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
Профиль «Технология автоматизированного машиностроения»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему «Повышение качества обработки маложестких валов путем  
применения обработки холодом»

Студент(ка)

К.О. Хрячков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель  
Консультанты

А.В. Бобровский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

В.Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской  
программы  
д.т.н., доцент

Н.М. Бобровский

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**Допустить к защите**

И.о. заведующего кафедрой  
к.т.н., доцент

А.В. Бобровский

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

## Содержание

Содержание	2
Введение. Повышение качества обработки маложестких валов путем применения обработки холодом.	4
ГЛАВА 1. Анализ применения обработки холодом.	7
1.1 Актуальность проблемы.	7
1.2 Применение холода в машиностроении.	8
1.3 Методы упрочняющей обработки металлов.	10
1.3.1 Упрочнение пластическим деформированием.	10
1.3.2 Комбинированные методы упрочнения.	13
1.3.3 Термические и химико-термические методы упрочнения.	14
1.3.4 Упрочнение методами химического осаждения.	24
1.3.5 Электролитические методы упрочнения.	25
1.4 Анализ существующих технологий изготовления маложестких деталей и направления их совершенствования.	27
ГЛАВА 2. Разработка математической модели технологического процесса обработки холодом.	36
2.1 Теоретические предпосылки к расчёту осевых деформаций и напряжений при термической обработке.	36
2.2 Теоретический анализ и математическая модель процесса обработки холодом.	43
2.3 Создание динамической модели обработки холодом как объекта управления.	50
ГЛАВА 3. Теоретический анализ обработки холодом.	63
3.1 Исследование применения обработки холодом.	63
3.1.1 Мартенситное превращение.	63
3.1.2 Механизм мартенситного превращения.	64
3.1.3 Кинетика мартенситного превращения.	66
3.1.4 Остаточный аустенит.	69

3.1.5 Стабилизация аустенита.	69
3.1.6 Свойства мартенсита.	70
3.2 Разработка функциональной схемы обработки холодом.	71
3.2.1 Разработка установки для обработки холодом.	71
3.2.2 Функциональная схема.	74
Выводы по магистерской диссертации.	80
Библиографический список.	81
Приложение	91

## **Введение.**

В современном мире борьба за природные ресурсы выходит на новый уровень. В поисках дополнительных природных богатств человечество устремило свой взор на крайний север (в Арктику). На протяжении многих лет СССР, а теперь уже Россия, изучало данный регион с точки зрения природных ресурсов, снаряжались экспедиции, делались научные открытия. Перед машиностроителями стала задача изучить влияния экстремальных холодов на материалы, обеспечить выпуск машин и технического оборудования, специально приспособленных для работ при низких температурах. Многие узлы современных агрегатов работают в условиях умеренного (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ) и глубокого (до  $-190^{\circ}\text{C}$ ) холода. Различные элементы установок сжижения и разделения газов, некоторые узлы систем использования сжиженных газов, современных самолетов, детали и узлы горных и транспортных машин, космических ракет и др. Все используемые материалы должны обеспечивать возможность длительной работы деталей и узлов в заданных температурных условиях.

В зависимости то назначения и условий работ к современным материалам могут быть предъявлены следующие требования: высокая прочность и пластичность, малый удельный вес, коррозионная стойкость, сопротивляемость износу и радиационному облучению, специальные электромагнитные свойства, хорошие свариваемость и обрабатываемость, а также низкая стоимость.

Со снижением температуры большое количество материалов становятся более прочными и износостойкими, т.е. увеличиваются их временное сопротивление и твердость. При температуре  $-196^{\circ}\text{C}$  (температура кипения жидкого азота) временное сопротивление разрыву многих металлов в 2-5 раз больше, чем при условиях комнатной температуры. При  $-269^{\circ}\text{C}$  предел прочности меди в 2 раза больше, чем при условиях комнатной температуры, а алюминия в 4 раза.

Уменьшение пластичности и увеличение твердости при низких температурах повышает эффективность механической обработки некоторых материалов. При пониженных температурах улучшаются режущие свойства и увеличивается стойкость режущего инструмента. Применение обработки холодом после термической обработки металлов позволяет стабилизировать размеры прецизионных деталей и получить определенную (необходимую) структуру.

Однако при пониженных температурах в материале происходят внутренние превращения структуры, как результат увеличивается опасность внезапного хрупкого разрушения деталей. Поэтому в тех случаях, когда глубокое охлаждение носит временный характер, при работе в условиях нормальных температур учитывают особую опасность хрупкого разрушения материала.

Причина хрупкого разрушения – аустенитно-мартенситные превращения, сопровождающиеся увеличением объема и понижением ударной вязкости. Таким образом целесообразно на заводах подвергать обработке холодом все детали и узлы машин, которые предназначены для работы в условиях низких (критически низких) температур. После такой обработки в материалах деталей закончатся процессы перекристаллизации и можно будет отдать в брак детали, в которых возникнут дополнительные напряжения.

Параллельно с изменением структуры материала происходят изменения таких физических параметров, как удельный вес, прочностные, электрические и магнитные характеристики. При направленном воздействии холода на стальные детали можно добиться необходимого изменения указанных характеристик.

В современном мире все больше предъявляется требований к качеству обработки деталей и маложесткий вал не исключение. Данная деталь используется во многих машинах, в том числе и тех, которые используются в климатических условиях Сибири, Крайнего Север и Арктики. И как

следствия все больше ученых выискивают разные методы повышения качества данных валов. Один из методов - это направленная обработка маложесткого вала холодом. Исходя из всего выше сказанного, целью данной работы является повышение качества обработки маложесткого вала, путем применения обработки холодом.

## **ГЛАВА 1. Анализ применения обработки холодом.**

### **1.1 Актуальность проблемы.**

В России существует множество регионов, которые находятся в вечной мерзлоте это и Якутия (где – 60°C это не редкость), и Сибирь, и Арктика. В этих условиях количество поломок оборудования в зимний период времени вдвое, автосцепок иногда в восемь раз больше, чем в летний период времени. Сталь не выдерживает в условиях пониженной температуры, становясь хрупкой, она разрушается. Ввиду этой причины на Норильском горно-металлургическом заводе ликвидация поломок основных узлов агрегатов составляет приличную сумму. А по всей Сибири и за полярным кругом убытки, вызванные тратами на ремонт техники, превышают 100 млн. руб. в год.

Советские (Российские) инженеры и ученые принимали активное участие в решении данной проблемы. В действительности некоторые сорта стали и обычное железо при низких температурах (до - 40 °C), наиболее характерных для районов Сибири и Арктики, охрупчиваются и трескаются. В последствии изучения данной проблемы возникли рекомендации ряда специалистов о подготовке особых марок стали.

Известно, что при разработке и изготовлении оборудования для работы в тропических климатических условиях учитываются особенности поведения металла при высоких температурах и во влажном климате. На Крайнем Севере необходимо также разрабатывать и изготавливать специальное оборудование.

В современном векторе развития человечества огромную роль играет борьба за ресурсы (нефтяные, газовые, а так же и вода). Добыча таких важных ресурсов выходит на первый план. Взгляды множеств стран устремлены на Арктику, т.к. там сосредоточенно большое количество

ресурсов. Тем самым перед современными учеными и инженерами стоит непростая задача по созданию оборудования и новых технологий обработок деталей и узлов агрегатов, которые могли бы выдерживать экстремальные погодные условия.

## **1.2 Применение холода в машиностроении.**

С древних времен человечество пользовалось обработкой холодом. Данный вид обработки использовался для закалки стальных клинков, чтобы сделать их прочными и долговечными. С развитием человечества криогенная обработка используется в разных процессах. К ним относятся процессы разделения и сжижения воздуха, фракционная перегонка и сжижения продуктов нефтяной отрасли, сжижения природного газа. Для изготовления емкостей, трубопроводов и различных агрегатов требуются вязкие на холоду стали. Химическая отрасль нуждается в специальных резервуарах для хранения сжиженных газов и др.

В нашей стране применение обработки холодом для дополнительного упрочнения и повышения качества некоторых сталей впервые было предложено профессором А. П. Гуляевым [...] в 1937 г. Лишь через пять лет первые попытки использовать глубокий холод были сделаны в США. В наши дни многие страны проводят опыты и исследования в данной сфере и внедряют методы «холодной» закалки.

В первую очередь обработка холодом оказалась ценным способом обработки инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали. Например, для увеличения прочности материала фрезы, после закалки, охлаждают до  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что в свою очередь приводит к повышению режущих свойств фрезы. У инструмента, изготовленного из стали P18, после обработки холодом наблюдается увеличение стойкости на 50 %.



**Рис. 1.1 Обработка шлицевого вала.**

В ходе испытаний было выявлено, что некоторые алюминиевые сплавы, латунь и ряд сталей подвержены пластическому деформированию при глубоком охлаждении. Например, проведя «холодную» закалку стального листа жидким азотом, температура кипения которого - 195 °С, с легкостью можно штамповать детали любой сложной формы, с глубокими выемками.

При лазерной закалки в сочетании с обработкой холодом, приводящие к формированию в цементированном слое опор качения буровых долот мартенситно-аустенитных структур, обеспечивается повышение сопротивления слоя стали 20ХН3А абразивному и контактно-усталостному изнашиванию.

Также обработка холодом применяется для обработки магнитотвердых сплавов. Из этих материалов изготавливают постоянные магниты. Основные требования, которым должны удовлетворять магнитотвёрдые материалы, - высокая коэрцитивная сила и большое значение остаточной индукции. Коэрцитивная сила повышается с увеличением внутренних напряжений и дисперсности структуры металла.

В качестве материалов для маломощных магнитов используются высокоуглеродистые и высокоуглеродистые хромистые стали(назначение хрома – увеличение прокаливаемости стали).

В таблице №1.1 приведены марки, термообработка и магнитные свойства магнитных сталей для постоянных магнитов.

**Таблица № 1.1 Термообработка и магнитные свойства сталей для постоянных магнитов.**

Марка стали	Термическая обработка				Магнитные свойства	
	Нормализация с температуры, °С	Закалка с температуры, °С	Обработка холодом, °С	Отпуск, °С	B <sub>r</sub> , Тл	H <sub>c</sub> , А/м
EX	1000	830...850	-70	100	9000	58
EX3	1050	840...860	-70	100	9500	60
E7B6	1200...1250	820...860	-70	100	10000	62
EX5K5	1150...1200	930...950	-70	100	8500	100
EK9K15M	1200...1230	1030...1050	-70	100	8000	170

### **1.3 Методы упрочняющей обработки металлов.**

#### **1.3.1 Упрочнение пластическим деформированием.**

В результате пластического деформирования поверхностного слоя повышается твердость и понижается пластичность. Упрочнение незакаленной стали происходит с изменением структурных несовершенств (качества, плотности и взаимодействия дислокации, количества вакансий и др.), создания микронапряжений, дробления блоков. При упрочнении закаленных сталей, происходит высвобождение дисперсных карбидных частиц и частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит. Упрочнение поверхности происходит при помощи ударных воздействий на

нее струи чугуновой или стальной дроби и шариков (дробеструйное упрочнение), а также при помощи суспензии, в которой содержатся абразивные частицы (гидродробеструйное упрочнение); ротационным инструментом, обкатыванием роликами или шариками; чеканкой. Дробеструйное упрочнение выполняется на механических или пневматических агрегатных станках. В пневматических установках стальная дробь, диаметром 0,8 — 2 мм, движется за счет напора сжатого воздуха, в механических установках — за счет действий центробежных сил, которые развиваются в быстровращающемся массивном роторе. В зависимости от режимов обработки следует принимать во внимание то, что на результат влияют некоторые технологические факторы: размер, качество и расход дроби; скорость дроби при встрече с обрабатываемой поверхностью; направление потока дроби; продолжительность обработки; обрабатываемый материал; линейное расстояние от места вылита дроби до обрабатываемой поверхности; плотность, покрытия поверхности обрабатываемого участка. Данные факторы влияют на шероховатость поверхности, остаточные напряжения и глубину упрочненного слоя. Например, в ходе упрочнения стальной детали дробью, диаметр которой составляет 0,5—1,5 мм, при скорости до 90 м/с и при продолжительности от 20 до 30 с, глубина упрочненного слоя составляет от 0,4 до 1,0 мм и сжимающие остаточные напряжения 300—700 МПа. Твердость поверхности HRC возрастает на 10—30%. Шероховатость поверхности (Ra) при упрочнении также возрастает. Следует также отметить, что при возрастании времени обработки дробью может произойти переупрочнение и шелушение (отслаиванию тончайших пленок) поверхности. Центробежно-шариковое упрочнение основывается на применении центробежной силы шариков из стали диаметром от 7 до 12 мм, которые в специальном приспособлении перемещаются свободно, в свою очередь данное приспособление вращается со скоростью 10—30 м/с над поверхностью обработки. Когда шарики встречают заготовку, которая вращается при скоростью 30—90 м/мин, они с силой ударяются об

обрабатываемую поверхность, при этом происходит сглаживание шероховатостей и упрочнение металла. Применяя подачу в 0,04—0,16 мм/об, вылете шарика на 0,1—0,25 мм и числе проходов 2—3, HRC поверхности увеличивается на 18—55%. Размер упрочненного слоя 0,2—1 мм, в этом слое возникают сжимающие остаточные напряжения до 200—600 МПа. Точность формы заготовок при этом не нарушается. Размер же заготовки в объеме диаметра увеличивается на 2—6 мкм. Обработка роликами выполняется при помощи свободно вращающихся роликов, которые соприкасаются с поверхностью обработки под. В ходе пластической деформации происходит упрочнение поверхностного слоя, в результате этого процесса возникают остаточные напряжения сжатия, что в свою очередь влечет изменение структуры и увеличивается твердость на 10—60%. Размер упрочненного слоя 0,8—2,1 мм (величина зависит от размеров заготовки и усилия давления), в данном слое возникают остаточные сжимающие напряжения 500—900 МПа. Во время обкатки пружинящими шариками используются шариковые накаты, в которых шарики (лучше всего использовать шарики от шарикоподшипников) самоустанавливаются относительно обрабатываемой поверхности, но в свою очередь они не имеют фиксированной оси вращения и проскальзывания. Конструкции шариковых накатов бывают: одношариковые с опорой на два подшипника; одношариковые опора каждого шарика которого приходится на один подшипник; трехшариковые опоры каждого шарика которых приходятся на один подшипник. Данный способ обкатки шариками применяют для финишной обработки и упрочнения деталей. Как результат усталостная прочность деталей, которые изготовлены из прочной стали, может быть увеличена на 20—70%, а шероховатость поверхности в разы уменьшена. Толщина упрочняющегося слоя 2 – 2,5 мм, увеличение твердости составит 50-80%. Режимы для обкатки применяется следующий: подача 0,06—0,15 мм/об; усилие 1,50—2,50 кН; скорость обкатки 60—120 м/мин; диаметр шарика 10—30 мм.

### 1.3.2 Комбинированные методы упрочнения.

Термомеханическая обработка (ТМО) суть такой обработки состоит в том, чтобы наложить друг на друга два источника внутренних напряжений в кристаллической решетке — метастабильные структуры, которые возникли и при термообработке и наклеп, который произошел в ходе возникшей деформации. Исходя из этого, если допустить одновременную обработку закалкой и давлением, то закалочное охлаждение материала пройдет раньше, чем процесс рекристаллизации и разрушит упрочнение, возникающие в ходе деформации. В структуре самого металла, при закаленном в наклепанном состоянии, присутствуют две особенности: первая особенность состоит в том, что на блоках зерен фрагментированных и раздробленных происходит мартенситное превращение, как результат образующемуся мартенситу присуще на несколько классов более дисперсную структуру, чем обычно; вторая особенность заключается в том, что в кристаллической решетке металла одновременно действуют два источника внутренних напряжений — фазовая неравновесность (закалка) и деформация (упрочнение), как результат искаженность решетки значительно увеличивается. На практике существуют два вида ТМО: высокотемпературная (ВТМО) и низкотемпературная (НТМО). Суть НТМО заключается в аустенизации при температуре 900°С—1200°С, переохлаждении аустенита и деформации с обжатием 65%—85% при температуре 300°С—500°С, закалке на мартенсит и низком отпуске. Суть ВТМО заключается в том, чтобы совместить пластическую деформацию на 30—40% (которая проводится после гомогенизации твердого раствора, осуществляемой при температуре около 1100°С, и последующего остужения до температуры 1000—900°С) с незамедлительным охлаждением, таким образом мы позволяем предотвратить увеличение рекристаллизации, а также зафиксировать особое структурное состояние, возникшее по действием деформации. Высокотемпературная термомеханическая обработка приводит к возрастанию показателей вязко-пластических характеристик (на 160—

280%), а низкотемпературная термомеханическая обработка — увеличивает прочность. Сущность термомагнитной обработки заключается в том, чтобы произвести упрочнение ферромагнитного материала путем совместного, одновременного воздействия двух источников внутренних напряжений в кристаллической решетке — магнитострикционных и закалочных, т. е. сам процесс закалки происходит в электромагнитном поле, который создан электромагнитами или соленоидами. Таким образом в результате термомагнитной обработки снижается чувствительность к надрезу, повышаются прочностные свойства и возрастает пластичность стали. Понятие термомеханомагнитной обработки включает в себя сочетание трех процессов (пластической деформации, закалки и магнитострикции), благодаря которым в кристаллической решетке стали возникают искажения периодичности и внутренние напряжения. Такой вид комбинированной обработки позволяет повысить показатели пластичности на 30-50% при одновременно увеличении прочностной характеристики на 40—70%.

### **1.3.3 Термические и химико-термические методы упрочнения.**

Термическая обработка — это наиболее простой, эффективный и экономически выгодный метод упрочнения металла. При таком виде обработки частично меняются как химические, так и физические свойства, примером может служить магнитные свойства, теплопроводность, коррозионная стойкость. Процесс отжига и нормализация металла относят к предварительной термообработке, происходящую после закалку, отпуск и криогенную обработку — к окончательной. Процесс закалки стали является самым известным видом термообработки, данный процесс включает в себя нагрев, выдержку и быстрое охлаждение с целью получения неравновесной структуры. Как результат повышаются твердость, прочность, износостойкость и предел упругости, но вместе с тем снижается

пластичность. Состав закаленной стали строится из нерастворившихся карбидов, мартенсита и остаточного аустенита. Существуют следующие способы закалки: изотермическая; полная; ступенчатая; поверхностная; сквозная; с-обработкой холодом. В процессе полной закалки температура нагрева должна превышать критические точки. В случае ступенчатой закалки охлаждение от высокой температуры ведут в горячей среде (ванне) при температуре намного превышающей температуры начала мартенситного превращения (точки  $M_n$ ) до момента выравнивания температуры по всему сечению. В дальнейшем охлаждение протекает на воздухе. Одновременно с этим происходит реструктуризация аустенита в мартенсит. Существует два способа проводить ступенчатую закалку: первый способ заключается в том, чтобы нагретое изделие охладить в горячей среде, температура которой на  $30^{\circ}\text{C}$ — $40^{\circ}\text{C}$  превышает температуру мартенситного превращения, а после охладить на воздухе; в следствии извлечения из горячей среды в период аустенитных превращений изделие можно править; второй способ заключается в том, чтобы нагретое изделие охладить в горячей среде намного ниже температуры мартенситного превращения примерно на  $170$ — $200^{\circ}\text{C}$ , а после охладить изделие на воздухе; при таком способе закаливания править изделия становится невозможно ввиду высокой скорости образования мартенсита, но в сравнении с обычной закалкой процент брака намного снижается. Изотермическая закалка, похожа на ступенчатую закалку, деталь нагревают до температуры закалки, после происходит охлаждение в соляной ванне до  $200^{\circ}\text{C}$ — $300^{\circ}\text{C}$  и затем выдержка при данной температуре до полного и необратимого превращения аустенита в игольчатый троостит. Последующие охлаждение осуществляется на воздухе. Такой вид закалки создает минимальные внутренние напряжения и удовлетворяет требованиям твердости и вязкости. Детали подвергают поверхностной закалке при использовании токов высокой частоты (ТВЧ), такие детали работают в условиях динамических нагрузок или на стирание. При помощи изменения частоты тока возможно производить регулировку толщины закаленного слоя

в пределах 1-10. Отпуском называют такой вид термической обработки, при котором нагрев закаленной стали до температур ниже критических точек ( $100^{\circ}\text{C}$ —  $550^{\circ}\text{C}$ ), выдерживается и после охлаждается с любой скоростью, так как фазовых превращений отсутствуют (т. е. температура намного ниже  $700^{\circ}\text{C}$ ). Цель данной термообработки является уменьшение или полностью исключение внутренних напряжений, которые возникают при закалке, снизить твердость и хрупкость, увеличив вязкость стали. Существует несколько видов отпуска, в зависимости от температуры различают низкий ( $150^{\circ}\text{C}$ — $250^{\circ}\text{C}$ ), средний ( $300^{\circ}\text{C}$ — $500^{\circ}\text{C}$ ) и высокий ( $450^{\circ}\text{C}$ — $650^{\circ}\text{C}$ ). При использовании низкого отпуска такая характеристика, как твердость практически не изменяется, но наблюдается уменьшение закалочных напряжений и незначительное повышение вязкости. Существенную долю структуры, после среднего отпуска, составляет тоостит отпуска, детали получают свойство упругости и одновременно с этим сохраняется высокая прочность. Такому виду отпуска подвергают мембраны, пружины. Для повышения ударной вязкости и пластичности ответственные детали (валы, оси, шестерни и др.) подвергаются высокому отпуску. С целью превращения остаточного аустенита в тетрагональный мартенсит применяют обработку холодом (так называемый криогенный метод), он заключается в охлаждении закаленной стали до температуры  $-40^{\circ}\text{C}$ ... $-150^{\circ}\text{C}$ . Данным видом обработки обеспечивается улучшение режущих и механических свойств инструментов (в том числе из быстрорежущих сталей), повышение твердости и их износостойкости, а также наблюдается возрастание износостойкости контрольно-измерительных инструментов, прессформ и штампов, изготовленных из легированных и высокоуглеродистых конструкционных сталей. С повышением содержания углерода наблюдается увеличение твердости коррозионно-стойких сталей. Качество поверхностей, подвергаемых доводке или полированию, заметно возрастает. При оценке применения целесообразности обработки холодом стали необходимо учитывать факторы: при повторном охлаждении закаленной стали свойства

её не улучшаются, если при этом температуры не будут намного ниже, чем при закалке; время выдержки в отрицательных температурах не оказывает существенного влияния на результаты обработки; большие структурные изменения в ходе выполнения обработки протекают в сталях с повышенным содержанием остаточного аустенита (легированных и высокоуглеродистых, следует отметить, что в легированных сталях содержание остаточного аустенита больше, чем в углеродистых); в результате аустенитно-мартенситных превращений наблюдаются закономерности изменения размеров детали, таким образом следует определить опытным путем конкретный химический состав в зависимости от конфигурации детали и режимов предыдущей термообработки; в случае обработки изделия сложной формы с неравномерным распределением массы следует незамедлительно после закалки применять вид обработки отпуск для того, чтобы снять закалочные напряжения; при охлаждении изделия ниже нуля сразу после закалки, наблюдается рост напряжения и велика опасность образования трещин; в случае применения криогенной обработки наблюдается рост объема структурных составляющих при процессе распада остаточного аустенита. Сам процесс распада остаточного аустенита и последующие его превращение в мартенсит происходит в определенных температурных границах. В случае если закалка протекает при низких температурах, то насыщение кислородом аустенита сводится к нулю, его полностью законченное превращение наблюдается при температуре ниже нуля, и дальнейшее его охлаждение не вызывает дополнительных аустенитных превращений. Образование аустенита с высокой концентрацией по легирующим и углеродным элементам наблюдается при выполнении закалки при повышенных температурах. При процессе охлаждения стали, в случае когда она закалена при повышенных температурах, до температуры ниже нуля происходит мартенситное превращение. Источником умеренного холода могут являться фреоновые и аммиачные установки, которые позволяют достигать температур до  $-70^{\circ}\text{C}$ ; чтобы получить криогенную

температуру  $-135^{\circ}\text{C}$  применяют криогенные аппараты или криогенные установки. Твердый углекислый газ обычно служит криоагентом (представлен в виде сухого льда), кислород и воздух (смесь жидких азота и кислорода), сам жидкий азот и др. В таблице 1.2 Представлены температуры кипения различных криогентов при атмосферном давлении.

**Таблица № 1.2 Температуры кипения различных криогентов при атмосферном давлении.**

<b>Криогент</b>	<b>Температура кипения, °C</b>
<b>Аммиак</b>	-33,5
<b>Углекислота</b>	-78,5
<b>Хлористый метил</b>	-23,7
<b>Азот</b>	-195,8
Смесь твердой углекислоты с хлористым метилом	-82
Смесь твердой углекислоты с хлороформом	-77
Смесь твердой углекислоты с этиловым эфиром	-77
Смесь твердой углекислоты с треххлористым фосфором	-76
Смесь твердой углекислоты с этиловым спиртом	-72
Смесь твердой углекислоты с хлористым этилом	-60

**Продолжение табл. № 1.2**

Смесь твердой углекислоты с ацетоном	- 78
Фреон	-29,4
Этилен	-105,2
Метан	-161,5
Кислород	-183

Химико термическая обработка (ХТО) применяется как синтез химического и термического воздействий на изделие и подразумевает изменение химического состава, свойств поверхностного слоя и его структуры. Она состоит из диффузионного насыщения металлами (диффузионная металлизация алюминием, хромом, титаном и др.) и неметаллами (углеродом, азотом, бором и др.), а также процесс диффузионного удаления примесей (углерода, кислорода, водорода). Такой вид обработки может применяться как в виде окончательной или как предварительной с последующей упрочняющей операцией термообработки. Всего существуют два вида цементации — в газовых средах и твердом карбюризаторе. Наибольшую популярность приобрела цементация в газовых средах, так как это высокопроизводительный способ при массовых и серийных производствах. Газовая цементация проводится в муфельных шахтных электропечах. Чтобы образовать газовую среду в качестве карбюризатора используют жидкости такие, как синтин, бензол, пиробензол, керосин, трансформаторное или промышленное масло или газы — попутный или природный, пропанобутановые смеси, нефтяных месторождений. Чтобы соблюсти необходимую глубину цементованного слоя, подбирается расход карбюризатора (для газообразного — кубический метр в 1 ч, а для жидкого — число капель в 1 мин), время выдержки и температура. Азотирование

стали — это процесс насыщения слоя поверхности азотом при нагреве стали до 600°C—700°C в аммиачной среде (NH<sub>3</sub>). Для увеличения износо-, тепло- и коррозионной стойкости и твердости (HRC) поверхностного слоя. Участки, которые не подвергаются азотированию, обрабатывают (покрывают) медью или оловом толщиной в 0,55—0,1 мм. Отверстия и резьбы, находящиеся внутри изделия, покрывают обмазками. Аммиак, имеющий свойство при нагреве разлагаться, создает атомарный азот, который внедряют в поверхностный слой изделий и затем происходит процесс взаимодействия с железом с образованием нитридов (Fe<sub>2</sub>N, Fe, N). Продолжительность процесса азотирования составляет 3 – 90 ч., затем печь с изделиями медленно охлаждают до 300°C —350°C одновременно сохраняя подачи аммиака в зону обработки в течении 4—5 ч. Также глубина азотированного слоя зависит от времени выдержки и температуры. Существует два вида азотирования: прочностное азотирование, при котором повышается твердость, износостойкость и усталостная прочность, и антикоррозионное азотирование (декоративное), которое повышает коррозионную стойкость в пресной воде и во влажной атмосфере. Прочностному азотированию, при котором твердость достигает 73 HRC, подвергают чаще всего хромоникелевые стали, а также легированные стали 35ХМЮА, 38ХМЮА, 25Х5МА, у которых легирующие элементы (Cr, Al, Mo) повышают рост образования твердых нитридов. Температура азотирования при этом составляет 500°C—520°C. Данный вид азотирования применяется для деталей прецизионных пар, шестерен, валов. Углеродистые стали подвергаются антикоррозионному азотированию, которое происходит при более высоких температурах (600— 700°C) со временем выдержки 0,5—1,0 ч. Азотирование в сравнении с цементацией отличается следующие плюсы: выше износостойкость и твердость; по завершению азотирования закалка деталей не требуется; поверхность приобретает коррозионную стойкость. После завершения азотирования производят внешний осмотр детали. Измеряют поверхностную твердость по Виккерсу (нагрузка 50 или 250 Н) или по суперроквеллу (нагрузка 50 или 100

Н), измеряют хрупкость и глубину слоя по отпечатку сделанному пирамидой прибора Виккерса, определяют величину коробления. Контроль над газовой средой в печи осуществляют при помощи диссо-циометра, манометра и счетчика, который считывает показатель расхода аммиака. Для процесса цианирования используют жидкие (цианирование), твердые и газовые (нитроцементация) среды, а также пасты, наносимые на места, подлежащие химико-термической обработке. В машиностроении применимо три вида жидкостного цианирования: низкотемпературное, которое совершается при температуре 540°С—580°С; среднетемпературное, которое совершается при температуре 820°С—860°С и высокотемпературное, которое совершается при температуре 920°С—960°С. С целью увеличения противозадирных свойств изделия, его теплостойкости и твердости осуществляют низкотемпературное цианирование, оно протекает при температуре 560°С — 580°С. Процесс цианирования проводят в электродных печах-ваннах или соляных (с наружным электрообогревом). Перед процессом цианирования детали внешне осматривают (на отсутствие забоин, заусенцев и других дефектов поверхности), промывают и тщательно просушивают, причиной является попадание воды в ванну, что вызывает очень опасный выброс солей. С целью уменьшения коробления, изделия, перед процессом цианирования, подогревают до температуры 300°С—400°С.

Борирование — это процесс диффузионного насыщения поверхности металла бором с последующим образованием боридов железа  $Fe_2B$  и  $FeB$  для конструкционных сплавов и сталей и других структур различных материалов. Главными способами борирования являются газовое, электролизное, жидкостное и в твердой среде. Такой вид обработки применяется для увеличения свойств износо- и красностойкости деталей, а также для упрочнения поверхности деталей, которые работают при пониженных температурах, ударных и знакопеременных нагрузках или в абразивных и агрессивных средах. Самым главным свойством слоя, подвергнувшемуся борированию, является повышенная твердость,

достигающая значений 1800—2300 кгс/мм (замер производился на приборе ПМТ-3) и сохраняющаяся это свойство при нагреве до 950°C. Поверхности, которые не подвергаются процессу борирования, подвергают электролитическому хромированию или гальваническому омеднению с толщиной слоя не менее 25 мкм. Изделия после процесса борирования подвергают закалке и последующему отпуску, так как наличие под твердым слоем боридов вязкой сердцевины при работе в условиях значительных давлений может привести к выкрашиванию и продавливанию борированного слоя. Повторного нагрева следует избегать, перемещая детали в закалочную среду сразу после борирования и некоторого процесса охлаждения. Закалка с погружением детали в охлажденную среду является весьма эффективным способом закалки (воду или масло при температуре 20—80°C), после погружения воду возбуждают ультразвуковые колебания с частотой 17—22 кГц. Сам процесс действия ультразвука на деталь заключается в изменении условий парообразования на её поверхности. Процесс кавитации, который наблюдается при воздействии ультразвуковых колебаний, быстрее разрушает парогазовую пленку. При данном виде обработки процесс охлаждения протекает в более интенсивном отводе тепла, чем при пленочном кипении. Борирование, чаще всего, используют как окончательную операцию. При этом необходимо учитывать её влияние на изменение размеров упрочняемых изделий: внутренние уменьшаются, а наружные размеры увеличиваются. Недостатками борированных поверхностей можно считать сетчатые трещины и сколы, дефект выкрашивание при эксплуатационных температурах, которые превышают 800°C, откалывание и продавливание боридных слоев высокой твердости, затрудненность восстановления изношенных поверхностей из-за содержания в них высокой твердости остатков боридных слоев, возросшая хрупкость с возрастанием толщины диффузионного слоя. Толщина, при которой борированный слой является критическим: для высокоуглеродистых — 0,18—0,2 мм, для среднеуглеродистых — 0,25 мм, для низкоуглеродистых

сталей 0,3 мм. Процесс легирования стали еще больше влияет на склонность борированного слоя к сколообразованию в сторону увеличения. Диффузионное хромирование называют процесс насыщения поверхности металла хромом и его соединениями для повышения кавитационной и коррозионной стойкости, окалиностойкости, жаростойкости до температуры 800°C, при содержании хрома 0,3—0,4% в поверхностном слое—повышения износостойкости и твердости. Процесс хромирования производят в высокотемпературных печах для любых деталей разных марок сталей. Перед началом хромирования детали очищают от различных загрязнений и укладывают в контейнеры, а затем и загружают в печь. Следует отметить, что температура в печи не должна превышать 400°C. Чтобы нагнать температуру в 600°C, необходимо осуществить нагрев со скоростью в 100°C/ч. Рабочая температура составляет 950—1100°C, время при котором происходит отпуск составляет 5—11 ч, скорость хромирования выдерживается в пределах 0,02—0,04 мм/ч. Твердость обработанной поверхности, при таком виде обработки, достигает 1200 HV. Контроль параметра качества хромирования производят по образцам-свидетелям. Твердость измеряют прибором Виккерса при нагрузке 6—10 Н, глубину — по микрошлифам, а качество слоя определяют травлением. Процесс силицирования это диффузионное насыщение поверхностного слоя стали кремнием, с его помощью повышается стойкость против коррозии в кислотах и морской воде, а также используют для повышения износостойкости при сниженной твердости (200-250 HV). Силицирование происходит в порошкообразных смесях, жидких и газовых средах. Процесс силицирования в жидких средах производится в расплаве солей хлористого натрия и хлористого бария (1:1) с добавлением ферросилиция (20% от общей массы) при температуре 1000°C. Данный слой может достигать глубины до 0,35 мм.

### 1.3.4 Упрочнение методами химического осаждения.

В растворе, содержащем гипофосфит натрия, осуществляют никелирование. Процесс химического осаждения никеля происходит по всей поверхности (равномерно) и не зависит от формы изделия. Из особенностей покрытия можно выделить следующие: толщина слоя равномерная; поверхность-блестящая; высокая прочность сцепления с основным металлом; пористость незначительная; большая твердость без термической обработки; достаточно высокие коррозионная стойкость и износостойкость; коэффициент линейного расширения сопоставим с коэффициентом линейного расширения стали. Для того, чтобы произвести процесс химического никелирования используют щелочные и кислые растворы, следует заметить, что осадки, которые получают в кислых растворах, имеют меньшую пористость и мелкокристаллическую решетку, в сравнении с щелочными растворами.

Большие скорости осаждения достигаются в кислых растворах. Данные растворы чаще всего применяются для деталей из черных и некоторых цветных металлов, особенно когда их рабочие поверхности должны иметь высокие коррозионно-защитные свойства, износостойкость и твердость.

Чтобы заменить дорогостоящие соли органических кислот в щелочах используют менее дорогие соли минеральных кислот (хлористый никель, гипофосфит никеля, никель серноокислый и др). Как результат в ходе термической обработки твердость покрытия увеличивается и в области температуры 400°C достигает максимума (8-10 ГПа), примерно равной твердости гальванического хрома. Сам технологический процесс (ТП) твердого никелирования имеет следующие операции: получение необходимой чистоты с устранением дефектов поверхности; для придания точности формы – механическую обработку; обезжиривание деталей венской известью, для изоляции мест, не подлежащих покрытию; травление электролитическое в сернофосфорном электролите; очистка в холодной воде;

осаждение сплава никель-фосфор на рабочую поверхность; очистка в горячей воде; в течении часа проводится термическая обработка при температуре 400°С ( она увеличивает прочность сцепления сплава с основанием и твердость слоя на 20-30%); механическую обработку и окончательный контроль. Процесс травления происходит в электролите, который состоит из 4 частей  $H_3PO_4$  и 1 части  $H_2SO_4$  при плотности тока 18 А/дм<sup>2</sup> в течении 2 – 3 мин.

### **1.3.5 Электролитические методы упрочнения.**

В качестве теплозащитного, антикоррозионного и декоративного покрытия используют процесс хромирования, который используется на деталях, используемых в условиях интенсивного трения. Хромовые осадки обладают такими свойствами, как повышенной износостойкостью и высокой коррозионной стойкостью. Данный процесс протекает в сульфатном электролите, состоящем из: 9—11 г/л концентрированной серной кислоты; 22—28 г/л трехвалентного хрома ( $Cr^{2+}$ ); 240—260 г/л хромового ангидрида ( $CrO_3$ ). При этом плотность тока составляет 50-100 А/дм, при температуре электролита равной 50-70°С.

Покрытия, обработанные хромом, понижают коэффициент трения, что влечет за собой снижения тепловыделения при трении. Такой параметр как износостойкость возрастает в несколько раз (5-15 раз).

Чтобы повысить качество покрытия во время хромирования реверсируют направления тока. Более улучшенную мелкокристаллическую структуру имеют осадки, в них внутреннее напряжение уменьшается. При этом состав электролита при процессе реверсированного хромирования обычный. Режимы используемые в процессе хромирования следующие: температура электролита 45—60°С, плотность тока 60—150 А/дм, продолжительность каждого катодного периода 10—15 мин, анодного 10—15 с.

Следует заметить, что в ходе увеличения периода анодной поляризации (примерно до 15-20 с) развивается сетка трещин. Также наблюдается, что хром прирабатывается лучше, когда он получается на токе переменной полярности, нежели при прямом токе. Твердость хромового покрытия варьируется в пределах 70-100 HRC.

В процессе если детали, после прохождения хромирования, подвергнуть цементации в твердом карбюризаторе при температуре 900-1100°C с добавлением 20% железного порошка, то атомы углерода насытят хром и образуется карбид хрома. Одновременно хром диффундирует из покрытия в основной металл, что приводит к образованию вторичного слоя состоящего из карбидов хрома. На глубине покрытия равной 20 мкм твердость составляет 140 HRC, а на поверхности 155 HRC.

Процесс борирования заключается в том, что при протекании электролиза расплавленной буры получается элементарный бор, который при выделении диффундирует в структуру металла, образуя при этом на поверхности изделия бориды железа, а в случае присутствия углерода – карбиды бора. Температура электролита составляет 900—950°C, а плотность тока 0,2-0,3 А/дм. По завершению процесса борирования твердость слоя составляет 200-250 HRC. Следует заметить, что при нагреве до 950°C слой бора не изменяет своих свойств. При этом прочность сцепления с основным металлом сравнима с цементированным слоем, а повышенная твердость слоя изделия делает её износостойкой.

Наносить покрытие можно различными методами, в основном конденсацией карбидов и нитридов тугоплавких металлов в вакууме одновременно с этим осуществляя ионную бомбардировку. Покрытия, получаемые в ходе соединения тугоплавких металлов, служат для упрочнения поверхностного слоя деталей. Такими покрытиями покрывают как наружные, так и внутренние поверхности, следует отметить, что с уменьшением диаметра отверстия от края вглубь неравномерность покрытия возрастает. Полировка покрытия допускается в случае, если снимаемый слой

колеблется в пределах 1 мкм. Для процесса покрытия используют такие установки, как УРМЗ.279 048, "Пуск", 8У-16, "Булат" и др. Покрываемые изделия имеют шероховатость не более 1,25 мкм.

#### **1.4 Анализ существующих технологий изготовления маложестких деталей и направления их совершенствования.**

Из всех задач, стоящих перед современным машиностроением особняком стоят требования по качеству, надежности и долговечности изделий, их рост является ключевым показателем. Исходя из условий создания все более технологичных и прочных конструкций агрегатов и узлов, в машиностроении происходит естественное уменьшение металлоемкости продукции и в результате формирование такого класса, как маложесткие детали (МЖД) рис. 1.2. К нему относятся оси, шпиндели станков, валы, гребные винты, ходовые винты и т.д. Чаще всего, данные МЖД лимитируют межсервисные, межремонтные и ресурсные границы изделий. В нашей стране наблюдается постоянный рост производства подобных деталей, что обусловлено ростом потребности в прецизионных машинах, увеличением скоростей вращения оборудования в газовой, судостроительной, нефтяной, авиационной и автомобильной промышленности. Именно поэтому, выходящие на первый план задачи по разработке технологий изготовления изделий данного класса являются приоритетными и актуальными задачами современного машиностроения, а поиск резервов повышения точности обработки и ее последующее сохранение – актуальной научной проблемой технологии машиностроения.



**Рис. 1.2 Маложесткая деталь (МЖД).**

На первый план при изготовлении МЖД типа «Вал» выходит проблема наличия в материале неравномерного распределения и повышенного уровня внутренних остаточных напряжений, появление которых обосновано различными технологическими причинами. Как результат во время релаксации происходит коробление детали, следует заметить, что процесс релаксации может быть слишком растянут во времени, что приведет к короблению уже готовой детали.

Известно, что остаточные напряжения возникают при всех технологических процессах механической обработки, термической обработки и многих других видах обработки. Причины их возникновения разнообразны это и неоднородность температурного поля, и неоднородность пластической деформации, и фазовые превращения и т.д.

Помимо остаточных напряжений, сформированных на заготовительном этапе, аккумулируются остаточные напряжения и в ходе металлорежущей обработки. Так как слой, пластически деформированный в ходе процесса резания, формирует ряд остаточных напряжений, то происходит суммирование всех остаточных напряжений в ходе всего ТП, в том числе и на заготовительном этапе. Процесс релаксации этих напряжений во многом после изготовления детали приводит к непредсказуемому короблению. Как

результат мы можем потерять точность, достигнутую в ходе выполнения ТП, уже на этапе эксплуатации. Следует отметить, что данные трудности изготовления МЖД увеличиваются с увеличением отношения длины к диаметру, т.к. наблюдается уменьшение жесткости изделий, а процесс релаксации напряжений вызывает все более значительное влияние на стабильность геометрических параметров мало жестких валов.

Путем термической обработки могут быть сняты частично остаточные напряжения. При отпуске происходит процесс релаксации, что позволяет изменить остаточные напряжения. Данный процесс протекает заметно быстрее с повышением температуры, но одновременно с этим наблюдается ряд недостатков:

1) остаточные напряжения снимаются не полностью;

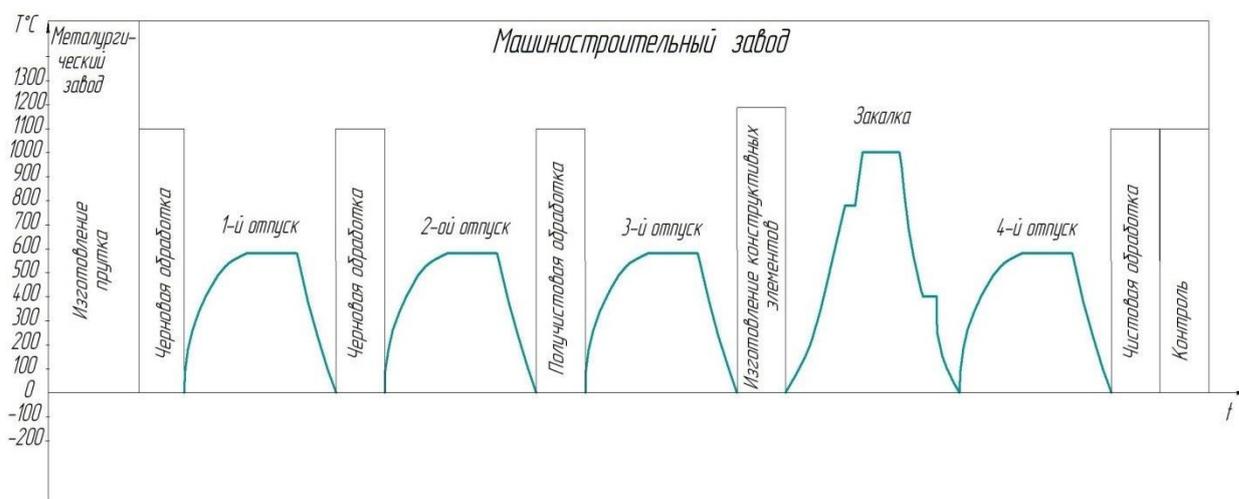
2) в результате нагрева и следующим за ним охлаждением, в заготовке крайне сложно обеспечить равномерное распределение остаточных напряжений по поперечному сечению и по всей длине заготовки;

3) данный способ отпуска у МЖД очень трудоемкий, наблюдается снижение производительности процесса. Огромное влияние на данный процесс оказывает скорость охлаждения заготовки после отпуска, так как в результате остывания деталей возможно возникновение новых остаточных напряжений.

Применяемые технологические процесс в машиностроении по изготовлению МЖД (см. рисунок 1.3) зачастую имеют огромное количество технологических переходов при которых предельно минимизировано снятие припусков и с обязательным выдерживанием изделия в свободном состоянии. Технологический процесс изготовления МЖД, как правило, включает в себя ряд операций: процесс правки, процесс термообработки (обычно многократную) и процесс механической обработки. Каждая из операций вносит в изделие остаточные напряжения, которые могут быть

различны по знаку, величине и направлению. Данные напряжения могут вызвать деформацию детали как на стадии изготовления, так и при последующей эксплуатации. Но следует заметить, что данные методы не могут обеспечить высокую производительность и могут в свою очередь привести к возрастанию себестоимости продукта.

Чтобы повысить точность МЖД используют калиброванные прутки в качестве заготовок с последующей пластическим деформированием. При изготовлении трансмиссионных валов артезианских турбинных насосов используют калиброванный металл, данные детали служат для извлечения воды из подъемных скважин. Основным моментом в достижении эксплуатационной точности являются повторные обжатия калиброванного металла, при данном процессе возникают не растягивающиеся, а сжимающиеся остаточные напряжения.



**Рис. 1.3** Схема изготовления малоожестких валов.

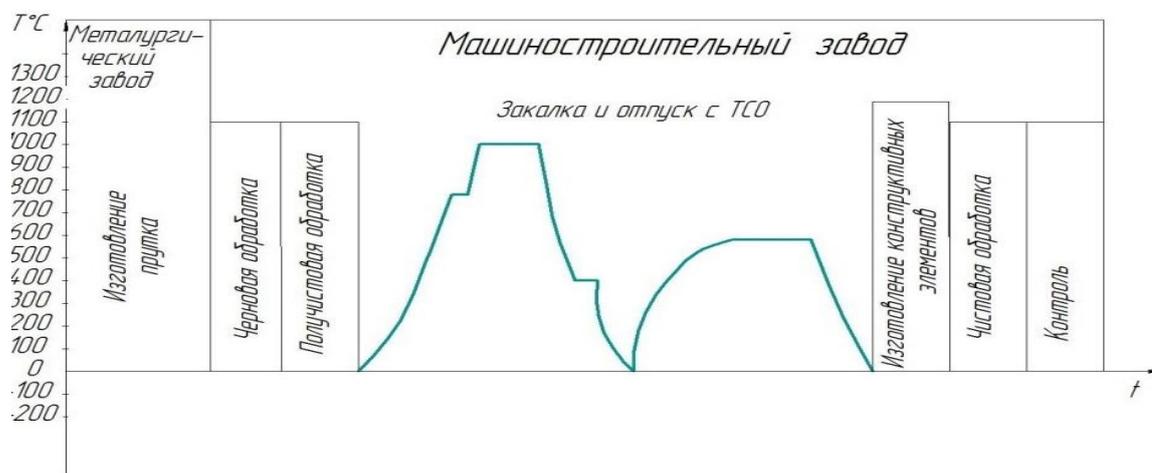
К плюсам данного метода относятся повышение производительности процесса изготовления малоожестких валов, так как высокое качество поверхности калиброванных прутков и высокая точность диаметрального размера требует механической обработки только отдельных участков вала, и снижение трудоемкости.

Данный способ изготовления МЖД экономически целесообразно применять только на предприятиях, которые занимаются изготовлением круглого проката и использующие для этого специальное оборудование.

Для того, чтобы понизить уровень остаточных напряжений по всей длине заготовки, а также снизить энергоемкость и время процесса используют виброобработку. В этом случае снятие напряжений производится за счет энергии колебаний. За счет этого в поликристаллическом материале происходят сдвиги кристаллической решетки, одновременно с этим происходит процесс перераспределения напряжений. Процесс вибрации обязан происходить с резонансной или близкой к резонансной частоте частотой. В случае, когда частота вибраций превысит частоту собственных колебаний детали, могут возникнуть усталостные напряжения. Разным видам виброобработки свойственны и другие недостатки, например: информация по протеканию процесса релаксации по всей длине и сечению детали отсутствует, возникает сложность в разработке и использовании конструкций, из-за демпфирования колебаний опорами на разных режимах обработки создается ограниченность технологических возможностей, наблюдается по сечениям заготовки неравномерность снижения остаточных напряжений, из-за трудностей регулировки амплитудных деформаций возникает ограниченность технологических возможностей, возникает отсутствие информации о ходе виброобработки и появляется риск невозможности учитывать изменяющиеся условия обработки быстро и оперативно.

К способам увеличения эксплуатационной точности МЖД можно отнести термосиловую обработку (ТСО) с применением системы автоматического управления (САУ) параметрами ТП. Суть данного метода заключается в следующем: необходимо равномерно в продольном и поперечном направлении обеспечить упругопластическое деформирование малоуглового вала, путем приложения осевого растягивающего усилия с

определённой скоростью и величиной, во время процесса термообработки. В процессе охлаждения наружная поверхность вала остывает быстрее, чем внутренняя, и следовательно напряжения в поверхностном слое будут противоположными, напряжениям образованным внутри детали. При завершении процесса охлаждения, знаки напряжений изменятся на противоположные, самое главное плюс данного технического приема заключается в том, что на поверхности изделия напряжения будут одного знака, что в свою очередь исключает коробление. В последствии при обработке вала с равномерным снятием металла не приведет к его короблению. Следовательно, из ТП изготовления МЖД можно исключить все промежуточные стабилизирующие отпуска (см. рисунок 1.4), а ТСО проводить при обычной термообработке (закалка, отпуск), при выходе на физикомеханические свойства. Такой способ позволяет повысить производительность изготовления МЖД, увеличить точность в несколько раз, снизить себестоимость и исключить коробление.



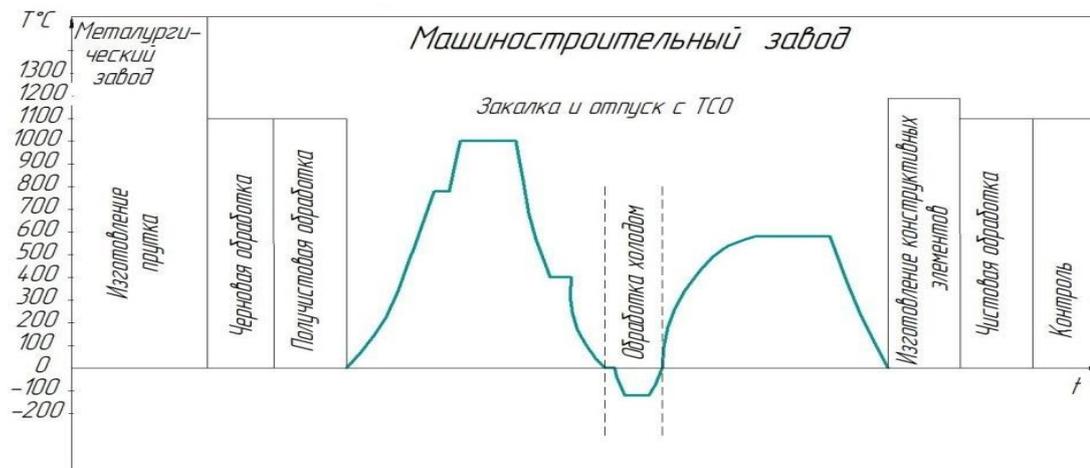
**Рис. 1.4** Схема изготовления малоожестких валов с ТСО.

Во время ТСО возможно одновременно контролировать такие параметры как: величину осевого усилия, величину пластической деформации, скорость пластической деформации, температуру нагрева заготовки, а также обеспечивать стабилизацию температуры и пластической

деформацию по всей длине изделия, путем управления данными параметрами.

За последнее время метод старения получил толчок в своем развитии, касаются они повышения релаксационной стойкости материала с одновременным понижением уровня остаточных напряжений. К ним можно отнести как статическое, так и динамическое нагружение, вибрационное старение, старение при помощи тепловых ударов и обработка ультразвуком. Но следует заметить, что ни один из перечисленных методов не может добиться равномерного распределения остаточных напряжений, в результате к перспективному направлению развития можно отнести применение системы автоматического управления параметрами термообработки – ТСО.

Следует обратить внимание на очень важный фактор, который не был рассмотрен полностью авторами, данный фактор называют процессом превращения аустенита в мартенсит (мартенситное превращение). Все дело в том, что легирующие элементы и углерод в стали (кроме кобальта) понижают температуры точек начала и конца мартенситного превращения. Так, при добавлении 1% легирующего элемента к стали с 0,9—1,0%С температура начала превращения аустенита в мартенсит снижается при легировании марганцем на 45<sup>0</sup>К, никелем — на 26<sup>0</sup>К, ванадием — на 30<sup>0</sup>К, молибденом — на 25<sup>0</sup>К, хромом — на 35<sup>0</sup>К, медью — на 7<sup>0</sup>К; при добавлении кобальта указанная температура повышается на 12<sup>0</sup>К. При этом, следует заметить, что температура окончания мартенситного превращения может достигать 180<sup>0</sup>К для высокоуглеродистых сталей, но для сталей с содержанием углерода менее 0,6% данная температура превышает комнатную. Как результат, для таких материалов в ТП изготовления МЖД включают специальную криогенную обработку (см. рисунок 1.5). Если данную обработку опустить, то часть аустенитной фазы стабилизируется, а другая часть перейдет в другую фазу, отличную от объема, что приведет к короблению изделия.



**Рис. 1.5** Схема изготовления малоожестких валов с ТСО и обработкой **холодом.**

Скорость охлаждения также существенно влияет на формирование структуры материала. Так, например, при некоей критической скорости образуется только мартенсит. Данное превращение чаще всего сопровождается возрастанием предела прочности, понижением ударной вязкости и относительного удлинения, а также увеличением объема. Даже если мы будем равномерно увеличивать объем детали сложной формы, то это приведет к появлению внутренних напряжений. Данные напряжения могут суммироваться с термическими напряжениями, которые в свою очередь возникают из-за изменения температуры и от внешней нагрузки, как результат понижается ударная вязкость и относительное удлинение и как результат может произойти охрупчивание детали. Благодаря этому можно сделать следующий вывод: чем выше содержание легирующих элементов и углерода в стали и чем выше температура термообработки, тем выше содержание остаточного аустенита в стали и тем ниже температурные точки начала и конца мартенситного превращения. Таким образом, принимая во внимание данный вывод, основой для разработки метода повышения эксплуатационной точности длинномерных многоступенчатых валов, следует

воспользоваться методом термосиловой обработки МЖД с последующем включением в нее выполнения операции криогенной обработки. Принцип работы данного метода заключается в автоматизации процесса ТСО и криогенной обработки, при помощи разработанной программы для ЭВМ, которая в свою очередь основываясь на данных о твердости (исходной и требуемой), размерах, а также учитывая и другие физико-механические свойства материала заготовки, рассчитывает параметры, необходимые для обработки МЖД методом ТСО. А в случаях повышенного содержания легирующих элементов и углерода в материале заготовки программа включает автоматически операцию обработки холодом и дальнейшим среднетемпературном или низкотемпературном отпуском (см. рисунок 1.5). Благодаря применению предложенного метода возможно повышение качество изготовления маложестких деталей. Отметим, что многообразие исходных данных заготовок (механические и физические свойства материала, его геометрические параметры) и эксплуатационные требования, которые предъявляются к готовым изделиям, в зависимости от назначения, требуют многообразие методов и подходов не только по изменению последовательности технологических операций, но и по оптимизации режимов резания и как результат появляется острая необходимость в разработке САУ (системы автоматического управления) процессом криогенной обработки.

Таким образом для достижения поставленной цели, нам необходимо решить ряд задач:

- Исследовать теоретические аспекты данного вопроса
- Создать математическую модель обработки маложесткого вала в криогенной установке
- Разработать криогенную установку

## **ГЛАВА 2. Разработка математической модели технологического процесса обработки холодом.**

### **2.1. Теоретические предпосылки к расчёту осевых деформаций и напряжений при термической обработке.**

Ввиду того, что операция по обработке маложесткого вала холодом выполняется после термосиловой обработки, необходимо изучить процессы протекающие при ТСО.

В металлургии анизотропия самопроизвольного изменения размеров (формы), обрабатываемого длинномерного вала рисунок 2.1 сходна с общей анизотропии механических и физических свойств и значителен как неоднозначность макро и микро строений обрабатываемого металла, в том числе в профиле из проката наличие ориентированной структуры, локализованной разной зернистости ориентации карбидных включений и т.д. При формировании проката длинномерных заготовок выделяют 2е основные причины образования и развития остаточных напряжений: неоднородность температурного поля при охлаждении и неравномерность пластических деформаций металла во время обжатия его в калибрах валков.



**Рис. 2.1 Длинномерный вал.**

Существуют разные способы снижения уровня остаточных напряжений в малоэластичных деталях [41, 44, 69] в зависимости от физико-механических свойств материала: пластическая деформация, отжиг, отпуск и так далее. Одним из способов сохранения формы – контролируемый процесс обработки холодом, т.к. после термообработки при отпуске детали, лишь в редких случаях может выполняться условие релаксации

$$\varepsilon_{y \rightarrow 0} + \varepsilon_{nl} = \text{const.} \quad (2.1)$$

Односложное механическое состояние состава материала при обработке холодом изделий под напряжением в сочетании с многообразием фазовых состояний может привести к технологическим последствиям, изменение геометрических параметров при следующих механических операциях или вылеживании. Следует заметить, что коробление в свободном состоянии происходит за счет изгибающего момента, возникающего при несовместимости деформаций.

Рассмотрим применение осевой деформации при нагреве и в холодном состоянии. В зависимости от назначения изделия каждая операция может производиться как самостоятельная. Суть технологического процесса состоит в том, что при растягивании материала все продольные слои равномерны и в них возникают одинаковые напряжения. Рабочие напряжения  $\sigma_p$  определяются по диаграмме напряжений по величине  $\varepsilon_p$  (относительной деформации). Разгибка заготовки происходит в искривленных участках одновременно с растяжением, благодаря этому относительная деформация в продольных слоях этих участков будет различна. Чаще всего радиус кривизны искривленных заготовок не меньше 15-35 кратной высоты поперечного сечения заготовок проката, в данном случае по сечению вала распределение деформации при разгибке можно принять таким же, как во

время изгиба бруса. Таким образом распределение относительных деформаций по высоте заготовки соответствует линейному закону, а наибольшие и наименьшие значения в крайних внутреннем и наружном слоях вала выражаются через формулы  $\varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_p - \frac{d}{2R}$  ;  $\varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_p + \frac{d}{2R}$ , где R - радиус кривизны заготовки.

$E_y$  (модуль упругости) принимаем постоянным. В данном случае линейному закону соответствует распределение напряжений по высоте вала. Следовательно зависимость напряжений в зоне относительных деформаций имеет вид:

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_p + \left( \frac{E_y}{R} \right) \cdot y; \quad (2.2)$$

где, y - координата напряжений от центрального слоя заготовки.

Таким образом изгибающий момент и растягивающее усилие определяются из уравнений. Исходя из неравномерного распределения напряжений по диаметру момент внутренних сил в искривленных участках должна уравниваться внешним изгибающим моментом. Последний момент возникает за счет смещения центра тяжести поперечного сечения искривленного участка вала, от линии действия усилия растягивания. В результате изгибающий момент внешних сил будет соответствовать формуле  $M = P \cdot e$ , где e - представляет собой абсолютную величину части остаточного искривления, P – внешняя сила. Подставляя значения M и P, выраженные через известные величины получим  $e = J E_y / R F \sigma_p$ .

Значение e является только частью конечного искривления, которое остается после правки. Его основная часть возникает во время снятия внешней нагрузки не упругих изменений (т.е. участки, которые были ранее

искривлены, отчасти восстанавливают кривизну, т.к. в этих участках одновременно с растягивающим усилием снимается изгибающий момент, который создается этим же усилием.) и в процессе релаксации остаточных напряжений.

Из аналитических исследований процесса осевого деформирования малоуглеродистого вала можно сделать вывод, что остаточная кривизна детали зависит от исходной искривленности  $1/R$ , технологии изготовления и физико-механических свойств материала. Таким образом, если материал имеет упрочняющую характеристику, то внешняя растягивающая нагрузка назначается из условия, что зона относительного удлинения  $\varepsilon_{\sigma}-\varepsilon_{\sigma_{\text{м}}}$  равна участку диаграммы  $\sigma-\varepsilon$ , который имеет минимальный модуль упрочнения. Площадка текучести  $E_y=0$  выражает малоуглеродистую сталь. Для материалов, которые склонны к упрочнению, осевую деформацию назначают таким образом, чтобы зона  $\varepsilon_{\sigma}-\varepsilon_{\sigma_{\text{м}}}$  соответствовала участку диаграммы  $\sigma-\varepsilon$  после начала участка с крутым подъемом кривизны напряжения. На участке равномерного удлинения высоколегированные и высокоуглеродистые стали имеют крутой подъем напряжений, т.е. из-за больших значений модуля упрочнения качество осевого деформирования незначительно и поэтому требуются большие значения деформации и осевых нагрузок, в значительной степени превосходящих значения прочности материала.

Данный техпроцесс исправления кривизны осесимметричных деталей приемлем, только как процесс черновой обработки для изделий которых соотношение  $l/d \Rightarrow 10$  и они не имеют склонность к упрочнению. Для того, чтобы МЖД имело стабильные геометрические формы и качество изделия повысилось был разработан новый способ, который сочетает в себе процесс термообработку и процесс правки [76].

Чтобы произвести расчет температурного процесса, необходимо про решать задачу нестационарной теплопроводности, что означает отыскать

зависимость изменения температуры от количества переданного тепла по времени для любой точки тела. Рассмотрим дифференциальное уравнение теплопроводности для твердых тел (см. формулу 2.3)

$$\frac{T^0}{t} = b \left( \frac{\partial^2 T^0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T^0}{\partial z^2} \right). \quad (2.3)$$

Зададим краевые условия для того, чтобы решить данное уравнение:

- 1) Начальное распределение температуры в теле
- 2) Действие на поверхность окружающей среды, задается тремя способами:
  - а) задание температуры поверхности
  - б) задание количества холода, проходящего через поверхность
  - в) задание коэффициента теплоотдачи  $\gamma$  и температуры окружающей среды

Следовательно, по закону Ньютона:

$$dQ = \gamma(T_c^0 - T_z^0)dF, \quad (2.4)$$

где,  $dQ$  - количество тепла, Дж,  $T_c^0, T_z^0$  - температура стенки детали и газа  $^{\circ}\text{C}$ ,  $dF$  - единица площади поверхности,  $b$  - коэффициент температуропроводности.

В результате решения уравнения 2.8 получится функция, которая должна удовлетворять краевым условиям и одновременно данному уравнению. Данная функция зависит от большого числа параметров, которые возможно сгруппировать в два безразмерных комплекса: критерий Фурье

$F_0 = bt/\delta^2$  и критерий Био  $B = \gamma\delta/\varphi$ , где  $\varphi$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>0</sup>С),  $\delta$  - диаметр вала, мм,  $t$  - время охлаждения, мин.

Основываясь на второй теореме подобия функция в виде безразмерной температуры  $Q/Q'$ , в различных сходственных точках представляется как  $Q/Q' = \Phi(B_i, F_0, L)$ , где  $L = x/\delta$ .

Вал, в свою очередь, можно представить в виде длинномерного цилиндра с радиусом  $R$ , тогда дифференциальное уравнение приобретет вид уравнения 2.9:

$$\partial Q / \partial t = b(\partial^2 Q / \partial t^2 + \partial Q / \partial t) \quad (2.5)$$

Граничное условие: при  $r=R$ ;  $\partial Q / \partial t = \gamma Q / \varphi_c$ .

Начальное условие: при  $t=0$ ;  $Q=Q'$ .

Для оценки осевого растягивающего напряжения при термообработке используем следующую зависимость:

$$\sigma_p = \alpha_T \Delta T^0 E F_b / F_{CT} \quad (2.6)$$

где  $\Delta T^0$  -разность температуры вала и стапеля при охлаждении,  $\alpha_1 = \alpha(T^0) + T^0 d\alpha / dT$  -истинная разность коэффициентов термического расширения.

В случае, когда закалка происходит над ступенчатым валом в продольном направлении, то условия равенства рабочих напряжений на всех ступенях заготовки определяется из уравнения:

$$F_b^n E_b^n \alpha(T^0) \cdot T^0 / F_{CT}^n = F_b^{n-1} E_b^{n-1} \alpha(T^0) / F_{CT}^{n-1}. \quad (2.7)$$

где  $F_b^n, F_b^{n-1}, F_{CT}^n, F_{CT}^{n-1}$  - площадь поперечных сечений изделия и стапеля в "n" и "n-1" ступенях.

На первом этапе нагрева вала величина малых остаточных деформаций изделия равна сумме пластической  $\varepsilon_{пл}$ , упругой  $\varepsilon_y$  и температурной деформации  $\varepsilon_T$ .

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_y + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_T; \quad (2.8)$$

где  $\varepsilon_T = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_T(T) dT$

При термообработке с приложением осевых деформаций, оставшиеся с предыдущей операции остаточные напряжения полностью исчезают [74-76], независимо от свойств материала изделия. Но при нагреве вала, находящегося под растяжением, возникают новые остаточные напряжения, которые равномерно располагаются по сечению заготовки. Для определения уровня остаточных напряжений, необходимо воспользоваться зависимостью:

$$\sigma = E(\varepsilon_y + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_T). \quad (2.9)$$

Во время процесса охлаждения наружная поверхность вала остывает намного быстрее, чем внутренняя и напряжения в наружных слоях противоположны напряжениям во внутренних областях детали. Во время полного охлаждения (криогенной обработки) знаки напряжений меняются,

но достоинство ТСО сохраниться, а именно в наружных слоях напряжения будут одного знака, что в свою очередь исключает коробление детали.

В случае дальнейшей обработки детали, при равномерном снятии материала относительно оси вала, сам процесс обработки не приведет к короблению изделия. В данной части главы аналитические зависимости справедливы, в случае если считать процессы линейными. Нелинейность, т.е. при закалке пластические деформации не превышают 1%, что в свою очередь позволяет аппроксимировать указанную нелинейность с достаточной точностью.

Процесс закалки является началом технологии термообработки, следовательно, чтобы понять процессы релаксации (криогенной обработки) необходимо узнать какие процессы имеют место быть при закалке.

## **2.2. Теоретический анализ и математическая модель процесса обработки холодом.**

Во время произвольной деформации сама деформация и напряжение должны выражаться тензорами второго ранга, благодаря этому 3-н Гука превращается в систему линейных уравнений, которые выражают компоненту тензора напряжений через компоненту тензора деформации или наоборот. В нашем случае данное обобщение приведет к усложнению, поэтому исходим из формулировки 3-на Гука, которая определяется соотношениями  $\sigma = E\varepsilon$  или  $\varepsilon = j\sigma$ , где  $E=1/j$ .

Следует отметить, что предполагается простой способ деформации, а именно одноосную деформацию или чистый сдвиг. Для того, чтобы определить не упругость материала, необходимо задаться тремя условиями:

- 1) каждому значению деформации соответствует единственное однозначное равновесное значение напряжения и наоборот;
- 2) для достижения равновесного значения величины требуется истечение определенного промежутка времени, как правило этот промежуток составляет от микросекунд до очень значительных промежутков времени;
- 3) связь линейна между напряжением и деформацией;

Первое и третье условия являются повторением условий идеальной упругости. Термин не упругость подразумевает, что кроме мгновенного, упругого выходного параметра существует также зависимый от времени неупругий выходной параметр.

В данной постановке задачи смысл линейности охватывает следующее утверждение: если данное изменение во времени напряжения  $\sigma_1(t)$  создает деформацию  $\varepsilon_1(t)$ , и если  $\sigma_2(t)$  вызывает деформацию  $\varepsilon_2(t)$ , то  $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$  приведет к деформации  $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ .

Дадим определение термодинамической системе. Термодинамической системой называют любое вещество, которое на бесконечное число изменений внешнего параметра может проходить через непрерывный ряд равновесных состояний. Поэтому первому условию не упругости, которое заключает в себе требования однозначности равновесного соотношения между деформацией и напряжением и вследствие полной восстанавливаемости, удовлетворяют все материалы, которые определяются как термодинамические твердые тела. А второе условие не упругости показывает, что в ответ на изменение приложенного напряжения, чтобы установить равновесие в неупругом материале, необходимо определенное количество времени.

Самоподнастройка термодинамической системы во времени к новому равновесному состоянию в ответ на изменения входного параметра и будет называться релаксацией. В случае если входным воздействием выступает напряжение, проявляется неупругая релаксация в виде зависящего от времени установленного равновесного значения выходного параметра – деформации (или наоборот). Следует заметить, что внешняя релаксация отражает подстройку внутренних параметров к новым равновесным значениям. Если рассматривать данный вопрос в теории автоматического управления, то внутренние параметры системы влияют на количественную сторону переходного процесса, рассматривая релаксацию как переходный процесс. Между  $\varepsilon$  и  $\sigma$  присутствует не только упругая связь, но также косвенная связь через внутренний параметр. В результате, по мере релаксации внутреннего параметра к равновесному значению,  $\varepsilon$  деформация стремится к значению не с мгновенной скоростью, а с конечной (мгновенное изменение соответствует случаю чистой упругости).

По существу неупругую релаксацию можно назвать термодинамическим свойством, она обусловлена связью между деформацией и напряжением с конкретными внутренними параметрами, их изменение к равновесным значениям происходит в результате протекания кинетических процессов, таких как диффузия и т.д.

Такая внутренняя релаксация внешне проявляется в виде деформационных свойств, зависящих от времени.

Известно, что коробление функционально связано с неоднородностью температурного поля и пластического деформирования, несовместимостью упругих и пластических деформаций при разгрузке. Такой же процесс протекает и с остаточными напряжениями, начало релаксации происходит одновременно по времени и на разных участках детали, как в продольном, так и в поперечном сечениях.

Способы стабилизации геометрических параметров МЖД [74-76] опираются на осевую деформацию при отпуске (ТСО), с управлением последней при охлаждении и нагреве. В данном случае в работе нас интересует модели управления упруго-пластической деформацией, стабилизацией внешних нагрузок и процессом разгрузки. Данное условное разбиение рассматривается для стержневой модели, когда в анализе рассматриваются напряжения первого рода.

В модели управления упруго-пластической деформацией деформация  $\varepsilon(t)$  и напряжение  $\sigma(t)$  изменяются по времени, управляется три параметра  $\dot{\varepsilon}(t)$ ,  $T^0$  и  $\sigma$ , а выходная величина  $\varepsilon(t)$  контролируется. Во второй модели САУ поддерживается постоянной  $\sigma = const$ , происходит изменение деформации и появляется податливость  $j$ . В модели управления процессом разгрузки  $\sigma$  поддерживается постоянным, управление происходит за счет параметра  $\varepsilon$  с учетом изменения температуры остывания.

Чтобы исследовать процессы количественно, необходимы уравнения, которые смогли бы описать обработку холодом, как объект управления, для этого нам необходимо разбить модели на динамические звенья см. табл. 2.1. Отметим, что динамическое звено не обязательно является схемно или конструктивно оформленным. В частных случаях такие звенья могут не иметь физического смысла, характеризуя лишь математические зависимости, имеющие место между некоторыми величинами автоматической системы с объектом. Для того, чтобы мы смогли охарактеризовать состояние динамического звена, возьмем за обобщенную координату на входе звена  $\sigma_1(\varepsilon)$ , а на выходе  $\varepsilon_1(\sigma)$ , и дадим им названия входной величиной и выходной величиной соответственно звена направленного действия, т.е. однонаправленности.

В зависимости от исследуемого свойства – релаксация напряжений или податливость, процесс упруго-пластической деформации можно представить

звеном направленного действия с выходной величиной  $\varepsilon$  и входной  $\sigma$ , и наоборот.

Статические характеристики не линейны. Для того чтобы реализовать САУ необходимо нелинейные характеристики линеаризировать, что в свою очередь позволит упростить САУ, не снижая требования к динамике процессов криогенной обработки. Такие характеристики характеризуют поведение динамического звена в установившихся режимах, что в свою очередь позволяет на их основе выстраивать законы управления упруго-пластической деформации.

Табл. 2.1. Динамические звенья.

	Механическая модель	Математическое описание	Переходный процесс	Передачные функции
1		$\sigma = E e + \beta \dot{e}$ $T \dot{e} + e = K \sigma_{вх}$ $\sigma = \sigma_0 / E (1 - e^{-t/T})$		$W(S) = e(S) / \sigma(S) =$ $\frac{K}{TS + 1}$
2		$\dot{e} = \sigma / \beta + \sigma / E$ $T \dot{\sigma} + \sigma = K e$ $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-t/T}$		$W(S) = \sigma(S) / e(S) =$ $\frac{KS}{TS + 1}$
3		$E_2 \dot{e} + \beta e = (1 + \frac{E_2}{E_1}) \sigma + \frac{\beta}{E_1} \dot{\sigma}$ $T_1 \dot{e} + e = T_2 \sigma + K \sigma$ $\sigma = e_0 [C e^{-t/T_1} + (E_1 - E') / E]$		$W(S) = e(S) / \sigma(S) =$ $\frac{K(T_2 S + 1)}{T_1 S + 1}$
4		$\sigma < \sigma_T \quad \sigma > \sigma_T$ $\sigma = e \cdot E \quad \sigma_T = \sigma_{вх}$ $\sigma = K e \quad e_{вх} \geq \sigma_T E$		$W(S) = e(S) / \sigma(S) =$ $K = \frac{1}{E}, \text{ при } \sigma < \sigma_T$
5		$\sigma \geq \sigma_T, \sigma = \sigma_T + \beta \dot{e}$ $\sigma \leq \sigma_T, \sigma / \beta = \dot{e}$ $\sigma = \sigma_0 > \sigma_T, e = K(\sigma_0 - \sigma_T)$ $S e_{вх} = K \sigma_{вх}$		$W(S) = e(S) / \sigma(S) = \frac{K}{S}$
6		$e = d l_{вх}^o$ $(TS + 1) e = K T_{вх}^o$ $T = C Q / K F$		$W(S) = e(S) / T^o(S) =$ $= K = d l$ $W(S) = K / (TS + 1)$
		$\sigma = d E T^o > \sigma_T$ $T^o = \sigma_T / E_d$		$W(S) = \sigma(S) / T^o(S) = d E$

САУ работают и в неустановившихся режимах, поэтому для исследования динамики процесса обработки холодом необходимо понять поведение динамических звеньев в переходных режимах.

В статистических характеристиках объекта управления не учитывается время релаксации, что в свою очередь недостаточно для возможности разработки САУ и её управления процессом криогенной обработки.

Рациональнее к описанию, основывающемуся на системе параметров, которые рассматриваются как свойства материала. Начальной точкой для данного подхода является отношение между напряжением и деформацией, которое записывается в виде линейного дифференциального уравнения, которое включает в себя деформацию и напряжение, а также их производные по времени (скорость изменения напряжения и скорость деформации). В последствии будет показано, что линейные дифференциальные уравнения – это деформации, которые описывают не упругость, включают в себе три независимых параметра. Исходя из этого в состав модели входят: две пружины и демпфер. Поведение, которое описывается моделью с тремя параметрами или уравнение имеет важное значение, материал, характеризующийся таким поведением, имеет определение неупругого тела.

Ввиду того, что определение не упругости, которое приводилось выше, включает в себя требования линейности, становится понятным, что дифференциальные уравнения, которые связывают  $\varepsilon$  и  $\sigma$  должны соответствовать уравнениям первой степени и включать в себя столько независимых констант, сколько необходимо для описания поведения твердого тела.

В общем виде линейное уравнение с постоянными коэффициентами выглядит следующим образом:

$$a_0\sigma + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n\sigma}{dt^n} = b_0\varepsilon + b_1 \frac{d\varepsilon}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n\varepsilon}{dt^n}$$

или

$$P\sigma = Q\varepsilon, \tag{2.10}$$

где  $P$ ,  $Q$  - линейные операторы, включающие соответственно коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$ .

Когда механическая система подчиняется тем же соотношениям между временем, смещением и силой, которые справедливы для времени, деформации и смещения в неупругом теле, тогда она может служить моделью для заданного неупругого материала. Например, сила, которая действует на пружину, представляет собой напряжение, а коэффициент жесткости пружины  $k$ , равен податливости  $j$  или модулю упругости  $E$ . Особенность данной пружины заключается в том, что в ней запасенная энергия обратима. Другой элемент, обеспечивающий внутреннее трение, называется ньютоновским демпфером, представляет он собой поршень, который движется в идеальной вязкой жидкости, скорость движения поршня пропорциональна действующей силе, как результат произведенная работа уходит на образование тепла. Именно комбинация демпфера и пружины используется для описания твердых тел.

При разработке моделей их механические составляющие могут соединяться как последовательно, так и параллельно. В случае последовательного соединения двух составляющих механических элементов (таблица 2.1 п.2) напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  равны, а деформации складываются.

Таким образом,  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ ;  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ . При параллельном соединении тех же элементов  $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ;  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ .

Комбинации моделей различных сочетаний из двух и трех механических элементов представлены в таблице 2.1.

### **2.3. Создание динамической модели обработки холодом как объекта управления.**

Ранее мы рассмотрели повествование касательно механических свойств металлов при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ , но влияние температурного фактора на механические свойства материала имеет важное практическое значение. Как и механические процессы нам следует различать температурные эффекты по степени их воздействия на материал: охлаждение в установке можно отнести

к макро эффектам, а температурные изменения при повторных нагрузках к микро эффектам. Ввиду того, что модуль упругости отражает изменение межатомных сил сцепления с изменением межатомных расстояний, следует, что модули упругости должны быть связаны с параметрами решётки.

На сопротивление пластической деформации огромное влияние оказывает уровень температур, предел текучести существенно зависит от температуры. Отметим, что наблюдается различие между металлами с ОЦК и ГЦК при различных изменениях температур [1-4]. Нам необходимо иметь в виду, что при разных температурах деформирование материала происходит по-разному и следует обратить внимание на два фактора:

- 1) При данной структуре деформированного материала влияние температуры на направление течения.
- 2) Возникающих при разных температурах, влияние различий в структуре (к примеру, различие плотности дислокаций), для материалов с данной степенью деформации.

Влияние температуры на кривую деформационного упрочнения в металле с Г.Ц.К. решёткой (например сталь 12Х18Н10Т) обусловлено тем, что металл, находясь в деформированном состоянии, имеет различную структуру, которая возникает при различных температурах, и не наблюдается очень большого изменения напряжения, которое протекает при уменьшении температуры, которые оказывают на пластичность часто сильное влияние. При понижении температуры большей частью сильнее падает пластичность, а не вязкость.

Влияние температуры на такие упругие характеристики как  $G$ ,  $E$  заключается в том, что процесс изменения температуры (особенно её понижение) вызывает наложение физико-химических процессов на механические факторы, как обусловленных взаимодействием окружающей среды с металлом, так и происходящих внутри самого металла.

$$E_T = \sigma / \alpha T^0 . \quad (2.11)$$

где  $\sigma$  - напряжение;  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения;  $T^0$  – температура.

Отметим, что на характеристики упругости  $G$  и  $E$  большое влияние оказывает скорость деформации. Если процесс деформации происходит с высоко скоростью, то происходит резкое упрочнение материала, как результат характеристики  $G$  и  $E$  увеличиваются.

$$E_y = \frac{K}{\nu_0} \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right) \quad (2.12)$$

где  $K$  – коэффициент упрочнения;  $\nu_0$  - скорость деформирования мм/мин.

Скорость деформирования по своей сути есть абсолютная величина деформации в единицу времени  $\nu_0 = \frac{\Delta L}{t}$ . Скорость изменения осевой нагрузки является функцией скорости деформации, поэтому, используя закон Гука можно записать:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \varepsilon_1 E + \eta \dot{\varepsilon}_1 ; \\ \sigma &= \varepsilon_0 \cdot \Delta E + E_0 \cdot \Delta \varepsilon ; \\ \Delta P &= \sigma_0 \Delta F_1 + F_0 \Delta \sigma_1 ; \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta L}{L t} = \frac{\Delta d}{d t} .$$

Благодаря этому можно сделать вывод, что влияние скорости деформации и температуры на модуль упругости носит прямо противоположный характер, чем меньше температура, тем меньше модуль упругости, чем выше скорость деформации, тем больше модуль упругости. Таким образом изменение значения модуля упругости под действием данных факторов запишется следующим образом:

$$E = \Delta E = E_y - E_T. \quad (2.14)$$

Обработка холодом, как операция происходящая после ТСО, служит для, выравнивания и минимизации остаточных напряжений по всей длине заготовки и включает в себя одновременно два процесса, температурное воздействие и пластическое деформирование металла.

В случае если произвести аппроксимацию функциональной зависимости напряжения-упругопластической деформации двумя или несколькими линейными зависимостями, в зависимости от величины пластической деформации, то лучше всего обратиться к теории термопластичности и термоупругости. Рассмотрим пример, когда температурное поле известно и независимо от напряженного состояния, а само тело упругое изотропное. При одноосном нагружении, что соответствует ТСО, закон Гука при тепловых расширениях имеет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} + \alpha T^0; \\ \varepsilon_2 &= -\frac{\mu \sigma_1}{E}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где тепловое расширение складывается с удлинением, обусловленным

напряжением. Это же уравнение, выраженное относительно напряжения имеет вид:

$$\sigma_1 = \alpha \cdot E \cdot T^0 + E \varepsilon_1; \quad \sigma_1=0 \quad (2.16)$$

Воспользуемся принципом сложения действий сил, благодаря этому возможно определение температурного смещения и напряжения при условии нулевых внешних сил, а после суммировать найденные значения с напряжениями и со смещениями под действием заданных нагрузок.

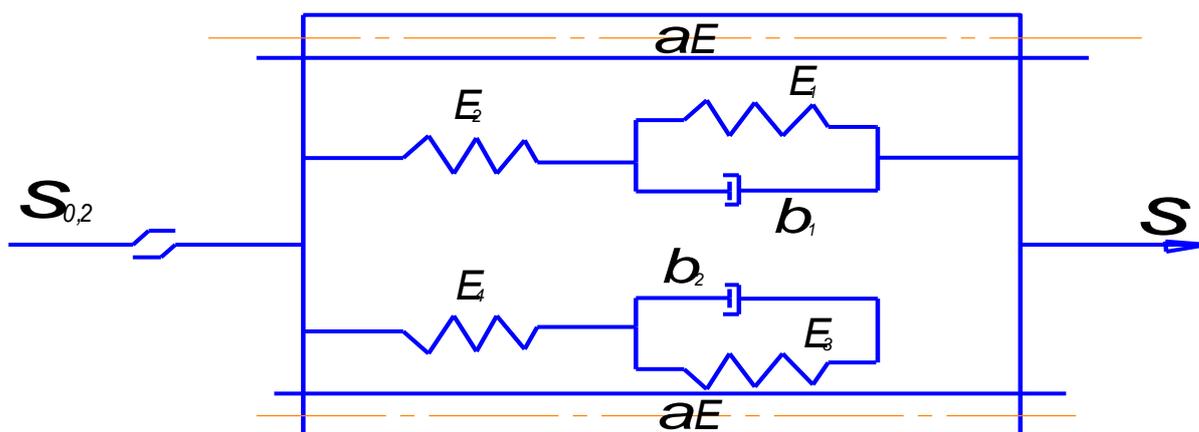
В случае если температура является константой или представляет собой линейную функцию координат, то температурные напряжения равны нулю.

Затруднение, возникающие в ходе математического описания криогенной обработки как объект управления, заключается в том, что начальное распределение температуры, остаточных напряжений пластических деформаций и скорости их протекания в масштабах заготовки остается неизвестной или отсутствуют измерительные средства, которые позволили бы контролировать распределение этих параметров в ходе процесса. Во время протекания процесса обработки холодом измеряется температура среды в установке и величины упруго-пластических деформаций.

Если процесс упруго-пластической деформации начать рано, когда ещё не достигается желаемое распределение температуры, то ухудшается процесс пластической деформации (большая неравномерность по длине) и время обработки увеличивается. С другой стороны, чересчур длительное охлаждение снижает производительность процесса, повышает издержки производства и приводит к охрупчеванию заготовки. В настоящий момент, время и скорость охлаждения определяют по априорной информации, используя при этом некоторые эвристические правила и приемы. Однако практика показывает, что такое управление процессом недостаточно

эффективно, поэтому и предлагается система автоматического управления криогенной обработки в целом. Для этого необходимо описать сам объект управления, заготовку в термо – упруго - пластическом состоянии. Статистическая характеристика объекта управления представлена в координатах сила-перемещение для сталей I2X18H10T и 40, из которых следует, что объект ведет себя и как упруго-вязкая, и как упруго вязко упрочняющая среда при превышении предела текучести. На рис. 2.1 представлена заготовка механической модели «n» элемента в которой заложено разработанные звенья САУ направленного действия и экспериментов, которые проводились на образцах. Данная модель имеет характерную особенность, которая заключается в том, что в ходе описания процесса перехода от упругой части диаграммы "напряжение - относительное перемещение" к пластической деформации внедряется пластический элемент ( в теории САУ называемый релейным элементом), который позволяет четко представлять работу механической модели. В случае, когда внешнее нагружение не превышает предел текучести, то верхняя ветвь начинает работать и стандартное неупругое тело имеет параметры  $E_2, E_1, V_1$ , т.е, в расчетах используется закон Гука, в случае достижения  $\sigma_{02}$  нагружение происходит по второй ветке с параметрами  $E_4, E_3$ , которые называют "модули упрочнения", "секущие модули" или "переменные модули упругости". Для данных двух зон нагружения представлены также и температурные модели входом для которых является температура, а на выходе параметр удлинения, математическое описание данных элементов можно увидеть в табл. 2.1 п. 6. Данная механическая модель «n»-го элемента заготовки позволяет разработать для объекта управления структурную схему.

Для реализации САУ обработки холодом необходима разработка структурной схемы объекта управления [18, 19]. Структурная схема отображает реализацию с математической стороны преобразование физических явлений, процессов, которые изменяются по времени.



**Рис 2.1** Механическая модель 'n' элемента обрабатываемой детали.

Структурные методы в случае их применения к отдельным динамическим элементам помогают вскрыть их внутреннее состояние, которые протекают в элементах, и помогают верно выбрать подход к улучшению характеристик за счет наложения других связей, которые в свою очередь оказывают благоприятное и нейтрализующие усилие нежелательных внутренних связей. Если структурные методы применить к системе в целом, то данные методы позволяют установить рациональность системы, если рассматривать вопрос с точки зрения решения главной задачи по становлению управляющего воздействия при компенсации в тоже время действующих на систему колебаний (возмущений). Подробная структура используется для настройки схемы ЭВМ непрерывного действия, на которой получают искомые решения.

Процесс термдеформации на этапе осевого деформирования, после выхода на заданный температурный режим, описывается уравнениями, согласно статической характеристики и механической модели:

$$\begin{aligned}
E_2\varepsilon_1 + \beta\varepsilon_1 &= \left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right) \cdot \sigma_1 + E_1\sigma_1; & \varepsilon_2 &= -\frac{\mu\sigma_1}{E}; \\
\sigma_1^T &= E\alpha T^0; & \varepsilon_1 &= \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\mu\sigma_2}{E}; \\
\varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} + \alpha T^0; & \varepsilon_2 &= \varepsilon_{22} + \varepsilon_{21} = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\mu\sigma_1}{E}; \\
& & \varepsilon_1 + \frac{cG}{\xi F \varepsilon_1} &= T^0.
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Во время осевой деформации длинномерных изделий  $\sigma_2=0$ , как результат, уравнения, описывающие обобщенный закон Гука для плоских сечений упростятся, а передаточные функции объекта управления для одной ветви примут вид.

$$\begin{aligned}
W_1(S) &= \frac{\varepsilon(S)}{\sigma(S)} = \frac{K_1(1+T_2S)}{1+T_1S}; & W_2(S) &= \frac{\varepsilon_1^T(S)}{T^0(S)} = \frac{K_2}{1+T_3S}; \\
W_3(S) &= \frac{\sigma_1^T(S)}{T^0(S)} = E\alpha = K_3; & W_4(S) &= \frac{\varepsilon_2(S')}{\varepsilon_{12}(S)} = \mu = K_4; \\
W_5(S) &= \frac{\sigma_1^T(S)}{\varepsilon_2(S)} = E/\mu = K_5.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

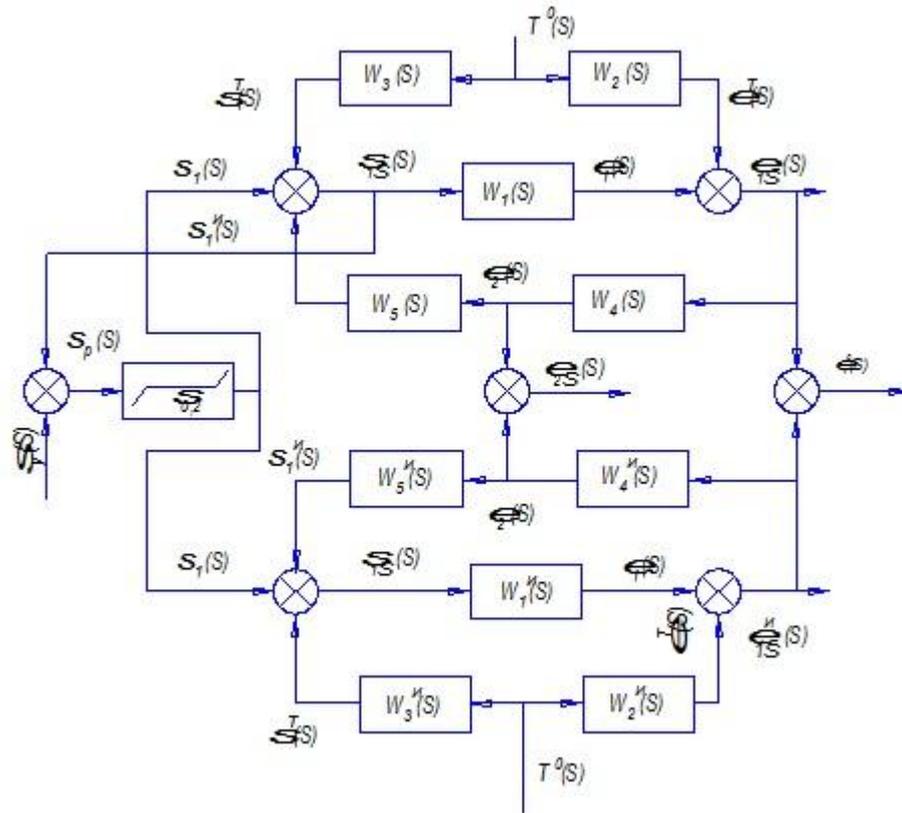
Здесь -  $E_1, E_2$  - модули упругости, ГПа,  $\beta$  - коэффициент вязкости;  $T_1 = \beta/E_2$ ;  $T_2 = \beta/E_1E_2$ ;  $T_3 = cG/\xi F$  - постоянные времени,  $K = E_1 + E_2/E_1E_2$ ,  $K_1..K_5$  - коэффициенты усиления,

$S$ - удельная теплоёмкость ДЖ/(кг  $^0C$ ),  $G$ - вес, КГ,  $F$ - площадь заготовки, мм $^2$ ,  $\xi$ - удельный коэффициент теплоотдачи;  $S$ -оператор Лапласа.

В случаи деформации заготовки в продольном направлении по своей оси, происходит уменьшение - сужение диаметра заготовки, что приводит к упрочнению материала и затем к увеличению осевых напряжений, т.е. воспользовавшись терминологией теории автоматического управления, процесс криогенной обработки можно визуализировать в виде замкнутой системы с положительной обратной связью по параметру напряжения

(рис.2.2). Для структурной схемы входом будет является осевое напряжение (значение которого изменяется в зависимости от заданной скорости), температура, а выходными параметрами продольная и поперечная относительная деформация  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Согласно статической характеристики объекта структурная схема имеет две параллельные ветви. Во время достижения предела текучести  $\sigma_T$ , в структурной схеме звено выглядит в виде нелинейного элемента релейного типа, в работу включается вторая ветвь схемы, в случае если в одноосном растяжении кривая деформации имеет участок упрочнения и текучести, то нечувствительность "полочки" на кривой показывает, что  $\sigma_T$  в этом случае является константой, а изменение  $\varepsilon$  в пределах  $\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n = \alpha$ , то  $\sigma = -E_y \cdot \varepsilon_\alpha + E_y \cdot \varepsilon$ , при  $\varepsilon > \varepsilon_\alpha$ , где  $\varepsilon_\alpha$  - деформация при постоянном напряжении. Для различных материалов величина так называемой "полочки"  $\varepsilon_\alpha$  неодинаковая. Если существует ограничение (насыщение), то предел текучести не меняется и кривая упрочнения отсутствует, то  $\sigma = E\varepsilon$  при  $|\varepsilon| \leq \sigma_T/E$ ;  $\sigma_T = \sigma$  при  $\varepsilon \geq \sigma_T/E$ .

Учен переход с одной ветки структуры на другую, т.е. в случае перехода за предел текучести материала, на первой ветки введена единичная обратная связь, под воздействием которой срабатывает «реле» и процесс осевой деформации проходит по второй ветке. Кривую упрочнения, отображающую процесс упрочнения, линейализировать, что в свою очередь справедливо в случае малых значений деформации, тогда передаточная функция остается прежней, что и предыдущая, за исключением численных значений коэффициентов усиления и постоянных времени (передаточная функция обозначена штрихом  $W'(S)$  рис. 2.2.). Согласно структурной схеме, на отдельном элементе заготовки подается суммарное термомодеформационное напряжение  $\sigma_{1\Sigma} = \sigma_1 + \sigma^T$ , в случае если нагрузка не зайдет за предел текучести  $\sigma'_{1\Sigma}$  и проходит процесс упрочнения. На выходе каждой ветки величина относительного удлинения равна суммарной деформации  $\varepsilon_{1\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon^T$ ,



**Рис. 2.2 Структурная схема n-го элемента**

$\varepsilon'_{1\Sigma} = \varepsilon'_1 + \varepsilon'^T$ . Полная относительная деформация в поперечном и продольных направлениях равна:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\Sigma} + \varepsilon'_{1\Sigma}; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{21} + \varepsilon'_{21}. \quad (2.20)$$

После структурных преобразований объект управления представлен на рис. 2.3. n-мерной системы несвязанного регулирования. Принцип управления обработкой длинномерных мало жестких деталей принят модульным, т.к. деформация  $\varepsilon_1$  является интегральным показателем и в этом случае теряется информация по длине детали. Контроль, за поперечной деформацией  $\varepsilon_2$  позволяет более точно оценить процесс осевого нагружения по всей длине и обеспечить равномерное сужение-деформацию вала, без локализации какой-то одной «шейки». Внутренняя связь между элементами (частями заготовки) существует, но для каждого контура управления она будет являться внешней нагрузкой в виде силового или теплового потоков. Структурная, схема рис. 2.2 получена на основе разработки "n-ого" элемента

рис.2.1, после несложных преобразований и упрощений таких, как свертывание передаточных функций  $H_1(S)=W_3(S)+W_2(S)W_1(S)$  и отказ от нелинейного элемента, переключающего ветви, работа которого определяется самой САУ, рис 2.3. Упрощение не изменяет физики процесса термдеформации с осевым нагружением. Здесь следует заметить, что для получения минимальной величины коробления на этапах выстоя и остывания осевое нагружение необходимо сочетать с вибрационным воздействием. При этом на изделие накладывается периодически изменяющиеся, во времени напряжение (или деформация) и определяется отставание по фазе деформации от напряжения и наоборот. Так при

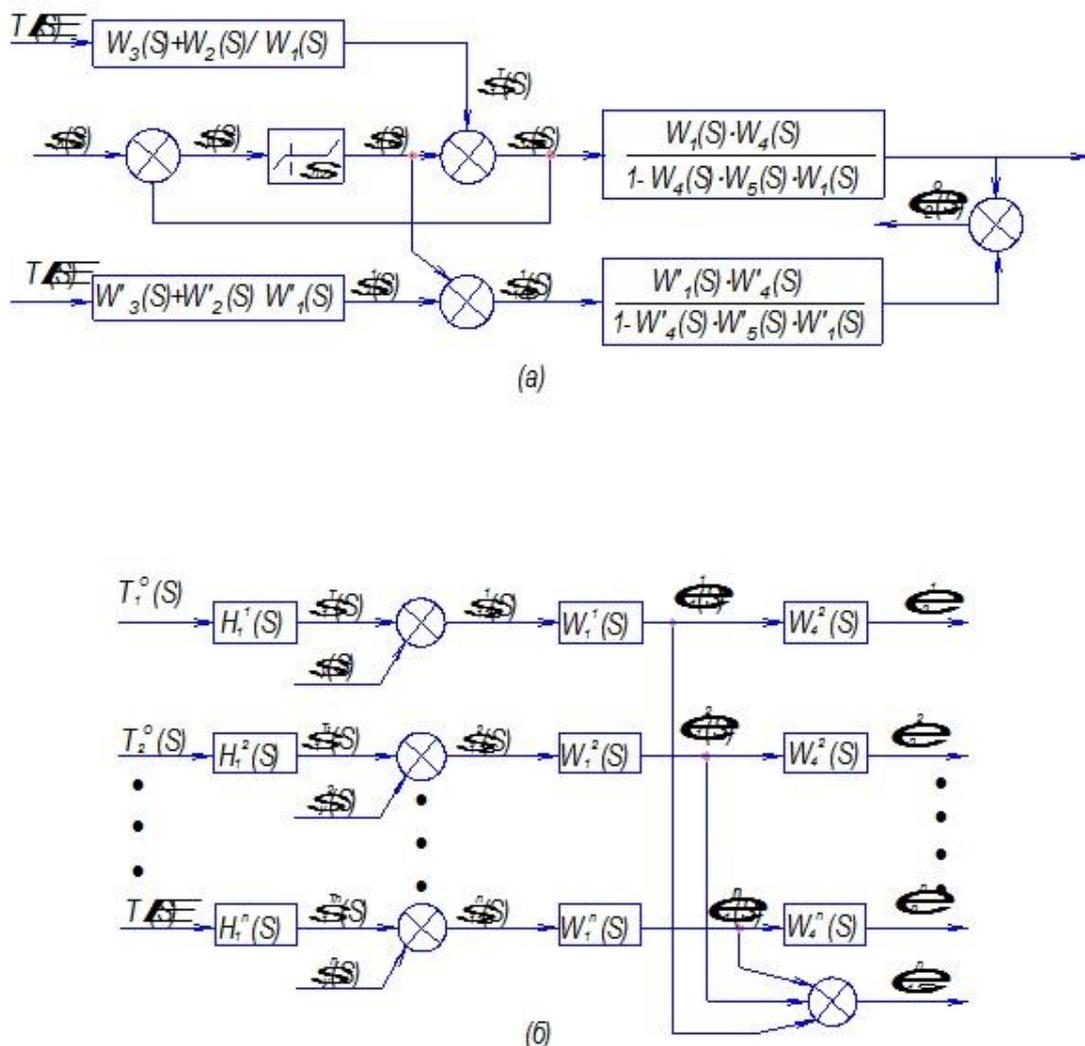


Рис. 2.3 Преобразованные структурные схемы объекта управления.

нагружении заготовки осевой силой, передаточная функция, связывающая выход с входом рассматриваемого звена

$$W(S)=\varepsilon(S)/\sigma(S)=j_R(\omega)-j_i(\omega) \quad (2.21)$$

где  $j_R(\omega)$  - действительная часть (податливость накопления.)  $j_i(\omega)$  - мнимая часть (податливость потерь). Подставляя  $W(i\omega)$  как вектор, который характеризует установившееся движение при периодическом возмущении с частотой  $\omega$  (в пределах от 0 до  $+\infty$ ). Конец вектора прочертит АФЧХ на комплексной плоскости, рис 2.6, что даёт возможность проследить как связаны  $j_R$ ;  $j_i$  и  $\Phi$ .

$$|j|^2 = j_R^2 - j_i^2 ; \operatorname{tg} \Phi = j_i/j_R. \quad (2.24)$$

Смысл величин  $j_R$  и  $j_i$ , как «податливости накопления» и «податливости потерь» соответственно иллюстрируется вычислением энергии, запасенной и рассеянной за период колебаний, это важно, когда в процессе термомодеформации, используется виброобработка как процесс, ускоряющий релаксацию. Энергия в единице объёма, в любой момент времени, в течение цикла равна  $\int \sigma d\varepsilon$ , где интегрирование производится между начальной и рассматриваемой точками цикла. Энергия  $\Pi_{ц}$ , рассеяна за весь цикл в единице объёма, равна:

$$\Pi_{ц} = \pi j_i \sigma_0^2, \quad (2.22)$$

здесь  $\sigma_0$  - амплитуда напряжений.

С другой стороны, максимальное значение энергии  $\Pi$ , запасённой в единице объёма определяется выражением

$$\Pi = \int_{\omega t=0}^{\pi/2} \sigma \cdot d\varepsilon = 0.5 \cdot J_R \sigma_0^2. \quad (2.23)$$

Отношение рассеянной энергии, к запасённой, выраженное в процентах, есть удельная демпфирующая способность материала. Естественно, что это отношение связано с углом потерь

$$\Pi_{\text{ц}}/\Pi = 2\pi(j_i/j_R) = 2\pi\text{tg}\Phi. \quad (2.24)$$

Аналогично это отношение выразится и через модуль

$$\Pi_{\text{ц}} = \pi E_i \varepsilon_0^2; \quad \Pi = 0,5 E_R \varepsilon_0^2. \quad (2.25)$$

$\Pi_{\text{ц}}/\Pi = 2\pi\text{tg}\Phi$ . Поскольку  $\Phi$  (или  $\text{tg}\Phi$ ) является мерой потерь энергии (за один период), обусловленных неупругим поведением, величина  $\Phi$  определяет внутреннее трение материала.

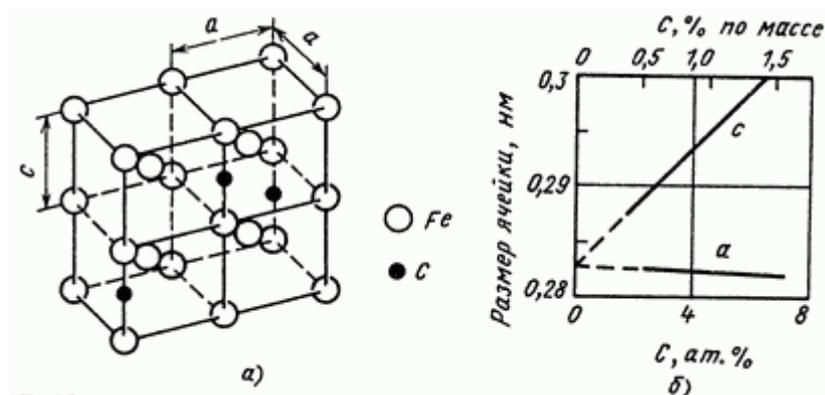
## ГЛАВА 3. Теоретический анализ обработки холодом.

### 3.1 Исследование применения обработки холодом.

#### 3.1.1 Мартенситное превращение.

Обработка холодом происходит при протекании процесса под названием мартенситное превращение. Это процесс при котором происходит перенасыщение твердым раствором внедрения углерода в  $\alpha$ -железо. В равновесном состоянии при 20 градусах цельсия растворимость углерода в  $\alpha$ -железе не превышает 0,002 % и бывает таким же, как и в первоначальном аустените, т.е. достигает 2,14 %.

Углеродные атомы занимают октаэдрические поры в решетке  $\alpha$ -железа (мартенсита) и стараются её сильно исказить. Мартенсит имеет тетрагональную решетку (рис. 3.1.1.1 а), в которой один период «с» больше другого – «а». С увеличением содержания атомов углерода высота, так называемой, тетрагональной призмы «с» увеличивается, а размеры её основания уменьшаются (рис. 3.1.1.1 б).



**Рис. 3.1.1.1. Кристаллическая структура мартенсита: а – кристаллическая решетка; б – периода решетки в зависимости от содержания углерода.**

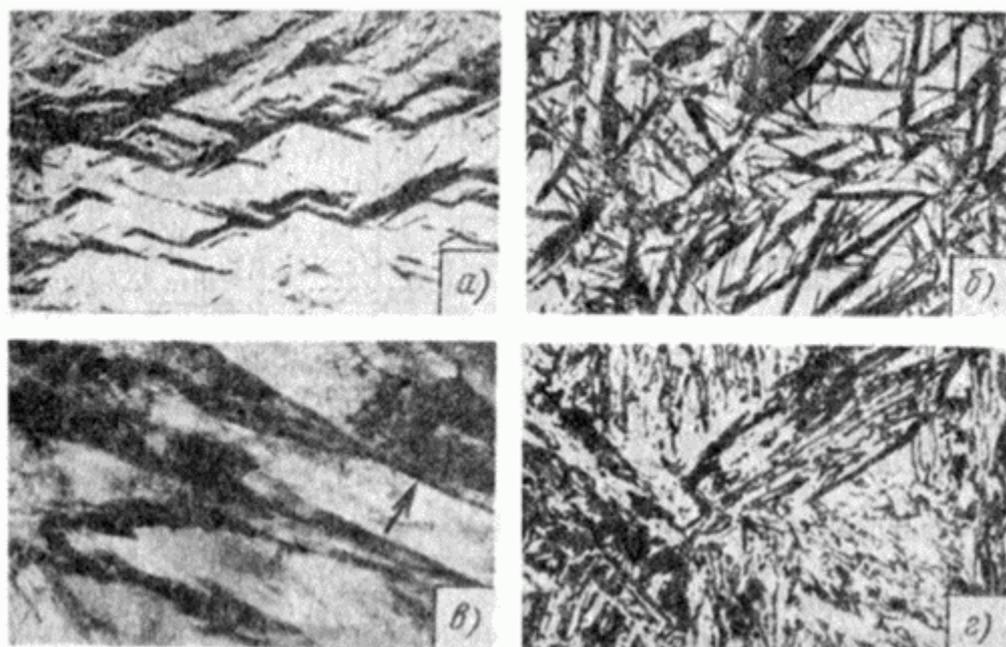
Как следствие, чем больше в мартенсите атомов углерода, тем больше отношение  $c/a$ , т.е. становится больше тетрагональность решетки. Отношение  $c/a=1+0,046C$ , где  $C$  – это концентрация атомов углерода в аустените, % по массе.

### 3.1.2 Механизм мартенситного превращения.

Мартенситное превращение происходит при быстром охлаждении материала. В этом случае аустенит, содержащийся в металле, должен быть переохлажден до таких низких температур, при которых диффузионные процессы стали невозможными. Само превращение носит бездиффузионный характер, т.е. оно не сопровождается диффузионным перераспределением атомов углерода и железа в решетке аустенита.

Мартенситное превращение происходит при помощи сдвигов и не сопровождается изменением внутреннего состава твердого раствора.

В процессе перестройки решетки сдвиговый механизм превращения отличается закономерным направленным смещением атомов. Каждый отдельный атом в решетке смещается относительно друг друга на расстояния, не превышающие межатомные, сохраняя взаимное соседство, но величина абсолютного смещения увеличивается пропорционально удалению от межфазной границы. Данный процесс приводит к макроскопическому сдвигу, внешне его можно увидеть в виде микрорельефа на поверхности металлического шлифа (рис. 3.1.2.1 а). При мартенситном превращении одновременный и направленный групповой сдвиг атомов в решетке аустенита. Направление перемещения большой группы атомов, расположенных в одной или нескольких смежных плоскостях, подобно сдвигу при пластическом деформировании. В условиях превращения кристаллы мартенсита сопряжены с аустенитом по определенным кристаллографическим плоскостям и как следствие межфазная граница не образуется.



**Рис. 3.1.2.1** Микроструктура мартенсита: а- мартенситный рельеф; б- высокоуглеродистый пластинчатый мартенсит и остаточный аустенит; в- низкоуглеродистый речный мартенсит; г- речный мартенсит стали.

В течении времени, когда на границе мартенсита и аустенита присутствует сопряжение решеток (когерентность), скорость образования и рост кристаллов мартенсита очень высока (10 в кубе м/с).

Вследствие разности удельных объемов аустенита и мартенсита, в процессе роста мартенситного кристалла, увеличиваются упругие напряжения в области когерентного сопряжения, что в свою очередь приводит к пластической деформации и, как следствие, образование межфазной границы с неупорядоченным расположением атомов относительно друг друга. Сопряженность решеток нарушается и при достижении растущим кристаллом мартенсита границы зерна (субграницы) или при других дефектов кристалла. В случае нарушения когерентности решеток дальнейший упорядоченный переход атомов из аустенита в мартенсит становится невозможным, и увеличение размеров кристалла мартенсита заканчивается.

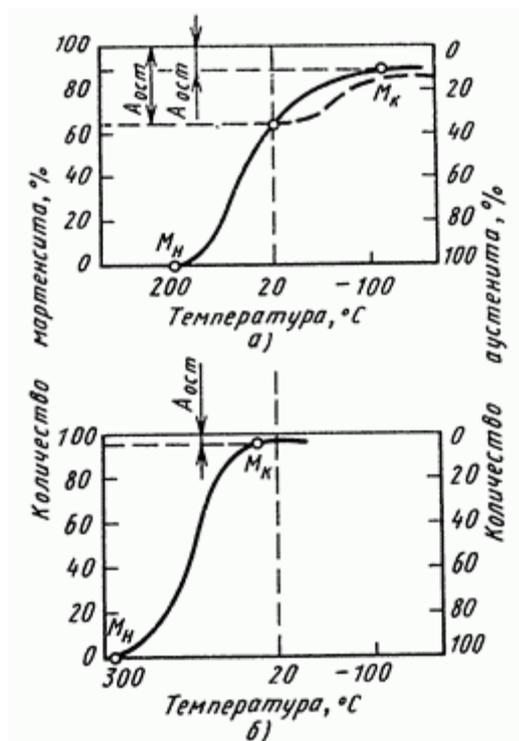
Диффузионный процесс перехода атомов из кристаллов аустенита в мартенсит при температурах ниже нуля невозможен. Дальнейшее

превращение происходит в результате образования новых кристаллов мартенсита.

### **3.1.3 Кинетика мартенситного превращения.**

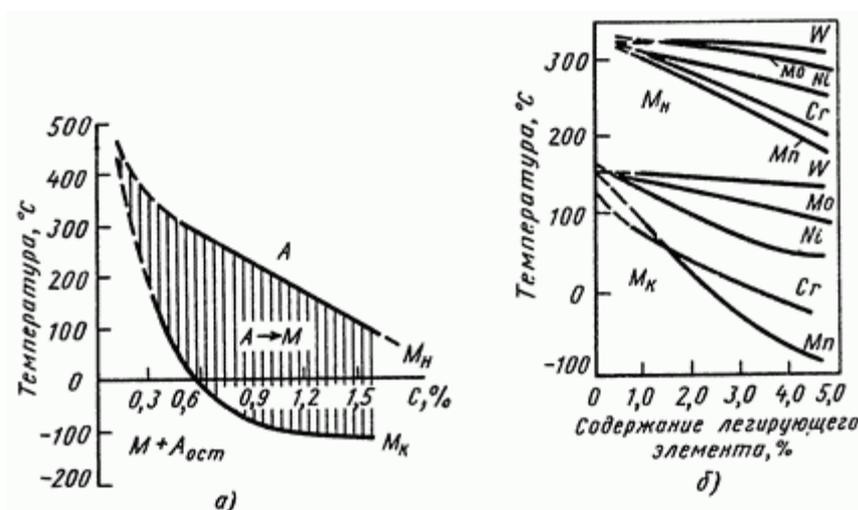
Мартенситное превращение, как правило, не удастся остановить быстрым охлаждением, как при диффузионных превращениях. При снижении температуры до точки соответствующей точке Мн (аустенит начинает переходить в мартенсит. Значит температура равная точке Мн и есть начало мартенситного превращения.

Для того, чтобы мартенситное превращение развивалось, необходимо постоянно охлаждать деталь ниже температуры в точке Мн. В случае если деталь прекратить охлаждать, то следовательно мартенситное превращение остановиться. Данная особенность мартенситного превращения отличает его от диффузионного, которое протекает в изотермических условиях, когда температура ниже точки  $A_1$ . Сама зависимость количества мартенсита от температуры (до которой охлажден образец) может быть выражена так называемой мартенситной кривой (рис. 3.1.3.1). Исходя из этого можно сделать вывод, что чем ниже температура материала, тем больше в нем образуется мартенсита. Как следствие количество мартенсита становится больше в результате образования новых кристаллов, но не в следствии роста кристаллов. Когда материал достигает определенной температуры превращение аустенита в мартенсит останавливается. Данную температуру окончания мартенситного превращения принято обозначать Мк. Расположение точек Мн и Мк не подвержено влиянию скорости охлаждения, а зависит от химического состава материала (аустенита). Чем выше содержание в аустените углерода, тем ниже располагаются точки Мн и Мк (Рис. 3.1.3.2 а). Научно доказано, что все легирующие элементы (исключение составляет кобальт и алюминий) понижают положение точек Мн и Мк (Рис. 3.1.3.2 б).



**Рис. 3.1.3.1** Мартенситные кривые для высокоуглеродистой стали (а) и низкоуглеродистой стали (б)

Напряжения, возникающие внутри материала, способствуют и влияют на мартенситное превращение, так при деформации аустенита возможно возникновение мартенситного превращения при температурах выше  $M_n$  [ ].

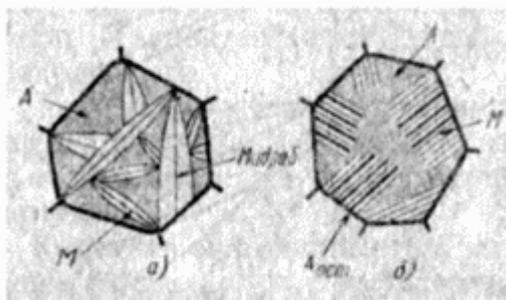


**Рис. 3.1.3.2** Температура мартенситных точек  $M_n$  и  $M_k$ ; а- влияние содержания углерода, б- влияние содержания легирующих элементов.

В зависимости от состава материала и температуры образования кристаллов, кристаллы мартенсита могут иметь различную субструктуру и

морфологию. Существует два вида мартенсита – реечный и пластинчатый (Рис. 3.1.3.3). Образуется пластинчатый мартенсит в высокоуглеродистых сталях, характерной особенностью которых является низкая температура мартенситной точки.

На рис. 3.1.2.1 (б) видна микроструктура такого мартенсита. Кристаллы такого мартенсита являют собой широкие пластины. А в плоскости среза они имеют игольчатый вид.



**Рис. 3.1.3.3. Схема пластинчатого (игольчатого) (а) и реечного (массивного) (б) мартенсита**

В большинстве случаев (легированные стали и конструкционные углеродистые стали) кристаллы мартенсита заключены в форму тончайших реек (реечный мартенсит), которые вытянуты в одинаковом направлении (см. рис. 3.1.2.1 в и рис. 3.1.3.3). Чаще всего образуется так называемый пакет из реек (см. рис. 3.1.3.3). В отличие от игольчатого, такой мартенсит называют массивным (см. рис. 3.1.2.1).

Структура реечного мартенсита выглядит как дислокации высокой плотности расположенные в хаотическом порядке в отсутствии кристаллов двойников. В легированных сталях чаще всего внутри мартенситных пакетов, в полостях между кристаллами мартенсита сохраняются частицы остаточного аустенита (см. рис. 3.1.2.1. (в и г) и 3.1.3.3, б).

Величиной исходного зерна аустенита определяются размеры кристаллов любой морфологии. Чем больше зерно аустенита, тем оно крупнее. Поперечному размеру зерна аустенита соответствует длина первой пластины мартенсита. При более низких температурах образующиеся кристаллы ограничены в своем развитии и как результат имеют более меньшие размеры (см. рис. 3.1.3.3).

### **3.1.4 Остаточный аустенит.**

В углеродистых закаленных сталях, которые имеют точку  $M_k$  ниже  $20^\circ\text{C}$  и содержащих свыше 0,4-0,5 % С (рис. 3.1.3.2), содержится остаточный аустенит. Количество его становится больше в случае если температура опускается ниже точек  $M_n$  и  $M_k$ , т.е. чем больше углерода содержится в аустените и легирующих элементов. Например, в стали с содержанием углерода 0,6-1,0% количество остаточного аустенита не больше 10%, а если в стали содержание углерода равняется 1,3-1,5%, то оно может достигать 30-50%.

В сталях, которое содержание углерода и легирующих элементов высоко (например 1,3% С и 12% Cr), после процесса закалки при высоких температурах количество аустенита достигает 70-100%. Данное свойство аустенита поясняется понижением температуры, равной точки  $M_n$ , в области отрицательных температур. Данный процесс можно наблюдать в микроструктуре закаленной стали в случае содержания в нем большого количества остаточного аустенита (25-35%) в виде светлых полей промежутков мартенсита (рис. 3.1.2.1 б)

### **3.1.5 Стабилизация аустенита.**

Если температуру охлаждения зафиксировать на определенное время в точке  $M_n$ , например  $20^\circ\text{C}$  (рис. 3.1.3.1 а), то в таком случае аустенит, который сохранился не превращенным, становится более устойчивым. Такое устойчивое состояние аустенита проявляется тем, что при последующем

уменьшении температуры процесс мартенситного превращения восстанавливается не сразу (рис. 3.1.3.1 а), а протекает при более низких температурах и интенсивность его снижается. В таком случае количество мартенсита заметно меньше, чем в случае непрерывного охлаждения. В интервале температур  $M_n$ - $M_k$  данное явление более заметно и она зависит от температуры, при которой фиксировалось охлаждение. Точка температуры, ниже которой проявляется стабилизация называют  $M_s$ . Иногда стабилизацию объясняют процессом релаксации напряжений, которое сопутствует мартенситное превращение.

### **3.1.6 Свойства мартенсита.**

Отличительной чертой мартенсита являются его высокая прочность и твердость. С увеличением содержания углерода наблюдается рост твердости. Однако, с ростом в мартенсите количества атомов углерода наблюдается склонность его к охрупчиванию. Мартенсит, в котором процентное содержание углерода больше 0,35-0,4%, обладает низким сопротивлением к зарождению трещин и малым значением вязкости разрушения. Прочность мартенсита возникает благодаря перенасыщению углеродом твердого раствора, атмосфер Коттрелла на дислокациях и их высокой плотности, а также большому числу различного рода субграниц и границ, которые в свою очередь затрудняют движение дислокаций. Мартенсит становится хрупким благодаря образованию атмосфер из атомов углерода на дефектах строения изделия.

В сравнении с другими составляющими стали мартенсит имеет наибольший удельный объем. Благодаря увеличению удельного объема при мартенситном превращении, возникают большие внутренние напряжения, которые в свою очередь образуют деформацию изделия.

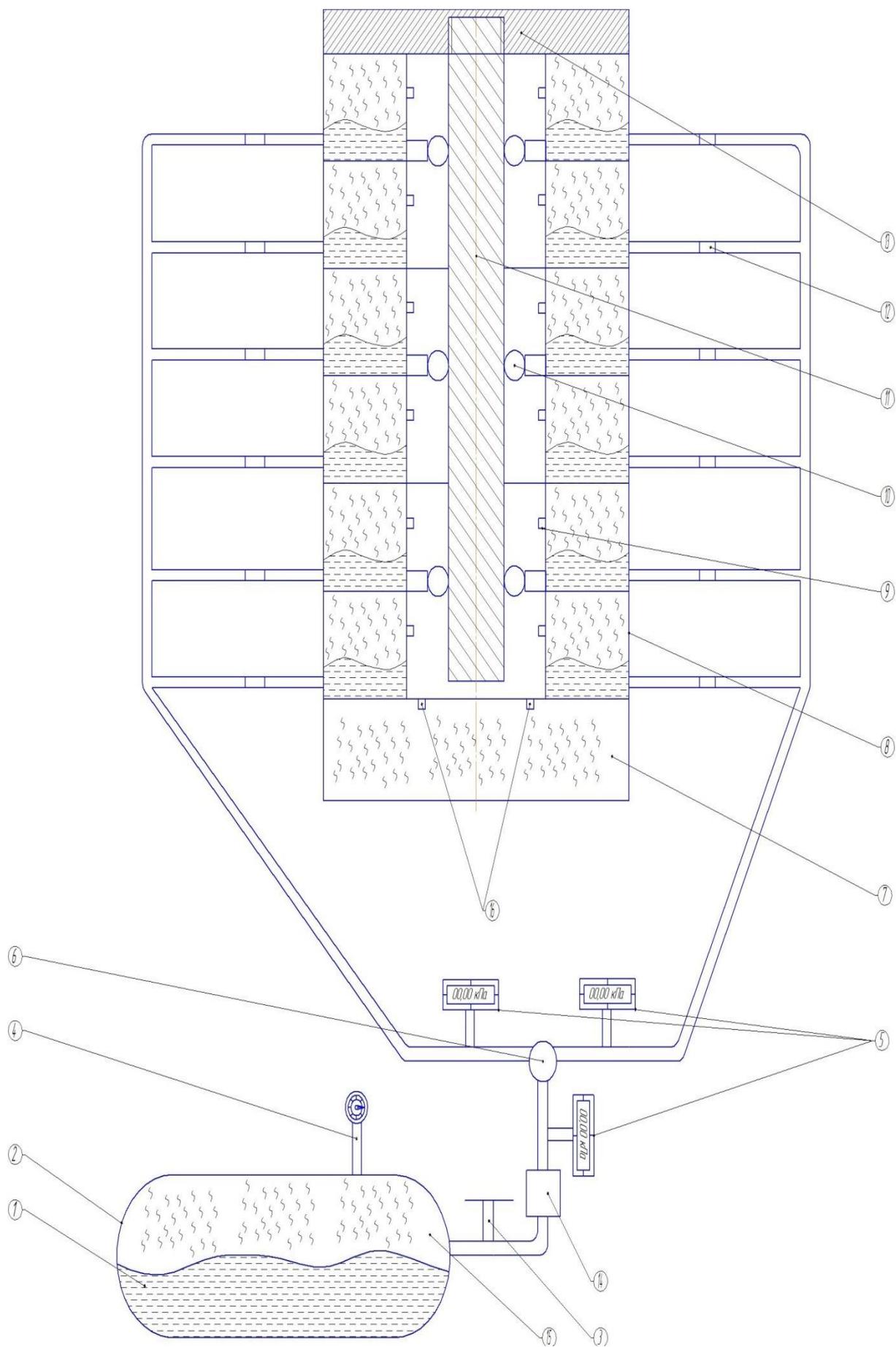
## **3.2 Разработка функциональной схемы обработки холодом.**

### **3.2.1 Разработка установки для обработки холодом.**

На современном этапе развития, общество придумало множество путей обработки маложестких валов. Одним из видов обработки таких валов является обработка холодом. Её преимущество в отношении других обработок, является то, что после данной обработки материал повышает свою твердость в среднем от 4...10 HRC и износостойкость, что влечет за собой повышение качества материала. Данный вид обработки используется после закалки (термосиловой обработки) для того, чтобы снизить количество остаточного аустенита, который в свою очередь влечет за собой снижение твердости материала. Также известно, что данный вид обработки позволяет в отношении некоторых материалов (латунь и алюминиевые сплавы) повышать эластичность, т.е. из таких материалов можно штамповать детали любой сложной формы.

Перед учеными встала задача, разработать такую установку, которая позволяла бы обработать маложесткий вал путем применения обработки холодом, что в свою очередь позволит повысить такие показатели как твердость и износостойкость. Попытки разработать такую установку предприняли такие ученые как: Н.П.Самошкин, П.И.Трифонов, А.П. Гуляев и т.д.

На рис. 3.2.1. приведено изображение установки, которая позволяет равномерно обработать вал по всей длине.



**Рис. 3.2.1.1 Установка по обработке маложесткого вала.**

- 1 – Жидкий азот
- 2 – Сосуд Дьюара
- 3 – Вентиль
- 4 – Механический манометр
- 5 – Электрический манометр
- 6 – Распределитель
- 7 – Отработанные пары жидкого азота
- 8 – Секции
- 9 – Форсунки
- 10 – Ролики
- 11 – Заготовка
- 12 – Заслонки
- 13 – Крышка с метрической резьбой
- 14 – Насос
- 15 – Пары жидкого азота
- 16 – Форсунки

На рис. 3.2.1.1 изображена установка обработки маложестких валов холодом. Конструкция состоит из сосуда Дьюара (2) в котором находятся жидкий азот (1) и пары жидкого азота (15), к сосуду установлен механический манометр (4) и труба с вентилем (3), которые в свою очередь соединены с распределителем (6). Контроль давления подачи паров осуществляется автоматически через электрические манометры (5). Также в установке присутствуют отдельные секции (8), форсунки (9), ролики (10), упор (14) и отводящие форсунки.

Принцип её работы заключается в следующем: крышка с метрической резьбой 13 устанавливается на заготовку 11, после чего данный узел проходит термосиловую обработку, а затем помещается в установку по обработке холодом.

Вентиль 3 открывает заслонку сосуда Дьюара 2. Жидкий азот 1, благодаря насосу 14, устремляется в распределитель 6, который регулирует подачу жидкого азота в секции 8 на установке. Контроль подачи осуществляется по электрическим манометрам 5. После попаданий жидкого азота 1 в секции 8 при помощи форсунок 9 происходит подача паров жидкого азота 15 в зону обработки заготовки 11.

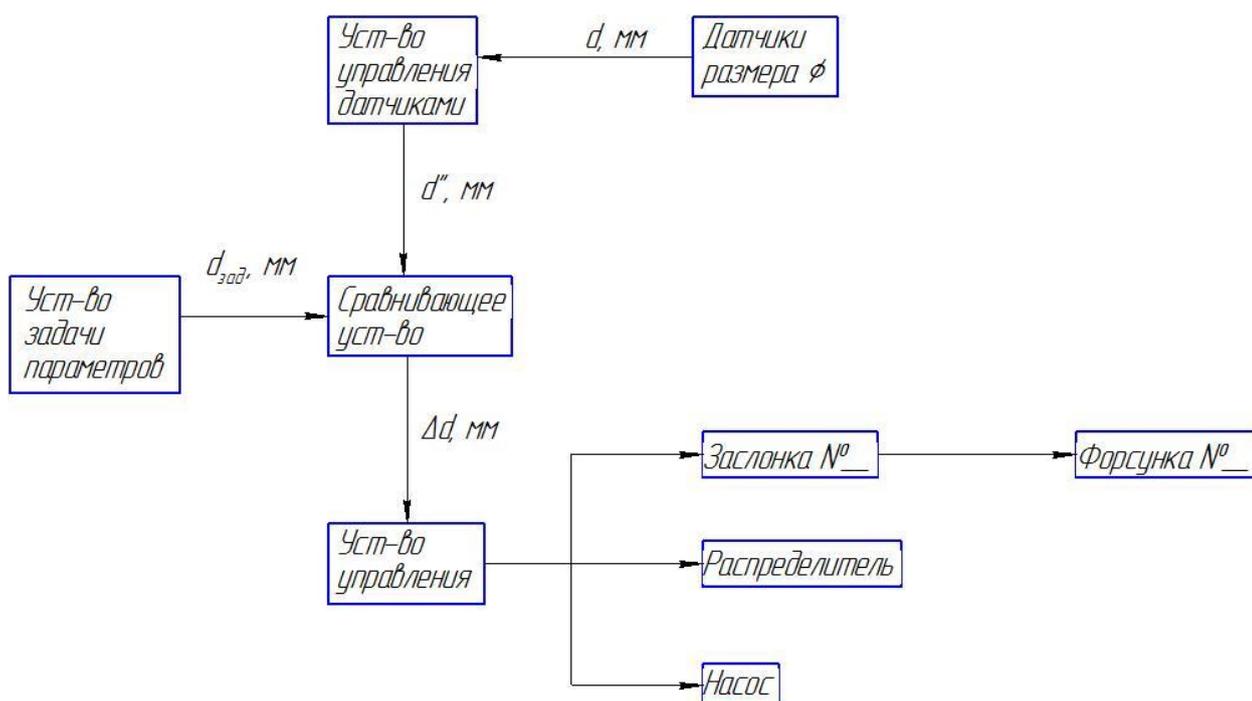
После завершения обработки, отработанные пары жидкого азота 7, при помощи отводящих форсунок 16, откачиваются из зоны обработки и заготовка 11 извлекается из установки.

Таким образом, данная установка позволяет нам обработать малоугнетенный вал после термосиловой обработки и поддерживать мартенситное превращение, тем самым снизить количество остаточного аустенита, повысив качество самого вала. А за счет отдельных секций обрабатывать малоугнетенные валы любой длины.

### **3.2.2 Функциональная схема.**

Чтобы описать процесс обработки малоугнетенного вала в условиях криогенной обработки, необходимо разработать функциональную схему, благодаря которой мы будем осуществлять контроль заданных параметров. В установке, изображенной на рис. 3.2.1.1, мы будем осуществлять контроль за такими параметрами как размер диаметра, длины и температуры. Эти параметры являются ключевыми, с помощью их возможно воздействовать на качество малоугнетенного вала, путем воздействия на них с точки зрения криогенной обработки.

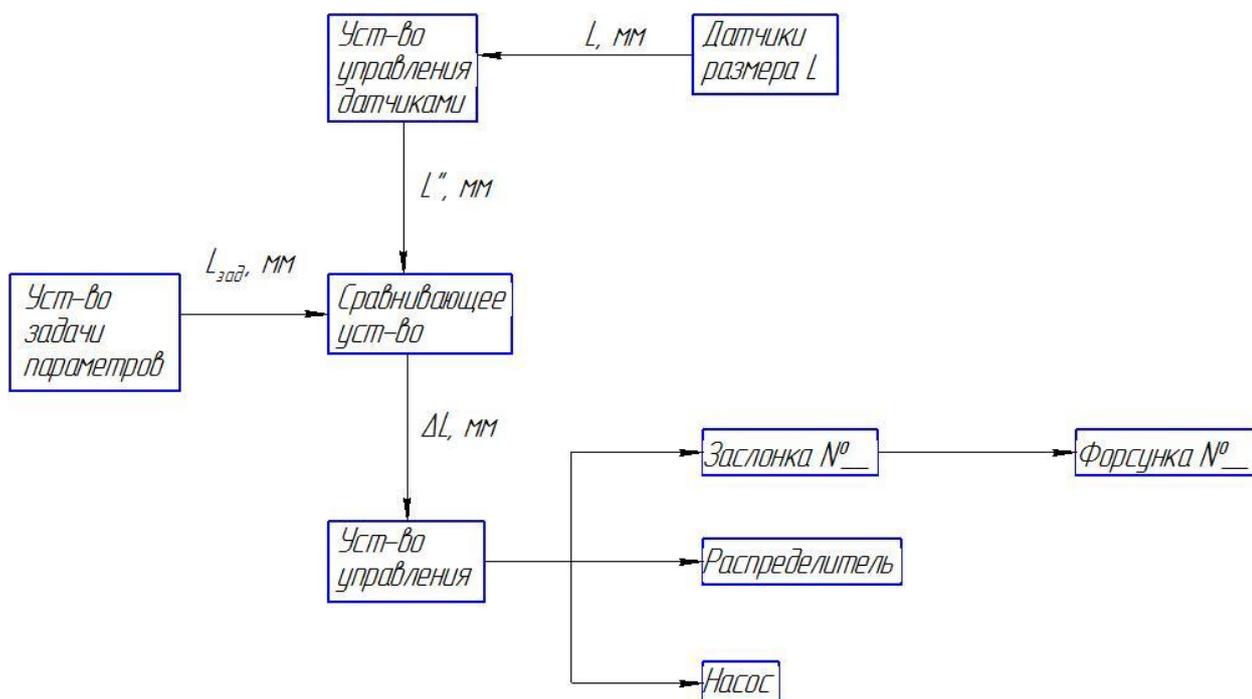
На рис. 3.2.2.1 изображена функциональная схема контроля такого параметра как размер диаметра. Без контактные датчики, располагающиеся внутри секции установки считывают диаметральный размер вала  $d$  и подают сигнал на устройство управления датчиками. Затем данное устройство отправляет считанную информацию  $d''$  на сравнивающее устройство, которое в свою очередь принимает сигнал от устройства задающего параметр диаметра –  $d_{зад}$ . Сравнивающее устройство обрабатывает информацию и



**Рис. 3.2.2.1 Функциональная схема контроля параметра – диаметр.**

подает сигнал  $\Delta d$  на устройство управления насосом, распределителем и заслонкой. Данное устройство запускает и контролирует сколько необходимо перекачать насосу жидкого азота из сосуда дьюара в распределитель, распределитель распределяет и направляет поток жидкого азота в необходимую секцию, одновременно с этим контролируется открытие необходимой заслонки и запуск в действие определенной форсунки. По достижению в сравнивающем устройстве равенство значений  $d'' = d_{зад}$ , устройство управления прекращает процесс поступления жидкого азота в секции. Таким образом мы можем осуществлять влияние на диаметральный размер заготовки.

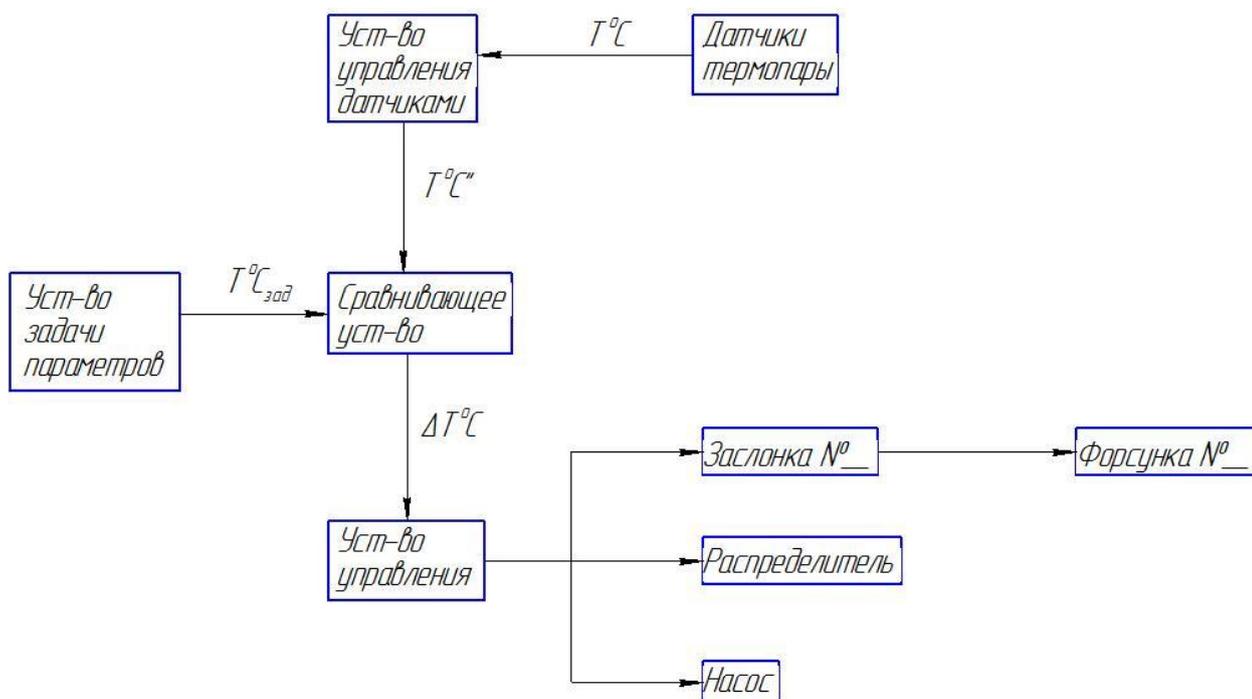
В свою очередь функциональная схема контроля над таким параметром, как длина выглядит так, как показано на рисунке 3.2.2.2.



**Рис. 3.2.2.2 Функциональная схема контроля параметра – длина.**

Датчик снимает размер  $L$  с заготовки и отправляет сигнал на устройство управления датчиками, который подает сигнал  $L''$  на сравнивающее устройство. В свою очередь устройство задачи параметров отправляет сигнал  $L_{зад}$  на сравнивающее устройство. Данное устройство сравнивает показатели и в случае их расхождения подает сигнал  $\Delta L$  на устройство управления. Устройство обрабатывает полученный сигнал и осуществляет процесс управления насосом, распределителем и заслонкой. Насос перекачивает жидкий азот в распределитель, после чего открывается необходимая заслонка и под давлением жидкий азот устремляется в необходимую секцию, срабатывает необходимая форсунка. После того как в сравнивающем устройстве показатели заданной длины  $L_{зад}$  и фактической длины  $L''$  выравниваются, процесс останавливается, заслонка перекрывается.

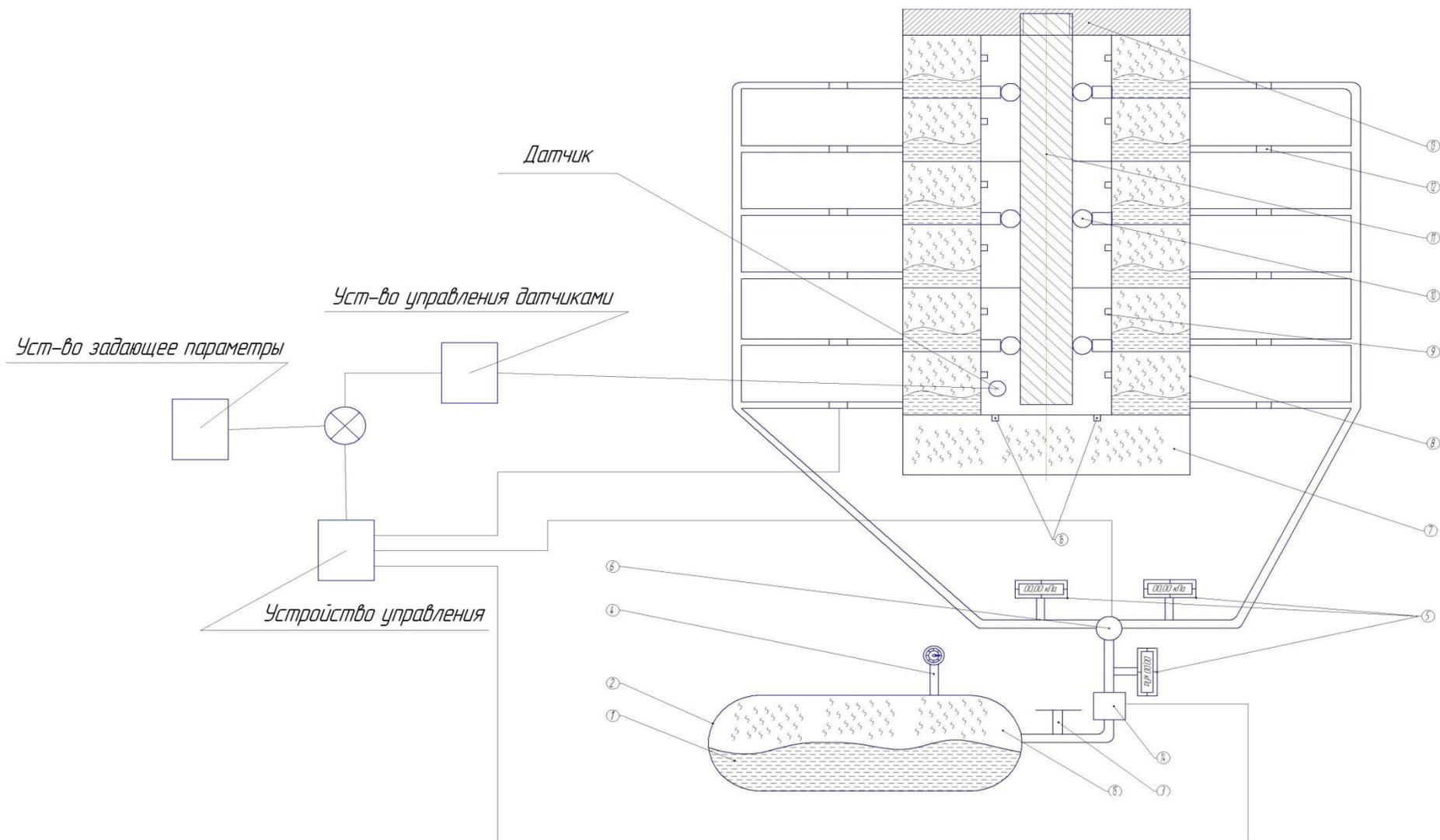
Для того, чтобы термическая обработка проходила при постоянной температуре, необходимо отслеживать и управлять температурой. На функциональной схеме рис. 3.2.2.3 показан данный процесс.



**Рис. 3.2.2.3 Функциональная схема контроля параметра – температура.**

Датчик термопары измеряет окружающую температуру внутри установки, в каждой секции (каждого участка изделия). Затем данные о температуре  $T^{\circ}\text{C}$  подаются на устройство управления датчиками и сигнал в виде  $T^{\circ}\text{C}'$  из него подается на сравнивающее устройство. В свою очередь заданные параметры  $T^{\circ}\text{C}_{\text{зад}}$ , которые задаются в устройстве задачи параметров, в виде сигнала отправляются на сравнивающее устройство. Происходит анализ пришедших данных и результат в виде сигнала  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  отправляется в устройство управления, который отправляет сигнал на насос. Затем начинается процесс транспортировки жидкого азота под определенным давлением в распределитель, проходя который, устремляется в необходимую секцию через определенную открывшуюся заслонку и срабатывает форсунка. По окончании процесса, при выравненных параметрах, заслонка закрывается, насос перестает перекачивать жидкий азот.

Таким образом, соединив все три функциональные схемы, мы получим единую функциональную схему управления процессом обработки холодом, которая изображена на рисунке 3.2.2.4.



**Рис. 3.2.2.4 Общая функциональная схема управления процессом криогенной обработки.**

Принцип её работы заключается в управлении процессом благодаря датчикам, установленным в каждой секции. Они посылают сигналы контролируемых параметров (диаметр, длина и температура) на устройство управления датчиками, который транспортирует сигнал на сравнивающее устройство. В свою очередь оно анализирует полученные данные с заданными параметрами и, находя расхождение, отправляет сигнал на блок управления, который управляет насосом (насос создает необходимое давление и перекачивает жидкий азот), распределителем (который распределяет поток жидкого азота) и заслонками каждой секции (которые открываются или преграждаются в целях осуществления допуска жидкого азота в секции). По достижению равенства между приходящей величиной с датчика и величиной заданного параметра устройство управления завершает работу схемы.

Таким образом, данная функциональная схема обеспечивает управление процессом криогенной обработки маложесткого вала, что в свою очередь позволяет повысить качество обработки маложесткого вала путем применения обработки холодом.

### **Выводы по магистерской диссертации.**

В ходе выполнения магистерской работы были решены следующие задачи:

- 1) Проведены исследования аспектов выполнения обработки холодом.
- 2) Была разработана установка для обработки холодом.
- 3) Была разработана функциональная схема для разработанной нами установки.

В первой главе мы познакомились с методами упрочняющей обработки, обосновали актуальность проблемы на сегодняшний день, рассмотрели применение криогенной обработки в отрасли машиностроения и провели анализ существующих технологий по изготовлению маложесткого вала, а также пути их совершенствования.

Во второй главе мы разработали математическую модель процесса криогенной обработки и рассмотрели маложесткий вал как объект управления.

В третьей главе был рассмотрен процесс мартенситного превращения его механизм, кинетику. Дали определение остаточному аустениту и рассмотрели свойство мартенсита. Произвели разработку установки по обработке холодом, выявили функциональную схему процесса происходящего в данной установке.

Таким образом, благодаря решению выше поставленных задач, была достигнута цель, а именно повысить качество обработки маложесткого вала путем применения обработки холодом.

### Библиографический список.

1. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: учебник – 3-е изд. / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.
2. Банных О. А., Ковнеристый Ю. К- Стали для работы при низких температурах М., «Металлургия», 1969, 59 с.
3. Барабанова И.А. Закономерности формирования структуры и распределения микротвердости наплавленной быстрорежущей стали при газолазерной резке и обработке холодом / И.А. Барабанова, Е.В. Ботянов, Г.В. Раткевич, Л.Е. Афанасьева // Сборник статей четырнадцатой международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". – Санкт-Петербург. – 2012. – С. 136-139
4. Барабанова И.А. Фазовые превращения в быстрорежущей стали при газолазерной резке, криогенной обработке и лазерном отпуске / И.А. Барабанова // Вестник ТвГУ. Серия «Физика». – 2013. – Выпуск 21. – С. 94-104
5. Барчукова Д.А. Повышение работоспособности быстрорежущих сталей за счет совершенствования их структурного состояния: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Барчуков Дмитрий Анатольевич. – Тверь., 2013. – 154 с.
6. Благих Б. М., Каленихин Ю. Н. Долговечность зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-3 в условиях Норильска. В сб. № 13 «Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера». Красноярск, 1966, 139—158 с.
7. Бобровников Г.А. Сборка в машиностроении с применением

- глубокого холода. М.— Киев, Машгиз, 1959, 114 с.
8. Богачев И.Н., Одиноква Л.П. Пластическая деформация титана и его сплавов при низких температурах. — «Физика металлов и металловедение». Т. 19, вып. 6, 1965, с. 208—214.
  9. Брандон Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. — М. : Техносфера, 2004. — 384 с.
  10. Бремер Дж. Сверхпроводящие устройства. Пер. с англ. Ченцова Р. А., М., «Мир», 1964, 340 с.
  11. Влияние химического состава и структуры на свойства некоторых титановых сплавов при низких температурах. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1967, №2, с. 11—14. Авт.: Борисова Е. А., Беляев С. Е., Климова Г. С, Пескова Л. В.
  12. Воробьев В. Г. Термическая обработка стали при температуре ниже нуля. М., Оборонгиз, 1954, 307 с.
  13. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. В 3 ч. Л.: Энергия, 1970.1. Ч.Ш. 328 с.
  14. Воронов Д.Ю.; Драчев О.И. Пути снижения коробления маложестких валов, путем применения термосиловой обработки. Журнал «Машиностроитель» №6, 2001 год.
  15. Воронов Д.Ю.; Драчев О.И.; Расторгуев Д.А. Динамическая модель термосиловой обработки, как объекта управления. Проблемы современного машиностроения. Сборник к 40-летию Машиностроительного факультета. Тольятти 2001 год.
  16. Воронов Д.Ю.; Драчев О.И.; Расторгуев Д.А. Влияние осевой пластической деформации на коробление готовой детали. Проблемы современного машиностроения. Сборник к 40-летию Машиностроительного факультета. Тольятти 2001 год.
  17. Воронов Д.Ю.; Драчев О.И.; Бобровский А.В. Влияние несоосности при термосиловой обработке на коробление готовой детали.

- Межвузовский сборник научных трудов. Часть 2. Тольятти 2000 год.
18. Воронов Д.Ю.; Драчев О.И. Пути технологического управления стабильностью форм маложестких деталей. Юбилейная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Тольятти 1997 год.
  19. Воронов Д.Ю.; Драчев О.И. Пути технологического воздействия на стабильность формы маложестких деталей. Педагогические, экономические и социальные аспекты научной и производственной деятельности. Межвузовский сборник научных трудов. Тольятти 1998 год.
  20. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах. М., «Мир», 1974, 373 с.
  21. Гладкий Я.М. Повышение работоспособности режущего инструмента при его обработке холодом / Я.М. Гладкий // Проблемы Трибологии. – 1996. - №2. – С. 17-22.
  22. Горбатов В.М., Финкельштейн Г. М. Вихревые холодильники, М., Цинтипищепром, 1963, 80 с.
  23. Гудков С. И. Механические свойства хромистых и хромоникелевых сталей при низких температурах. —В сб.: Аппараты и машины кислородных установок. Вып. 9, 1965, с. 186—191 (Труды ВНИИКИМАШ).
  24. Гудков С.И. Механические свойства стали при низких температурах. Справочник. М., «Металлургия», 1967, 267 с.
  25. Гудков С.И. Механические свойства промышленных цветных металлов при низких температурах. М., «Металлургия», 1971, 304 с.
  26. Гуляев А.П. Обработка стали холодом / А.П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1998. - №11. – С. 19-26.
  27. Гуляев А.П., Кузнецов И. В., Тихонравова Т. Л. Стабилизация размеров колец подшипников путем обработки холодом. М., Машгиз,

- 1968, 28 с.
28. Гуляев А.П., Чаадаева М. С. Стабилизация остаточного аустенита при обработке стали холодом. — «Вестник машиностроения», 1953, № 1, с. 37—42.
29. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. Издание 4-е, переработ. М., «Металлургия», 1966, 480 с.
30. Гуляев А. П., Фаткина А. М. Влияние никеля на механические свойства и хладноломкость низкоуглеродистой стали. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1966, №10, с. 34—39.
31. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надёжности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. - 223 с.
32. Дальский А.М. Повышение качества высокоточных изделий на основе явлений технологической наследственности // ТрМВТУ-1989.-№518.- с.3-13.
33. Давиденков Н.Н. Журнал технической физики 1981 т.1 вып.1 с. 5-17.
34. Данилова Т. Н. Теплообменные аппараты холодильных установок. Л., «Машиностроение», 1973, 375 с.
35. Долецкий В.А., Бунтов В.Н. Увеличение ресурса машин технологическими методами. М. : Машиностроение, 1978. - 214 с.
36. Дорожкин Н.Н., Карпушин В. А. Прогрессивные методы повышения точности обработки нежестких деталей. Минск.: БелНИИТИ и технико-экономические исследования, 1977. 16 с.
37. Драчев О.И., Иванов О. И. К вопросу об оптимальном управлении демпфированием колебаний стержней с использованием принципа максимума Понтрягина. // Сб. Технология и автоматизация машиностроения. № 46. - Киев: Техника. 1989. -140 с.
38. Драчев О.И. Аналитический расчёт деформаций при термостабилизации длиномерных заготовок. //Сб. Технология и

- автоматизация машиностроения. № 48. Киев: Техника. 1991. - с. 41-45.
39. Драчев О.И. Автоматическая система стабилизации геометрических форм маложёстких деталей при термомеханической обработке. Куйбышев: Тр. КПТИ, 1990. с. 129 -142.
40. Драчев О.И., Хенкина Э.Е. Пути технологического воздействия на стабильность форм маложёстких осесимметричных заготовок. // Технол. и Автоматиз Машиностр 1991 - № 48 с.13-16
41. Драчев О.И., Скиданенко В. И. Возможность управления остаточными напряжениями при термомеханической обработке маложёстких деталей.// Технол. и Автоматиз Машстр. Киев. 1989 №4 4 с. 2731.
42. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. Политехника, 2003, 302 с.
43. Иванов Ю.А., Ефимов В.Д. Вибрационная стабилизация геометрической формы стальных деталей типа винтов, валов, шпинделей. В кн.: Технология производства, научная организация труда и управления, М.: НИИмаш, 1980, №8, с. 4-5.
44. Игнатьков Д.А. Остаточные напряжения в неоднородных деталях. Кишинев: Штиница 1992 - 232 с.
45. Ильина Н.И. Термобарокамера ТБК015-70. — «Холодильная техника», 1966, № 1, с. 58—61.
46. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975, 280с.
47. Кишуров В.М., Шарипов Б. У. Остаточная напряженность обработанного поверхностного слоя. // Рез. и Инстр.-1990.- №44.- с.50-53.
48. Клименко А.П. Компрессионно-сорбционный цикл умеренного охлаждения. В сб.: Сжижение и разделение газов. Киев, Изд. АН

- УССР, 1961, вып. 2, кн. 9, с. 35—43 (Труды ИГ АН УССР).
- 49.Кобрин М.М., Дехтярь Л.И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. -М.: Машиностроение 1965 175 с.
- 50.Коршунов Л.Г., Макаров А.В., Черненко Н.Л. Структурные аспекты износостойкости сталей мартенситного класса // ФММ. – 1994. – Т. 78. – вып. 4. – С. 128-146.
- 51.Козирук Г.П. Образование остаточных напряжений и деформаций в условиях действия технологической наследственности. Оптимизация технологических процессов по критериям прочности Межвуз. Научный сборник Уфа 1985. с.20 -23.
- 52.Колод Л.П. Технологическое обеспечение точности нежестких деталей. -1991. Пенза,- с.42-43.
- 53.Кудинов В.А. Динамика станков.- М. : Машиностроение, 1967. 399 с.
- 54.Кузнецов Р.И., Павлов В. А. Временный ход пластической релаксации напряжений // Физика металлов, металловедение.- М.: 1968. 210 с.
- 55.Кузовкин Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М. : Машиностроение, 1976. 184 с.
- 56.Кремнев Л.С. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей / Л.С. Кремнев, А.К. Онегина, Л.А. Виноградова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. - №12. – С. 13-19.
- 57.Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Счастливец В.М., Черненко Н.Л. Износостойкость и структурные изменения поверхностного слоя азотосодержащих высокохромистых сталей мартенситного класса при абразивном воздействии и трении скольжения // ФММ. – 1998. – Т. 86. – Вып. 4. – С. 104-114.
- 58.Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Счастливец В.М. и др. Структура, трибологические и механические свойства азотосодержащих

- высокохромистых сталей с мартенситной основой // ФММ. – 2003. – Т. 96. – Вып. 3. – С. 101-112.
- 59.Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х., Колобылин Ю.М. Коэрцитиметрический и вихретоковой контроль абразивной износостойкости закаленных и отпущенных заэвтектоидных углеродистых сталей. I. Стали, подвергнутые стандартной низкотемпературной закалке и отпуску // Дефектоскопия. – 2007. - №5. – С. 3-11.
60. Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х., Колобылин Ю.М. Коэрцитиметрический и вихретоковой контроль абразивной износостойкости закаленных и отпущенных заэвтектоидных углеродистых сталей. II. Стали, подвергнутые различным режимам закалки, обработке холодом и отпуску после высокотемпературной закалки // Дефектоскопия. – 2007. - №5. – С. 12-29.
- 61.Максимов Ю.В., Анкин А.В., Матяш В. И. Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов. // Вестник машстр.-1997.- №3.
- 62.Михайлов О.Н. Связь объёмных и плоских остаточных напряжений состояний в цилиндрических деталях и их элементах при радиальном градиенте. // Пробл. прочности. 1983. - №8. - с.59-62.
- 63.Мошин Е.Н. Исследования пластического изгиба. // Труды ЦНИИТМАШ, М.: Машгиз, 1954. кн. с. 62 -65.
- 64.Мурашкин Л.С. О глубине наклепанного слоя при резании металлов. Машиностроение №324, ■"Машиностроение" Ленинград 1972. с.220-222.
- 65.Мурашкин Л.С., Мурашкин С. Л. Скорость распространения пластической деформации. :Машиностроение № 324, "Машиностроение" Ленинград 1972. с.223-224.
- 66.Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.,

- Атомиздат 1975.с.472.
- 67.Няшин Ю. И. Об управлении процессом обработки материалов целью снижения остаточных напряжений. // Прикладная математика механика, 1981, т.45 № 2.
- 68.Основы автоматического управления / Под ред. В.С. Пугачева, М.: Наука, 1974. - 720 с.
- 69.Остаточные напряжения /Ред. Осгуд В. Р. М. : ИЛ, 1957. - 169 с.
- 70.Остаточные технологические напряжения. //Тр. 2 Всесоюзного симпозиума. И.: 1985. - 390 с.
- 71.Отчёт инв.№ Б984698. Снятие внутренних напряжений и стабилизация формы сварных и литых деталей вибрационной обработкой. Куйбышев 1980.
- 72.Патент 2194773 (Россия). МПК 7 С 21 D 6/04, 1/09. Способ обработки стальных изделий / А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, А.Л. Осинцева. – Оpubл. В БИМП. – 2002. - №35.
- 73.Патент на изобретение, от 10.07.04. № 2232198. Устройство для термосиловой обработки. Д.Ю. Воронов; О.И. Драчев; Расторгуев Д.А.
- 74.Подпоркин В.Е. Обработка нежестких деталей. -Л.: Машгиз, 1959. 208 с.
- 75.Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусков П.В. Остаточные напряжения теории и приложения. М.: Наукова Думка, 1982. - 291 с.
- 76.Петрова Л.Г. Применение методологии управления структурообразованием для разработки упрочняющих технологий / Л.Г. Петрова, О.В. Чудина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. - №5. – С. 19-21.
- 77.Работнов Ю.И. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977, 350 с.
- 78.Разработка и внедрение рекомендаций по снижению коробления

- деталей: Отчет / НИИПТмаш. Руководитель В.А. Колот. Инв.№ 0281.2.004982, Краматорск, 1981,- 78 с.
79. Раппен А. Описание метода использования вибраций в области механической обработки для измерения внутренних напряжений в металлах. Пер. с немецкого. №5030.
80. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение 1981. - 279 с.
81. Релаксационные явления в твердых телах.- Труды IV Всесоюзной конференции / Воронежский политехнический институт. М. : Металлургия, 1968.- 694 с.
82. Смольников Е.А. Обработка холодом режущего инструмента / Е.А. Смольников, Г.А. Коссович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1980. - №10. – С. 5-7.
83. Солоненко В.Г. Криогенная обработка режущих инструментов / В.Г. Солоненко // Технология металлов. – 2009. - №4. – С. 7-14.
84. Сталь на рубеже столетий / Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М. : МИСИС, 2001. – 664 с.
85. Basu K., Subrahmanya C.K. Vibratory stress relieving. Prog. End., 1980, №6, p 46-48.
86. Dasa D. Correlation of microstructure with wear behavior of deep cryogenically treated AISI D2 steel / D. Dasa, A.K. Duttab, K.K. rayc // Wear. – 2009. – V. 267. – P. 1371-1380
87. Dasa D. Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behavior of die steel / D. Dasa, K.K. Rayb, A.K. Dutta // Wear. – 2009. – V. 267. – P. 1361-1370.
88. Pattenson E.G., Dugdate D.S. «Metallurgica». Manchester, 1982, №11, p. 228.
89. Schmid E, Boas W. Plasticity of crystals. London 1992.
90. Scheel H.J. Theoretical and technological solutions of the striation

problem // Journal of Crystal Growth. – 2006. – V. 287 (2). – P. 214-223.  
91. Seitz F. Physics of metals. New York 1999.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Опубликованные работы



При поддержке:

Одесский национальный морской университет  
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)  
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта  
Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт морского флота  
Институт морехозяйства и предпринимательства  
Луганский государственный медицинский университет  
Харьковская медицинская академия последипломного образования  
Бельцкий Государственный Университет «Алеку Руссо»  
Институт водных проблем и мелиорации Национальной академии аграрных наук

Входит в международную наукометрическую базу  
РИИД SCIENCE INDEX

Международное периодическое научное издание

International periodic scientific journal

**МИР** НАУКИ И  
WORLD OF SCIENCE AND INNOVATION  
ИННОВАЦИЙ

Выпуск №1 (3), 2016  
Issue №1 (3), 2016

Том 5  
*Технические науки*

Иваново  
«Научный мир»  
2016

Рисунок 1. Обложка журнала.



преимущественно вязким изломом. В изломе наблюдаются крупные пленочные выделения карбидов, скопления карбидов дендритной формы, крупные выделения карбонитридов. При скорости охлаждения  $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  в изломах общее количество выделившихся карбидов и карбонитридов значительно меньше, они более мелкодисперсны, не наблюдается грубых выделений дендритного типа. Наряду с вязким изломом наблюдаются участки хрупкого разрушения.

**Таблица 2**

**Результаты металлографических исследований поверхности разрушения образцов из стали 08X22H6T, испытанных на ударный изгиб при минус  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Скорость охлаждения при ТЦС, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Диаметр ферритного зерна, мкм	Соотношение фаз, %			Микротвердость, Р = 20 г	
		$\gamma'$ -фаза	$\alpha$ -фаза	$\delta$ -феррит	$\delta$ -феррит	$\gamma'$ -фаза
2	420	25	10	65	243	384
10	410	23	5	72	241	320
40	400	22	5	73	244	310
100	380	20	нет	80	238	274

Таким образом установлено, что увеличение скорости охлаждения после сварки приводит к существенному повышению значений ударной вязкости феррито-аустенитных сталей. Выявлено, что скорость охлаждения при воздействии ТЦС влияет на фазовый состав феррито-аустенитных сталей.

Литература:

1. Хубрих, М.А. Кинетика фазовых и структурных превращений стали 08X22H6T под воздействием термического цикла сварки / М.А. Хубрих, Г.А. Сальников, О.П. Бондарева и др. // Химическое и нефтяное машиностроение – 1986. -№3. – С.23 – 25.

2. Бондарева, О.П. Влияние термического цикла сварки на трещиностойкость металла околошовной зоны сварных соединений феррито-аустенитных сталей./ О.П. Бондарева, Э.В. Седов, И.Л. Гоник // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – Волгоград, 2015. – №5(160).– С.139 – 142.

3. Бондарева, О.П. Исследование трещиностойкости феррито – аустенитных сталей./ О.П. Бондарева, И.Л. Гоник, Э.В. Седов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №15(118) ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С.90 – 93. (Серия. «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»).

Статья отправлена: 31.03.2016г.

© Седов Э.В.

ЦИТ: n216-098

Хрячков К.О.

**УСТАНОВКА ПО ОБРАБОТКЕ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ ХОЛОДОМ**

*Тольяттинский государственный университет,*

*Тольятти, Белорусская 14, 445667*



Khryachkov K.O.

## INSTALLATION FOR PROCESSING MALOZHESHTKIH CHILL ROLLS

Togliatti State University,  
Tolyatti, 14 Belarus, 445667

*Аннотация.* В статье приведены причины необходимости разработки установки по обработке холодом, преимущества обработки холодом, её место в технологическом процессе, сама установка и принцип её работы.

*Ключевые слова:* обработка холодом, жидкий азот, остаточный аустенит, мартенситное превращение, хрупкое разрушение, маложестький вал.

*Annotation.* The article presents the reasons for the need for installation on the cold processing, cold processing advantages, its place in the process, the very principle of the installation and its operation.

*Keywords:* cold treatment, liquid nitrogen, residual austenite, martensite transformation, brittle fracture, malozhestkiy shaft.

В современном мире борьба за природные ресурсы выходит на новый уровень. В поисках дополнительных природных богатств человечество устремило свой взор на крайний север (в Арктику). На протяжении многих лет СССР, а теперь уже Российская Федерация, изучала данный регион с точки зрения природных ресурсов, снаряжались экспедиции, делались научные открытия. Перед машиностроителями стала задача изучить влияния экстремальных холодов на материалы, обеспечить выпуск машин и технического оборудования, специально приспособленных для работ при низких температурах. Многие узлы современных агрегатов работают в условиях умеренного (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ) и глубокого (до  $-190^{\circ}\text{C}$ ) холода. Различные элементы установок сжижения и разделения газов, некоторые узлы систем использования сжиженных газов, современных самолетов, детали и узлы горных и транспортных машин, космических ракет и др. Все используемые материалы должны обеспечивать возможность длительной работы деталей и узлов в заданных температурных условиях.

В зависимости то назначения и условий работ к современным материалам могут быть предъявлены следующие требования: высокая прочность и пластичность, малый удельный вес, коррозионная стойкость, сопротивляемость износу и радиационному облучению, специальные электромагнитные свойства, хорошие свариваемость и обрабатываемость, а также низкая стоимость.

Со снижением температуры большое количество материалов становятся более прочными и износостойкими, т.е. увеличиваются их временное сопротивление и твердость. При температуре  $-196^{\circ}\text{C}$  (температура кипения жидкого азота) временное сопротивление разрыву многих металлов в 2-5 раз больше, чем при условиях комнатной температуры. При  $-269^{\circ}\text{C}$  предел прочности меди в 2 раза больше, чем при условиях комнатной температуры, а алюминия в 4 раза.

Уменьшение пластичности и увеличение твердости при низких температурах повышает эффективность механической обработки некоторых материалов. При пониженных температурах улучшаются режущие свойства и



увеличивается стойкость режущего инструмента. Применение обработки холодом после термической обработки металлов позволяет стабилизировать размеры прецизионных деталей и получить определенную (необходимую) структуру.

Однако при пониженных температурах в материале происходят внутренние превращения структуры, как результат увеличивается опасность внезапного хрупкого разрушения деталей. Поэтому в тех случаях, когда глубокое охлаждение носит временный характер, при работе в условиях нормальных температур учитывают особую опасность хрупкого разрушения материала.

Причина хрупкого разрушения – аустенитно-мартенситные превращения, сопровождающиеся увеличением объема и понижением ударной вязкости. Таким образом целесообразно на заводах подвергать обработке холодом все детали и узлы машин, которые предназначаются для работы в условиях низких (критически низких) температур. После такой обработки в материалах деталей закончатся процессы перекристаллизации и можно будет отдать в брак детали, в которых возникнут дополнительные напряжения.

Параллельно с изменением структуры материала происходят изменения таких физических параметров, как удельный вес, прочностные, электрические и магнитные характеристики. При направленном воздействии холода на стальные детали можно добиться необходимого изменения указанных характеристик.

В современном мире все больше предъявляется требований к качеству обработки деталей и маложесткий вал не исключение. Данная деталь используется во многих машинах, в том числе и тех, которые используются в климатических условиях Сибири, Крайнего Север и Арктики. И как следствия все больше ученых выискивают разные методы повышения качества данных валов. Один из методов - это направленная обработка маложесткого вала холодом, в результате которого происходит мартенситное превращение, что повышает качество обработки данного вала.

В случае если аустенит охладить до точки  $M_n$ , то происходит процесс называемый мартенситное превращение. Он протекает при непрерывном охлаждении аустенита от точки  $M_n$  до точки  $M_k$ , которая лежит ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Интервал температур  $M_n \dots M_k$  представлен на рис. 1, так же на нем представлена зависимость данного интервала от количества углерода, находящегося в аустените стали.

Минимальная скорость охлаждения  $V_k$ , необходимая для переохлаждения аустенита до точки  $M_n$  и дальнейшего его превращения в мартенсит, называется критической скоростью закалки. Его суть состоит в том, что в этих условиях происходит процесс только без диффузионного аллотропического превращения  $\gamma\text{-Fe}$  в  $\alpha\text{-Fe}$ .

Самым главным условием для мартенситного превращения является непрерывное охлаждение аустенита в пределах от  $M_n$  до  $M_k$ . В случае остановки нераспавшийся аустенит неблагоприятно влияет на такие параметры как твердость и размеры, наблюдается их снижение и изменение соответственно.

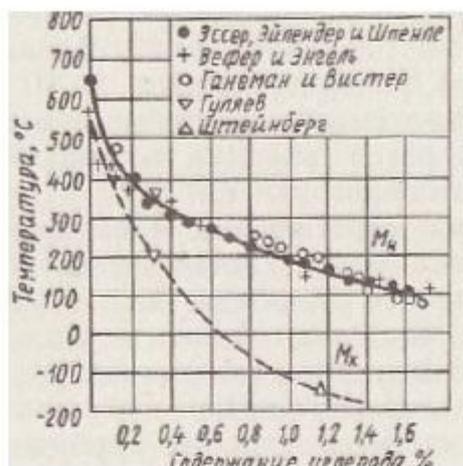


Рис. 1. Влияние содержания углерода на положение мартенситных точек  $M_n$  и  $M_k$ .

Таким образом механизм образования мартенсита сводится к тому, что в зернах аустенита наблюдается возникновение, растущих с огромной скоростью, кристаллов мартенсита. Скорость роста мартенситных кристаллов составляет свыше 1000 м/с, что способствует образованию наклепа в аустените. При этом процессе возникают дислокации переходящие затем мартенсит, что в свою очередь повышает твердость, снижая пластичность до нуля.

В результате можно сделать вывод, что обработка холодом является одним из прогрессивных видов обработки. Её преимущество в отношении других обработок, является то, что после данной обработки материал повышает свою твердость в среднем от 1...4 HRC и износостойкость, что влечет за собой повышение качества материала. Данный вид обработки используется после закалки (термосиловой обработки) для того, чтобы снизить количество остаточного аустенита, который в свою очередь влечет за собой снижение твердости материала. Также известно, что данный вид обработки позволяет в отношении некоторых материалов (латунь и алюминиевые сплавы) повышать эластичность, т.е. из таких материалов можно штамповать детали любой сложной формы.

На рис. 2 изображена установка обработки малоожестких валов холодом. Конструкция состоит из сосуда Дьюара (2) в котором находятся жидкий азот (1) и пары жидкого азота (15), к сосуду подведен механический манометр (4) и труба с вентилем (3), которые в свою очередь соединены с распределителем (6). Контроль давления подачи паров осуществляется автоматически через электрические манометры (5). Также в установке присутствуют отдельные секции (8), форсунки (9), ролики (10), упор (14) и отводящие форсунки.

Принцип её работы заключается в следующем: крышка с метрической резьбой 13 устанавливается на заготовку 11, после чего вставляется металлический стержень 12 в отверстие крышки 13 и готовый узел помещается в установку.

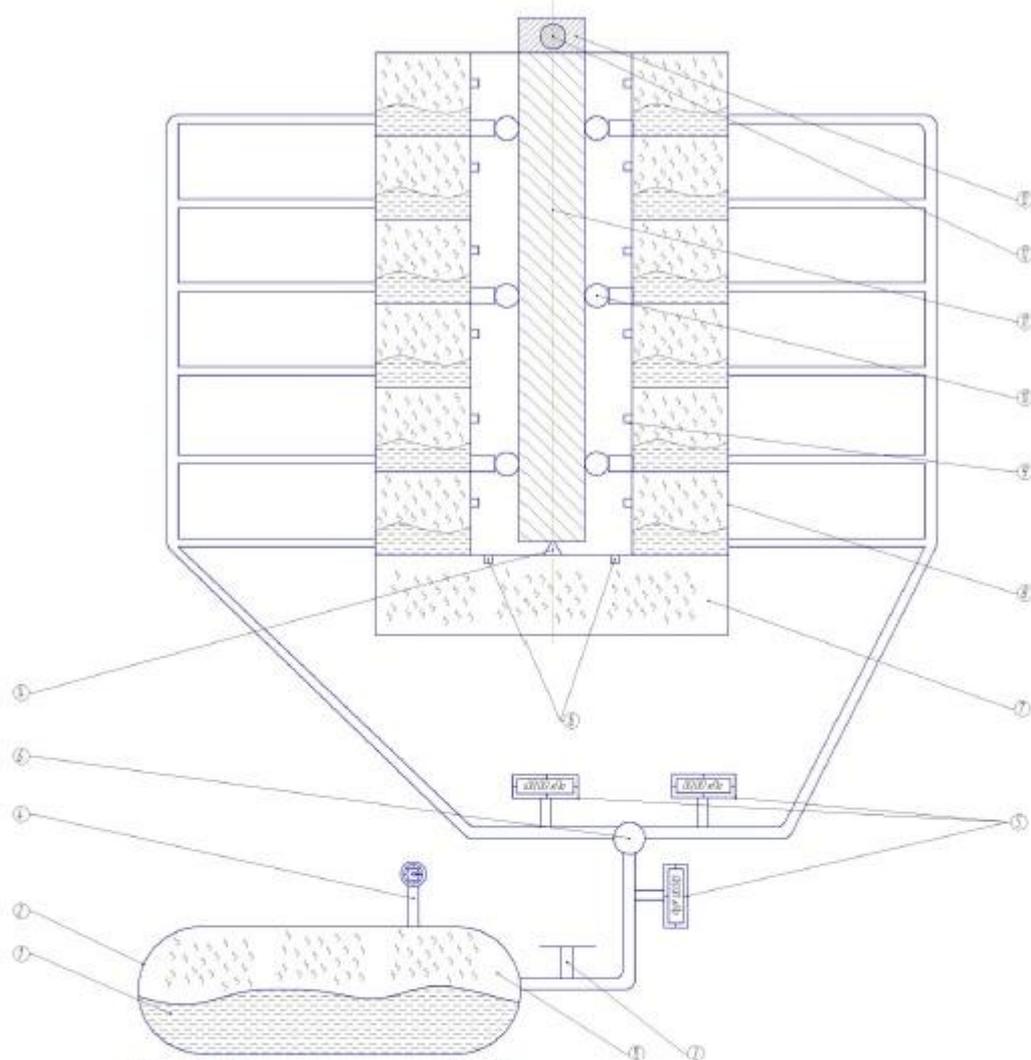


Рис. 2. Установка по обработки маложестких валов холодом.

Вентиль 3 открывает заслонку сосуда Дьюара 2. Жидкий азот 1 устремляется в распределитель 6, который регулирует подачу жидкого азота в секции 8 на установке. Контроль подачи осуществляется по электрическим манометрам 5. После попаданий жидкого азота 1 в секции 8 при помощи форсунок 9 происходит подача паров жидкого азота 15 в зону обработки заготовки 11.

После завершения обработки, отработанные пары жидкого азота 7 при помощи отводящих форсунок 16 откачиваются из зоны обработки и заготовка 11 извлекается из установки.

Таким образом, данная установка позволяет нам обработать маложесткий вал после термосиловой обработки и поддерживать мартенситное превращение, тем самым снизить количество остаточного аустенита, повысив качество



самого вала. А за счет отдельных секций обрабатывать маложесткие валы любой длины.

Литература:

1. Драчев О.И., Воронов Д.Ю. – Пути снижения коробления маложестких валов, путем применения термосиловой обработки. // Журнал «Машиностроитель», № 6, 2001.
2. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А.. – Новая технология термосиловой обработки маложестких валов. // Журнал «Известия». Волгоград: 2004. №1, С. 32-35.
3. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А.. – Экспериментальная установка для равномерного осевого пластического деформирования маложестких деталей при термосиловой обработке. // Журнал «Известия». Волгоград: 2004. №9, С. 15-18.
4. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Устройство для термосиловой обработки. Патент на изобретение от 12.05.2003. № 2232198.
5. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А.. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления. Патент на изобретение от 19.12.2003. № 2254383.
6. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей. Патент на изобретение от 20.09.05. № 2260628.
7. Воронов Д.Ю., Шевелев И.В. – Физическая сущность процессов протекающих при термосиловой обработке маложестких деталей типа «вал» // «Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств». Сборник научных трудов. Волгоградский государственный технический университет; ЗАО «ОНИКС». Волгоград, Тольятти, Ирбит 2013.
8. Воронов Д.Ю., Логинов Н.Ю., Шевелев И.В. – Обзор существующих и перспективные тенденции развития технологий изготовления маложестких длинномерных валов. // Сборник научных трудов SWorld. Одесса: 2012. Выпуск 3. Том 8.
9. Воронов Д.Ю., Репин К.А., Шевелев И.В. – Разработка функциональной схемы системы автоматизированного управления термосиловой обработки многоступенчатых маложестких валов. // Сборник научных трудов SWorld. Одесса: 2013.
10. Воронов Д.Ю., Репин К.А., Шевелев И.В. – Описание конструкции и принципа работы лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований по термосиловой обработке длинномерных маложестких деталей. // Сборник научных трудов SWorld. Одесса: 2013.

Статья отправлена: 27.03.2016г.

© Хрячков К.О.